

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

Recherche d'indicateurs du soutien d'étiage

Résultats sur les tourbières de Luitel et de Frasne : hydrologie, hydrogéologie, géophysique, pédologie, géochimie, modélisation

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

Synthèse

Rapport final

Phase 3 (2019-2022)

Action n°68

UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne SPIN-PEG (Frédéric Paran, Didier Graillot, Florence Dujardin, Frédéric Gallice, Jordan Ré-Bahuaud, Yvan Pascoletti, Salma Sadkou)

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

UMR CNRS 5023 LEHNA ENTPE (Thierry Winiarski, André-Marie Dendievel)

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

UMR CNRS 5276 LGL-TPE UJM (Véronique Lavastre, June Chevet)

UMR CNRS 6249 Chrono-environnement UFC (Guillaume Bertrand, Alexandre Lhosmot)

ONF Aude (Christophe Cocula, Etienne Ebrard, Vincent Parmain, Karine Thomassin, Caroline Turlesque, Benoit Laroque, Mireille Vion, Stéphane Villarubias)

Décembre 2022

Fiche signalétique

Destinataires du document : AE-RMC, Zabré

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 (Zabré) 66, boulevard Niels Bohr - BP 2132 - 69 603 Villeurbanne Cedex.

Interlocuteurs : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Julie Jeanpert

Date : Décembre 2022

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

Recherche d'indicateurs du soutien d'étiage

Statut du rapport :

Version de travail



Version finale (phase 3)



Auteurs :

- UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne SPIN-PEG (Frédéric Parán, Didier Graillot, Florence Dujardin, Frédéric Gallice, Jordan Ré-Bahuaud, Yvan Pascoletti, Salma Sadkou)
- Mines Alès LGEI (Guillaume Artigue, Sébastien Pinel, Huseyin Caldirak et Anne Johannet)
- UMR CNRS 5023 LEHNA ENTPE (Thierry Winiarski, André-Marie Dendievel)
- UMR CNRS 5600 ISTHME UJM (Hervé Cubizolle, Thomas Jolly, Pierre-Olivier Mazagol, Céline Sacca, Jérémie Riquier, Mélanie Bertrand)
- UMR CNRS 5276 LGL-TPE UJM (Véronique Lavastre, June Chevet)
- UMR CNRS 6249 Chrono-environnement UFC (Guillaume Bertrand, Alexandre Lhosmot)
- ONF Aude (Christophe Cocula, Etienne Ebrard, Vincent Parmain, Karine Thomassin, Caroline Turlesque, Benoit Laroque, Mireille Vion, Stéphane Villarubias)

Contact : frederic.paran@mines-stetienne.fr

Comité de pilotage :

- AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Julie Jeanpert, Nadine Bosc-Bossut, 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 Frasne : Epage Haut-Doubs Haute-Loue (Geneviève Magnon, Louis Collin, Thibault Van-Rijswijk, Vincent Berthus, Michel Sauret, Elodie Melh), Communauté de communes Frasne Drugeon (Thibault Van-Rijswijk, Vincent Berthus), Laboratoire Chrono-environnement - UMR 6249 CNRS-UFC (Catherine Bertrand, Marie-Laure Toussaint), CEN (Grégory Bernard)
- Analyses géochimiques : Université de Nîmes - EA7352 Chrome (Patrick Verdoux)
- Analyses pédologiques : Université Lyon 2 - UMR 5600 - Plateforme OMEAA (Vincent Gaertner)

Financements complémentaires : aucun

| | | | |
|-------------------------|-------------------|--|----------------------------|
| <i>Nb d'exemplaires</i> | Version numérique | <i>Nb de pages hors Annexes</i> | 349 |
| <i>Diffusion</i> | Zabré / AE-RMC | <i>Nb d'illustrations hors Annexes</i> | 211 figures et 40 tableaux |
| <i>Nb de volumes</i> | 2 | <i>Nb d'Annexes</i> | 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..... | I |
| Table des matières synthétique | III |
| Résumé | V |
| Acronymes, sigles et abréviations..... | IX |
| Préambule..... | XIII |
| Remerciements | XV |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. Objectifs, planification, résultats clefs des phases 1 et 2..... | 1 |
| 2. Organisation du rapport phase 3 (2019-2022) | 19 |
| PARTIE I – Tourbière de Frasne | 21 |
| 3. Suivi hydrologique | 23 |
| 4. Analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones..... | 31 |
| 5. Traceurs géochimiques | 33 |
| 6. Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet : rôle du suivi à long terme pour la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique (A. Lhosmot et G. Bertrand)..... | 47 |
| 7. Campagnes géophysique (GPR) : juin 2018, janvier 2019 et septembre 2019..... | 69 |
| 8. Synthèses – Frasne | 91 |
| PARTIE II – Tourbière du Luitel | 99 |
| 9. Suivi hydrologique | 101 |
| 10. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones | 117 |
| 11. Traceurs géochimiques | 133 |
| 12. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col du Luitel | 155 |
| 13. Synthèses – Luitel | 225 |
| PARTIE III – Indicateurs de soutien d'étiage..... | 237 |
| 14. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux | 239 |
| 15. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux | 251 |
| 16. Synthèses – Indicateurs | 277 |
| CONCLUSION..... | 283 |
| 17. Bilan du travail de la phase 3 | 283 |
| 18. Synthèse générale du projet ZHTB et perspectives..... | 288 |
| Références Bibliographiques | 315 |
| Liste des figures et tableaux | 329 |
| Table des matières complète..... | 341 |
| Tables des matières des Annexes | 349 |

Résumé

Le projet Zabr/AE-RMC intitulé « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau » (ZHTB) s'intéresse à la problématique suivante : *Quel est le rôle des zones humides pour le soutien d'étiage des cours d'eau ?* Pour répondre à cette question, ce projet est planifié en 3 phases : *Phase 1 (2016/2017)* - état de l'art, choix des sites d'étude, des compétences et de l'instrumentation ; *Phase 2 (2017-2019)* - mesures et instrumentation des sites, développement d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides ; *Phase 3 (2019-2021)* - analyse et interprétation des données, test des indicateurs, valorisation des résultats. Comme tous les projets Zabr/AE-RMC sa finalité est double et se situe à l'interface de problématiques de recherche et de gestion. Du point de vue scientifique, le projet vise à : 1) mieux comprendre les interactions cours d'eau/zones humides/eaux souterraines et la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides ; 2) mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (notamment régulation, stockage) ; 3) préciser les vulnérabilités physiques des zones humides de têtes de bassins pour une meilleure protection et gestion. D'un point de vue opérationnel, plusieurs points sont à envisager : 1) transfert de connaissance (ex : fiches techniques) ; 2) production d'argumentaires pour la protection des zones humides ; 3) construction d'indicateurs de diagnostic et de suivi (ex : restauration, bon fonctionnement).

Les zones humides sont des objets d'attention dans le domaine de l'eau, tant au niveau local qu'international. De nombreux enjeux pèsent sur ces milieux fragiles et menacés qui assurent des fonctions écosystémiques. Des estimations indiquent que plus de 50% des zones humides ont été détruites ou dégradées au cours du siècle dernier. Pour la France, les zones humides ne couvrent plus que 5 à 10% du territoire. Les zones humides apparaissent communément comme des réservoirs de biodiversité et des « éponges » stockant l'eau. L'analyse de la littérature scientifique montre que ce rôle d'éponge dans le stockage/déstockage d'eau est à nuancer. Le projet vise donc à préciser le rôle hydrologique des zones humides en : 1) quantifiant leurs capacités de stockage/transfert d'eau ; 2) déterminant et quantifiant les origines des apports d'eau au cours d'eau à l'étiage. Ce travail prend en compte le contexte environnant la zone humide (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 ont conduit à l'élaboration d'une méthodologie interdisciplinaire et de plans d'instrumentation pour les 2 sites d'études principaux (Tourbière de Luitel-38 et de Tourbière de Frasné-25) mis en œuvre en phase 2.

Ainsi, en **phase 2** du projet, l'instrumentation et les campagnes de mesures ont permis d'acquérir et de compléter les connaissances pédologiques, géophysiques, hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques. La quantification du soutien d'étiage nécessite en effet : 1) d'analyser et de « boucler » de manière précise les bilans hydrique et hydrologique du site en identifiant et quantifiant les sources d'apport localisées ou diffuses (ex : pluie, ruisseau, aquifère dont drainance) et d'export (ex : évapotranspiration, surverse, infiltration) ; 2) de caractériser en 3D la géométrie de la zone humide et ses propriétés hydrodynamiques (ex : perméabilité, porosité) ; 3) de connaître l'origine, les voies de transfert et de mélange des eaux. Les données et connaissances acquises ont été utilisées pour modéliser le comportement de stockage/déstockage des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques (modèles réservoir et réseaux de neurones), déterminer les paramètres et variables clés et identifier une première série d'indicateurs de suivi.

En **phase 3** du projet, ces travaux ont été finalisés. Les principaux résultats sont les suivants :

- Tourbière du Luitel : fonctionnement hydrologique et soutien d'étiage

Les travaux effectués sur ce site montrent que le ruisseau qui le traverse (Fontfroide) semble déconnecté de la tourbière. Il n'y a donc pas de soutien d'étiage avéré de la tourbière au ruisseau de Fontfroide à l'exutoire. Le débit à l'exutoire à l'étiage est soutenu par les apports d'eaux souterraines de l'encaissant. Ce débit peut-être très faible : le Q90 est de l'ordre de 0,36 l/s. Les résultats montrent que plusieurs sources d'alimentation en eau prennent le relais au fil du cycle hydrologique pour garantir, sinon la saturation, mais au moins un apport d'eau à la tourbière. De plus, les apports de versants (encaissant) jouent un grand rôle dans l'alimentation du ruisseau de Fontfroide impliquant au moins 3 masses d'eau souterraines, en alternance ou en mélange sur le cycle hydrologique.

- Tourbière de Frasne : Fonctionnement hydrologique et soutien d'étiage

Comme au Luitel, le débit à l'exutoire pérenne principal de ce site peut être très faible à l'étiage (<1 l/s). Toutefois, contrairement au Luitel, de l'eau stockée en période pluvieuse du cycle hydrologique est déstockée en période sèche : la tourbière de Frasne semble donc avoir un meilleur rôle dans le soutien d'étiage du ruisseau à l'exutoire. Deux types de masses d'eau sont impliqués : 1) des eaux de pluies peu modifiées stockées dans la tourbière active ; 2) des eaux de pluies soumises à l'évaporation stockées dans le secteur nord-est du site. De plus, les résultats montrent qu'une troisième masse d'eau est impliquée dans l'alimentation de la tourbière et du ruisseau à l'exutoire. Il s'agit d'eau plus minéralisée ayant potentiellement circulé dans les moraines et/ou le karst sous-jacent. Ces eaux ont potentiellement une origine locale voire régionale.

- Indicateurs de soutien d'étiage : à l'échelle du site

À cette échelle, le travail sur la recherche d'indicateurs de soutien d'étiage a été conduit à partir d'une étude fondée sur loi de vidange d'un réservoir (équation de Boussinesq). Cette équation permet de calculer l'évolution du débit de vidange (tarissement) d'un réservoir aquifère en fonction du temps. Le calcul est fondé sur les propriétés géométriques (longueur, largeur, charge hydraulique) et hydrodynamiques (porosité efficace, conductivité hydraulique) du réservoir. Cette équation a été appliquée pour des gammes et des niveaux de valeurs cohérents avec des réservoirs tourbeux. Les résultats sont présentés sous forme d'abaques. Ils montrent qu'il existe des combinaisons de paramètres réalistes qui garantissent théoriquement un soutien d'étiage intéressant et supérieur à 1l/s (soit la consommation journalière de 576 personnes à concurrence de 150 l/j) pour une durée de 90 jours (l'équivalent de 3 mois estivaux). Les configurations les plus intéressantes sont obtenues pour des réservoirs de zones humides présentant un volume important et une forte charge hydraulique. Ces réservoirs doivent aussi contenir un volume d'eau déstockable par gravité important mais présenter une conductivité hydraulique intermédiaire afin que la vidange ne soit ni trop rapide ni trop lente.

- Indicateurs de soutien d'étiage : à l'échelle du bassin versant

La recherche d'indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant a été conduite à partir d'une approche multi-critère spatiale. Elle consiste à déterminer si une combinaison de critères permet de calculer un indice spatialisé du potentiel de soutien d'étiage (et/ou d'écêtement de crue) d'un sous-bassin versant. Le travail a été réalisé en partenariat avec l'ONF Aude sur deux couples de bassins versant et le calcul d'indice effectué sur les 2 types de bassins versants : 1) faible densité de zones humides ; 2) forte densité de zone humide. La construction de l'indice est fondée principalement sur des indicateurs topographiques pour lesquels les données étaient facilement disponibles et spatialement représentatives. On distingue deux catégories d'indicateurs : 1) potentiel de présence de zone humide et de stockage d'eau (ex : indice d'humidité des sols, pente, indice de convergence, ...) ; 2) potentiel de connectivité des zones humides avec le réseau hydrographique (ex : distance à l'écoulement le plus proche, distance à l'exutoire...). Les résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les bassins versants de la Haute-vallée de l'Aude selon leur densité en zones humides. On obtient des résultats similaires sur

des couples de bassins en Lozère et dans le Forez. Si ces premiers résultats sont encourageants, une validation terrain pour finaliser ce type d'indicateurs s'impose.

- Vulnérabilités et préconisations de gestion

Les tourbières de têtes de bassin versant, même lorsqu'elles sont de petite taille, sont des milieux hétérogènes aux habitats phyto-sociologiques parfois nombreux, dits en mosaïques. Il est donc important d'appréhender ces milieux en tant que complexes tourbeux lors d'études hydrologiques. Ce type de complexes hydroécologiques n'est pas déconnecté de son environnement. Leur fonctionnement et leur maintien dépend de connexions hydrauliques fortes avec l'hydrosystème local et régional intégrant les relations avec l'atmosphère et le sous-sol. La persistance de complexes tourbeux nécessite le maintien d'un état de saturation en eau le plus longtemps possible dans l'année et au moins 9 mois voire plus. La présence de tourbières est donc conditionnée à un bilan hydrologique excédentaire où les apports (entrées) sont plus importants que les pertes (sorties). Les actions de gestion doivent donc viser à maintenir ce bilan excédentaire.

- Perspectives et intérêt opérationnel

En l'état, la méthodologie mise en œuvre dans le projet ZHTB est transférable sur d'autres sites de zones humides et notamment les sites retenus en phase 1 mais non étudiés (ex : marais de Vaux – 01 ; tourbière de Praubert - Impluvium d'Évian – 74 ; tourbière de Montselgues – 07). Au final, le projet ZHTB ouvre plusieurs perspectives d'utilisation des résultats qui semblent prometteuses : 1) Aide à l'évaluation des fonctions et services hydrologiques des tourbières ; 2) Modélisation numérique du soutien d'étiage ou du fonctionnement hydrologique avec prise en compte des effets des changements climatiques ; 3) Poursuite des travaux engagés sur les indicateurs du soutien d'étiage ou de fonctionnement hydrologique à l'échelle du site et du bassin versant.

D'un point de vue opérationnel, il y a des fortes attentes en termes de : 1) transfert de connaissance (ex : fiches techniques de préconisations de gestion ou de protection) ; 2) production d'argumentaires pour la protection des zones humides ; 3) construction d'indicateurs simples de diagnostic et de suivi (ex : restauration, bon fonctionnement).

Acronymes, sigles et abréviations

| | |
|---|---|
| 3D : trois dimensions | Eunis : European nature information system |
| AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse | EVS : Environnement ville société |
| AE-SN : Agence de l'eau Seine Normandie | FAO : Food and Agriculture Organization of United Nations (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture) |
| AFB : Agence française pour la biodiversité | FCBN : Fédération des conservatoires botaniques nationaux |
| Afes : Association française pour l'étude des sols | Geppa : Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée |
| AM : Arrêté ministériel | GES : Gaz à effet de serre |
| ANR : Agence nationale de la recherche | Gewex : Global energy and water cycle exchanges) |
| BO : Bulletin officiel | GHZH : Groupe d'histoire des zones humides |
| BP : Before present | GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| BRGM : Bureau de recherche géologique et minière | Gis : Geographic Information System |
| BV : Bassin versant | Gis : Groupement d'intérêt scientifique |
| CAEi : Conseil aménagement espace ingénierie | GISP : Greenland ice sheet precipitation |
| Cen : Conservatoires d'espaces naturels | GNIP : Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations |
| CMP : collection de points milieu | GPR : Ground Penetrating Radar |
| CNRS : Centre national de la recherche scientifique | GPS : Global positioning system |
| Corine (land cover) : Inventaire biophysique de l'occupation des terres | GSSI : marqie de georadar |
| CPCS : Commission de pédologie et de cartographie des sols | GWDTE : Groundwater dependent terrestrial ecosystems |
| CTD : Conductivity temperature depth | GWI : débit entrant souterrain |
| DCE : Directive cadre européenne sur l'eau | GWO : débit sortant souterrain |
| DEA : Denitrification enzyme activity | Habref : Référentiel national des habitats |
| Deb : Direction de l'eau et de la biodiversité | Hf : tourbe fibrique |
| EC : Electrical conductivity | Hm : tourbe mésique |
| EMA : École des mines d'Alès | Hs : tourbe saprique |
| EMSE : École des mines de Saint-Etienne | HDPE : Polyéthylène à haute densité |
| ENS : Espaces naturels sensibles | HGM : Hydrogeomorphic approach |
| ENIPE : École nationale des travaux publics de l'État | IAEA : Agence internationale de l'énergie atomique |
| EPA : Environmental protection agency) | IBK : Indice Beven-Kirby |
| EPL : Établissement public Loire | IDPR : Indice de persistance des réseaux |
| ERC (principe) : Éviter, Réduire, Compenser | IGE : Institut des géosciences de l'environnement |
| ERT : Electric Resistivity Tomography | IGN : Institut géographique national |
| Eso : Eau souterraine | INPN : Inventaire national du patrimoine naturel |
| Esu : Eau de surface | Isba : Interaction sol-biosphère-atmosphère |
| ET : Évapotranspiration | |
| ETP : Évapotranspiration potentielle | |
| ETR : Évapotranspiration réelle | |
| EU : European Union | |

Isthme : Image société territoire homme
 mémoire environnement
 K : conductivité hydraulique
 KGE : Kling Gupta Efficiency
 KTH : Kultureller trockenhorizont
 Lehna : Laboratoire d'écologie des
 hydrosystèmes naturels et anthropisés.
 LGEI : Laboratoire de génie de
 l'environnement industriel
 Lidar : Light detection and ranging
 LGIT : Laboratoire de Géophysique Interne et
 Tectonophysique
 LMV : Laboratoire magma et volcans
 Medde : Ministère de l'écologie, du
 développement durable et de l'énergie
 MedWet : Zones humides méditerranéennes
 Meem : Ministère de l'environnement et de la
 mer
 MES : Matière en suspension
 MHz : Mégahertz
 MNHN : Museum National d'Histoire
 Naturelle
 MNT : Modèle numérique de terrain
 MO : Matière organique
 MTES : Ministère de la transition écologique et
 solidaire
 MWL : Meteoric water line
 NRCS : Natural resources conservation service
 NSE : Nash-sutcliffe efficiency
 Omeaa : Observation et mesure des
 environnements actuels et anciens
 ONF : Office national des forêts
 Ospar (Convention) : Protection du milieu
 marin de l'Atlantique du nord-est
 P : précipitations
 Paf : perte au feu
 Pe : porosité efficace
 Pt : porosité totale
 PEE (modèle) : Zones humides potentielles,
 effectives, efficaces
 PEG : Procédés pour l'environnement et les
 géoressources
 PER (modèle) : Pressions-État-Réponses
 Piren Seine : Programme interdisciplinaire de
 recherche sur l'eau et l'environnement du bassin
 de la Seine
 PNR : Parc naturel régional
 PNRZH : Programme national de recherche
 sur les zones humides
 PVC : Polychlorure de vinyle
 QMNA : Moyenne des débits journaliers du
 mois d'étiage
 RCP : Representative Concentration Pathway
 REV : Revue de projets scientifiques et
 techniques au service de la gestion intégrée du
 bassin de la Loire et ses affluents
 Rhomeo : Observatoire de l'évolution du bon
 état des zones humides sur le bassin Rhône
 Méditerranée
 RMC : Rhône Méditerranée et Corse
 RN : Réserve naturelle
 RNN : Réserve naturelle nationale
 RNR : Réserve naturelle régionale
 RU : réserve utile
 Sage : Schéma d'aménagement et de gestion des
 eaux
 Sandre : Service d'administration national des
 données et référentiels sur l'eau
 Sdage : Schéma d'aménagement et de gestion
 des eaux
 Seq : Système d'évaluation de la qualité
 SIE : Système d'information sur l'eau
 SIG : Système d'information géographique
 SLAP : Standard light Antarctic
 SMOW : Standard Mean Ocean Water
 SNO : Service national d'observation
 SNO : Service national d'observation
 SNOT : Service national d'observation des
 tourbières
 SNPn : Société nationale de Protection de la
 Nature
 Spin : Science pour les processus industriels et
 naturels
 SPN : Service du patrimoine naturel
 SWI : débit entrant de surface
 SWO : débit sortant de surface
 UFC : Université de Franche Comté
 UHC : Unité hydraulique cohérente
 UICN : Union internationale pour la
 conservation de la nature
 UJM : Université Jean Monnet
 UK : United Kingdom
 UMR : Unité mixte de recherche
 US : United States
 USA : United States of America
 VCN : Débits d'étiage annuels au pas de temps
 journalier

WetMec : Wetland water supply mechanisms
WMMWL : West mediterranean meteoric water
line
WTD : Water Table Depth
Zabr : Zone atelier bassin du Rhône
ZH : Zones humides
ZHTB : Zones humides de têtes de bassins
versants
ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique
faunistique et floristique

Préambule

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

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

Notre point de vue est que la protection légitime des zones humides a construit un discours généralisant sur le « rôle d'éponge » des zones humides dans le stockage/déstockage des eaux. La littérature scientifique montre qu'il est nécessaire de nuancer et de préciser selon le type de zones humides. Le travail réalisé, tant sur l'analyse de la bibliographie que sur le terrain nous permet d'ores et déjà de mettre en avant les points suivants :

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

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)

Les différents sites étudiés dans le cadre des projets ZHTB et ZH Aude témoignent de cette diversité :

1. *Tourbière de Laitel* – Cette tourbière ombrogène et limnogène de petite taille est composée d'une diversité de milieux : lac tourbière (radeaux flottants), tourbière bombée boisée...
2. *Tourbière de Frasne* – Ce complexe tourbeux de grande taille est constitué d'une mosaïque d'habitats tourbeux (ombrotrophes et minérotrophes) ou non tourbeux (ex : tourbière active, bas-marais, tourbière bombée, pinèdes...).
3. *Zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude* – Les zones humides des sous-bassins versants forestiers étudiés sont globalement de petite taille. Une partie d'entre elles sont des tourbières hautes actives (tourbières de pente ou soligènes minérotrophes). Dans cette région, le contraste amont/aval est marqué par des têtes de bassin versant humides et des vallées sèches régulièrement en déficit hydrique.

La persistance biologique de ces complexes tourbeux nécessite le maintien d'un état de saturation en eau le plus longtemps possible dans l'année et au moins 9 mois voire plus. La présence de tourbières est donc conditionnée par un bilan hydrologique excédentaire où les apports (entrées) sont plus importants que les pertes (sorties)

1. *Entrées d'eau* – Les principaux apports sont la pluie (dont ruissellement), les eaux de fonte des neiges et les eaux souterraines. En tête de bassin versant, les apports amont des ruisseaux sont faibles ou anecdotiques ou intermittents. Il existe souvent plusieurs masses d'eau, d'origines spatiales parfois différentes, dont la prépondérance dans l'alimentation du complexe tourbeux est variable dans le temps et l'espace.
2. *Sorties d'eau* – La persistance de milieux humides implique que les pertes sont limitées ou au moins inférieures aux apports. Les sorties d'eau se font principalement par évapotranspiration.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin s'intéressent à différents titres au projet ZHTB, qu'il s'agisse d'un pur intérêt personnel ou d'une collaboration étroite dans la conduite du projet. L'ensemble de ces personnes est listé en annexe 4 : membres du comité de pilotage, gestionnaires et personnes liées à un, ou des sites de zones humides prospectés lors de la phase 1.

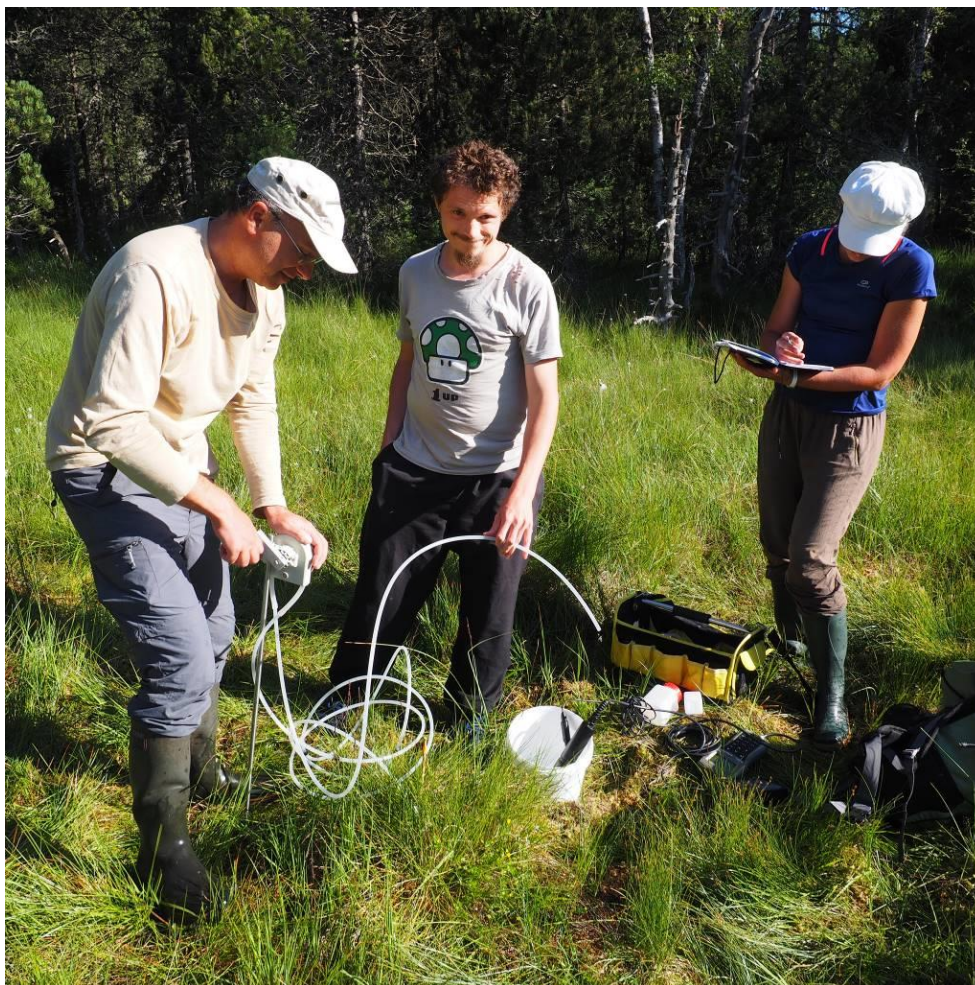
Dans le cadre des travaux réalisés sur les 2 sites d'études principaux du projet ZHTB, tourbière de Luitel et tourbière de Frasne, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui localement nous ont apporté leur aide lors de nos missions que ce soit pour le partage de données, de bibliographie,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

Pour la tourbière de Luitel, nos remerciements vont tout particulièrement à Carole Desplanque (Conservatrice de la RN du Luitel – ONF) et à Jean-Paul Laurent (IGE – Université de Grenoble). Nous adressons aussi nos remerciements à André-Marie Dendievel³ qui a construit le modèle d'âge sur la grande carotte du Luitel.

Pour la tourbière de Frasne, nos remerciements s'adressent en particulier : 1) aux agents de de la Communauté de Communes Frasne Drugeon et de l'Épave Haut-Doubs Haute-Loue : Geneviève Magnon, Louis Collin, Thibault Van Rijswijk, Vincent Bertus, Michel Sauret, Elodie Mehl ; 2) aux scientifiques de l'UMR Chrono Environnement : Catherine Bertrand, Marie-Laure Toussaint. Nous adressons des remerciements plus spécifiquement à Guillaume Bertrand et Alexandre Lhosmot qui ont pu intervenir sur le terrain à notre place lors de restriction de déplacement liées à la Covid et qui ont partagé et intégré leurs résultats au rapport ZHTB.

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

3. Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR 5023 LEHNA, F-69518, Vaulx-en-Velin, France



Prélèvements d'eau souterraine au Luitel pour analyse géochimique (Source : C. Desplanque)



Surprise ! Le Creux au Lard (doline) est plein d'eau. La sonde, placée au fond (environ -11 m) attendra notre prochaine visite à Frasne pour être relevée

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, les résultats clés des phases 1 et 2 du projet. La deuxième partie expose le contenu du rapport.

1. Objectifs, planification, résultats clés des phases 1 et 2

Le projet ZHTB repose sur le postulat qu'il existe un rôle important des zones humides dans le stockage et le soutien d'étiage des cours d'eau, voire des nappes. Les zones humides sont des objets emblématiques pour la biodiversité recoupant de nombreux enjeux. Ce sont des entités complexes faisant l'objet de nombreux travaux interdisciplinaires.

1.1. Problématique, finalités et objectifs

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

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

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

- 1) transfert de connaissance (ex : fiches techniques) ;
- 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).

Introduction

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 ?

L'étiage, dans son acception la plus courante, est une notion statistique et hydraulique 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 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 ZH 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 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 l'objet d'un rapport⁴. 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 présentés en Annexe 3. 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 Frasné (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 Frasné.

- **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

4. Paran, F., Ré-Bahuaud, J. et Graillot D. (2017) Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône. Rapport phase 1. Zab, AE-RMC, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, 117p + annexes.

Introduction

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.

| | 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 :

- 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/rétraction) : temps pluriannuel (croissance végétale/décomposition), temps cyclique (variation saisonnière de la saturation en eau) / cette évolution affecte la géométrie du milieu et ses propriétés hydrodynamiques | <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

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 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.

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 faibles voire très faibles. 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 étaient 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 Frasne (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'été qui seront construits et testés en phase 3.

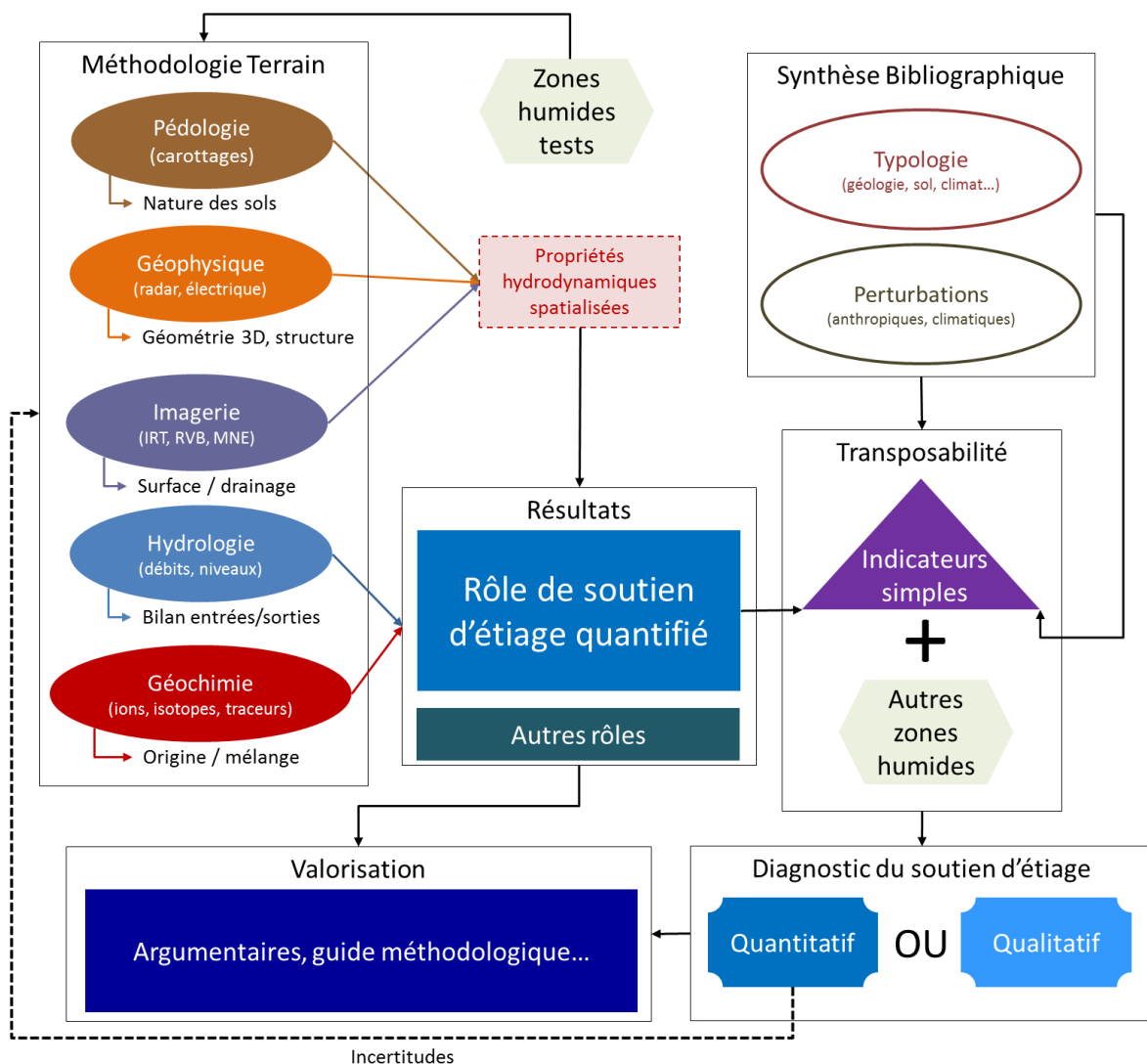


Figure 1 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3)

Introduction

Les résultats attendus pour la phase 2 sont les suivants :

- Première analyse des données existantes (Luitel et Frasné) : écologie (végétation), géophysique, géochimie, géomorphologie, pédologie, hydrologie, météorologie...
- Première analyse des données hydrologiques acquises (Luitel et Frasné) :
 - 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)

1.4.3. Bilan : volet hydrologique

1.4.3.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel)

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

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

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

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

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

- Piézomètre station météo (P20) – système intégrateur avec un effet mémoire de 143 jours et une périodicité annuelle
- ETP – effet mémoire de 67 jours et cyclicité annuelle

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

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

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

- Débits et étiage (FF1) – l'analyse a permis de discriminer 4 fonctionnements différents du système hydrologique : 1) gros débits (débits supérieurs à Q5) ; 2) majorité des débits (2 comportements pour des débits entre Q5 et Q90) ; 3) faibles débits (débits inférieurs à Q90). Le Q90 est défini comme le débit d'étiage (0.36 l.s-1). Cette analyse met aussi en évidence une faible variation au cours de l'année du temps de réponse (1 jour) et une légère variation de l'effet mémoire (de 3 à 6 jours). Les précipitations printanières (les plus abondantes) sont plus rapidement assimilées que sur les autres périodes.
- Coefficient d'écoulement – la restitution de la pluie est plus grande et plus variable (mars à mai 2018) par le ruisseau de Fontfroide (FF1) que par le ruisseau du Lac. Ceci pourrait indiquer une restitution différée de la tourbière, en lien avec une très forte saturation. Durant les périodes d'étiages (été-automne), le coefficient d'écoulement de Fontfroide (FF1) diminue mais reste élevé (>0,50) contrairement au ruisseau du lac. Cette différence pourrait avoir comme cause un soutien d'étiage estival et automnal de la tourbière au ruisseau de Fontfroide.
- Nappe d'eau souterraine de la tourbière – l'effet mémoire est variable selon les piézomètres (de 39 jours au P17 à 86 jours pour P20, 77 jours pour le P14). Les plus petits temps de mémoire sont calculés pour les piézomètres situés près des fossés de drainage. Pour la relation pluie-hauteur piézométrique, les temps de réponse sont quasi-immédiats (1 jour), les effets mémoire sont similaires (~13 jours).
- Ruisseau de Fontfroide (comparaison amont aval) – la traversée de la tourbière contribue à une déminéralisation du cours d'eau. Le débit reste le plus élevé en amont. Sur certaines courtes périodes, il peut y avoir des inversions (plus de conductivité en aval, plus de débit en aval).
- Ruisseau du lac (RDL)/ruisseau de Fontfroide (FF1) – les différences entre données de débits, température et conductivités des deux cours d'eau peuvent être vraisemblablement attribuées à la traversée de la tourbière. Les deux cours d'eau ont le même temps de réponse (1 jour) et le même effet mémoire (12 jours). Toutefois, si l'analyse est saisonnalisée, il apparaît que l'effet mémoire (Pluie-débits RDL) chute drastiquement à 1 jour pendant le printemps (contre 3 pour le ruisseau de Fontfroide). Ainsi, la tourbière réagit plus lentement aux pluies printanières.

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

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

1.4.3.2. 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'étiage de la tourbière du Col de Luitel lors de 3 cycles hydrologiques (3 étiages). Au final, la valeur de débit de soutien d'étiage journalière maximale est de 0,38 l/s. Le débit moyen du soutien d'étiage des périodes d'étiage est compris entre 0,21 à 0,06 l/s. Pour les débits dans ces gammes de valeurs (inférieurs à 0,5l/s), nous nous trouvons aux limites par rapport à la qualité des mesures réalisées au niveau des seuils jaugés.

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

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

Ce travail est bien évidemment perfectible :

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

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

1.4.3.3. Réseaux de neurones (Luitel)

Quand le fonctionnement d'un système hydrologique ne peut pas être décrit de façon explicite parce qu'il est trop complexe ou trop incertain, l'approche de modélisation statistique par réseaux de neurones présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur ce fonctionnement en proposant de relier entrées et sorties du système de la meilleure manière possible sur cette base. Cette approche semble adaptée aux complexes tourbeux pour lesquels la réalisation d'un bilan hydrologique est difficile.

L'objectif du travail de modélisation par réseau de neurones entrepris au Luitel vise dans un premier temps à modéliser et simuler le débit du ruisseau de Fontfroide et les hauteurs du piézomètre 3 (P3). Les données utilisées pour ce travail sont les suivantes : 1) précipitations hybrides ; 2) évapotranspiration et évapotranspiration virtuelle ; 3) débits observés de Fontfroide (sonde IGE/ONF) ; 4) piézomètres (P3, P13, P14). La phase d'apprentissage du modèle couvre la période aout 2014-décembre 2017 et la période test l'année 2018.

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

- Le modèle reproduit en phase les pics de crues dans des proportions correctes, et simule bien les récessions de débits.
- Certaines périodes de hautes eaux, notamment avec la fonte de neige, demeureront cependant mal simulées par le modèle

- Des débits négatifs sont simulés par le modèle, généralement après une certaine période de basses eaux. Ce dernier point montre qu'après une période d'évapotranspiration suffisamment longue, l'évapotranspiration potentielle que le modèle utilise ne saurait être convertie par le système hydrologique en évapotranspiration réelle, faute d'eau disponible. Ainsi, le modèle, par ce comportement a priori aberrant, indiquerait une période de stress particulièrement importante pour le système.

Ces conclusions partielles ont fait actuellement l'objet de nouvelles analyses et de nouvelles modélisations en phase 3 afin de déterminer plus précisément quelles sont leur capacité à prévoir le soutien d'étiage.

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

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

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

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

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

1.4.3.4. Éléments complémentaires concernant le volet hydrologique

Pour ajuster ce bilan hydrologique il pourrait être nécessaire :

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

1.4.4. Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne)

Ce volet est étroitement lié avec le volet pédologie. Les travaux engagés sur le volet géophysique ont permis de valider la méthode sur les 2 sites du projet ZHTB.

Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.4.6. Volet géochimie (Luitel)

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

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

Introduction

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.4.7. Bilan général

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

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

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

1.4.7.1. Bilan au Luitel

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

- **Réponse du système et effet mémoire**

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

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

- **Comportements hydrologiques et sectorisation**

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

Les travaux de modélisation ont conduit à structurer le fonctionnement hydrologique du Luitel a priori à l'aide de : 1) 3 réservoirs (nord-œil de la tourbière, sud-ouest-tourbière bombée-boisée et sud-est-prébois) ; 2) 3 types d'écoulement (ruissellement-très rapide, circulation dans la tourbière-rapide et circulation dans la tourbière-lente). L'analyse pédologique du site a permis de confirmer la pertinence de ces 3 réservoirs et de ces 3 types d'écoulements. L'analyse des histosols des 3 réservoirs montre

Introduction

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

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

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

- **Étiage, soutien d'étiage et changement d'échelle**

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

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

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

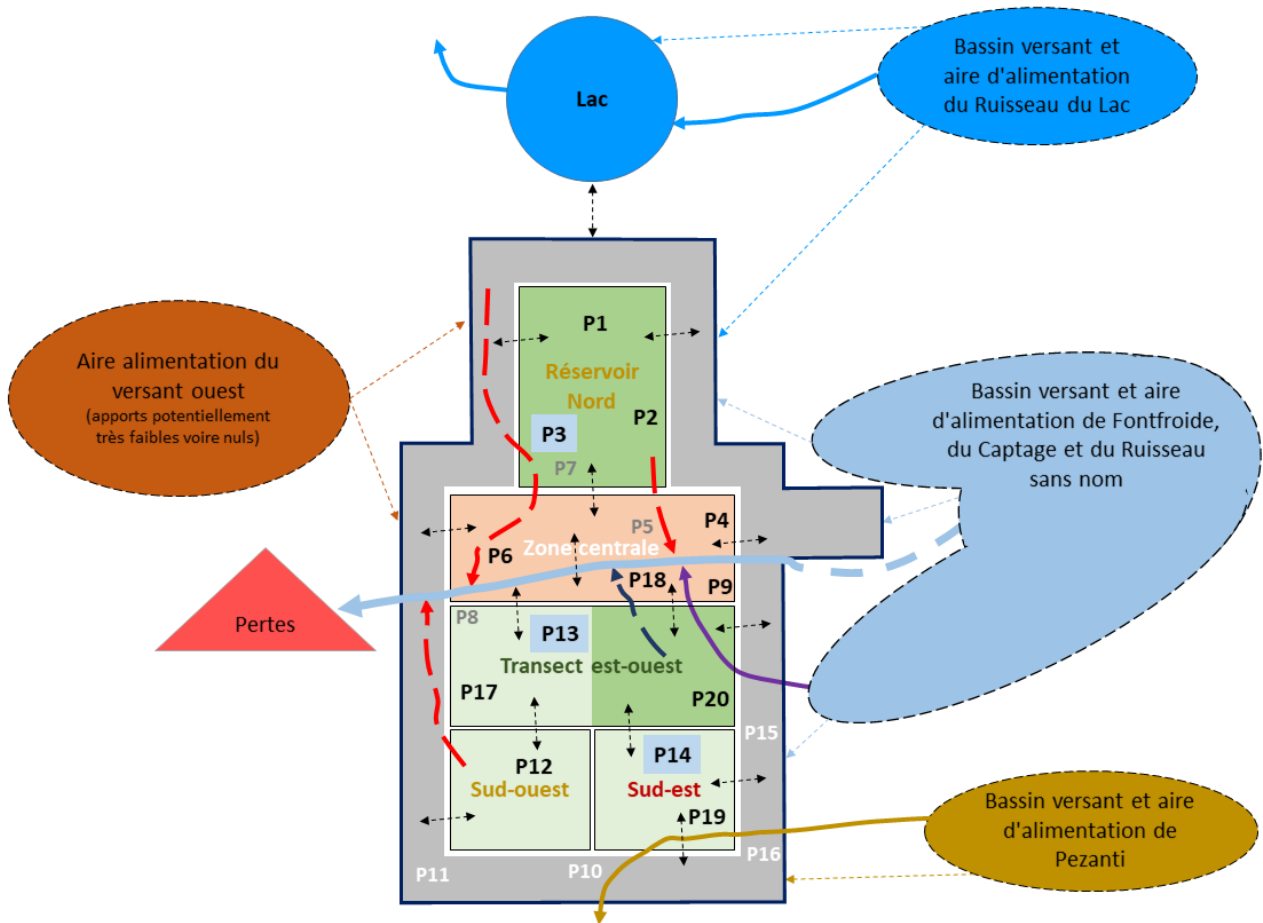
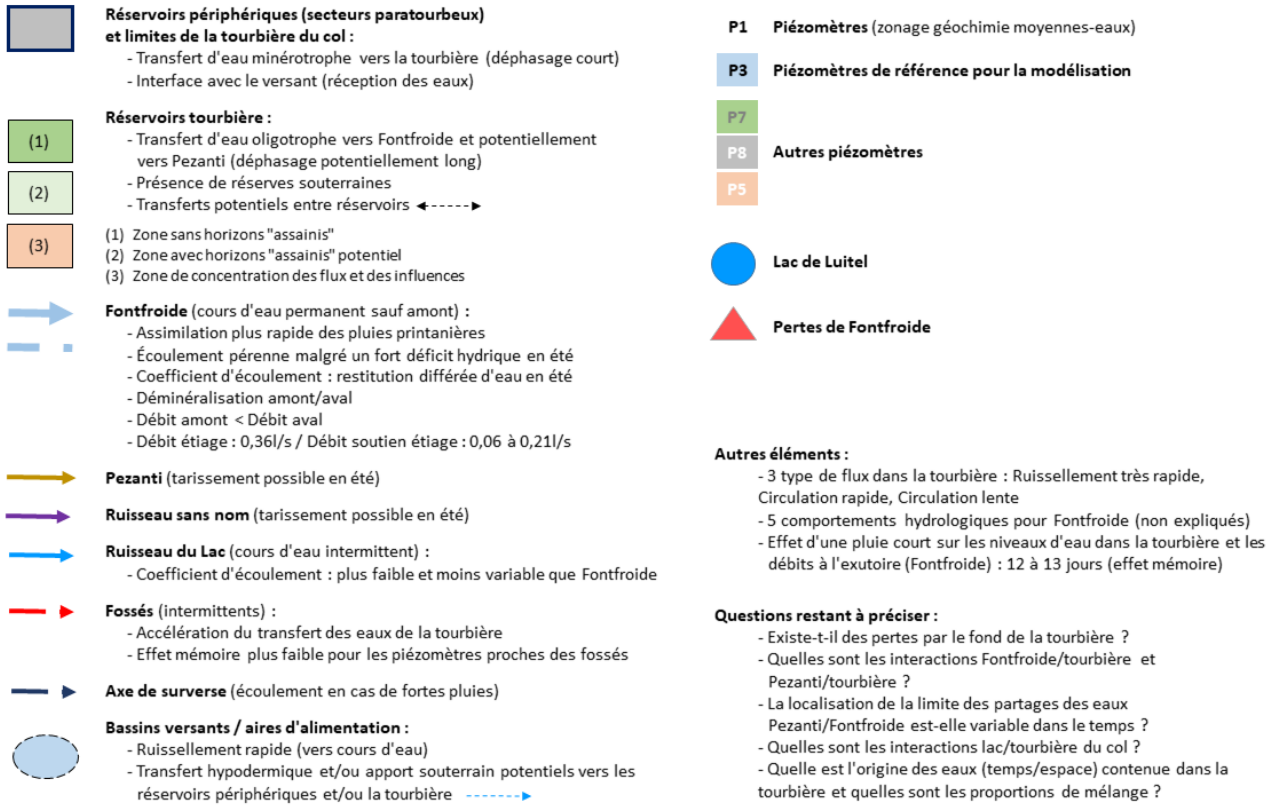


Figure 2 : Fonctionnement hydrologique du complexe tourbeux de Luitel : schéma conceptuel

1.4.7.2. Bilan Frasne

Le travail est moins avancé sur Frasne que sur le Luitel. Comme pour ce dernier, le fonctionnement de la tourbière de Frasne doit être appréhendé comme celui d'un complexe tourbeux intégré dans son hydrosystème. Les eaux stockées (temporairement) et transitant dans un tel complexe ont des origines vraisemblablement différentes dans l'espace et dans le temps, et des interactions complexes. Toutefois, la taille plus importante de ce complexe tourbeux et le domaine karstique sur lequel il repose tente à augmenter la complexité du site.

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

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

Les objectifs de la phase 3 sont les suivants :

- **Objectif 1** : suite de l'acquisition d'information et de données (hydrologiques, géochimiques, pédologiques, géophysiques) pour couvrir au moins 1 cycle hydrologique complet supplémentaire.
- **Objectif 2** : analyse et synthèse des données acquises en phases 2 et 3.
- **Objectifs 3** : poursuite des travaux de modélisation / modèles réservoirs (commencés en phase 2) et réseaux de neurones
- **Objectif 4** : élaboration d'indicateurs synthétiques permettant d'évaluer le soutien d'étiage des zones humides. Ce travail pourrait a été conduit à 2 échelles : zone humide et bassin-versant
- **Objectif 5** : test et transférabilité des indicateurs (nouveaux sites issus de la prospection réalisée en phase 1, zones humides de l'Aude (lien accord cadre AERMC/ONF).
- **Objectif 6** : 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**) : valorisation.

2. Organisation du rapport phase 3 (2019-2022)

Si la phase 1 du projet ZHTB a été axée essentiellement sur la bibliographique, la recherche de site et le développement méthodologique, la phase 2 quant à elle consiste en une phase de mise en œuvre et d'acquisition de données sur les 2 sites sélectionnés (Luitel et Frasné). La phase 3 a permis de finaliser les travaux commencés en phase 2 et de conduire une réflexion sur des indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site de zone humide et à l'échelle du bassin versant.

La partie I de ce rapport propose une présentation des travaux effectués sur la tourbière Frasné : suivi hydrologique, analyses hydrostatistiques, traceurs géochimique et travaux de thèse d'Alexandre Lhosmot. La fin de cette partie présente une synthèse de chacun des volets abordés pour la tourbière de Frasné, suivi d'un bilan du fonctionnement hydrologique.

La partie II présente quant à elle les travaux effectués sur la tourbière du Luitel : suivi hydrologique, analyses hydrostatistiques, modélisation par réseaux de neurones, traceurs géochimiques et caractérisation 3D de la géométrie et de la structure interne de la tourbière du col (articulation approche pédologique et géophysique). Comme pour la partie I, la fin de cette partie propose une synthèse de chacun des volets abordés au Luitel, suivi d'un bilan du fonctionnement hydrologique.

La partie III propose le bilan des premières réflexions et travaux concernant les indicateurs de soutien d'étiage : 1) à l'échelle du site tourbeux à partir d'une étude de cas théoriques fondée sur l'équation de Boussinesq ; 2) à l'échelle du bassin versant, en partenariat avec l'ONF Aude, à partir de l'étude de 4 bassins versant analysés selon une approche SIG spatiale et multicritère.

La conclusion tire le bilan des 3 phases du projet ZHTB et présente des perspectives. Une synthèse globale présente de manière rapide les résultats sur les sites étudiés (Luitel, Frasné, haute vallée de l'Aude) et les travaux engagés sur la question des indicateurs de soutien d'étiage.

PARTIE I

—

Tourbière de Frasne

| | |
|---|-----|
| 3. Suivi hydrologique | p23 |
| 4. Analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones | p31 |
| 5. Traceurs géochimiques | p33 |
| 6. Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet : rôle du suivi à long terme pour la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique (A. Lhosmot et G. Bertrand) | p47 |
| 7. Campagnes géophysique (GPR) : juin 2018, janvier 2019 et septembre 2019 | p69 |
| 8. Synthèses – Frasne | p91 |

3. Suivi hydrologique

3.1. Partage de données et suivis

Les activités scientifiques liées au projet ZHTB ont été intégrées dans le plan de gestion de la tourbière de Frasne. La bibliographie et les données de la tourbière de Frasne sont donc utilisées dans le cadre du projet ZHTB. Il s'agit principalement de données météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau), géophysiques, géochimiques et écologiques. L'ensemble de ces données a été présenté de manière rapide dans la partie concernant la présentation du site de Frasne dans le rapport ZHTB phase 2. Ces données ont été traitées et analysées dans le cadre de l'analyse statistique des données hydrologiques (voir §4. p31) et de l'interprétation du fonctionnement hydrologique du site (§6. p47).

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

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

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

3.2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique

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

Ce dispositif a été complété par l'installation de 4 sondes CTD (Figure 3) :

- 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 de 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 décorrélatées de celles des 2 tributaires (ruisseaux affluents, 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.

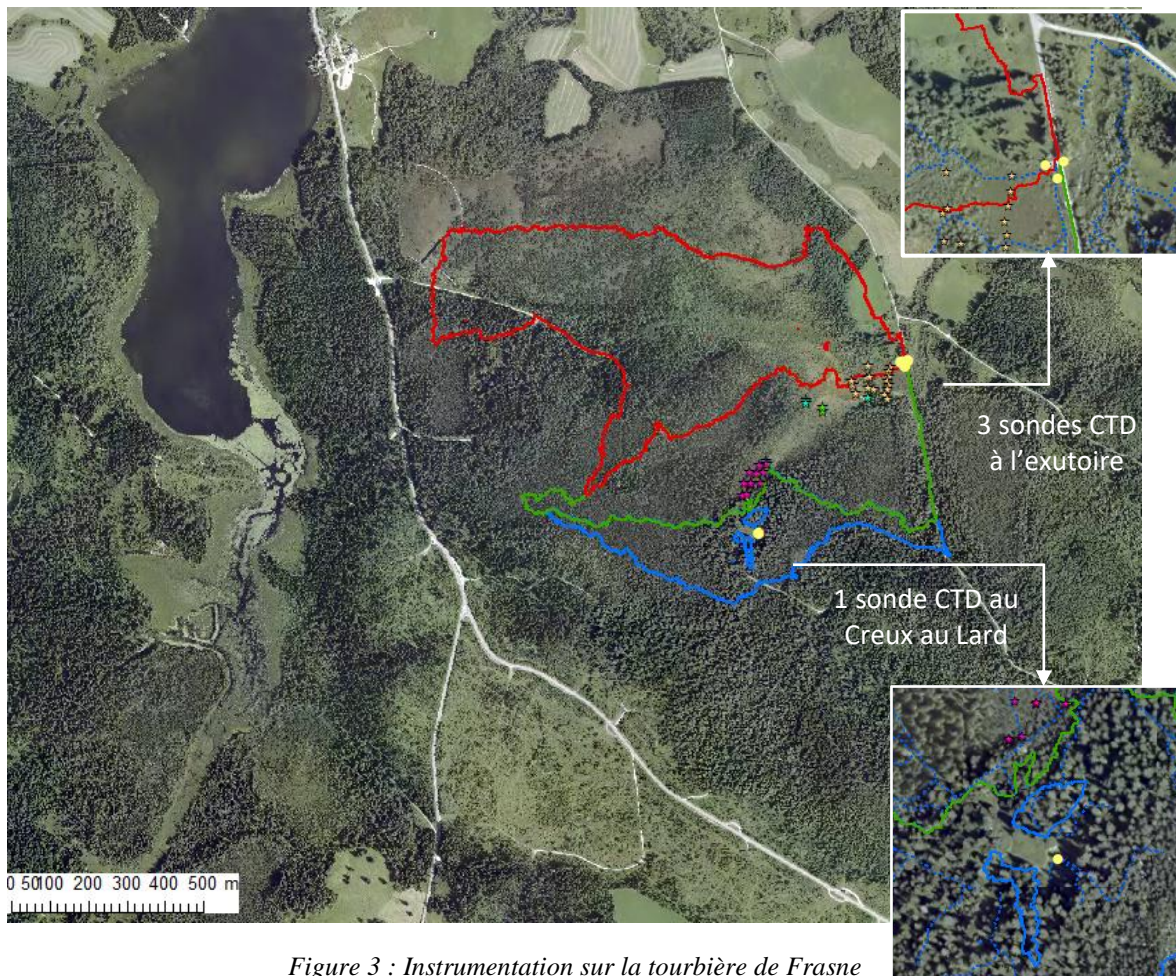


Figure 3 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne

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.

3.3. Présentation rapides des données acquises

3.3.1. Relevés de conductivité à l'exutoire principal de la tourbière de Frasne

Lors du suivi de la conductivité électrique des eaux au niveau des 2 tributaires et de l'exutoire principal de la tourbière de Frasne, nous avons été confronté à un certain nombre de difficultés qui au final nous ont empêché d'obtenir les chroniques escomptées. Les problèmes rencontrés sont les suivants :

- sondes CTD Solinst défectueuses ;
- fortes variations entre les mesures de conductivités électriques réalisées manuellement (sonde de terrain) et celles enregistrées par les sondes Solinst ;
- fortes variations entre les mesures de nos sondes Solinst et la sonde OTT de Chronoenvironnement ;
- fortes incertitudes sur les mesures de conductivités électriques enregistrées par les sondes Solinst pour de faibles valeurs.

Au final, les chroniques continues de conductivités électriques enregistrées simultanément sur les 2 tributaires et l'exutoire (Figure 4) couvrent une période limitée (avril 2021 à septembre 2022). De plus, les fortes incertitudes sur les mesures rendent ces données difficilement exploitables.

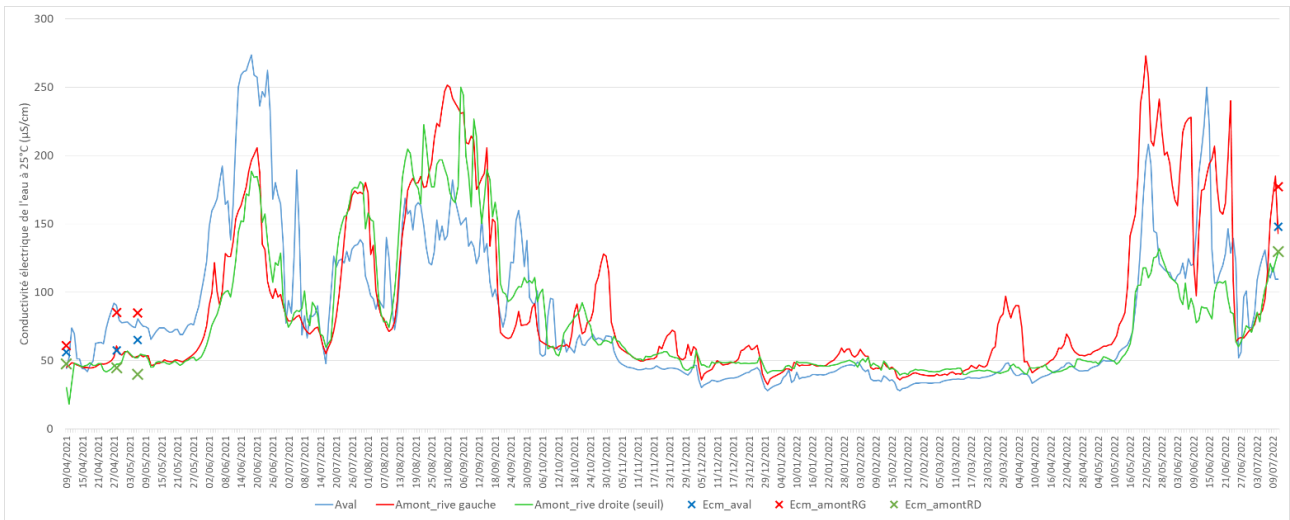


Figure 4 : Suivi en continu de la conductivité électrique de l'eau à l'exutoire principal de la tourbière de Frasne

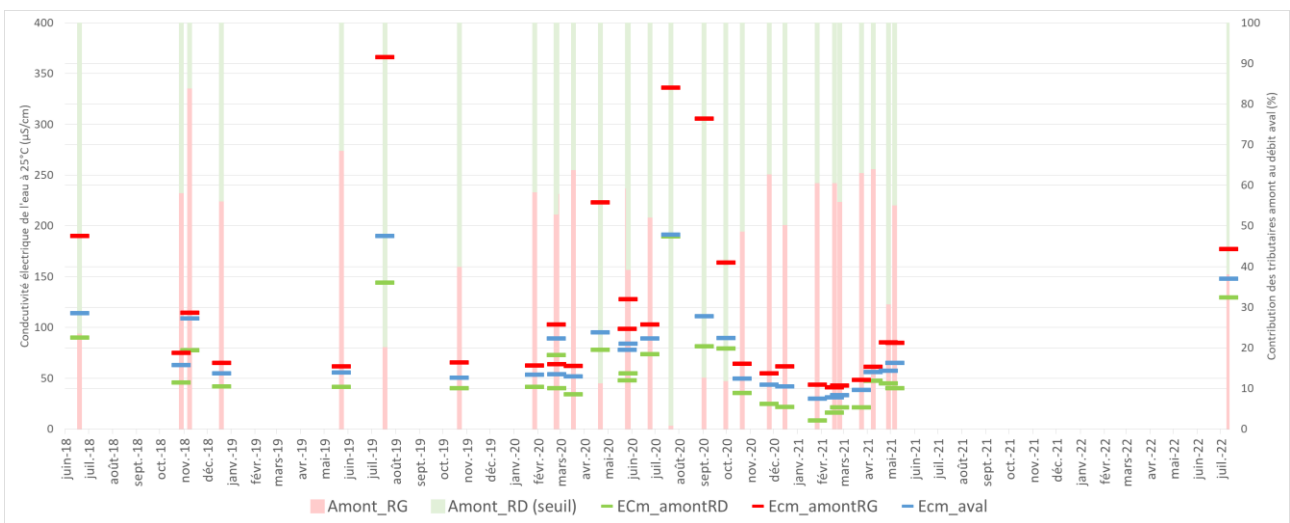


Figure 5 : Estimation de la contribution relative (%) des 2 tributaires à l'exutoire principal

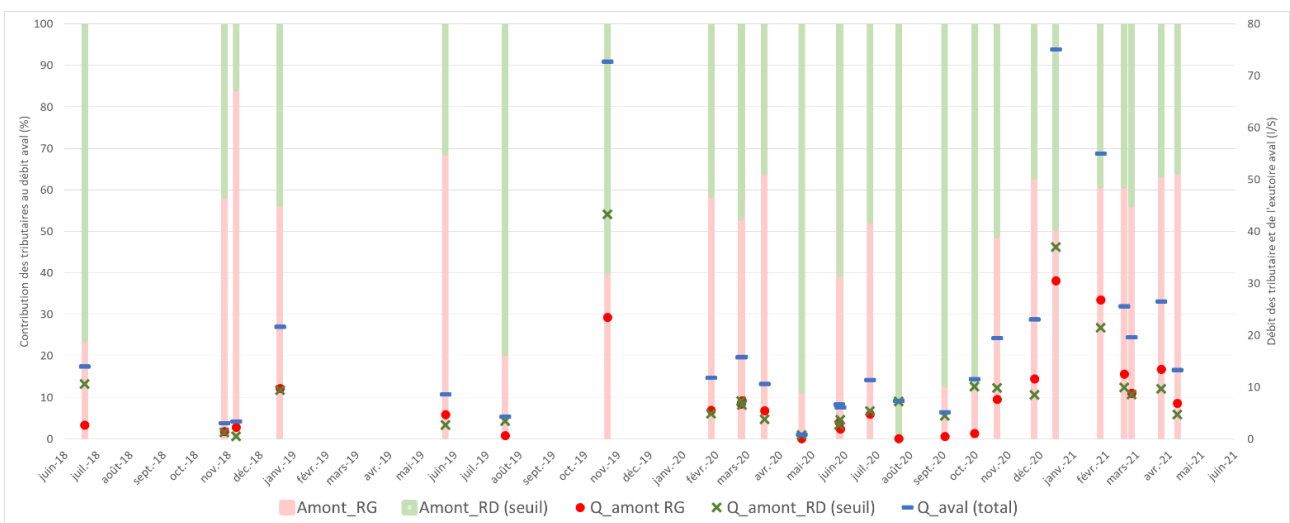


Figure 6 : Estimation de la contribution en débit (l/s) des 2 tributaires à l'exutoire principal

La Figure 4 montre donc le suivi en continu de la conductivité électrique de l'eau (EC) à l'exutoire principal de la tourbière de Frasne. On observe une augmentation de la conductivité électrique en

Partie I - Frasne – Suivi Hydrologique

période estivale, fin mai pour l'année 2021 et début mai pour l'année 2022 où la conductivité dépasse les 100 μ S/cm. Ce phénomène peut s'expliquer de 2 façons :

- la chaleur concentre les éléments présents dans l'eau ;
- une source d'eau plus minéralisée devient prépondérante à l'exutoire.

La deuxième solution est envisageable compte de tenu des conductivités électriques élevées (environ 600 μ S/cm) mesurées en profondeur dans les piézomètres de la tourbière vivante à l'interface avec le substratum (morainique et/ou calcaire) par rapport aux faibles valeurs en surface (environ 40 μ S/cm). Si cette deuxième solution s'avère exacte, la tourbière vivante assure un soutien d'étiage selon deux modalités couplées :

- déstockage de l'eau de pluie à saturation qui masque les apports plus concentrés ayant vraisemblablement un débit plus faible et plus régulier ;
- en fin de période de déstockage des eaux de pluies, les apports plus concentrés deviennent prépondérants pour la valeur de la conductivité électrique à l'exutoire et vraisemblablement pour le soutien d'étiage.

En l'état, il est difficile d'aller plus loin dans l'interprétation. En effet, les données enregistrées par les sondes CTD (Figure 4) diffèrent des données ponctuelles mesurées manuellement (Figure 5). Ces dernières montrent que l'EC de l'exutoire principal (EC_{m_aval}, trait bleu) est toujours intermédiaire quelque que soit la saison entre : 1) les valeurs d'EC du tributaire en rive droite (EC_{m_amontRD} ; trait vert) plus faibles avec des eaux en provenance majoritaire de la partie superficielle de la tourbière vivante ; 2) les valeurs d'EC du tributaire en rive gauche (EC_{m_amontRG}) plus fortes mélangeant des eaux en provenance de la tourbière vivante et d'une autre source (moraine et/ou calcaire ?).

S'il n'est pas possible compte-tenu des incertitudes de travailler avec les données d'EC des chroniques, il est possible à partir des données ponctuelles d'EC de déterminer la contribution relative de chacun des émissaires à l'exutoire principal grâce à une simple équation de mélange. La Figure 5 donne la contribution relative calculée pour chacun des émissaires, en rouge pour l'affluent de la rive gauche (Amont_RG), en vert pour l'affluent de la rive droite (Amont_RD (seuil)). On constate sur ce graphe que les contributions sont relativement équilibrées, voire prépondérantes pour l'émissaire en rive gauche (84% en novembre 2018). Pour d'autres périodes, au contraire, les apports du tributaire en rive droite en provenance de la tourbière vivante sont prépondérants avec 76% des apports en juillet 2018, 79% en juillet 2019 et 99% en juillet 2020).

Connaissant le débit à l'exutoire, il est possible de calculer la contribution de chacun des émissaires. La Figure 6 positionne sur les graphes des apports relatifs (barres rouge et vertes) le débit de l'exutoire (Q_{aval} (total), trait bleu) et des 2 émissaires (Q_{Amont_RG}, disque rouge ; Q_{amont_RD} (seuil), croix verte).

Pour les périodes estivales, les débits à l'exutoire sont faibles : 13,9l/s en juillet 2018, 4,3l/s en juillet 2019 et 7,3l/s en juillet 2020. On observe aussi des valeurs de débits très faibles en avril 2020 (0,8l/s), novembre 2018 (2,9l/s). En période critique, le soutien d'étiage est donc très faible.

Au final, on ne peut que regretter de ne pas disposer de chroniques d'EC fiables. Il faudrait donc utiliser des sondes d'autres marques ou tester les nouvelles sondes Solinst de cinquième génération, utilisées actuellement sur un projet en Ardèche et qui semblent désormais plus fiables pour la mesure de la CE pour de faibles valeurs. Toutefois, à partir des données d'EC ponctuelles, on constate que le soutien d'étiage existe même (pour l'heure actuelle) dans les périodes les plus critiques. Ce soutien d'étiage semble assuré :

- d'une part, par de l'eau de pluie stockée dans la tourbière vivante puis déstockée progressivement ;
- d'autre part par des arrivées d'eau d'une autre source (moraine et/ou calcaire) plus concentrée.

3.3.2. Creux au Lard

La sonde CTD installée au Creux au Lard a permis d'enregistrer un épisode de remplissage/vidange (Figure 7) de la doline depuis le 19 juin 2018 jusqu'au 11 juillet 2022. La sonde est toujours installée dans la doline et enregistre des données au moins jusqu'en juillet 2024.

Novembre 2017 (G. Magnon)

Mars 2017 (F. Paran)



Figure 7 : Remplissage/vidage de la doline du Creux au lard

Entre juillet 2018 et février 2021, 22 épisodes de remplissage/vidange de la doline ont eu lieu. Les volumes d'eau de remplissage (Figure 8) ont été estimés à partir du MNT lidar de Frasne et des hauteurs d'eau mesurées. La relation hauteur/volume et hauteur/surface a été construite en utilisant la fonction « volume » dans ArcGIS. Lorsque la doline est pleine ou presque (environ 11 m de hauteur d'eau) le volume d'eau présent est de l'ordre de 6 200 m³.

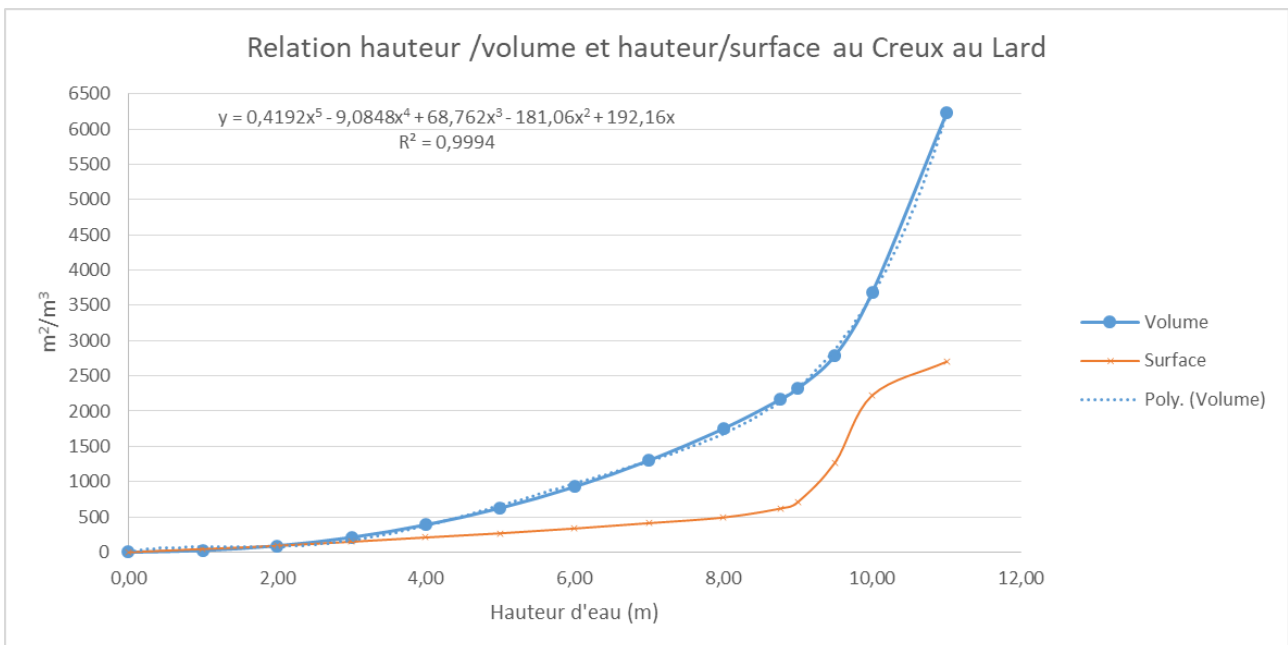


Figure 8 : Relation hauteur d'eau/volume d'eau (courbe bleue) et hauteur d'eau/surface noyée (courbe orange) dans la doline du Creux au Lard

Les figures suivantes (Figure 9 à Figure 12) montrent différents épisodes typiques du remplissage et de la vidange du Creux au lard. Ces figures intègrent : 1) la pluviométrie (mm, barres bleues pleines) ; la température de l'eau (°C, trait vert) ; 3) la conductivité électrique de l'eau (µS/cm à 25°C, trait orange) ;

Partie I - Frasne – Suivi Hydrologique

le niveau d'eau dans la doline (m, trait bleu) ; 4) le volume d'eau calculé d'après la relation hauteur/volume donnée en Figure 8 (m³, barre bleue vide).

L'analyse de ces données montre que pour les épisodes enregistrés la doline du Creux au Lard a un comportement capacitif. En effet, la conductivité électrique de l'eau contenue dans la doline ne dépasse pas des valeurs de 100 µS/cm lors de pics en début de remplissage. On peut supposer que ces pics sont dus à des transports de minéraux liés à un lessivage des sols en début de pluie. En dehors de ce pic, l'eau contenue dans la doline a une conductivité de l'ordre de 30 à 40 µS/cm.

L'analyse de ces chroniques montre donc que la doline du Creux au lard est un exutoire temporaire de la tourbière de Frasne. Des calculs effectués à l'aide de la formule de Torricelli pour la vidange d'un réservoir en eau libre de la forme d'une clepsydre permettent d'estimer la surface équivalente de l'orifice d'évacuation de 10 à 50 cm².

Il ne semble pas d'après les données disponibles que la doline ait un fonctionnement émissif, où de l'eau du karst sous-jacent alimenterait la tourbière.

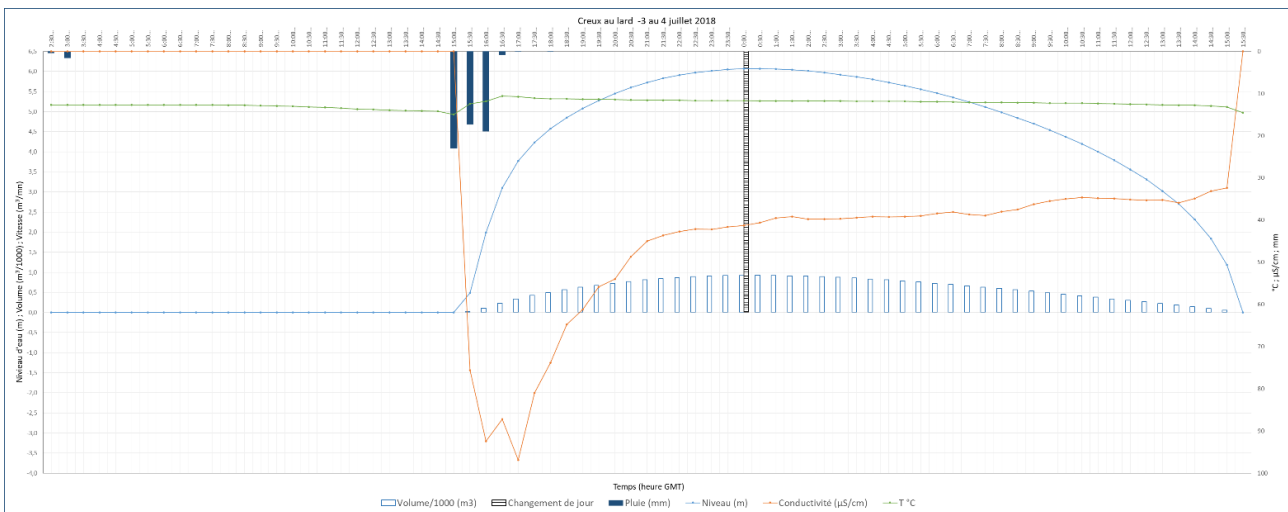


Figure 9 : Remplissage rapide du Creux au lard suite à un orage estival (3 et 4 juillet 2018)

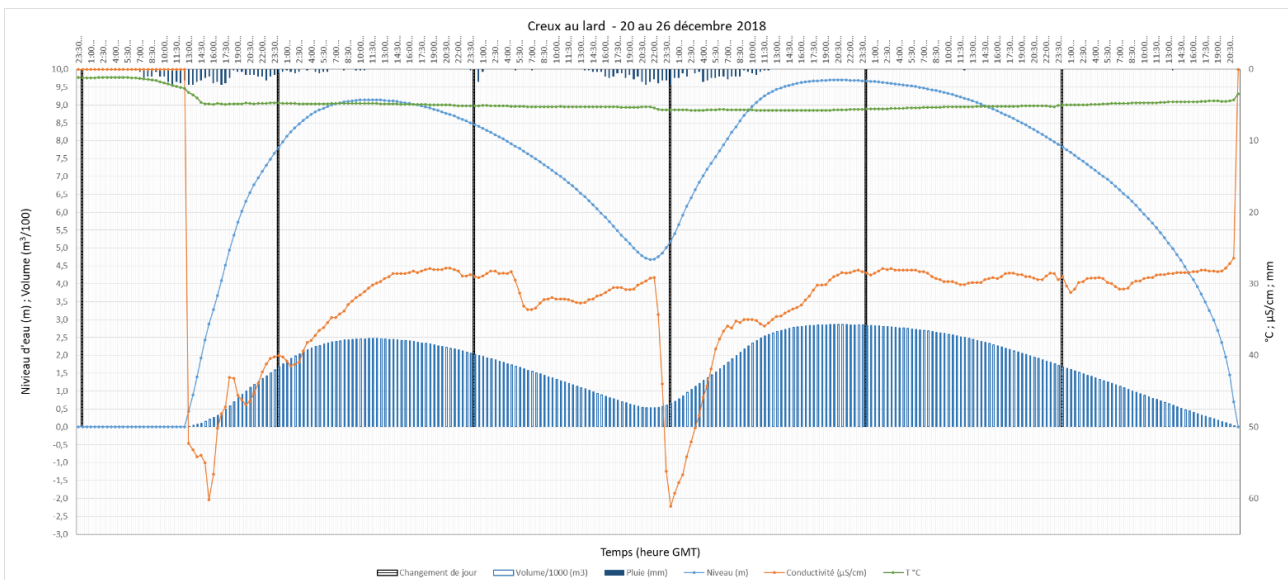


Figure 10 : Remplissage consécutif du Creux au lard suite à 2 épisodes pluvieux hivernaux (20 au 26 décembre 2018)

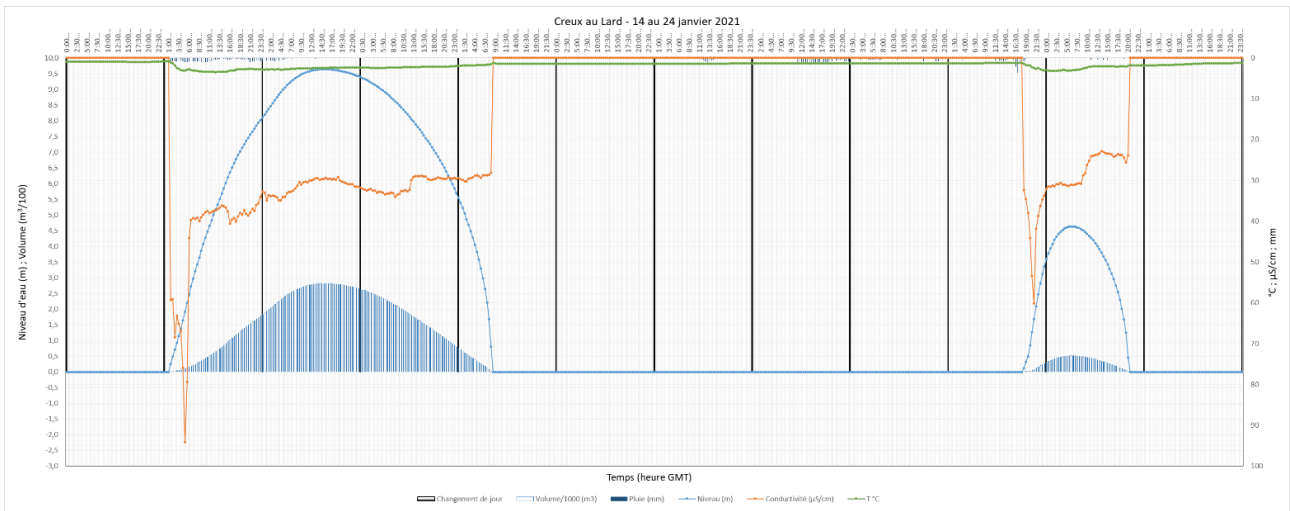


Figure 11 : Remplissage double non consécutif du Creux au lard suite à 2 épisodes pluvieux hivernaux (14 au 24 janvier 2021)

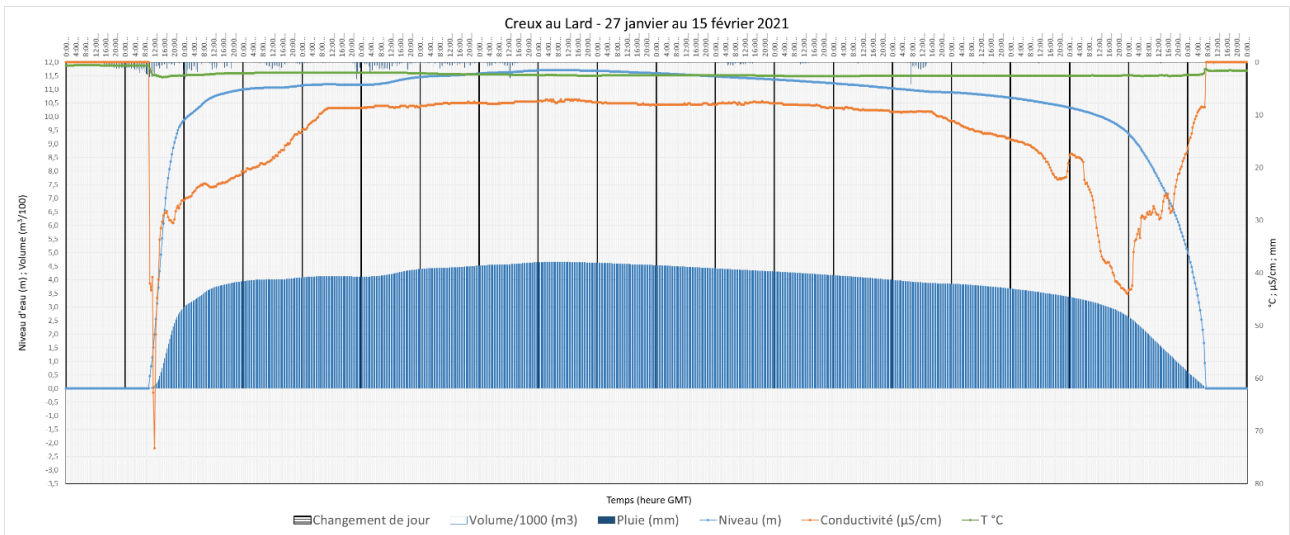


Figure 12 : Remplissage long du Creux au lard lors d'un long épisode pluvieux hivernal avec un niveau d'eau important (jusqu'à environ 11,5 m)

4. Analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones

Cette approche est fondée sur l'analyse des données hydrologiques et les travaux de modélisation engagés en phase 2, puisqu'aucune donnée supplémentaire n'est venue s'ajouter à celles disponibles à l'époque. Les difficultés rencontrées sur le site de Frasné sont multiples. Malgré des obstacles majeurs à l'analyse, des tentatives ont été réalisées durant le stage de Master d'Huseyin Caldirak⁵.

D'abord, le faible volume de données disponibles (2014-2018) ne permet pas de pratiquer la modélisation statistique qui, comme décrit dans le rapport de la phase 2, nécessite de fonctionner avec une base d'apprentissage suffisamment fournie, un ensemble permettant de pratiquer l'arrêt précoce et, évidemment, un ensemble de validation. Ces éléments sont indispensables pour assurer une robustesse permettant de tirer des conclusions significatives. Dans l'état, cela reviendrait à avoir moins de 3 ans d'apprentissage, ce qui est bien trop peu pour apprendre le comportement d'un système complexe.

De surcroît, ce même système n'est pas stationnaire, puisqu'il a subi des modifications structurelles, d'origine exogène (anthropique), en 2016. De ce fait, il n'y a en réalité qu'un peu moins de trois années complètes de données correspondant au fonctionnement actuel du système, qui est le fonctionnement le plus intéressant à décrire puisqu'il représente sa base de fonctionnement pour les périodes à venir. Cette durée ne permet en aucune manière de proposer une modélisation statistique robuste et génératrice de conclusions sur lesquelles s'appuyer.

Enfin, un certain nombre de lacunes dans les données, plus ou moins durables, ont encore défavorisé l'environnement d'analyse. Ces écueils auraient persisté quand bien même deux ou trois années se fussent ajoutées à la base de données.

D'abord, des analyses statistiques ont été réalisées. Elles ont montré que l'interdépendance des différents secteurs de la zone humide était variable dans le temps, ce qui constitue une difficulté pour la modélisation (non stationnarité supplémentaire) et confirme la grande complexité du système, qui avait été pressentie en amont. On a d'ailleurs pu noter que les coefficients d'écoulement étaient variables, souvent particulièrement faibles, attestant soit de pertes d'eau dans la zone humide, soit du simple fait que la mesure en débit effectuée ne représente pas l'ensemble des écoulements sortants.

Dans l'environnement jurassien, cette première hypothèse (pertes) n'est pas à exclure d'emblée. Nombre de pertes d'origine karstique sont observables dans le secteur, même si le substratum semble majoritairement morainique. Il n'est pas à exclure que ce substratum, perméable ou partiellement perméable, autorise une circulation en direction d'un système karstique sous-jacent. Au chapitre des pertes, le massif jurassien est aussi connu pour être propice à l'évapotranspiration, en particulier dans des conditions de fond de combe (températures maximales relativement élevées et ventilation parfois faible).

La seconde hypothèse engage la représentativité plus que la qualité de la mesure en débit. Sans cibler d'erreur de mesure particulière, et gardant en mémoire que les mesures de très bas débits sont soumises à des incertitudes élevées, il est possible que la captation de l'exutoire ciblé soit partielle, soit en raison d'écoulement diffus temporaires ou permanents, soit en raison d'écoulements concentrés, plus rares, en hautes-eaux.

Quoi qu'il en soit, les difficultés dans l'estimation des coefficients d'écoulement sont bien souvent liées aux très faibles pentes du système, dont les contours en surface, déjà difficiles à établir, ne

5. Caldirak H. (2019) Study and Understanding of the Hydrological and Hydrogeological Role of Wetlands of Basin Heads in the Support of Low Flow: Modeling Contributions by Artificial Neural Networks, rapport de stage de Master 2, Université de Poitiers, Mines Alès, 46p.

correspondent probablement pas entièrement aux contours réels, en lien avec des écoulements de subsurface souvent moins intuitifs que de simples écoulements gravitaires.

Les analyses corrélatoires entre les débits mesurés n'ont par ailleurs pas révélé de comportement spécifique à type de soutien d'étiage. On a pu observer des temps de réponse de l'ordre d'une journée et des effets mémoire de moins d'une semaine, ce qui est, somme toute, plutôt bref, ou, en tout cas, pas remarquable. La forme des courbes de corrélation et d'autocorrélation n'a pas apporté plus d'éléments dans le sens d'un soutien d'étiage du système.

Dans un second temps, des tentatives de modélisation par réseaux de neurones ont tout de même été effectuées. Elles donnent des résultats dont la performance se situe entre 0,7 et 0,8 pour ce qui est du critère de Nash. Ces performances relativement élevées ne doivent pas masquer que la capacité à interpréter les résultats reste très faible. On notera simplement que lorsque le système ne produit pas de débit, en étiage sévère, le modèle est incapable d'en faire autant, suggérant, comme à Luitel, une non-stationnarité durant ces périodes.

Afin d'élargir l'horizon de réflexion, il est difficile de ne pas songer à une relation entre l'existence de ces milieux humides en altitude et la fréquence à laquelle sont observés les averses et orages d'évolution diurne sur le massif jurassien. Le maintien de conditions humides associé à l'orographie est connu pour favoriser l'apparition de ce type de phénomène qui, par des apports estivaux relativement réguliers au système, joue aussi, indirectement, un rôle de mitigation des étiages.

5. Traceurs géochimiques

5.1. Contexte de l'étude⁶

L'objectif de cette approche était de caractériser les propriétés géochimiques des eaux du site de Frasne (Doubs) afin d'apporter des éléments de compréhension sur l'alimentation et le fonctionnement de cette zone humide.

5.2. Les zones humides de Frasne

Le complexe tourbeux de Frasne-Bouverans se situe dans le massif du Jura et s'étend sur 293 ha. Il fait partie de la réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne et de Bouverans (Figure 13).

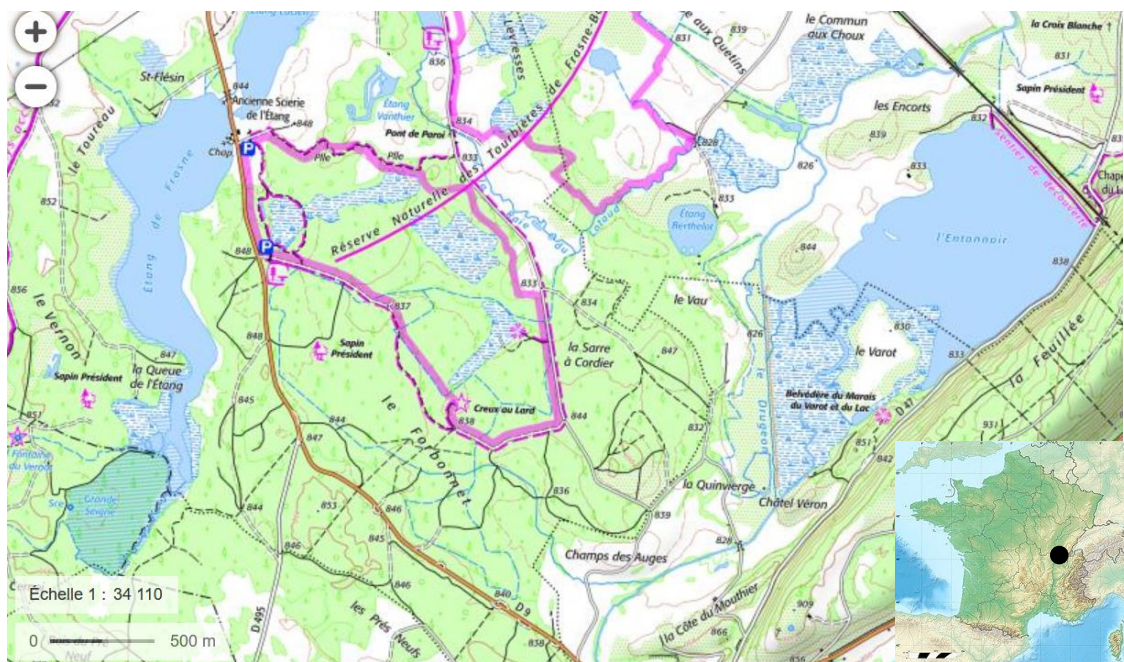


Figure 13 : Carte topographique IGN de la Réserve Naturelle Régionale des tourbières de Frasne et de Bouverans

Cet ensemble repose sur des formations calcaires et marneuses du Jurassique et du Crétacé karstifiées recouvertes par des dépôts morainiques (Figure 14). L'étude a porté plus spécifiquement sur la tourbière vivante de Forbonnet située au sud du complexe pour une superficie de 7 ha en grande partie boisée. Cette tourbière est étudiée depuis les années 2000 et a été instrumentée avec la mise en place notamment de piézomètres et d'une station météorologique. Des fossés de drainage et des fosses d'extraction de tourbe réalisés lors des différentes périodes d'exploitation et d'aménagement de la zone sont répertoriés en périphérie de la tourbière. Des ruisseaux non permanents sont répertoriés en amont et en bordure nord de la tourbière (Figure 15).

6. Contributeurs :

- . Véronique Lavastre et June Chevet - Université Jean Monnet, CNRS-UMR 5276 Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement, 23 rue du Docteur Paul Michelon, 42023 Saint-Étienne Cedex
- . Guillaume Bertrand et Alexandre Lhosmot - Université de Franche-Comté, CNRS -UMR 6249 Chrono-Environnement, 16 Route de Gray, 25000 Besançon
- . Frédéric Paran, Didier Gaillot et Yvan Pascoletti - École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, CNRS UMR5600, Géosciences et environnement, Cours Fauriel, 42000 Saint-Étienne

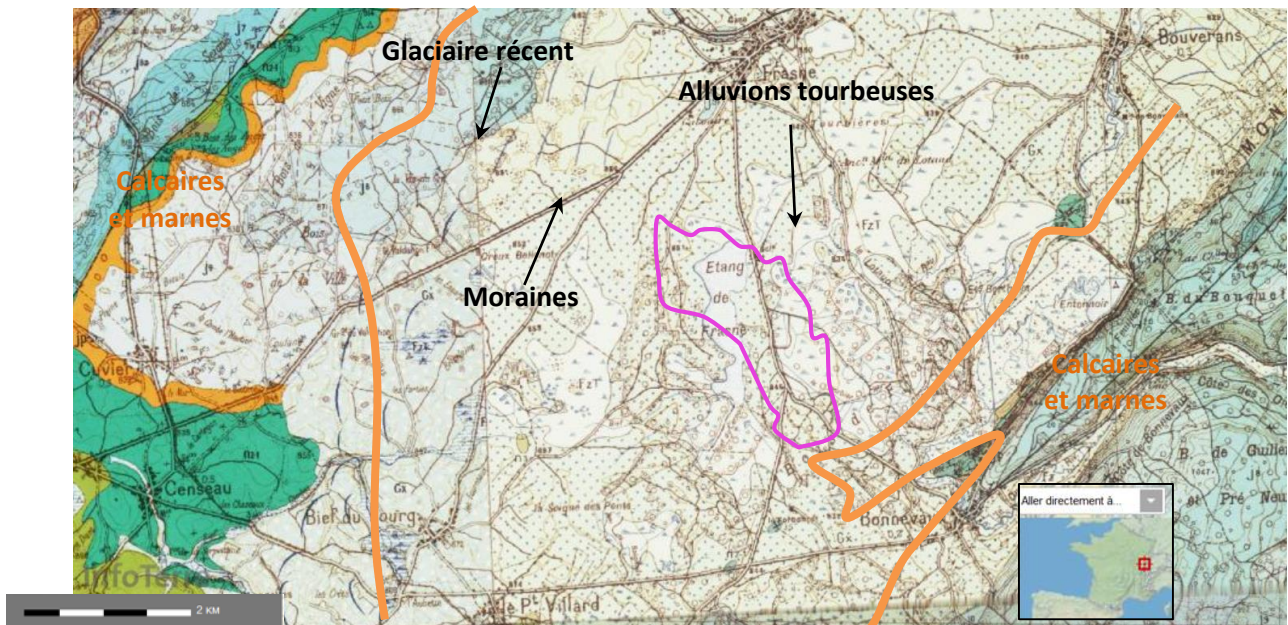


Figure 14 : Carte géologique de la RNR des tourbières de Frasne et de Bouverans. La zone de tourbière étudiée est délimitée par un trait rose

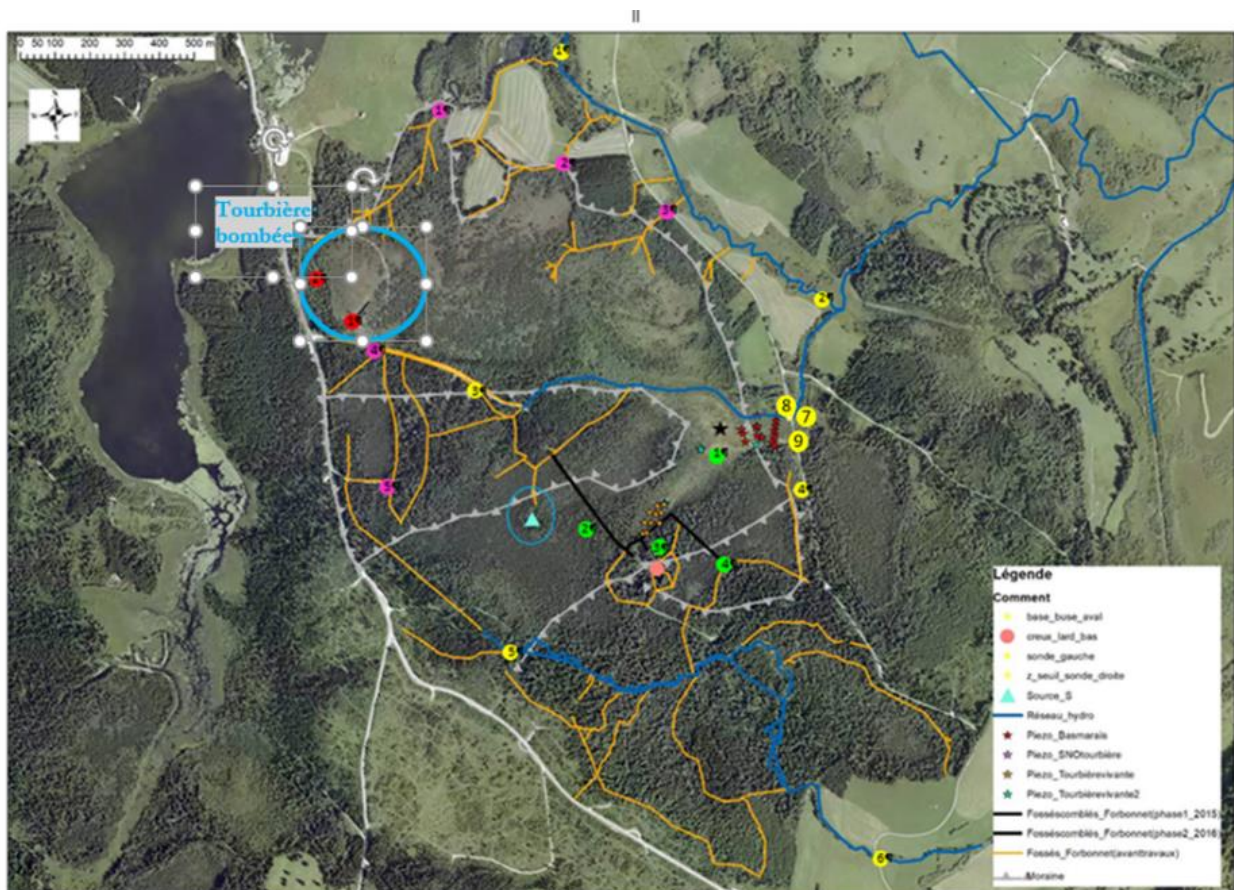


Figure 15 : Photographie aérienne de la zone d'étude. Tourbière du Forbonnet. Localisation des piézomètres (étoiles rouges et jaunes), des ruisseaux (traits bleus, numérotation cercles jaunes) ; des fossés (traits jaunes et noirs, numérotation cercles roses), des fosses (numérotation cercles rouges) et autres zones d'excavation (trous, cercles verts) localisation supposée des moraines (trait gris)

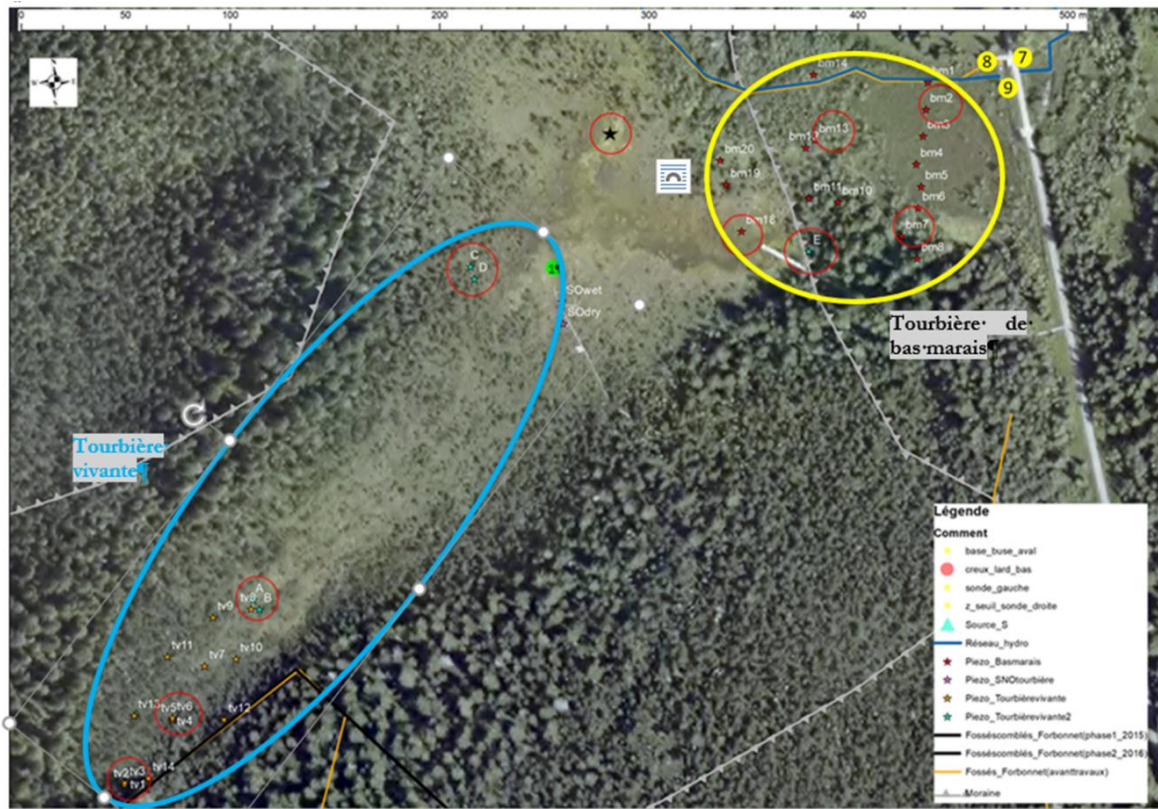


Figure 16 : Vue aérienne détaillée de la tourbière du Forbonnet et localisation des piézomètres (étoiles colorées), des zones excavées (rouleau vert) et des points de prélèvement à l'exutoire de la tourbière (points jaunes)

5.3. Campagnes de prélèvements et méthodologie

Les campagnes de prélèvement ont été réalisées afin de couvrir deux contextes hydrologiques différents, les basses-eaux et les moyennes/hautes-eaux. La caractérisation géochimique des eaux a été réalisée à partir de mesures de terrain et de laboratoire.

5.3.1. Les campagnes de prélèvement

Les prélèvements d'eau ont été réalisés en différents points de la zone d'étude (Tableau 3) sur une sélection de piézomètres permettant de couvrir les différentes zones de la tourbière du Forbonnet. Les eaux de surface ont été prélevées au niveau de 6 ruisseaux répartis sur une large zone autour de la tourbière (Figure 15) et dans une dépression en eau dans la partie nord du secteur. Les eaux souterraines ont été prélevées au niveau de 14 piézomètres répartis dans la tourbière vivante au sud-ouest de la zone humide et dans le secteur de bas-marais et en partie intermédiaire (Tableau 3 et Figure 16). Des zones d'excavation ont été sélectionnées dans l'objectif d'étayer l'échantillonnage précédent et la caractérisation des échanges eaux souterraines et eaux de surface. Il s'agit de fosses situées au nord-ouest de la zone d'étude (Figure 15) formant des couloirs longs de plusieurs dizaines de mètres sur environ 5 mètres de large et quelques mètres de profondeur. Des travaux d'aménagement de la tourbière ont également laissé des dépressions de petites tailles, appelées par la suite « trous » qui se retrouvent aujourd'hui ennoyés et qui ont fait l'objet de prélèvements pour cette étude. Enfin des points de prélèvements ont été définis sur le réseau de fossés.

Une première campagne de prélèvement a été réalisée conjointement par les membres de l'équipe EVS et LGL-TPE en contexte de basses-eaux les 18 et 19 juillet 2019. Celle-ci a permis la collecte de 27 échantillons (tableau 1) d'eau prélevés au niveau des cours d'eau situés à proximité de la tourbière de Forbonnet, dans des piézomètres distribués sur l'ensemble de la zone humide et dans les zones d'excavation (anciennes fosses d'exploitation de tourbe et fossés de drainage).

Partie I - Frasne – Traceurs géochimiques

| Catégorie | Sous-catégorie | Milieu | Symbole | Nom | Campagne juillet 2019 | Campagne novembre 2020 |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------------|------------|---|--|
| Eau souterraines | Piézomètres | Tourbière vivante | ★ | PA | X | X |
| | | | ★ | PB | X | X |
| | | | ★ | PTV8 | X | |
| | | | ★ | PC | X | X |
| | | | ★ | PD | X | X |
| | | ★ | GB | X | Eaux prélevées en surface et en profondeur | |
| | | Bas-marais | ★ | BM1 | | Eaux prélevées en surface et en profondeur |
| | | | ★ | BM2 | X | |
| | | | ★ | BM7 | X | X |
| | | | ★ | BM14 | X | X |
| | ★ | | BM12 | | Eau prélevée en surface et en profondeur | |
| | ★ | | BM13 | X | | |
| | ★ | | BM18 | X | Eau prélevée en surface et en profondeur X | |
| ★ | PE | X | X | | | |
| Eaux de surface (milieu naturel) | Cours d'eau | Ruisseau n°2 | ① | RU 2 Amont | X | X |
| | | | ② | RU2 Aval | X | X |
| | | Ruisseau n°3 | ③ | RU3 Amont | X | X |
| | | | ⑧ | RU 3 Aval | Prélèvement en amont de la confluence des ruisseaux n° 3 et 4 | |
| | | Ruisseau n°4 | ④ | RU 4 Amont | X | X |
| | | | ⑨ | RU 4 Aval | Prélevé en amont de la confluence des ruisseaux n° 3 et 4 | |
| | | Ruisseau n°5 | ⑤ | RU 5 | X | X |
| | | Ruisseau n°6 | ⑥ | RU 6 | X | X |
| | | Ruisseau n°7 | ⑦ | RU 7 | Prélèvement réalisé à l'exutoire de la tourbière en aval de la buse située en bordure de la route | |
| | | Lac | Petite dépression | | LAC | X |
| | Eaux de surface (Zones d'excavation) | Trous | Tourbière boisée | ② | TR2 | X |
| ③ | | | | TR3 | X | X |
| ④ | | | | TR4 | X | X |
| Fosses | | Tourbière bombée | ① | Fosse 1 | X | X |
| | | | ② | fosse 2 | X | X |
| Fossés | | Tourbière boisée | ① | FO1 | Pas d'écoulement | X |
| | | | ② | FO2 | | X |
| | | | ③ | FO3 | | X |
| | | | ④ | FO4 | | X |
| | ⑤ | | FO5 | X | | |

Tableau 3 : Liste des points de prélèvements choisis sur le secteur de la tourbière du Forbonnet et symbole de représentation sur les photos aériennes de la Figure 15 et de la Figure 16

Une deuxième campagne a été réalisée par les membres de l'équipe Chrono-Environnement les 24 et 25 novembre 2020 en contexte de moyennes/hautes-eaux. L'échantillonnage a été reproduit sur les mêmes points de prélèvements à l'exception des points BM13 et BM2 pour lesquels le prélèvement a été effectué dans des piézomètres situés à proximité (BM12 et BM1 respectivement). Le contexte de

moyennes-eaux/hautes-eaux a permis l'échantillonnage de fossés supplémentaires par rapport à celui réalisé en juillet 2019. Cette campagne a permis de rassembler 34 échantillons.

Cette étude a bénéficié du travail de collecte, de suivi et de caractérisation isotopique des précipitations réalisé par l'équipe de Chrono-Environnement sur la période avril 2018-mai 2021. Le collecteur d'eau de pluie est installé au niveau de la plate-forme expérimentale (Figure 16).

5.3.2. Approche géochimique mise en œuvre

Afin de contraindre au mieux l'origine et le chemin des eaux et les échanges eaux de surface/eaux souterraines sur le site d'étude, différents traceurs géochimiques ont été utilisés dépendants des interactions eau-atmosphère ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et dépendants des interactions eau-roche (éléments majeurs). Les paramètres physico-chimiques des eaux (T, pH, EC, O_2) ont été mesurés sur le terrain et les concentrations en espèces majeures (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) et les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) ont été déterminées en laboratoire. Les attentes vis-à-vis des différents traceurs naturels utilisés et les techniques employées pour l'acquisition des données sont présentées ci-dessous.

5.3.2.1. Paramètres physico-chimiques

Le pH, la température, la conductivité et l'oxygène dissous ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'une sonde multi-paramètres VWT 3420Tc. L'alcalinité a été déterminée sur le terrain par titration volumétrique (1,6 et 0,6N H_2SO_4) avec un kit de Hach. La mise en œuvre de ce test colorimétrique a été compromise par la coloration et le pH faible de certaines eaux de la tourbière.

5.3.2.2. 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 (activité industrielle, agricole, rejets domestiques, ...).

Les eaux prélevées ont été conditionnées sur le terrain dans des flacons HDPE 60 mL puis filtrées sur le terrain ou au laboratoire à 0,45 μm avec un filtre en nitrate de cellulose. Les échantillons ont ensuite été stockés à 5°C jusqu'à analyse. Les concentrations en cations et en anions des échantillons des deux campagnes ont été mesurées par chromatographie ionique (modèle : Metrohm ECO IC) au LGL-TPE à Saint-Étienne. Une solution 3,2 mM Na_2CO_3 / 1 mM NaHCO_3 a été utilisée comme éluant pour l'analyse des anions et un suppresseur chimique (MSM) permet d'abaisser la conductivité. Pour les cations, une solution 1,7 mM HNO_3 est utilisée comme éluant. Les anions et les cations sont séparés en utilisant des colonnes chromatographiques, Metrosep A Supp5 Guard/4.0 et Metrosep C4 250/4.0, respectivement. L'intervalle de confiance pour les concentrations mesurées est de $\pm 5\%$.

5.3.2.3. Les isotopes de l'eau

Les isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^{16}O , ^1H , Deutérium ou ^2H) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux (zone de recharge, mélange, saisonnalité) dans des environnements variés [montagne, aquifères fracturés, ... (Coplen et al., 2000 ; Barbieri et al., 2005 ; Chapman et al., 2003 ; Gurrieri et Furniss, 2004 ; Kendall et Caldwell, 1998 ; Maréchal et Etcheverry, 2003 ; Rademacher et al., 2002)]. Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}\text{O}$ et δD , expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau de mer (SMOW). Les $\delta^{18}\text{O}$ et δD des précipitations sont contrôlés par les conditions de formation de ces dernières : température de surface (effet saisonnier), latitude, altitude. Sur un diagramme « δD vs $\delta^{18}\text{O}$ », les eaux de pluies se répartissent le long de la droite mondiale des eaux météoriques mondiales. Une droite des eaux météoriques locales a été définie par l'équipe Chrono-Environnement (Lhosmot et al., 2022) à partir des précipitations collectées mensuellement sur la tourbière du Forbonnet entre avril 2018 et mai 2021. L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux

Partie I - Frasne – Traceurs géochimiques

de rivière et des eaux souterraines présentent les mêmes caractéristiques que les eaux de pluie qui les alimentent : variations saisonnières et effet d'altitude. Dans un contexte d'eaux circulantes le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'origine spatiales et/ou temporelles différentes.

Les eaux prélevées ont été conditionnées sur le terrain dans des flacons en verre ambré de 20 mL, acheminés et stockés au laboratoire à 5°C jusqu'à analyse. Les eaux ont ensuite été analysées sur un banc d'équilibration isotopique (Gas Bench, Thermo) couplé à un spectromètre de masse (Delta V plus, Thermo). L'équilibration de la vapeur d'eau échantillon avec un mélange hélium – CO₂ 2% est menée durant 24 heures à température ambiante avant analyse isotopique. Pour l'analyse isotopique de l'hydrogène, l'équilibration entre la vapeur d'eau et le mélange de gaz He-H₂ 9% est menée durant 2 heures à température ambiante en présence d'un barreau de platine qui sert de catalyseur. Les standards internationaux GISP, SMOW-2 et SLAP ont été utilisés pour la calibration.

Les valeurs isotopiques sont reportées avec la notation δ en ‰ vs SMOW :

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000$$

avec $R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et $R = \frac{\text{H}}{\text{D}}$ pour le δD

L'incertitude des mesures est de $\pm 0,1\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $\pm 1\text{‰}$ pour le δD .

5.4. Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux des tourbières de Frasne

5.4.1. Les précipitations

Le suivi isotopique des précipitations de Frasne réalisé par le laboratoire Chrono-Environnement a permis de mettre en évidence un contraste dans les signatures isotopiques pour les périodes 2019-2020 et 2020-2021. Il en ressort la détermination de deux droites (Équation 1 et Équation 2) des eaux météoriques locales :

$$\delta^{18}\text{O} = 7,8 \times \delta^{2}\text{H} + 6,8$$

Équation 1 : Droite des eaux météoriques locales pour 2019-2020

$$\delta^{18}\text{O} = 8,1 \times \delta^{2}\text{H} + 13$$

Équation 2 : Droite des eaux météoriques locales pour 2020-2021

Les $\delta^{18}\text{O}$ les plus négatifs sont observés pour les pluies des mois de décembre à mars :

$$\rightarrow -15,9 < \delta^{18}\text{O} < -7,7\text{‰}/\text{SMOW}$$

Les moins négatifs sont observés pour les pluies des mois de juin à septembre :

$$\rightarrow -9,1 < \delta^{18}\text{O} < -3,4\text{‰}/\text{SMOW}$$

5.4.2. La campagne de juillet 2019 – Basses-eaux

5.4.2.1. Paramètres physico-chimiques

L'ensemble des eaux collectées sur la zone d'étude se répartissent dans une gamme de pH allant de 3,6 à 7,5 et dans une gamme de conductivité allant de 20 à 687 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 17). Les conductivités les plus faibles ($< 100 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont associées aux pH les plus acides ($< 6,2$) et se retrouvent au niveau des eaux prélevées dans les zones d'excavation TR2 à 4, au niveau de la fosse n°1, du ruisseau 4 amont et des piézomètres BM18, GB et PE. Ces trois piézomètres se situent dans la zone intermédiaire à la tourbière vivante et la zone de bas-marais. Les conductivités les plus élevées ($> 500 \mu\text{S}/\text{cm}$) sont associées à des pH compris entre 6,2 et 6,5 et se retrouvent dans les eaux des piézomètres de la tourbière vivante PA et PTV8 et PC.

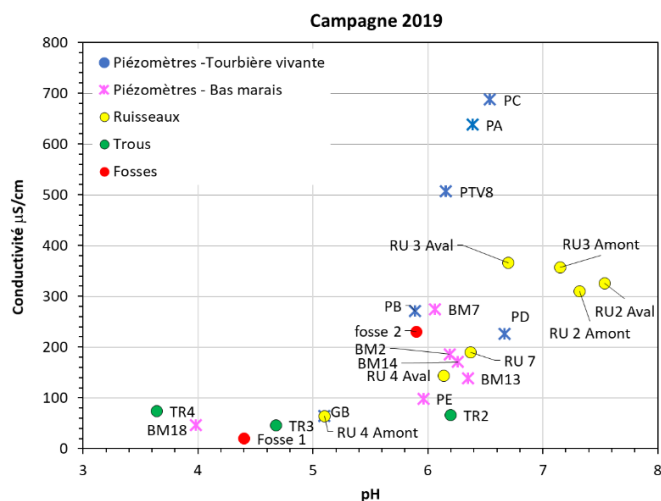


Figure 17 : Variations du pH et des conductivités pour les eaux collectées sur le secteur de la tourbière du Forbonnet en juillet 2019

Les compositions chimiques des eaux collectées permettent de définir un faciès bicarbonaté calcique (Figure 18). Les concentrations en Ca^{2+} varient entre 1 et 132 mg/L. Mg^{2+} est le deuxième cation majoritaire avec des concentrations variant entre 0,1 et 4,7 mg/L. Les concentrations en chlorures sont relativement faibles avec de valeurs inférieures à 5 mg/L. Les eaux collectées sont pauvres en sulfates et en nitrates (<3 mg/L). L'étude des corrélations entre les 7 paramètres pH, conductivité, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- a été menée par analyse factorielle en composantes principales. Les données obtenues sur l'ensemble des eaux s'organisent sur 2 axes principaux expliquant 72% de la variance (Figure 19). Le facteur 1 (F1) explique 45,5% de la variance et il associe pH, conductivité, Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le facteur 2 (F2) associe Na^+ et Cl^- et explique 26,5% des données. Un score élevé sur l'axe 1 suggère l'influence de sources en capacité d'apporter Ca^{2+} et Mg^{2+} . Cette tendance est définie principalement par les données obtenues sur les eaux des piézomètres PA, PC et PTV8 (Figure 16), tous trois situés dans la partie amont de la tourbière vivante. Le facteur 2 associe Na^+ et Cl^- et est défini par les données obtenues sur les eaux de la Fosse 1. Ces eaux se démarquent fortement des autres échantillons collectés sur le secteur d'étude avec des concentrations en Cl^- (jusqu'à 25 mg/L) et Na^+ (16,5 mg/L) relativement élevées. À l'opposé de la tendance définie par les eaux des piézomètres PA, PC, PTV8 se trouvent les eaux des zones d'excavation TR2 à 4, des piézomètres BM18 et PE et de la fosse 1. Il s'agit des eaux de faibles conductivités et à pH acide recensées précédemment (Figure 17).

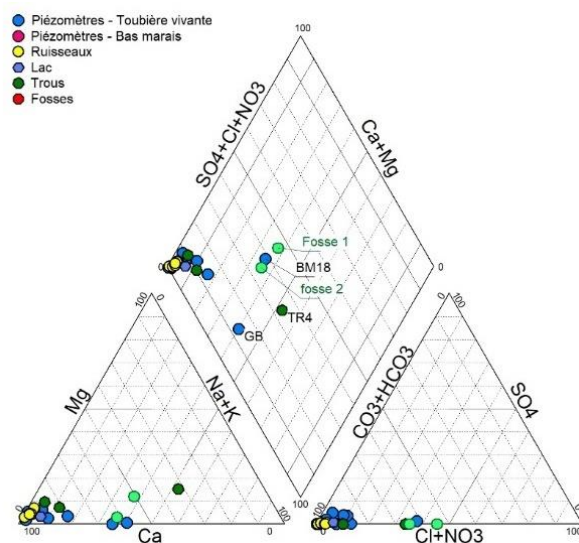


Figure 18 : Distribution dans un diagramme de Piper des échantillons d'eau collectés sur le secteur de la Tourbière du Forbonnet en juillet 2019

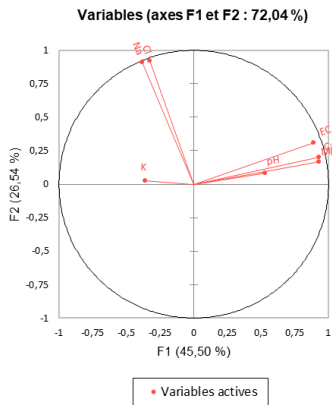


Figure 19 : Cercle des corrélations de l'ACP effectuée à partir des données obtenues sur les eaux la tourbière du Forbonnet de juillet 2019

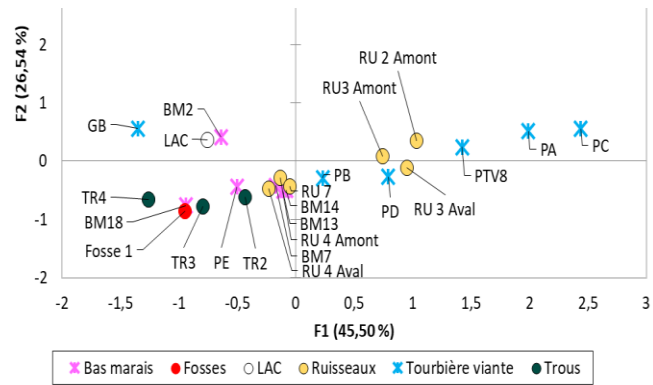


Figure 20 : Graphique des observations – Représentation des observations dans l'espace ACP. Eaux de la tourbière du Forbonnet – campagne de juillet 2019

5.4.2.2. Les données isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD

La distribution des données dans le graphique δD vs $\delta^{18}\text{O}$ (

Figure 21) apporte un éclairage complémentaire aux observations précédentes. Les eaux des piézomètres de la tourbière vivante (PC, PA, PB et PTV8) présentent les signatures isotopiques les plus négatives ($-9 < \delta^{18}\text{O} < -8,6\text{‰}$; $-62,7 < \delta\text{D} < -60,1\text{‰}$ respectivement) de la gamme mesurée et très proches les unes des autres. Ces eaux se placent sur la droite des eaux météoriques locales. Les eaux des zones d'excavation (trous et fosses) et des ruisseaux n°2 et n°4 amont s'éloignent très fortement de la droite des eaux météoriques locales et présentent des $\delta^{18}\text{O}$ et δD plus élevés ($\delta^{18}\text{O} > 6,2\text{‰}$; $\delta\text{D} > -50\text{‰}$) que les eaux de la tourbière vivante, suggérant la perturbation des compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD par un processus d'évaporation. Ce dernier serait plus intense pour les eaux du trou n°4. Enfin, les eaux des piézomètres de la tourbière de bas-marais et des ruisseaux 3, 4 aval et 7 se trouvent en position intermédiaire aux pôles définis par les eaux des zones d'excavation et par les eaux de la tourbière vivante.

Ces observations permettent de souligner plusieurs points :

- une alimentation d'origine différente ou à partir de mêmes masses d'eau intervenant en proportions différentes pour la tourbière vivante et la tourbière de bas-marais ;
- l'absence de renouvellement des eaux des zones d'excavation durant la période d'été ;
- l'alimentation du ruisseau n° 2 à partir d'un réservoir soumis à l'évaporation ou une vitesse d'écoulement très lente ;
- l'alimentation des ruisseaux 3 et 4 dans la zone exutoire et le piézomètre BM14 situé à proximité du ruisseau 3 par des masses d'eau de même signature isotopique (signature isotopique unique ; $\delta^{18}\text{O} = -7,75\text{‰}$; $\delta\text{D} = -57,6\text{‰}$) ;
- un apport souterrain suggéré pour le ruisseau 4 le long de son parcours par l'évolution de la signature isotopique de l'amont ($\delta^{18}\text{O} = -6,2\text{‰}$; $\delta\text{D} = -50,03\text{‰}$) à l'aval ($\delta^{18}\text{O} = -7,74\text{‰}$; $\delta\text{D} = -57,22\text{‰}$) ;
- des propriétés en dehors des tendances précédentes pour les eaux de la fosse 2 enrichies en Na et Cl qui suggèrent localement une contribution différente de celle des pôles 1 et 2.

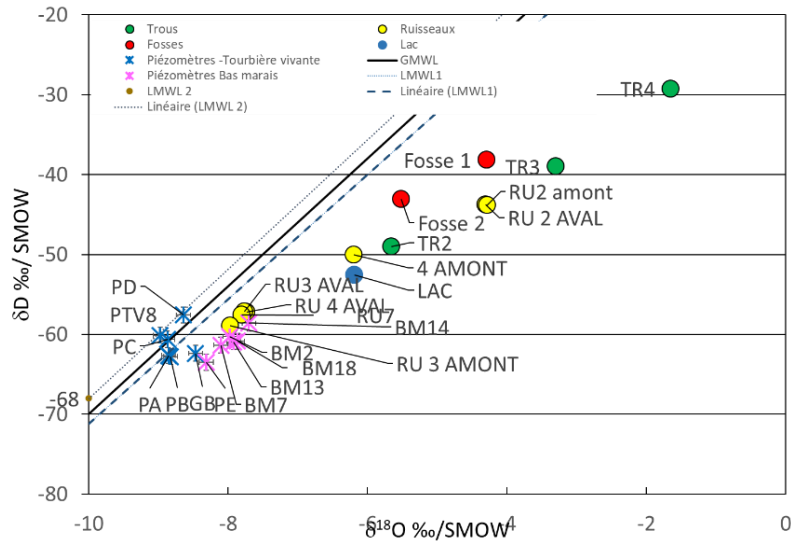


Figure 21 : Distribution dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ des eaux des piézomètres, des zones d'excavation et des ruisseaux de la zone humide du Forbonnet. GMWL : Global Meteoric Water Line ; LMWL : Local Meteoric Water Line

5.4.2.3. Caractéristiques des masses d'eau identifiées et implications en termes d'alimentation de la zone d'étude en basses-eaux

L'analyse en composantes principales et l'analyse des données isotopiques permettent d'identifier deux masses d'eau principales contribuant à l'alimentation des zones d'excavation, des ruisseaux et de la tourbière en période de basses-eaux de juillet 2019 :

- **Pôle 1.** Une masse d'eau enrichie en Ca^{2+} et Mg^{+} , avec une conductivité élevée ($610 \pm 94 \mu S/cm$) et des $\delta^{18}O$ et δD moyens de $-8,9\text{‰} \pm 0,1\text{‰}/SMOW$ et $-61,5 \pm 1,4\text{‰}/SMOW$ respectivement. Le point le plus représentatif serait le piézomètre PC situé dans la tourbière vivante. La composition chimique de ces eaux suggère l'influence des formations sédimentaires carbonatées sous-jacentes à la tourbière voire du bassin-versant.
- **Pôle 2.** Une masse d'eau présentant de faibles conductivités (20 à $74 \mu S/cm$), des pH acides (3,6-4,4) et qui se retrouve au niveau du piézomètre BM18 et zones d'excavation TR4 et fosse 1. Ces eaux exposées aux échanges avec l'atmosphère au niveau des zones d'excavation TR4 et Fosse 1 verraient les compositions isotopiques affectées pour atteindre des $\delta^{18}O$ et δD de $-3 \pm 1,9\text{‰}$ et de $-33,7 \pm 6,3\text{‰}/SMOW$ respectivement. Les faibles valeurs de conductivité mesurées et les $\delta^{18}O$ et δD affectés par le processus d'évaporation pour les zones d'excavation suggèrent une eau circulant principalement en surface ayant peu ou pas interagi avec le substratum rocheux et influencée par l'acidité du milieu des tourbières.

Les eaux de la fosse 2 se démarquent des pôles 1 et 2 et suggèrent localement des influences différentes en capacité d'apporter du NaCl (formation géologique ? sels de déneigement en provenance des routes du bassin versant ?).

Le traitement du jeu de données obtenues permet d'apporter des éléments sur l'alimentation et la circulation d'eau en période de basses-eaux sur la zone d'étude :

- alimentation de la tourbière vivante à partir d'eau ayant interagi avec les formations carbonatées sous-jacentes (Pôle 1). Cette influence n'est pas homogène sur la tourbière vivante, le Pôle 1 et le Pôle 2 agissent probablement en proportions variables d'un point à l'autre. Malgré la très forte proximité des piézomètres PTV8 PA et PB, et des piézomètres PC et PD, il est observé des variations très significatives des conductivités et du pH ;
- alimentation de la tourbière de bas-marais par des eaux probablement avec une influence plus marquée du Pôle 2 que du Pôle 1 et plus spécifiquement pour le piézomètre BM18 ;

- alimentation des zones d'excavation Fosse 1, TR2, TR3 et TR4 par des eaux de pluie ayant essentiellement interagi avec la tourbière (Pôle 2), pas de renouvellement durant la période de basses-eaux de juillet 2019 ;
- l'influence du Pôle 2 sur la chimie des eaux des ruisseaux 2 et 3 apparait plus marquée que pour le ruisseau 4 ;
- contribution de la tourbière à l'alimentation du ruisseau 3, 4 et donc 7.

5.4.3. La campagne de novembre 2020 – Moyennes-eaux/Hautes-eaux

Lors de la campagne de novembre 2020 réalisée à moyennes-eaux/hautes-eaux, un ruissellement a été observé sur l'ensemble des ruisseaux et fossés répertoriés (Figure 15, Figure 16, Tableau 3).

5.4.3.1. Paramètres physico-chimiques

La gamme de pH couverte par les eaux collectées dans les ruisseaux, les zones d'excavation et les piézomètres s'étend de 3,5 à 8 et la gamme des conductivités s'étend de 14 à 618,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces gammes sont très similaires à celles obtenues pour les eaux collectées en juillet 2019. Les pH les plus acides sont associés aux conductivités les plus faibles ($<100 \mu\text{S}/\text{cm}$) qui sont mesurées sur les eaux du piézomètre GB (14,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de la fosse n°1 (22 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les eaux de la zone d'excavation TR4 (pH=3,5). Les données obtenues pour les eaux des ruisseaux et des fossés décrivent une corrélation pH-conductivité positive avec les valeurs maximales mesurées pour les eaux du ruisseau n°6 (pH=8 et EC=361 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les conductivités les plus élevées sont mesurées sur les eaux des piézomètres PA et PC (547 et 618,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

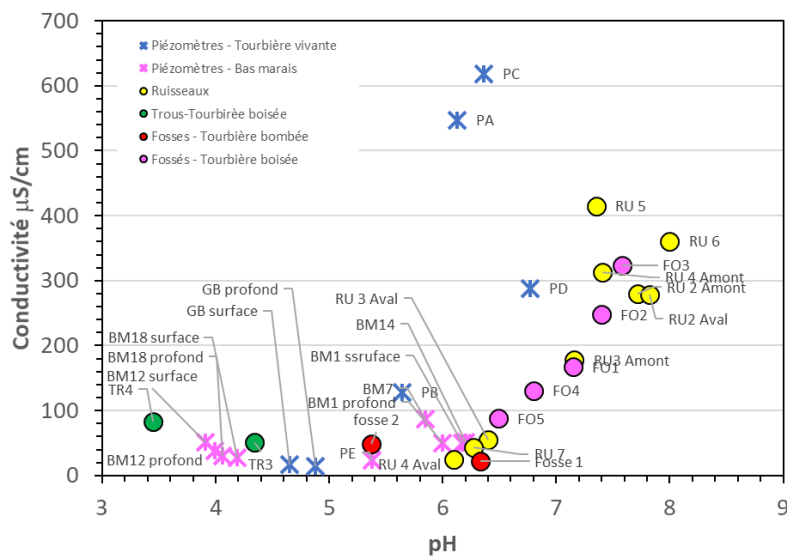


Figure 22 : Variations du pH et de la conductivité pour les eaux des ruisseaux, des zones d'excavation et des piézomètres de la tourbière de Forbonnet en novembre 2020

Le faciès chimique des eaux étudiées est bicarbonaté calcique (Figure 23). Les concentrations en calcium varient de 1 mg/l pour les eaux des zones d'excavation TR3 et 4 à 69,8 mg/L pour les eaux du fossé n°3.

Une analyse en composante principale a été réalisée sur les 6 paramètres principaux permettant de décrire les eaux des ruisseaux, des zones d'excavation et de la tourbière de bas-marais : pH, conductivité, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- . Les données obtenues sur les eaux du piézomètre PD représentent la tourbière vivante dans cette ACP. Les données s'organisent ainsi sur 2 axes principaux expliquant 86% de la variance (Figure 24). Le facteur 1 (F1) explique 67,5% de la variance et il associe pH, conductivité, Ca^{2+} et Mg^{2+} . Il est principalement décrit par les eaux des fossés n° 2 et 3 et par les eaux

des ruisseaux 2 et 4 amont. Le facteur 2 (F2) associe Na^+ et Cl^- et explique 18,7% des données. Le facteur 2 est défini principalement par les eaux du ruisseau 6. L'influence couplée Na-Cl se retrouve également sur les eaux de la fosse 2, des fossés 1 et 4 et du ruisseau 5.

Les eaux des piézomètres de la tourbière de bas-marais et des zones d'excavation TR3 et 4 se démarquent des tendances définies par les axes F1 et F2 avec notamment des conductivités inférieures à $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ et des pH inférieurs à 6,4 et l'absence de corrélation pH-Conductivité-Ca-Mg.

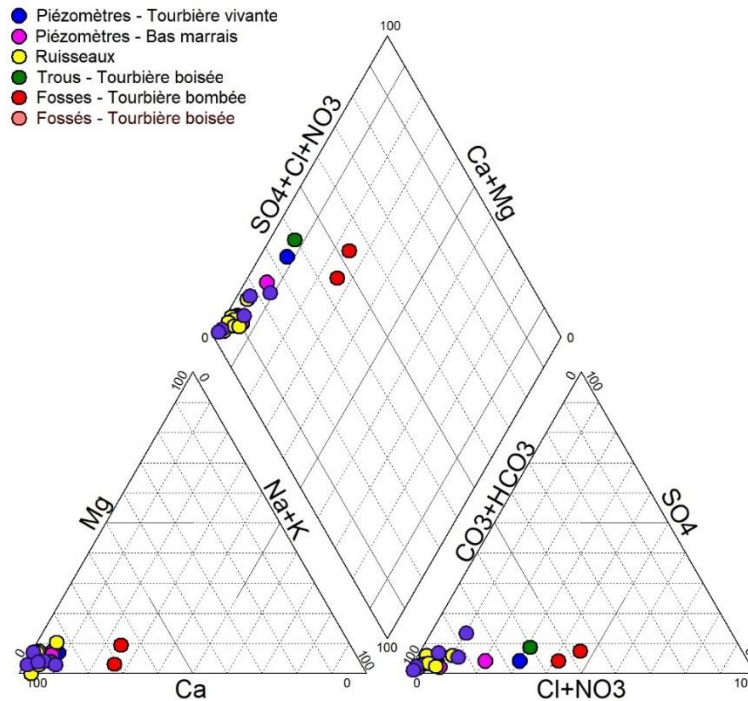


Figure 23 : Distributions sur un diagramme de Piper des échantillons d'eau collectés en novembre 2020

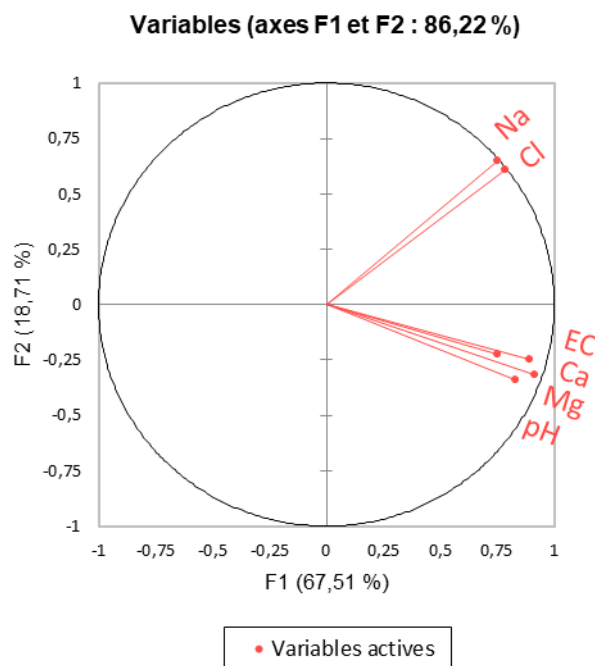


Figure 24 : Cercle des corrélations de l'ACP effectuée à partir des données obtenues sur les eaux de la tourbière du Forbonnet de novembre 2020

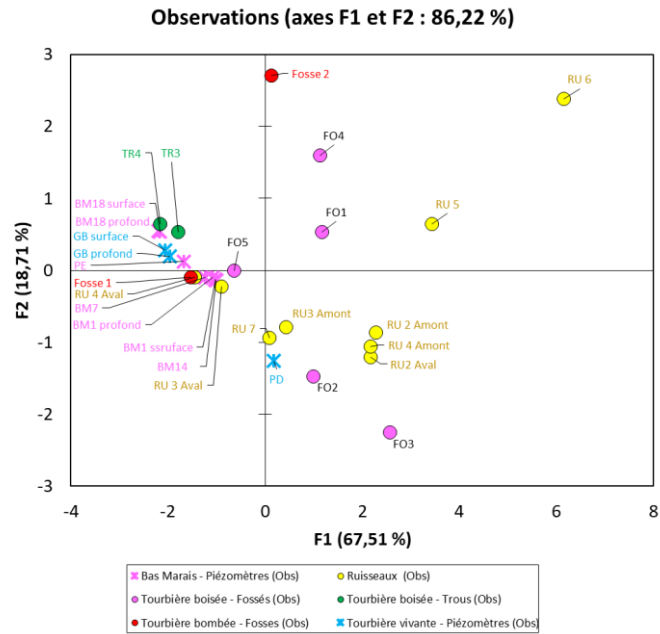


Figure 25 : Graphique des observations – représentation des observations dans l'espace ACP – Eaux de la tourbière du Forbonnet – Campagne de novembre 2020.

5.4.3.2. Les compositions isotopiques

Les compositions isotopiques des eaux de la campagne de novembre 2020 présentent une faible gamme de variation $-8,4 \pm 0,7\text{‰}$ et $-55,87 \pm 4,6\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD respectivement. Sur un diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ L'ensemble des eaux analysées se placent le long de la droite des eaux météoriques mondiales (Figure 26). Ces gammes de variation obtenues ne laissent pas apparaître de différences significatives entre les eaux des tourbières vivante et de bas-marais, des ruisseaux et des zones d'excavation. Seules les eaux du ruisseau 2 aval et du piézomètre BM18 se démarquent avec des $\delta^{18}\text{O}$ et δD plus élevés. Et les eaux de la Fosse 1 se démarquent par un éloignement à la droite des eaux météoriques locales traduisant l'influence d'un processus d'évaporation. Les données suggèrent pour les autres points de prélèvement une alimentation par des eaux issues de mêmes événements pluvieux ou de réservoirs homogénéisés.

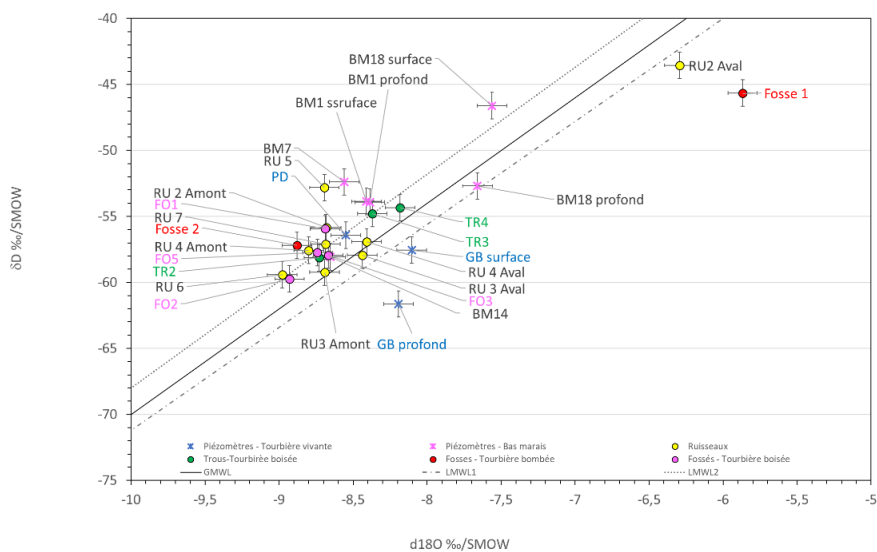


Figure 26 : Distribution des données isotopiques dans un diagramme $\delta^{18}\text{O}$ vs δD pour les eaux de la tourbière vivante, de la tourbière de bas-marais, les ruisseaux et zones d'excavation en période de moyennes-eaux/hautes-eaux (novembre 2020). GMWL = Global Meteoric Water Line ; LMWL1 et 2 = Local Meteoric Water Line (Lhosmot et al., 2022)

5.4.3.3. Caractéristique des masses d'eaux identifiées et implications en termes d'alimentation de la zone d'étude en moyennes-eaux/hautes-eaux

Les paramètres physico-chimiques sont les traceurs les plus discriminants pour la caractérisation des masses d'eau en jeu dans l'alimentation à moyennes-eaux/hautes-eaux de la tourbière vivante, de la tourbière de bas-marais, des ruisseaux et zones d'excavation du secteur d'étude.

Les Pôles 1 et 2 décrits précédemment sont à nouveau mis en avant avec les mêmes représentants principaux : piézomètre PC pour le Pôle 1 et piézomètre BM18 et zones d'excavation TR3 et TR4 pour le Pôle 2.

La masse d'eau enrichie en Na et Cl et mise en évidence à basses-eaux est confirmée à moyennes-eaux/hautes-eaux avec une représentation géographique plus importante. L'influence de ces apports enrichis en NaCl se retrouve principalement sur les bordures ouest (FO1, FO4, Fosse 2) et sud (RU5 et RU6) de la zone d'étude. Cette localisation à proximité des axes routiers pourrait être un élément en faveur d'une origine anthropique de ces apports localisés en Na et Cl (salage des routes). Ces eaux constitueraient ainsi un Pôle 3.

En moyennes-eaux/hautes-eaux, la tourbière de bas-marais et la zone du piézomètre GB apparaissent alimentées par les eaux peu minéralisées du Pôle 2. Les eaux de la tourbière vivante sont influencées quant à elles à des degrés différents par les eaux de conductivité élevée et enrichies en Ca du pôle 1.

Les ruisseaux 2 et 4 amont et dans une moindre mesure le ruisseau 3 amont apparaissent influencés par les eaux en provenance des formations carbonatées. Pour les ruisseaux 3 et 4, les propriétés physico-chimiques des eaux évoluent de l'amont à l'aval avec une diminution du pH, de la conductivité et des concentrations en Ca suggérant une contribution des eaux de la tourbière à leur alimentation.

Les fossés de drainage sont également le réceptacle d'eau en provenance des formations carbonatées et d'eau en provenance de la tourbière.

Les zones d'excavation apparaissent alimentées par l'eau des précipitations modifiée lors de son séjour dans la zone humide. La Fosse 1 a la particularité malgré la période de moyennes-eaux/hautes-eaux de présenter des $\delta^{18}\text{O}$ et δD marqués par un processus d'évaporation, amenant à la question du renouvellement complet ou partiel de ces eaux au cours des saisons et donc de sa connexion avec le milieu environnant.

5.5. Synthèse et conclusions

L'alimentation en eau de la tourbière du Forbonnet se fait à partir de deux masses d'eau d'origines différentes : des eaux de surface correspondant à des eaux de pluie évoluées par interaction avec le milieu tourbeux et des eaux ayant interagi de manière très significative avec les formations carbonatées sous-jacentes.

Ces dernières eaux influencent principalement la tourbière vivante en moyennes-eaux/hautes-eaux comme en basses-eaux et les écoulements des ruisseaux en moyennes-eaux/hautes-eaux. La tourbière de bas-marais est principalement influencée par les eaux de surface dans les deux contextes hydrologiques.

La tourbière de bas-marais contribue à l'alimentation des ruisseaux la bordant (RU3 et RU4), en basses-eaux comme en moyennes-eaux/hautes-eaux.

Les zones périphériques de la tourbière du Forbonnet (RU5, RU6, FO1, FO4, Fosse 2) présentent une vulnérabilité vis-à-vis des apports anthropiques de NaCl. À l'exception de la Fosse 2, ces zones sont également soumises à l'assèchement total en période de basses-eaux. Les zones d'excavation TR2 à 4 et la Fosse 1 soumises à l'évaporation en période de basses-eaux sans renouvellement significatif voient

Partie I - Frasne – Traceurs géochimiques

leurs eaux totalement (TR2 à 4) ou partiellement (Fosse 1) renouvelées en période de moyennes-eaux/hautes-eaux. La tourbière vivante et de bas-marais ainsi que les ruisseaux 3 et 4 ne subissent pas d'influence de ces eaux enrichies en Na et Cl.

Les fossés et les ruisseaux assurent donc un rôle de drainage des eaux issues du karst et de la zone humide en période de moyennes-eaux/hautes-eaux. Seuls les ruisseaux R3 et R4 continuent à jouer ce rôle en basses-eaux pour les eaux de la tourbière de bas-marais. Les travaux de restauration hydraulique de la tourbière en augmentant sa capacité de stockage ont potentiellement favorisé ce rôle.

6. Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet : rôle du suivi à long terme pour la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique (A. Lhosmot et G. Bertrand)

Cette partie synthétise les travaux effectués dans le cadre de la thèse Alexandre Lhosmot⁷ dirigée par Guillaume Bertrand et Marc Steinmann (Chrono-Environnement). Elle présente les éléments de compréhension du fonctionnement hydrologique de la tourbière du Forbonnet. En particulier, il s'agit d'un focus sur le bassin versant comprenant la tourbière active qui occupe une grande partie du complexe tourbeux de Frasne. L'origine ainsi que la dynamique de transfert des flux d'eau dans la tourbière sont étudiées afin de reconstituer l'export d'eau de la tourbière vers les hydrosystèmes localisés à l'aval. Cette synthèse est fondée à la fois sur les données hydrométéorologiques acquises par le Service National d'Observation des Tourbières (SNO Tourbières), du suivi piézométrique réalisé par les gestionnaires de la RNR de Frasne-Bouverans dans lequel le site s'inscrit et sur les données du suivi hydrologique acquises dans le cadre du projet Zabr/AE-RMC - ZHTB Soutien d'étiage.

6.1. Utilisation des données hydrométéorologiques pour prédire la profondeur de la nappe d'eau durant le prochain siècle

Cette partie s'appuie sur les résultats d'une étude publiée dans la revue scientifique *Science of the Total Environment* (Bertrand et al., 2021). Plus de détails sont donc disponibles dans cette publication. Le suivi au long terme de variables hydrométéorologiques (plus de 10 années consécutives) a permis d'établir des relations statistiques entre les précipitations, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la profondeur de la nappe d'eau (Water Table Depth, WTD ou p_t) à un pas de temps journalier pour 6 piézomètres (Figure 27). Pour chaque piézomètre le temps de mémoire de la WTD en réponse à la fois à l'ETP et aux précipitations a pu être calculé à partir de corrélations croisées. Ce temps de mémoire a été utilisé pour définir la période temporelle ($t-\Delta t$) à utiliser pour modéliser la WTD à un instant t (voir l'équation, Figure 27).

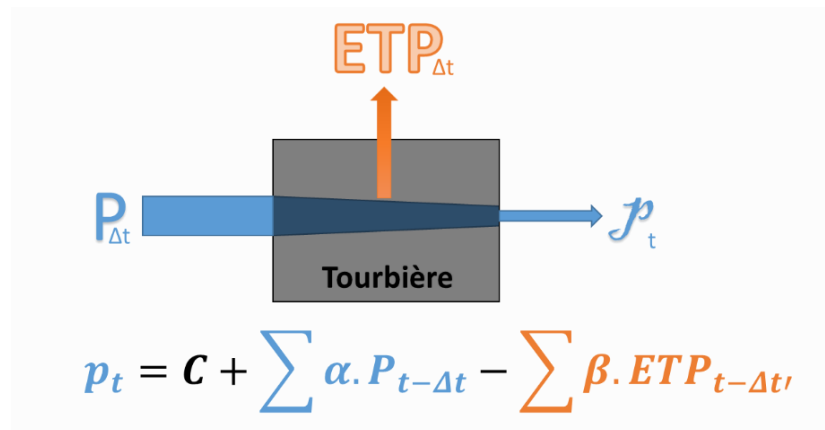


Figure 27 : Principe de l'approche statistique. [p_t : Profondeur de la nappe ; P_t : Précipitations ; ETP : Évapotranspiration potentielle]

7. Lhosmot A. [thèse en préparation] (2022) Réactivité du Carbone dans les interactions combinant l'atmosphère et les tourbières combiner l'analyse hydrogéochimique et des flux de gaz à effet de serre à l'échelle des microsites pour contraindre la variabilité spatio-temporelle des fonctions puits et émetteur de C de la tourbière de Frasne (25). Université de Bourgogne Franche-Comté.

Le modèle une fois calibré a été utilisé dans le but de prédire l'évolution de la profondeur de la nappe d'eau pour un piézomètre situé au niveau de la plateforme scientifique selon différents scénarii climatiques d'ici la fin du siècle. Cette approche peut être qualifiée de modèle « boîte noire » : 1) dans le sens où il s'agit uniquement de relations statistiques (régressions linéaires) entre des variables hydrométéorologiques ; 2) dans la mesure où cette approche ne présume pas du fonctionnement hydrogéologique de la tourbière et de son bassin d'alimentation. Ce fonctionnement sera évoqué par la suite.

Après avoir calibré le modèle statistique sur une partie du jeu de données, la phase de validation du modèle sur le reste des données montre qu'il est capable de reproduire 87% des niveaux d'eau (Coefficient de Nash). Néanmoins, les hauteurs d'eau en dessous de 19 cm de profondeur sont les plus difficiles à reproduire, suggérant un seuil de changement des propriétés hydrodynamiques du système que le modèle ne prend pas en compte. Ce seuil peut être interprété comme la limite acrotelme-catotelme (Ingram, 1978).

Les projections climatiques journalières de précipitations et températures jusqu'à la fin du siècle, disponibles à une maille de 8 km² (simulations régionales Euro-Cordex⁸), ont été utilisées pour prédire l'évolution des WTD à Frasné en utilisant le modèle statistique calibré. Les prédictions utilisées couvrent deux scénarii du Giec, le RCP (*Representative Concentration Pathway*) 4,5 et le 8,5 (respectivement +4,5 et 8,5 W.m⁻² en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle).

Pour les deux scénarii (Figure 28), il apparaît que les WTD sont relativement stables jusqu'en 2050, date à partir de laquelle un abaissement moyen significatif apparaît (≈ -1 cm) pour le scénario RCP 8,5. Néanmoins, les principaux changements résident dans les contrastes saisonniers. En effet, les résultats montrent qu'en hiver la WTD devrait rester stable voire même se rapprocher de la surface. À l'inverse de la période hivernale, les autres saisons sont marquées par un abaissement de la WTD davantage marqué pour le scénario RCP 8,5. En particulier, c'est pour l'été que l'abaissement est le plus important à l'horizon 2100 (de l'ordre de -3 cm). Ces changements saisonniers de WTD sont probablement liés aux changements prédits de répartition saisonnière du cumul de précipitations, avec davantage de cumul en hiver et des périodes de sécheresses en été. De plus, les précipitations davantage sous forme de pluie devraient contribuer à stimuler plus rapidement la WTD en hiver. Ajoutée à l'abaissement moyen de la WTD, la fréquence de sécheresses, définie comme la succession de 5 journées consécutives avec une WTD inférieure à 5 cm par rapport à la moyenne de l'année devrait être supérieure à 0,7 pour les mois de juillet, août et septembre à partir de 2040 alors que sur la période de mesure (2009-2019), elle n'est que de 0,1.

6.2. Suivi à long terme des variables hydrométéorologique sur la tourbière du Forbonnet : vers un modèle hydrogéologique conceptuel

Le suivi à long terme des variables hydrométéorologiques réalisé d'une part dans le cadre du SNO Tourbières (débit et conductivité électrique à l'exutoire de la tourbière ; station météorologique) et d'autre part par les gestionnaires du site (niveau piézométrique dans un réseau de piézomètres) ont permis de proposer un modèle conceptuel hydrogéologique de la tourbière du Forbonnet. La méthode d'acquisition des données ainsi que le détail des résultats sont disponibles dans Lhosmot et al. (2021). Les données hydrométéorologiques sont disponibles en *open-access* sur le serveur du SNO Tourbières⁹ (Toussaint et al., 2020a, 2020b).

L'analyse de ces données a montré premièrement, que la relation entre le débit à l'exutoire et la profondeur de la nappe d'eau (Water Table Depth, WTD) dans la tourbière active est non-linéaire. Pour les variations de WTD dans la gamme -0,30 à -0,10 m de profondeur, le débit à l'exutoire est faible et varie peu ($< 0,05$ m³.s⁻¹, Figure 29). En revanche, dès que la nappe d'eau se rapproche de la surface (diminution de la WTD), un effet seuil est observé et le débit à l'exutoire augmente de manière exponentielle. Cet effet de seuil reflète le changement de milieu dans lequel s'écoule l'eau. En effet,

8. <https://www.euro-cordex.net/>

9. <https://data-snot.cnrs.fr/data-access/>

proche de la surface, la conductivité hydraulique est plus forte qu'en profondeur. Ces observations font écho au modèle diplotelmique proposé par Ingram (1978) : la couche superficielle aux propriétés physiques favorables à l'écoulement, l'acrotelme, est sensible aux précipitations directes et à l'évapotranspiration, contribuant à expliquer la grande réactivité du débit à l'exutoire de la tourbière lorsque le niveau d'eau est proche de la surface. La couche plus profonde, correspondant à un degré de maturation plus avancé de la matière organique, correspond au catotelme dont la perméabilité (conductivité hydraulique) plus faible implique des flux d'eau moindre lorsque seul ce compartiment est saturé (période de basses-eaux).

La restauration de la tourbière (2015-2016) a consisté à combler certains drains d'une part et à la mise en place d'une digue à partir de palplanches métalliques d'autre part. L'objectif était : 1) de stopper les flux d'eau sortant au sud de la tourbière active vers le Creux au Lard générés par le système de drain et 2) de reconnecter la partie sud de la tourbière active aux tourbières boisées (Figure 30). Par conséquent, une augmentation du niveau d'eau était attendue, limitant ainsi la minéralisation de la matière organique et la subsidence de la tourbière active. Plus de détails sur les études avant travaux, les travaux eux-mêmes ainsi que les résultats sont disponibles dans la littérature suivante : Calvar et al. (2021, 2018), Collin (2016), Magnon (2016), Magnon et Grosvernier, (2015). Plus largement, le recueil d'expérience des travaux de restauration du programme Life Tourbières à l'échelle du massif du Jura procure des informations pratiques sur la problématique de restaurations de tourbières (Calvar et al., 2021). Au Forbonnet, le suivi piézométrique avant et post-travaux a montré la rapidité et l'efficacité de la restauration sur l'altitude de la nappe qui est remontée dans les semaines qui ont suivis la dernière phase du chantier. De plus, deux systèmes de piézomètres en flute de pan (TV123 et TV456, Figure 31 et Figure 32), c'est-à-dire crépinés à des profondeurs différentes, ont pu mettre en évidence l'effet de la restauration sur les flux d'eaux entre les différents niveaux de tourbe. Ces systèmes de piézomètres en flutes de pan sont respectivement composés de 3 piézomètres dont un est crépiné en surface (50 premiers centimètres), le second intègre le niveau intermédiaire de tourbe (≈ 1 m à 1,5 m de profondeur) et le troisième le niveau profond de tourbe (2,2 à 2,4 m de profondeur, Figure 32). Le suivi du niveau piézométrique dans ces différents niveaux de tourbe montre que les trois niveaux ont subis une augmentation de pression suite à la restauration.

Néanmoins, cette augmentation a significativement (p value $< 0,05$) et davantage influencée le niveau intermédiaire (TV2 : +54,1 cm ; TV5 : +20,4 cm) comparé aux niveaux profonds (TV1 : +22,5 cm ; TV4 : +6,6 cm) et de surface (TV3 : +25,5 cm ; TV6 : +16,1 cm). En outre, ce niveau intermédiaire était en dépression par rapport aux autres niveaux avant la restauration, signifiant que les flux d'eau se dirigeaient depuis les niveaux de surface et profond en direction du niveau intermédiaire (Figure 32). Cette situation traduit l'effet marqué des drains (fossés) sur le niveau intermédiaire de tourbe. Pour le système TV123, le niveau intermédiaire est passé en surpression par rapport aux deux autres après la restauration tandis que pour le système TV456 les pressions se sont progressivement équilibrées durant les deux années suivant la restauration (Figure 32). La restauration a donc rétabli les relations hydrauliques entre les trois niveaux de tourbe en reconnectant les tourbières boisées alentours avec la tourbière active, en particulier via les couches de tourbes de profondeur intermédiaire.

Du point de vue géochimique, la minéralisation de l'eau circulant dans ces trois niveaux de tourbe est contrastée. En effet, le niveau de surface est caractérisé par des eaux acides ($\text{pH} \approx 4$) et dont la concentration en solutés dissous (EC : *electrical conductivity* ou conductivité électrique) est faible ($\text{EC} < 50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Le niveau profond est quant à lui caractérisé par des eaux plus fortement minéralisées ($\text{EC} > 300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) avec un pH plus fort ($\approx 6,5$). Les eaux dans le niveau intermédiaire présentent des caractéristiques moyennes entre les deux autres niveaux. Au-delà de ce cadre général, spatialement les profils verticaux montrent une variabilité avec parfois des eaux du niveau profond moins minéralisées (Figure 31 et Figure 33). En parallèle, le suivi continu de la conductivité électrique à l'exutoire montre une saisonnalité avec une augmentation estivale en partie attribuée à l'effet de concentration par évapotranspiration. Néanmoins, sur le long-terme (échelle pluriannuelle) la conductivité électrique de l'eau à l'exutoire de la tourbière en période estivale (juin-octobre) répond linéairement à la recharge pluviométrique de l'hiver précédent (novembre-mai ; précipitations moins évapotranspiration). Cette relation linéaire ($R^2 = 0,91$) reflète probablement des transferts saisonniers d'eaux depuis le système régional vers la tourbière. Néanmoins, bien que cette contribution soit

géochimiquement (qualitativement) identifiable, elle ne semble pas contribuer majoritairement à la quantité d'eau exportée : la recharge estivale explique le mieux le débit à l'exutoire de la tourbière en période estivale ($R^2 = 0,76$). Ce pool d'eau minéralisée correspond potentiellement à des apports d'eau souterraine (karst, moraine) ou à des eaux présentes à la base de la tourbière et au contact de la moraine poussées par transfert de pression lorsque le karst sous-jacent se met en charge. Ces hypothèses alimentent la discussion des transferts de masse (lien hydrologique direct) et/ou de pression (lien hydrologique indirect) entre les aquifères karstiques des anticlinaux et les tourbières logées dans les synclinaux du massif du Jura. La présence du Creux au lard à proximité immédiate de la tourbière active, dont la dynamique de mise en charge suscite encore des questions, et l'hétérogénéité de l'interface tourbe-moraine mis en évidence par les profils de géophysique (voir §7. p69), illustrent un cadre hydrogéologique complexe.

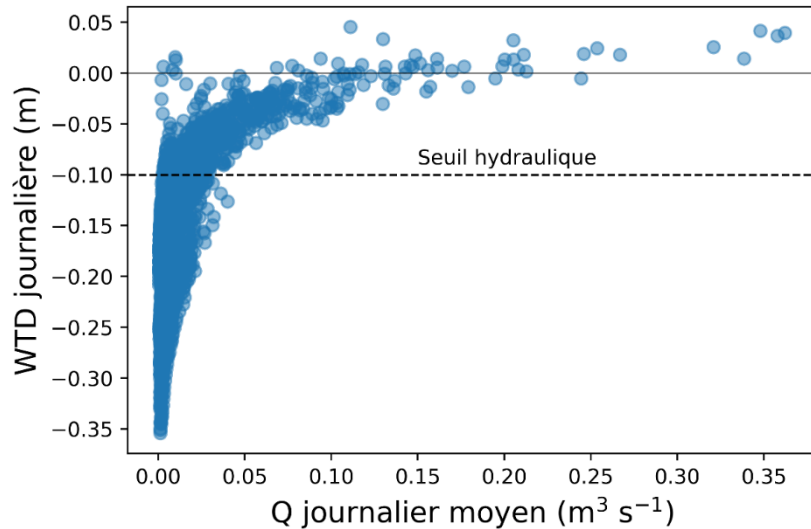


Figure 29 : Profondeur de la nappe par rapport à la surface (WTD) au niveau de la plateforme scientifique en fonction du débit journalier (Période de mesure 2015-septembre 2020 ; Toussaint et al., 2020). [Surface du sol : ligne continue horizontale, $y = 0$; Limite acrotelme-catotelme : ligne pointillée, $y = -0,10$ m].

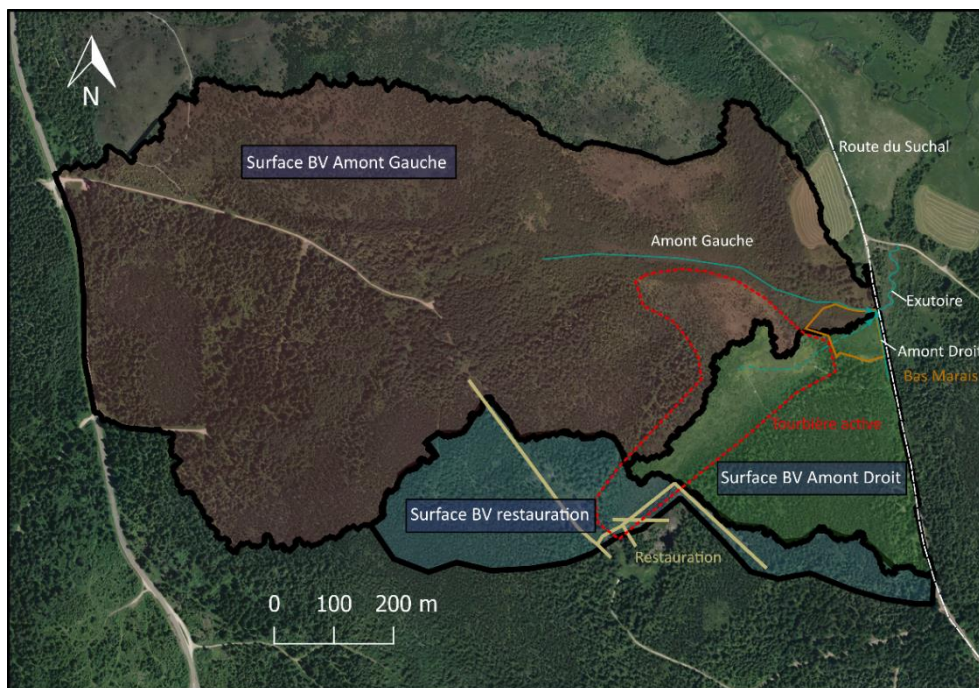


Figure 30 : Estimation du gain de bassin versant topographique après la restauration (d'après Magnon et Grosvernier, 2015 ; Fond de carte IGN 2018). [La surface du Bassin Versant topographique pour Amont Droit et Amont Gauche est calculée avec le logiciel QGIS à partir du MNT Lidar de 2011].

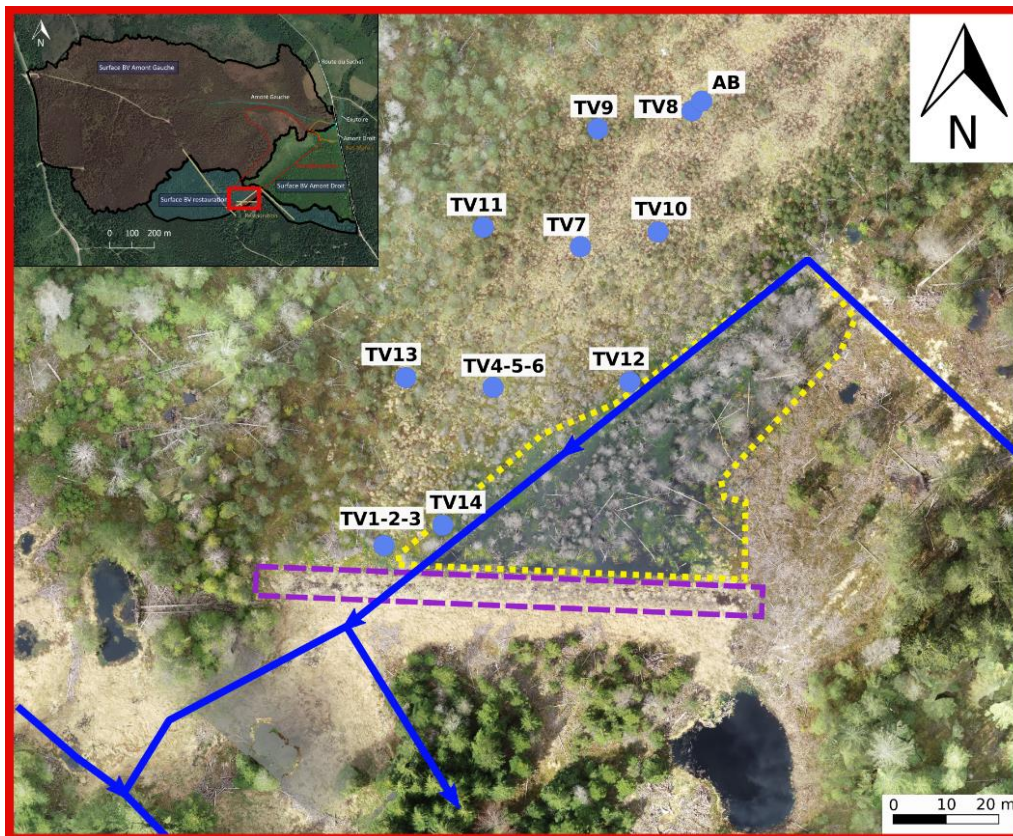


Figure 31 : Localisation des piézomètres étudiés par rapport aux ouvrages de restauration. [Drains comblés lors des travaux de restauration : ligne bleue ; Digue : rectangle pointillés violet ; Zone inondée après la restauration : pointillés jaunes].

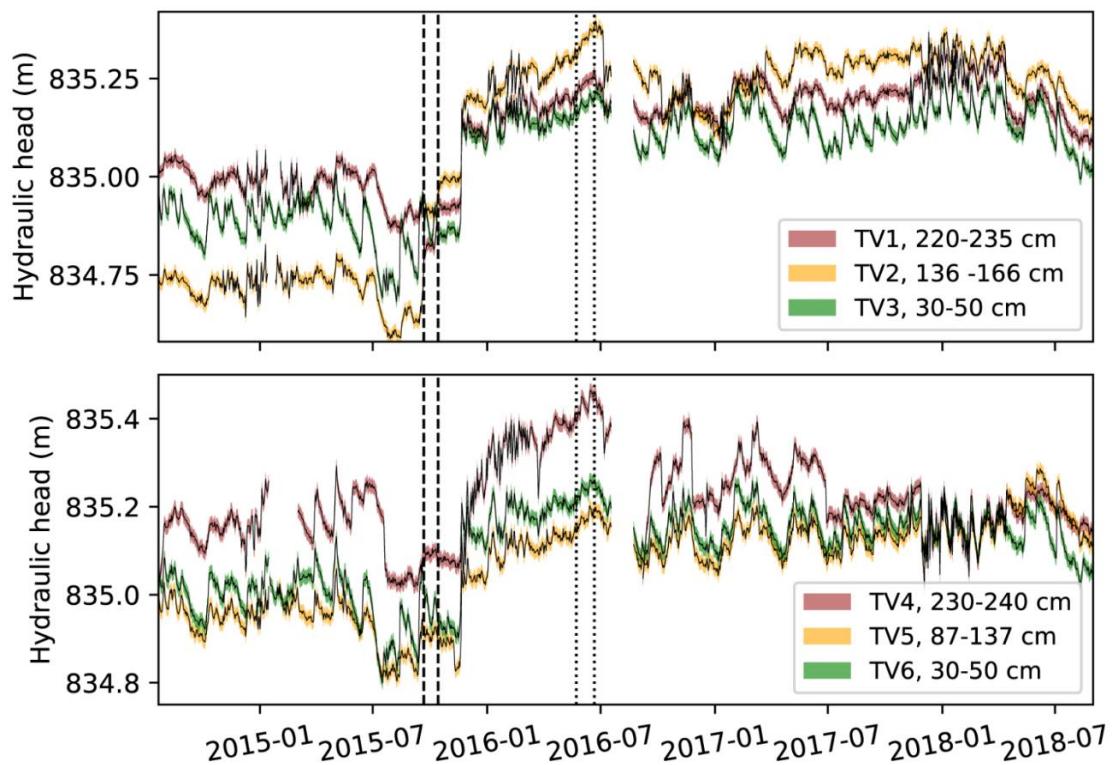


Figure 32 : Niveaux piézométriques des deux systèmes de flutes de pan sur la période 2014-2018. [Incertitude associée à l'acquisition des données : contour coloré autour des courbes noires ; Deux phases des travaux de restauration (21 septembre - 14 octobre 2015 et 23 mai - 21 juin 2016 respectivement) : barres verticales ; Niveau de surface : couleur verte ; Profondeur intermédiaire : couleur jaune ; Niveau profond : brun].

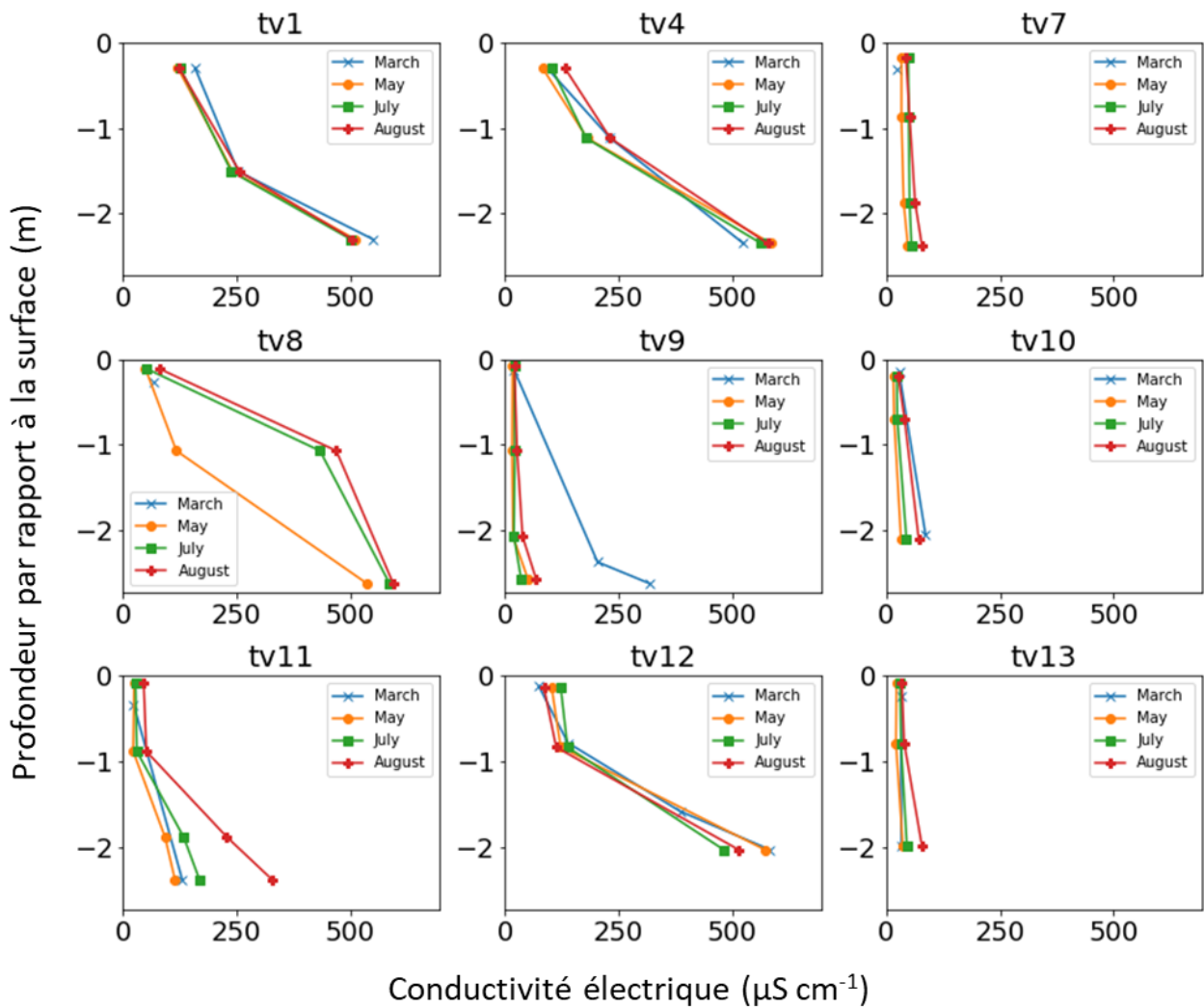


Figure 33 : Évolution verticale de la conductivité électrique de l'eau de la tourbière pour la saison 2016 (Données issues de Collin, 2016). [Se référer à la Figure 31 pour la localisation des piézomètres].

Ce modèle d'imbrication de flux d'eau à différentes échelles spatiales et temporelles est conceptualisé sous la forme d'un schéma (Figure 34). Cette imbrication de flux montre son importance pour garantir une gestion optimale de l'approvisionnement en eau d'une tourbière tant du point de vue qualitatif que quantitatif. En particulier, les flux d'eau entre les différentes tourbières semblent contribuer à l'inertie hydrologique de la tourbière active (identifiée au §6.1) favorisant peut-être la résilience de ces écosystèmes face aux changements climatiques.

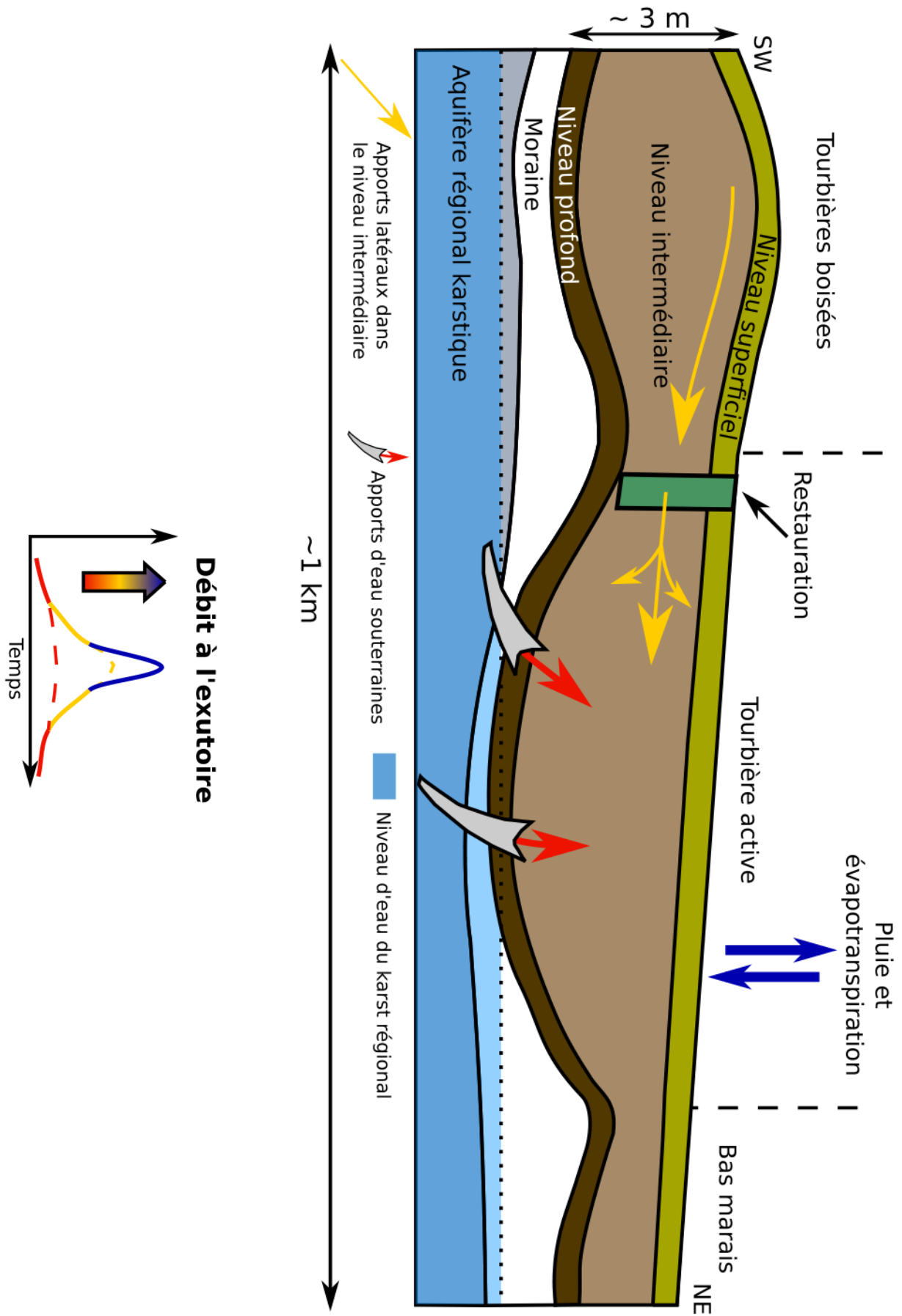


Figure 34 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la tourbière du Forbonnet (Lhosmot et al., 2021).

Le modèle conceptuel proposé Figure 34 constitue la base de la mise en œuvre d'une modélisation de type « réservoir » visant à représenter de façon cohérente la sensibilité des volumes et des flux d'eaux de la tourbière aux variations météorologiques. L'objectif est de proposer un outil pertinent pour modéliser le comportement futur du système face aux changements climatiques. Dans un premier temps (§6.3), le bilan hydrologique du système est calculé à un pas de temps mensuel afin de quantifier les composantes de ce bilan et de mettre en évidence d'autres flux d'eau non pris en compte dans le bilan. Dans un second temps (§6.4), l'utilisation d'un modèle réservoir (Karstmod) est faite afin de modéliser le débit à l'exutoire de la tourbière.

6.3. Approche bilan de masse

Afin de contraindre les flux d'eau entrant et sortant dans le système, une approche par bilan de masse sur plusieurs années consécutives (2014-2020) a été mise en œuvre.

Dans un premier temps, la variation du stock d'eau dans la tourbière est estimée d'après les données piézométriques enregistrant les variations de niveau de la tourbière active.

Dans un second temps, le bilan hydrologique (différence entre les entrées et les sorties d'eau du système) est calculé à un pas de temps mensuel. Le bilan hydrologique calculé n'est pas représentatif que de la tourbière active mais d'une partie du complexe tourbeux de Frasn-Bouverans intégrant cette dernière (Figure 30). La surface du bassin versant topographique (BV_{topo}) a été calculée avec le logiciel QGIS à partir du MNT Lidar de 2011. La surface du BV_{topo} avant restauration est de 0,82 km². La surface ajoutée après les travaux de restauration est estimée à 0,10 km² d'après les chemins d'écoulement calculés et les travaux de P. Grosvernier. La surface totale du BV_{topo} après restauration est donc estimée à 0,92 km².

6.3.1. Estimation de la variation du stock d'eau sur la période d'étude 2014-07/2020-04 en utilisant le delta altitude de la nappe d'eau

6.3.1.1. Matériel et Méthode

La variation du stock d'eau mesurée sur le terrain sur la période 2014-07/2020-04 (soit 70 mois) a été calculée en utilisant la variation du niveau absolu (altitude) de la nappe d'eau et un coefficient de porosité efficace.

Quatre piézomètres localisés dans la partie sud de la tourbière active dont le suivi couvre la période de calcul du bilan hydrologique ont été utilisés (TV11, 12, 13 et 14). Les piézomètres TV12 et TV14 sont les plus proches de la zone restaurée, à proximité immédiate du fossé de drainage comblé lors des travaux de restauration. Les piézomètres TV11 et TV13 sont plus éloignés des ouvrages de restauration. À noter que ces quatre piézomètres sont crépinés sur toute la profondeur de tube, l'altitude de la hauteur d'eau mesurée correspond donc à l'altitude de la nappe d'eau libre.

Des trous dans la série de données du suivi piézométrique limitent la possibilité de calculer une variation d'altitude de nappe pour tous les mois de la période étudiée. Par conséquent, la différence d'altitude de la nappe entre le début et la fin de la période de calcul du bilan hydrologique interannuel a été calculée (2014-07 à 2020-04, noté Δh). Plus précisément, il s'agit de la différence entre l'altitude moyenne de la nappe pour le mois de juillet 2014 et le mois d'avril 2020. Pour que cette approche permette de comparer la variation d'altitude de nappe (stockage d'eau dans la tourbière) avec le Δstock cumulé sur la période d'étude, la variation d'altitude de nappe est multipliée par la porosité efficace de la tourbe (φ) dont le résultat est noté ΔS .

Hoag et Price (1997) ont mesuré une porosité efficace de 37% dans de la tourbe peu décomposée tandis que Quinton et al., (2008) ont mesuré une valeur moyenne de 53% dans des sphaignes avec des valeurs comprises entre 47 et 69%. Enfin, Quinton et al., (2000) ont mesuré des valeurs de φ atteignant 80% pour de la tourbe de surface. La gamme de valeurs utilisées est donc 37-80% (moyenne de 58,5%) dans le cadre de ce travail car le toit de la nappe d'eau se trouve essentiellement dans les niveaux de tourbe de surface les moins humifiés (minéralisés).

Par ailleurs, le suivi piézométrique intègre la mesure de la distance entre le toit du piézomètre et la surface du sol, notée $H_{\text{toit-piézo}} - H_{\text{surface sol}}$. En effet, cette variable est importante en milieu tourbeux car

elle permet de mesurer les variations d'épaisseur de tourbe qui peuvent suivre les variations hydrologique saisonnière (gonflement et contraction de l'acrotelme) ou encore sur le long terme suivre la croissance de la tourbe notamment à la suite de travaux de restauration (Howie et Hebda, 2018 ; McCarter et Price, 2013). La variation de cette distance permet d'évaluer l'évolution de la capacité de stockage d'eau de la tourbière.

6.3.1.2. Résultats

À l'échelle interannuelle, la différence d'altitude de nappe entre 2014-07 et 2020-04 est maximum à proximité immédiate des ouvrages de restauration (fossés comblés et construction de la digue) pour les piézomètres TV12 et 14 (respectivement $dh = +457$ et 397 mm, soit dS respectivement entre 169 et 366 mm (TV12) et entre 147 et 318 mm (TV14) en prenant en compte la gamme 37-80% de porosité efficace). En s'éloignant de la zone restaurée, le delta altitude de nappe diminue (TV13 : $dh = 145$ mm et dS entre 53 et 116 mm) jusqu'à devenir négatif pour le piézomètre TV11 ($dh = -62$ et dS entre -23 et -50 mm). Ces résultats montrent que l'augmentation du stockage de l'eau dans la tourbière sur la période d'étude est plus importante à proximité de la zone restaurée et reste limitée au-delà d'une distance de l'ordre de 60 m.

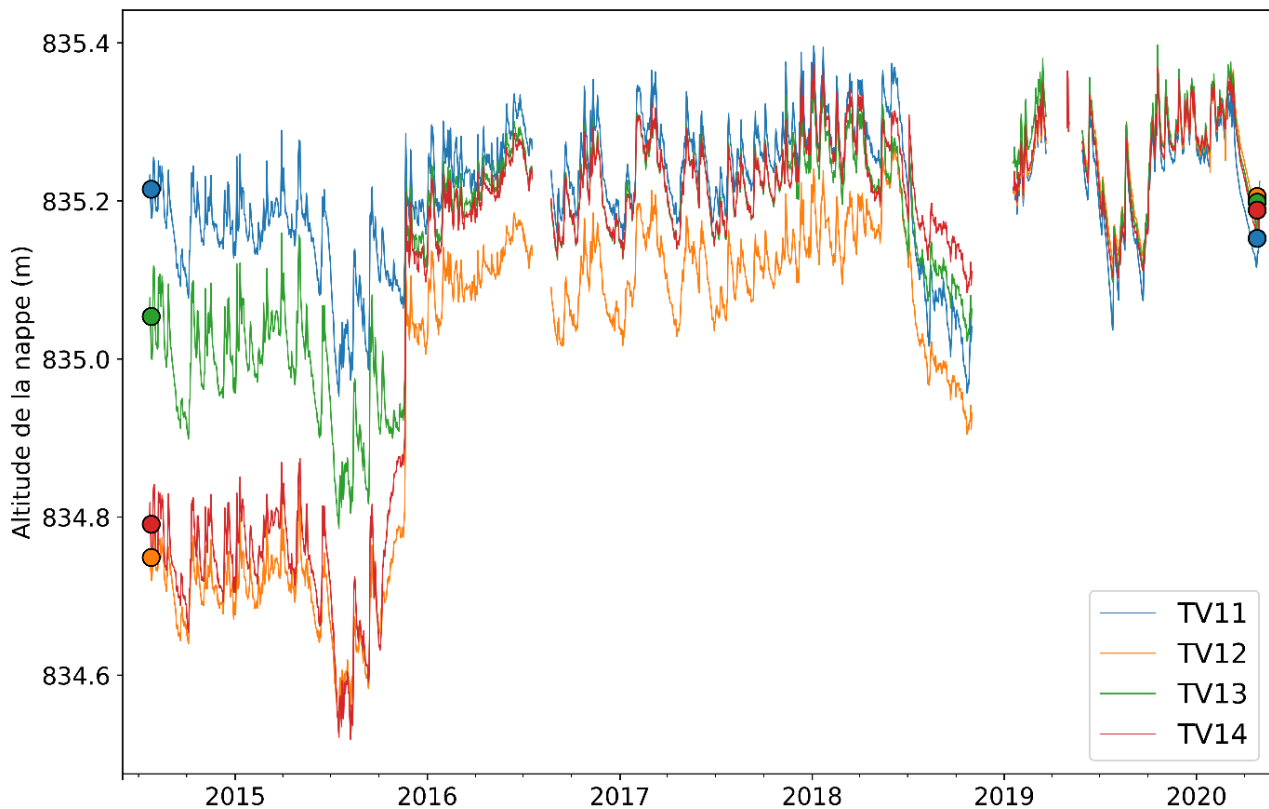


Figure 35 : Variation d'altitude de la nappe pour les piézomètres TV11, 12, 13 et 14. Les cercles symbolisent la moyenne mensuelle pour juillet 2014 et avril 2020 respectivement. C'est cette moyenne qui a été utilisé pour comparer la variation de stockage d'eau dans la tourbière entre ces deux périodes.

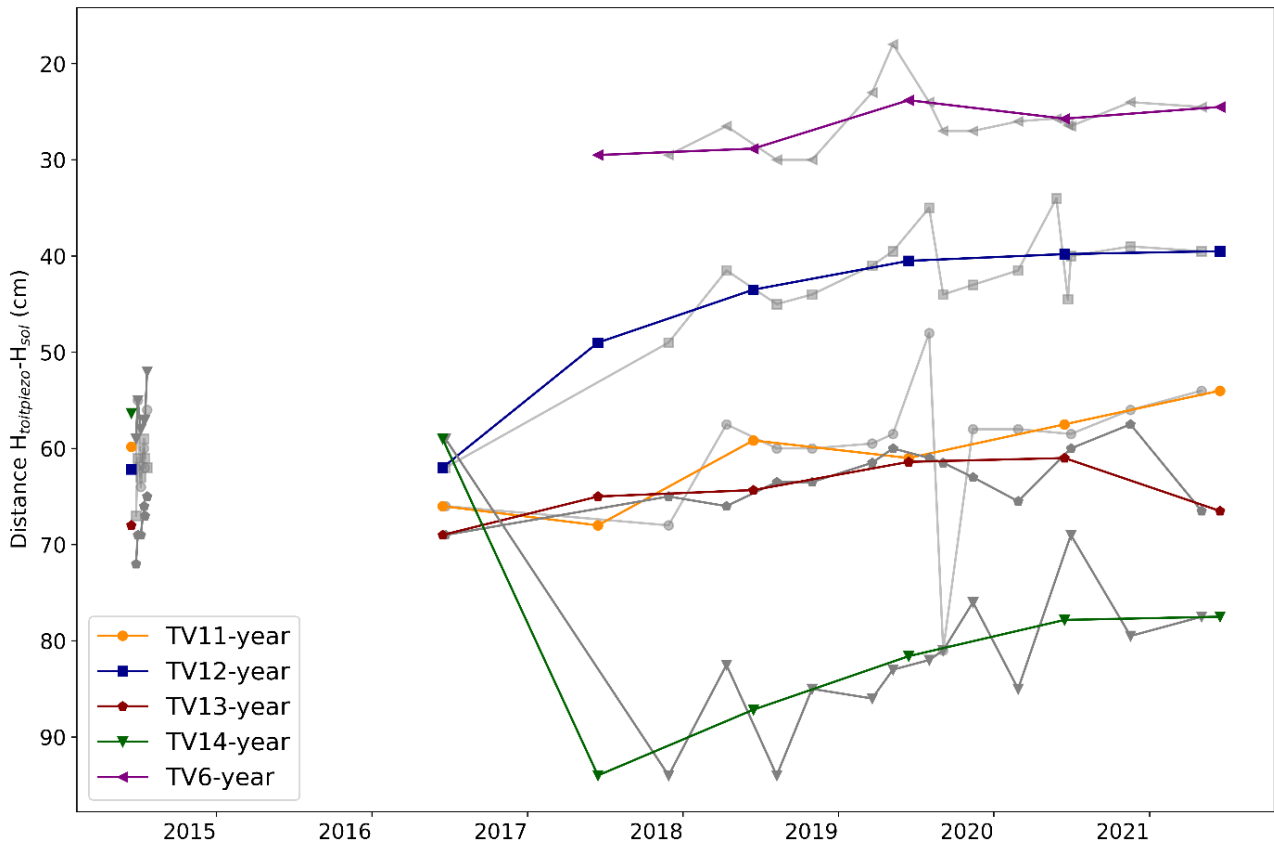


Figure 36 : Évolution de la distance $H_{\text{toit-piézo}} - H_{\text{sol}}$ pour certains piézomètres de la tourbière active. Les courbes colorées sont les moyennes annuelles tandis que les courbes grisées suivent les valeurs de mesures ponctuelles.

Parallèlement au stockage de l'eau, la capacité de stockage de la tourbière (volume de tourbe) semble également avoir augmenté car la distance $H_{\text{toit-piézo}} - H_{\text{surface sol}}$ a diminué au cours de la période d'étude (Figure 36). La diminution de la distance $H_{\text{toit-piézo}} - H_{\text{surface sol}}$ est bien observable pour les piézomètres TV6, TV11, TV12 et TV13. Pour TV14, les valeurs antérieures à 2017 (seulement 2 points) ne sont pas cohérentes puisque la distance est plus faible de près de 20 cm comparé à la période 2018-2021.

6.3.1.3. Variabilité spatiale de l'effet de la restauration et représentativité de la surface du bassin versant

Suite aux travaux de restauration, l'augmentation significative du niveau d'eau dans les piézomètres proches de la digue suggère que de l'eau a été stockée (Figure 12). Le piézomètre TV11 est le moins affecté par les travaux de restauration car le plus éloigné des ouvrages de restauration parmi les piézomètres de la partie sud de la tourbière. L'altitude de la nappe d'eau a augmenté significativement ($p\text{-value} < 0,05$) entre la période pré- (2014-09/2015-08) et post-restauration (2016-09/2018-08), entre +20 et +55 cm pour les piézomètres TV11, 12, 13 et 14 (Lhosmot et al., 2021). Cependant, pour TV11, entre les périodes 2014-07 et 2020-04, il s'avère que la différence d'altitude de nappe est négative, suggérant qu'il n'y a pas d'avantage d'eau stockée entre ces deux dates. Au contraire, pour les piézomètres TV12, TV13 et TV14, le delta altitude de nappe est positif. Ces piézomètres sont localisés dans la zone la plus fortement impactée par la restauration où l'augmentation de l'altitude de la nappe a été la plus significative suite aux travaux (Lhosmot et al., 2021).

Cependant, cette zone ne représente qu'environ la moitié de la surface de la tourbière active, et seulement environ 2% de la surface totale du BV topographique. Bien que l'effet de la restauration sur les tourbières boisées à proximité des ouvrages de restauration n'ait pas été suivi du point de vue piézométrique, la diminution de l'effet de la restauration avec la distance mesurée dans la tourbière active (diminution de dS de plus de 50 % pour TV13 qui n'est qu'à environ 40 m des ouvrages de restauration par rapport à TV12 et TV14) suggère que l'effet de la restauration reste local à l'échelle du

bassin versant topographique. Ainsi, il est probable que le stockage d'eau induit par la restauration soit minimale à l'échelle du bassin versant topographique.

6.3.2. Estimation des variations du stock d'eau dans la tourbière à un pas de temps mensuel : approche bilan hydrologique

6.3.2.1. Matériel et Méthode

La variation de stock d'eau à l'échelle du bassin versant (noté Δstock , Équation 3) est calculée à un pas de temps mensuel en effectuant la différence entre les entrées (P) et les sorties d'eau (Q à l'exutoire et ETP) :

$$\Delta\text{stock} = P - Q - \text{ETP}$$

Équation 3 : Variation de stock d'eau à l'échelle du bassin versant

Le bilan mensuel est calculé de Juillet 2014 à Avril 2020, soit 70 mois, permettant ainsi d'intégrer plusieurs cycles hydrologiques complets. Le cumul du Δstock mensuel est calculé pour chaque année hydrologique complète (2015-05/2016-04, 2016-05/2017-04, 2017-05/2018-04, 2018-05/2019-04, 2019-05/2020-04). Un Δstock positif signifie que les exports d'eau du système (débit, ETP) sont inférieurs aux précipitations, et réciproquement (Équation 3).

L'ETP mensuel a été calculé avec trois méthodes différentes, afin d'estimer une gamme de variation sur cette variable. Il s'agit de (i) la méthode de Oudin (Oudin et al., 2005) ; (ii) de la méthode de Priestley Taylor (Priestley and Taylor, 1972) et (iii) de la formule de la FAO-56 Penman-Monteith multipliée par un « crop coefficient » (Kc) (Allen et al., 1998) (Figure 37). Le Kc utilisé a été déterminé à partir de la surface de forêt (92% du BV_{topo}) et de végétation basse (8% du BV_{topo}) avec respectivement les valeurs de Kc associées à ce type de milieu dans la littérature (Kc = 1 pour la forêt et 0,85 pour la tourbière active en période estivale et 1 pour tous les milieux en période hivernale ; Allen et al., 1998 ; Gerling et al., 2019).

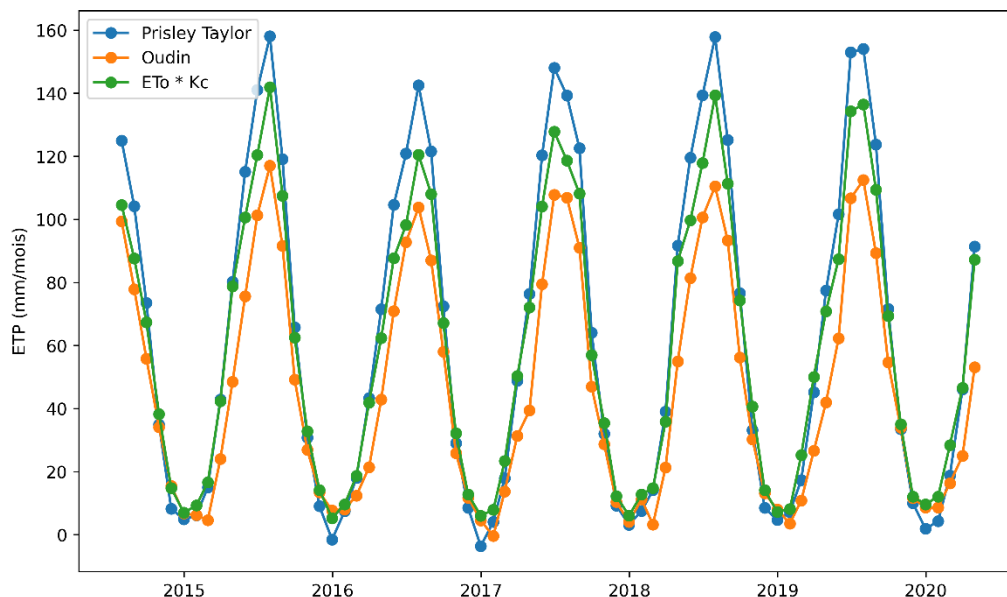


Figure 37 : ETP mensuel calculée avec différentes méthodes sur la période Juillet 2014 - Avril 2020. ETo*Kc signifie l'ETo de Penman Monteith multiplié par un « crop » coefficient.

Le débit est calculé à partir de la hauteur d'eau mesurée à l'exutoire et de la courbe de tarage. Le bilan hydrologique est calculé en utilisant la valeur moyenne d'ETP des trois méthodes de calcul et la valeur de débit calculée. Afin d'estimer une incertitude sur le bilan hydrologique, celui-ci a également été calculé en utilisant (i) les valeurs minimums d'ETP et de débit et (ii) les valeurs maximums d'ETP et de débit (Figure 38-A, B et C).

6.3.3. Résultats et discussions

Le bilan hydrologique cumulé est positif pour chaque année hydrologique avec des valeurs de 170 à 376 $\text{mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ($\mu = 297 \pm 140 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$; Figure 38 C et Tableau 4). Cependant, en considérant les valeurs minimums d'ETP et de débit, le bilan cumulé est bien plus important ($\mu = 864 \pm 165 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit en moyenne 52% des précipitations). Au contraire, lorsque les valeurs maximums d'ETP et de débit sont utilisées, le bilan cumulé est négatif, $\mu = -289 \pm 124 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

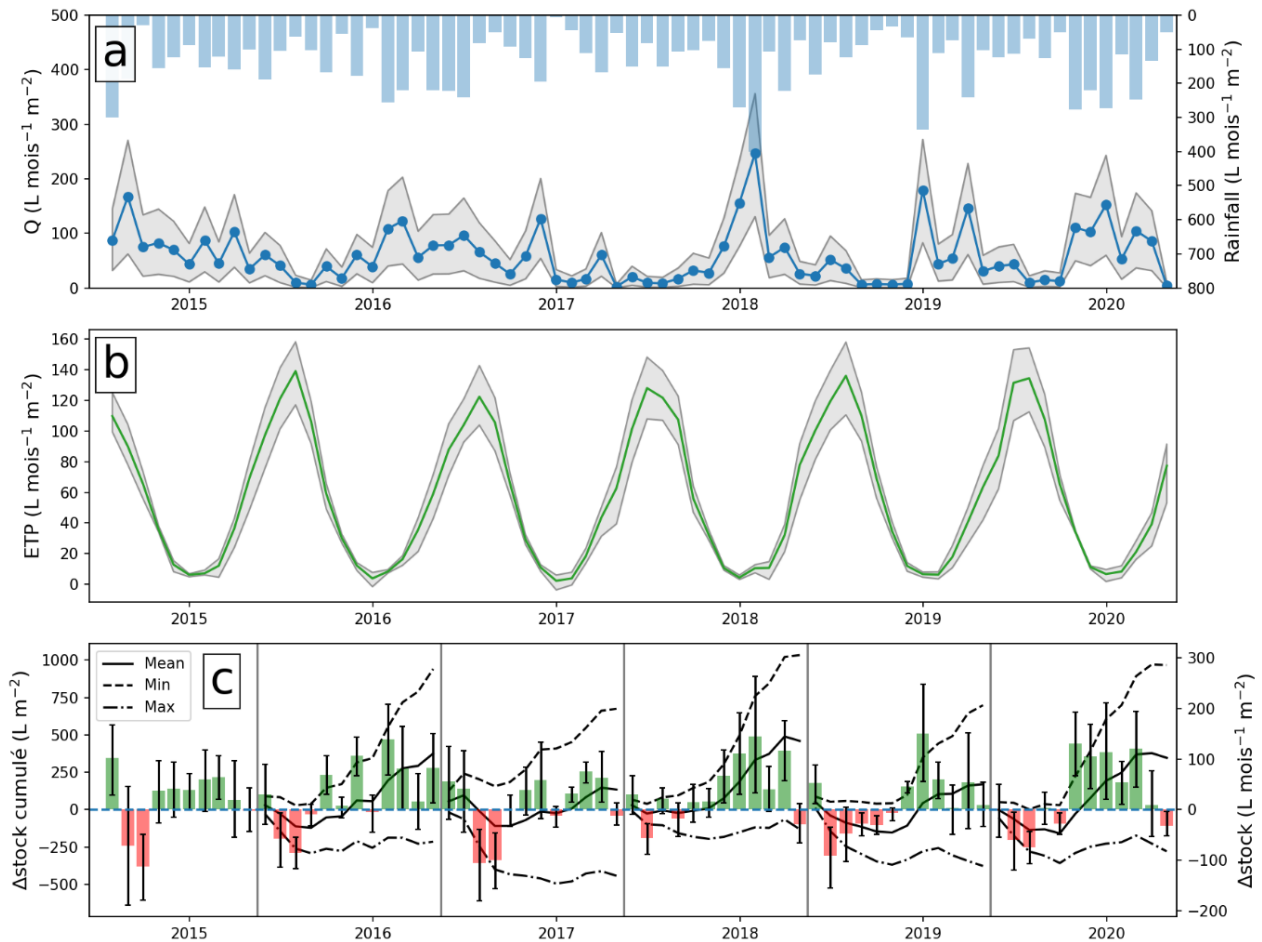


Figure 38 A : Précipitations et débit mensuels. La bande grise autour de la courbe de débit correspond à l'incertitude calculée à partir de la courbe de tarage. B : ETP mensuel. La courbe verte représente la moyenne des trois méthodes de calcul de l'ETP. La bande colorée en gris correspond à la l'intervalle compris entre les valeurs minimales et maximales parmi les trois méthodes de calcul de l'ETP. C : L'axe vertical à gauche est associé aux courbes cumulées du bilan hydrologique mensuel moyen, maximum et minimum. Le graphique en barre (axe vertical à droite) représente le bilan hydrologique mensuel moyen. La barre d'erreur correspond à la différence entre la valeur moyenne et la valeur maximum/minimal de bilan hydrologique calculé.

Cependant, comme le bassin versant topographique de la tourbière du Forbonnet est composé à 92% de couvert forestier (principalement des épicéas), la part de l'interception dans le bilan hydrologique est à prendre en compte. En effet, des mesures d'interception sur des bassins versant composés de conifères révèlent que cette variable peut constituer une part importante des précipitations. Par exemple, Duranel et al. (2021) mesurent dans une tourbière du massif centrale une interception représentant environ 37% des précipitations pour une couverture de conifères. D'autres études mesurent des ordres de grandeurs similaires pour des épicéas de moyenne/grande taille, ~30-40% des précipitations interceptées (Dohnal et al., 2014; Price et al., 2003; Šrámek et al., 2019). Respectivement, une proportion de 30 et 40% des précipitations interceptées par les épicéas (en tenant compte des 92% de couverture sur le BV) correspond entre 457 ± 59 et $609 \pm 79 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour l'ensemble des années étudiées (Tableau 4).

| | Δ stock : Q ETP minimums | Δ stock : Q et ETP moyens | Δ stock : Q et ETP maximums | Précipitations | Interception = 30% of P | Interception = 40% of P |
|-----------------|---------------------------------------|--|--|----------------|----------------------------|----------------------------|
| 2015-05/2016-04 | 941 | 376 | -214 | 1704 | 470 | 627 |
| 2016-05/2017-04 | 674 | 134 | -442 | 1393 | 385 | 513 |
| 2017-05/2018-04 | 1034 | 460 | -131 | 1903 | 525 | 700 |
| 2018-05/2019-04 | 698 | 170 | -377 | 1477 | 408 | 544 |
| 2019-05/2020-04 | 967 | 346 | -279 | 1801 | 497 | 663 |
| Moyenne | 863 | 297 | -289 | 1656 | 457 | 609 |
| Écart type | 165 | 140 | 124 | 215 | 59 | 79 |

Tableau 4 : Présentation des résultats du bilan hydrologique (Δ stock) pour chaque année. Le cumul de précipitation ainsi que l'estimation de l'interception (30 % et 40 % des précipitations respectivement) sont également présentés dans le tableau. L'ensemble des résultats est exprimé en millimètre par mètre carré par an.

Ainsi, ces résultats suggèrent qu'il est possible de fermer le bilan hydrologique du système avec la surface du bassin versant topographique en considérant l'interception dont son importance est estimée à 30-40% des précipitations. Il s'agit donc des situations où Δ stock est compris entre 457 ± 59 et 609 ± 79 mm.m⁻² an⁻¹. Cependant, dans la configuration où Δ stock est supérieur à l'estimation de l'interception (voir colonne « Δ stock : Q ETP minimums », Tableau 4), le système reçoit encore trop d'eau par rapport à ce qu'il est capable d'exporter par le débit et l'ETP. Réciproquement, lorsque Δ stock est négatif (voir colonne « Δ stock : Q ETP maximums », Tableau 4), le système ne reçoit pas assez d'eau pour compenser les pertes du système (Q et ETP). Considérer l'interception dans cette situation accentue le déficit en eau du système, suggérant qu'il est nécessaire de faire intervenir des apports d'eau souterrains non comptabilisés lorsqu'uniquement la surface topographique du bassin versant est utilisée. Ainsi, l'incertitude associée au bilan hydrologique cumulée, résultant de l'incertitude sur le débit et sur l'ETP, montre que malgré la prise en compte de l'interception dans le bilan, le système peut être soit déficitaire soit excédentaire en eau (respectivement Δ stock négatif et positif).

Ces deux hypothèses, Δ stock négatif et positif, impliquent que le bilan des interactions karst-tourbière n'est pas à l'équilibre. Ceci n'est néanmoins pas contradictoire avec le contexte géomorphologique dans lequel s'inscrit la tourbière du Forbonnet. En effet, un bilan déficitaire impliquerait que la décharge de la tourbière vers le karst soit plus importante que la recharge du karst vers la tourbière évoquée notamment d'après la dynamique des signatures géochimiques (Lhosmot et al., 2021). La temporalité, fonction des variations (intra-) saisonnière du karst, et la localisation, fonction de l'hétérogénéité de l'interface tourbe-moraine-karst, des phénomènes de décharge-recharge, restent à déterminer, mais fait écho aux profils géophysiques (réflectivité radar) mis en œuvre par l'ENTPE (Paran et al., in press). Ces derniers suggèrent la présence de structures dépressionnaires sous la tourbière et de réflecteurs pouvant témoigner de la présence d'eaux minéralisées à l'interface tourbe/substratum. Cependant, ce phénomène reste supposé et n'est ici pas quantifiable. Au contraire, un bilan excédentaire impliquerait que la recharge de la tourbière par le karst soit plus importante que la décharge de la tourbière vers le karst et concorderait avec la signature géochimique des eaux dans la tourbière évoquée dans la partie 5, p33 (Traceurs géochimiques).

L'approche bilan hydrologique développée ici met en évidence les processus hydrologiques encore mal contraints et non/mal quantifiés. Mieux intégrer ces processus permettrait d'améliorer la résolution du bilan hydrologique et d'en réduire son incertitude. Les flux d'eau potentiels entre la tourbière et les hydrosystèmes sous-jacents (perte, recharge) sont supposés mais il n'y a pas d'information permettant de contraindre leur importance et leur temporalité. Mieux contraindre l'ensemble des processus mentionnés ci-dessous permettrait probablement de discuter l'importance de ces flux :

- Il est nécessaire de quantifier l'interception. Ce processus dépend de l'importance de l'évènement pluvieux et des conditions atmosphériques avant l'évènement (saturation de l'air). Ainsi, la distribution des évènements (importance, temporalité) conditionne directement le cumul d'eau intercepté. Par exemple, Šrámek et al. (2019) observent une relation non linéaire entre le cumul d'un évènement pluvieux et le pourcentage d'interception de cet évènement dans une forêt

d'épicéas. Le pourcentage d'interception pour des petits événements pluvieux (<5 mm) est très variable (de 0 à 100%) et est caractérisé par une très forte densité de points entre 60 et 100% d'interception. Au contraire, lorsque les événements dépassent les 15 mm, l'interception est comprise entre 0 et 40% de l'évènement.

- Il est également nécessaire d'avoir une meilleure connaissance de l'évolution de l'altitude de la nappe d'eau à l'échelle du bassin versant topographique, incluant les tourbières boisées. Ceci permettrait de quantifier la variation de stock d'eau à l'échelle du bassin versant. Dans ce travail, le suivi piézométrique de la tourbière active, ne représentant que quelques pourcents de la surface du bassin versant topographique, ne permet pas d'établir de conclusions.
- L'incertitude sur le débit est probablement surestimée : un nombre de mesure plus important de débit dans des gammes de fortes valeurs de hauteur d'eau permettrait de mieux contraindre la courbe de tarage et ainsi d'en réduire l'incertitude.

6.4. Modélisation du débit à l'exutoire à partir d'un modèle réservoir

6.4.1. Principe

Modéliser le débit à l'exutoire du système reste un enjeu dans le cadre des problématiques de soutien d'étiage des tourbières aux hydrosystèmes aval d'une part et dans la compréhension des mécanismes de transfert en eau de la tourbière vers l'exutoire d'autre part. Ainsi, nous avons utilisé un modèle réservoir pour modéliser le débit à l'exutoire à un pas de temps journalier. Il s'agit du logiciel Karstmod (Mazzilli et al., 2019). Le travail a été effectué sur la même période d'étude que pour le calcul de bilan hydrologique interannuel. La pluie, l'ETP (Oudin) et le débit journalier sont les variables d'entrée. Dans le but à terme d'intégrer les projections climatiques dans ce modèle réservoir où seulement la température de l'air et les précipitations journalières sont disponibles, l'ETP calculé avec l'équation développée par Oudin et al. (2005) a été utilisé car il est possible d'utiliser cette méthode (nécessitant uniquement les données de température de l'air journalières).

Le modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la tourbière du Forbonnet suggère trois composantes contribuant à l'exutoire du système : (1) la contribution de l'acrotelme avec un temps de transfert rapide (journalier à horaire en période de crue) ; (2) le catotelme regroupant les niveaux de tourbe intermédiaire et profond où l'écoulement est plus lent et assure ainsi le débit d'étiage lorsqu'il n'y a plus d'eau dans l'acrotelme. Enfin, (3), l'apport d'eau minéralisée à l'exutoire de la tourbière en période estivale en lien avec la recharge hivernale de l'hiver précédant suggère une contribution d'un réservoir d'eau minéralisé à l'exutoire. Néanmoins, il est difficile de différencier cet apport d'eau du reste des eaux s'écoulant dans le catotelme dans la mise en place d'un modèle réservoir.

Conceptuellement, la pluie et l'ETP interfèrent avec le réservoir E qui correspond à une « fonction de production » entre les processus atmosphérique et l'eau disponible pour la tourbière. Le réservoir M correspond à la tourbière (Figure 39). Le débit à l'exutoire du système (Q_s) est égal à Q_{MS} . Q_{MS} permet d'intégrer la dichotomie de l'écoulement de l'eau de l'acrotelme et du catotelme. En effet, le flux Q_{MS} suit une relation puissance avec la hauteur d'eau dans le réservoir M, permettant ainsi de représenter les écoulements d'eau préférentiels dans l'acrotelme lorsque la hauteur d'eau est la plus forte. Q_{loss} correspond au flux d'eau sortant nécessaire pour équilibrer le bilan hydrologique (interception, pertes).

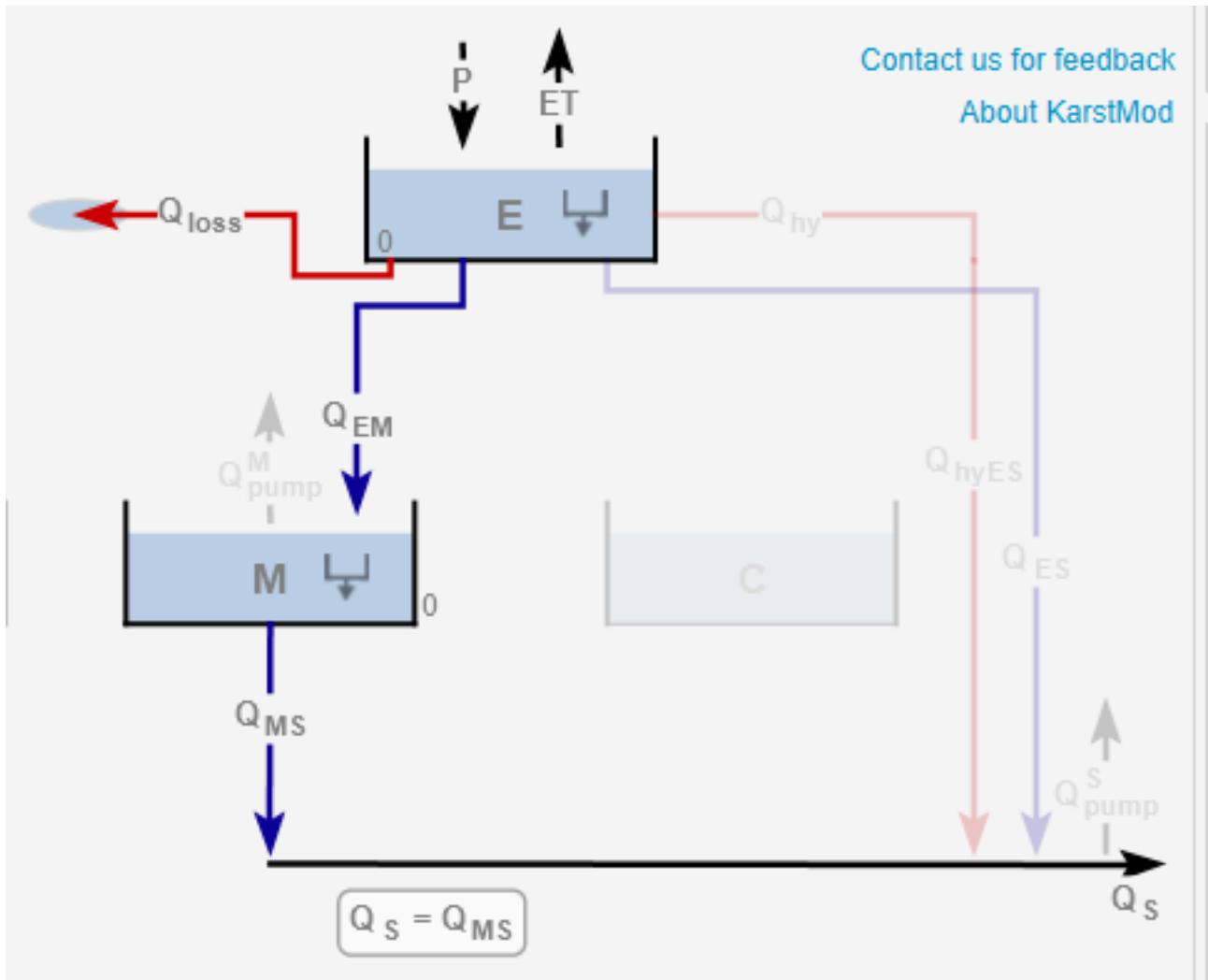


Figure 39 : Schéma conceptuel du modèle réservoir utilisé pour reproduire le débit à l'exutoire de la tourbière du Forbonnet.

- Q_{loss} est calculé à partir de l'équation suivante (Équation 4) :

$$Q_{loss} = k_{loss} * \left(\frac{E}{L_{ref}} \right)$$

Équation 4 : Calcul du débit spécifique (Q_{loss})

Où k_{loss} est le débit spécifique (mm/jour), E le niveau d'eau (mm) dans le réservoir E, L_{ref} est la longueur de référence pour la normalisation du niveau d'eau dans le réservoir E.

- Q_{EM} et Q_{MS} sont calculés à partir de l'équation suivante (Équation 5) :

$$Q_{AB} = k_{AB} * \left(\frac{A}{L_{ref}} \right)^{\alpha_{AB}} \quad (Eq. 3) \text{ si } A > 0,$$

$$\text{sinon } Q_{AB} = 0$$

Équation 5 : Calcul du débit du réservoir A vers le réservoir B (Q_{AB})

Où k_{AB} est le débit (mm/jour) du réservoir A vers le réservoir B, A le niveau d'eau (mm) dans le réservoir A, L_{ref} est la longueur de référence pour la normalisation du niveau d'eau dans le réservoir E, et α_{AB} est un exposant positif. Lorsque l'exposant α est égal à 1, le débit associé à la fonction suit donc une augmentation linéaire. $\alpha > 1$ signifie que la vidange du réservoir augmente en suivant une fonction puissance lorsque la hauteur d'eau dans le réservoir augmente.

La disposition du modèle réservoir évoqué plus haut fait intervenir 6 paramètres que le modèle vise à ajuster afin d'établir des simulations les plus proches possibles des données observées. Il s'agit de la surface du bassin versant (0,8-1 km²), la vitesse d'écoulement (k) pour chacun des flux d'eau exprimée en mm/jour ainsi que de l'exposant α associé à la fonction de calcul de débit entre deux réservoirs.

La mise en œuvre du modèle inclue une période « warm-up », puis une période de calibration de différents paramètres pour modéliser le plus justement possible le débit à l'exutoire et enfin une période de validation du modèle.

Afin d'évaluer la qualité de la modélisation du débit, le KGE (Kling Gupta Efficiency) est calculé pour la période de calibration et de validation (Gupta et al., 2009 ; Équation 6).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Équation 6 : Calcul du KGE (Kling Gupta Efficiency)

Où r est le coefficient de corrélation de Pearson entre le débit simulé et observé, α est le rapport entre la variance des données de débit simulé et observé et β est le rapport entre la moyenne des données de débit simulé et observé. Un KGE égal à 1 signifie que les valeurs simulées reproduisent exactement les valeurs mesurées.

Le modèle a été lancé pour 20 000 simulations afin d'obtenir une gamme de valeur pour chaque paramètre permettant de bien reproduire les données observées. Seules les simulations avec un KGE supérieur ou égal à 0,70 ont été conservées. Sur les 20 000 simulations, 15 973 ont validé ce seuil de qualité et ont donc été utilisées.

Concernant la simulation du débit à l'exutoire, pour chaque instant t et sur la base des n simulations opérées, on calcule l'intervalle de confiance à 90%, la valeur minimale et la valeur maximale du débit. En outre, le modèle calcule le Q_{s-prob} qui correspond à la valeur la plus probable du débit simulé, c'est-à-dire à la somme pondérée des débits par le KGE (Équation 7).

$$Q_{s-prob}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (KGE_{(i)} * Q_{s(i)}(t))}{\sum_{i=1}^n KGE_{(i)}}$$

Équation 7 : Calcul de la valeur la plus probable du débit simulé

Où n est le nombre de simulations.

6.4.2. Résultats et Discussion

6.4.2.1. Validité du modèle

Le modèle permet de bien reproduire le débit à l'exutoire de la tourbière en période de calibration comme en période de validation du modèle (Figure 40 et Figure 41). Pour les 15 973 simulations, le KGE varie entre 0,70 et 0,90 (moyenne = $0,76 \pm 0,04$ s.d.) pour la période de calibration et entre 0,53 et 0,93 (moyenne = $0,79 \pm 0,05$ s.d.) pour la période de validation. Les meilleurs résultats en période de validation peuvent s'expliquer par un événement de crue mal représenté lors de la période de calibration courant Juin et Juillet 2016 (Figure 40 et Figure 41). La surface de BV pour la meilleure simulation est de 0,882 km². Cet événement intervient durant la période estivale où la réponse du débit l'exutoire aux orages, dont la durée est de l'ordre de quelques heures, est probablement mal représentée du fait du pas de temps journalier du modèle.

Partie I - Frasne – Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet

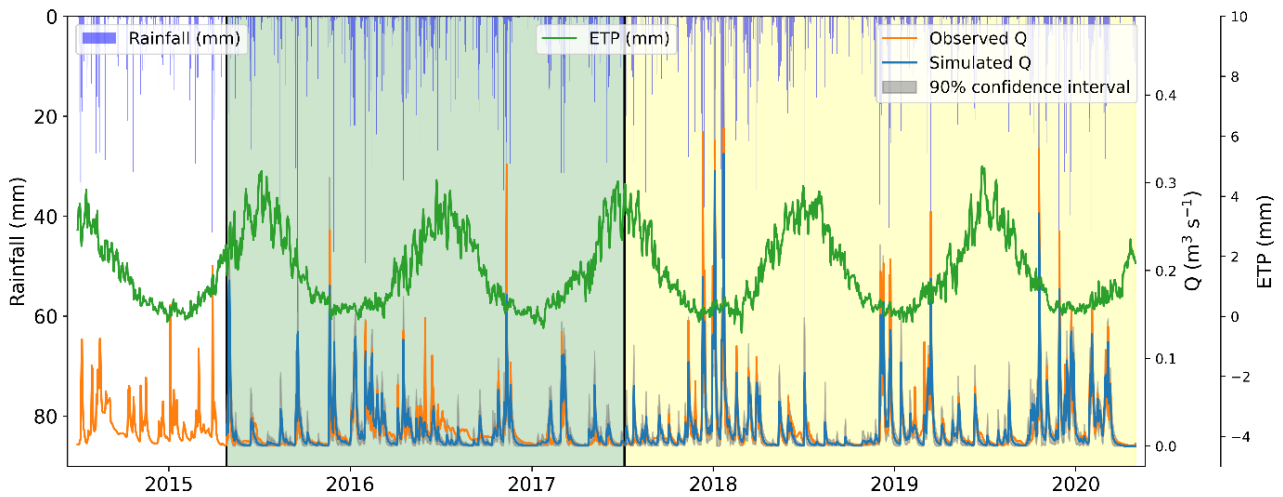


Figure 40 : Débit mesuré et simulé (Q_{S-prob} et intervalle de confiance) en fonction du temps pour la totalité de la période d'étude. Le fond de couleur indique si la période est en warm-up (fond transparent), calibration (vert) ou en validation (beige)

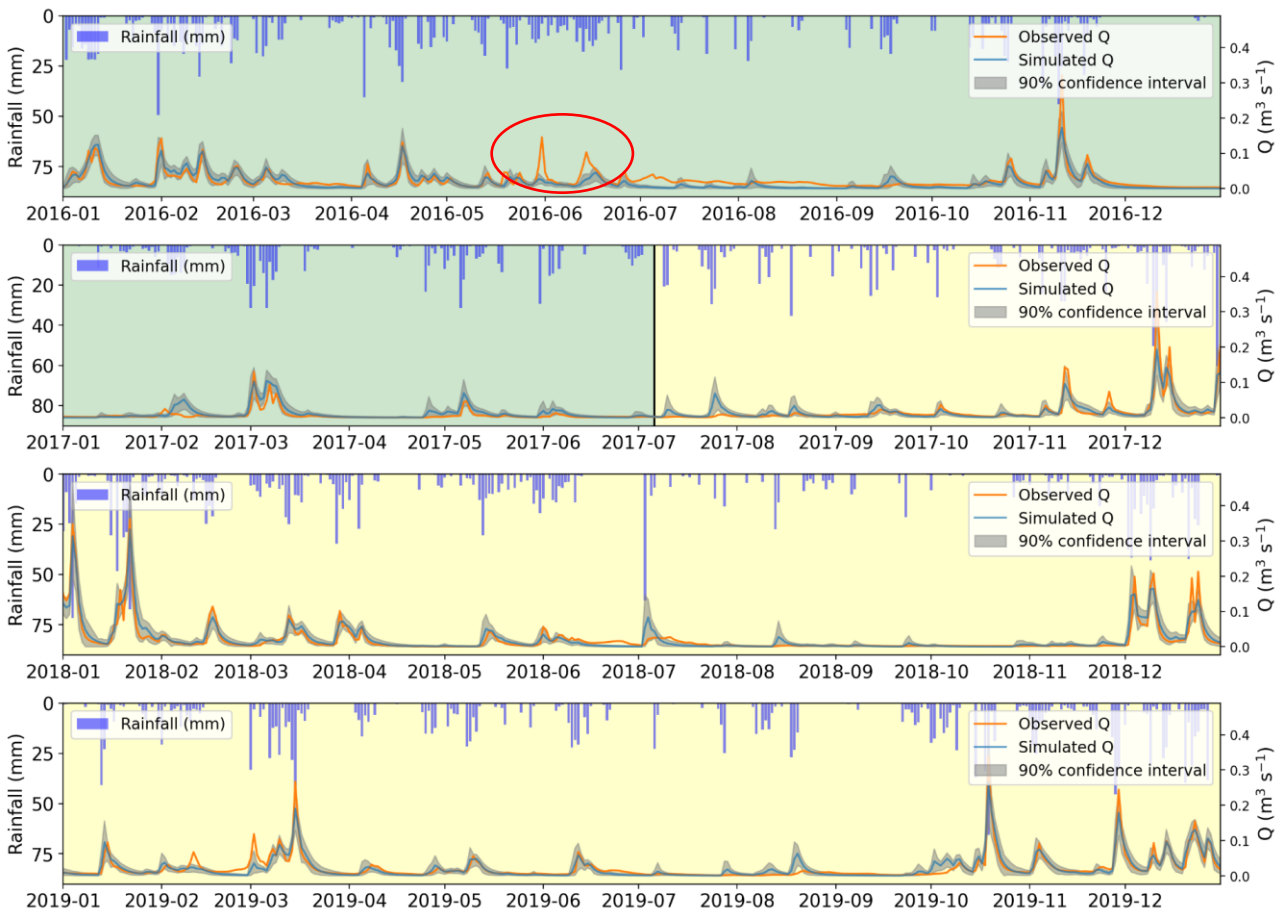


Figure 41 : Évolution du débit mesuré et simulé (Q_{S-prob} et intervalle de confiance) en fonction du temps. Chaque partie représente une année civile. Le fond de couleur indique si la période est en calibration (vert) ou en validation (beige). La Figure 42 montre que de la quantité d'eau cumulée exportée par le système est très proche entre les débits simulés et observés. Cela montre la qualité du modèle pour reproduire la quantité d'eau exportée de la tourbière à une échelle pluriannuelle. La différence de volume exportée entre le cumul de débit simulé et observé est seulement de 1,6 % pour la période de calibration et de 2 % pour la période de validation du modèle. L'ellipse rouge montre des évènements mal pris en compte par le modèle.

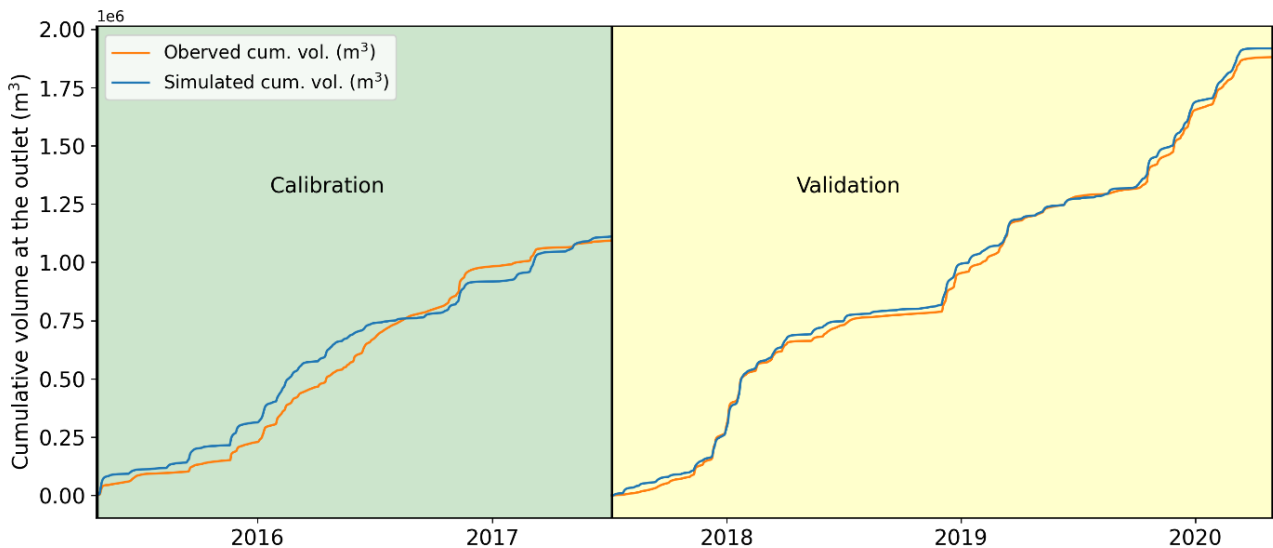


Figure 42 : Volume cumulé à l'exutoire de la tourbière sur la période calibration et validation. La comparaison des courbes simulé et observé montre la qualité du modèle pour reproduire la quantité d'eau exportée de la tourbière à une échelle pluriannuelle.

6.4.2.2. Mise en évidence d'un réservoir d'eau dynamique

Le niveau d'eau moyen dans le réservoir M est de $5,8 \pm 1,5 \text{ mm.m}^{-2}$ (maximum = $8,6 \text{ mm.m}^{-2}$) tandis que celui du réservoir E est en moyenne de $14,1 \pm 14,2 \text{ mm.m}^{-2}$ (maximum = $88,7 \text{ mm.m}^{-2}$) or pour la surface du bassin versant les épaisseurs de tourbe sont de l'ordre de plusieurs mètres. Même en supposant 1 m d'épaisseur de tourbe à l'échelle du BV et une porosité active du catotelm de 42% (Quinton et al., 2008), cela représente 420 mm de hauteur d'eau. Le volume d'eau absolue n'est pas représentatif de la réalité et ceci est probablement dû à la forte inertie générale des transferts d'eau de la tourbière sur le long terme (derniers milliers d'années). Ainsi, le volume d'eau dans les réservoirs E et M représente ce que l'on pourrait appeler le réservoir d'eau « dynamique » à distinguer du volume d'eau total dans la tourbière dont une partie est « immobile » aux échelles de temps considérées et n'intervient pas dans le bilan. Ceci est probable en particulier pour les couches de tourbes les plus profondes, dont le degré d'humification couplée au phénomène de compaction peut conférer à la tourbe un rôle de type aquitard lié à une chute excessive de leur conductivité hydraulique (Mesri and Ajlouni, 2007), quand bien même ce compartiment stockerait une quantité importante d'eau.

À première vue, cette inertie du réservoir profond semble contradictoire avec l'implication de venues profondes karstiques et qui s'exprimeraient jusqu'à l'exutoire au bout de quelques mois, suggérées par le modèle conceptuel de la tourbière proposé par Lhosmot et al. (2021). Cette dichotomie pourrait trouver son explication dans le comportement advectif des arrivées d'eau profondes qui « contaminent » ce réservoir et dont une portion, peut-être plus superficielle, atteint l'exutoire - potentiellement favorisé par les flux latéraux en provenance des tourbières bombées alentours - avant d'être diluée par les précipitations automnales.

6.4.2.3. Sensibilité de modèle

La Figure 43 représente la distribution de KGE en fonction des valeurs utilisées par le modèle pour chacun des six paramètres du modèle. Ce type de graphique permet d'évaluer la sensibilité du modèle pour chaque paramètre. En effet, une distribution homogène des points comme c'est le cas pour la surface du BV indique que pour chacune des valeurs de BV dans l'intervalle utilisé, le modèle est capable de reproduire les meilleurs KGE. Au contraire, le modèle est plus sensible aux paramètres α dont la distribution des points est en forme de cloche. Notamment, on peut observer que le KGE diminue lorsque α_{MS} se rapproche de 1, montrant l'importance d'un exposant α élevé (optimum entre 3 et 4), permettant de simuler l'augmentation exponentielle du débit lorsque la tourbière est en période de hautes eaux pour améliorer la qualité du modèle à travers une meilleure modélisation des processus d'écoulement en tourbière (modèle diplotelmique).

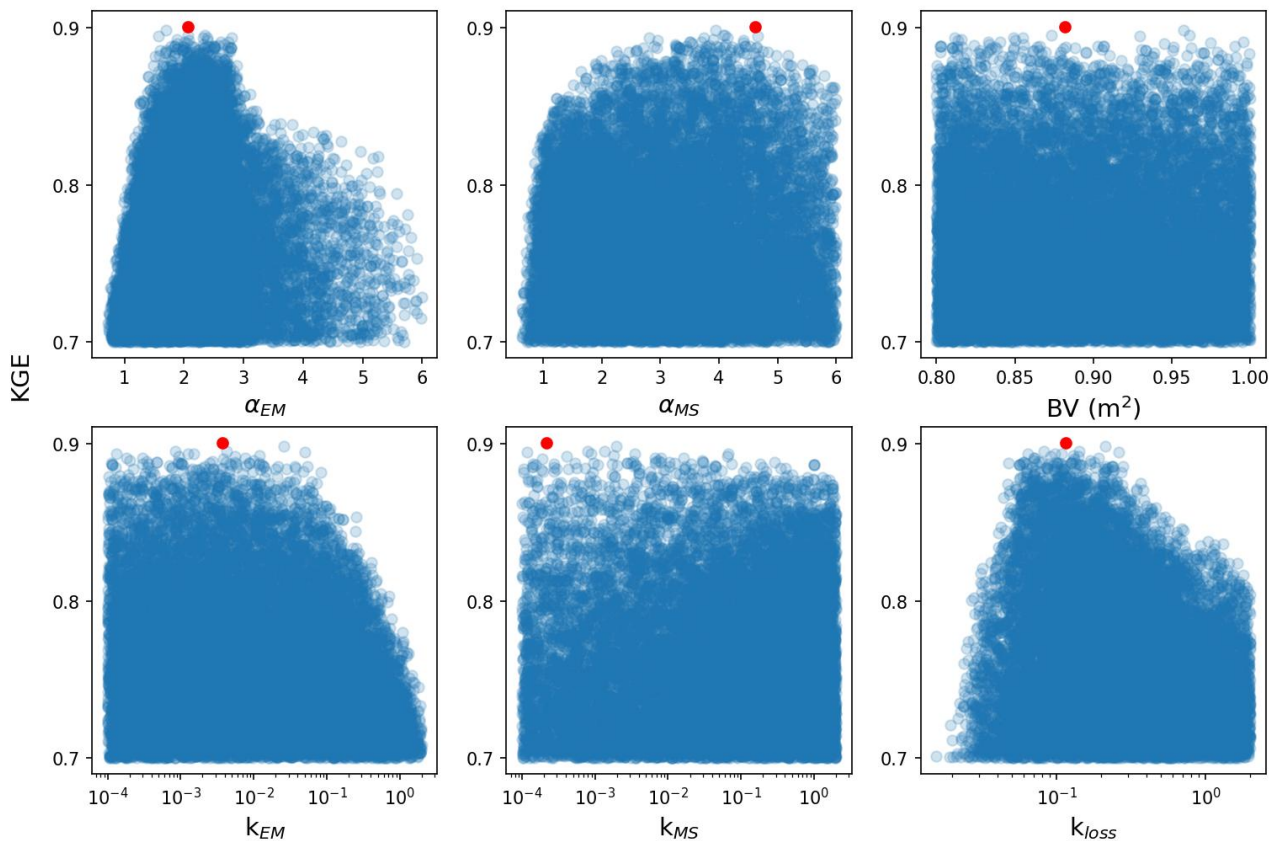


Figure 43 : Distribution des valeurs de KGE (période de calibration) en fonction des valeurs obtenues pour chaque paramètre parmi les 15973 simulations où le KGE est supérieur à 0.70. Le point rouge correspond à la simulation dont le KGE est le plus haut. L'axe horizontal pour les 3 graphiques du bas est en log.

6.4.2.4. Réponse du modèle en période de basses-eaux

Bien que le modèle à l'échelle interannuelle soit un très bon prédicteur du volume d'eau écoulé à l'exutoire du système (Figure 42) et qu'il reproduise bien de manière générale les débits à l'exutoire au cours du temps (KGE entre 0,7 et 0,9), la Figure 41 met en évidence des écarts significatifs entre débit mesurés et modélisés lors des périodes de basses-eaux. Pour les mois de juillet à septembre des années 2017, 2018 et 2019 lors d'évènement pluvieux les débits modélisés montrent une réponse rapide (augmentation) tandis que ceux observés restent stables. À cette période de l'année, la WTD est la plus basse et l'écoulement à l'exutoire résulte probablement en grande partie d'écoulement matricielle dans le catotélme. Les évènements pluvieux dans ces conditions se traduisent davantage par une ré-humidification/réhumectation de la tourbe que par une augmentation significative du débit à l'exutoire. Karstmod ne semble pas considérer ces processus comparables à un effet de seuil et donc par essence non linéaires, car il simule systématiquement l'augmentation du débit lors des évènements pluvieux en période de basses-eaux. Néanmoins, en termes de bilan, cette surestimation est très limitée dans la mesure où elle s'applique à des débits encore modestes sur des périodes restreintes à quelques jours.

6.4.2.5. Évaluation du Q_{loss}

Q_{loss} suit la même dynamique temporelle que $Q_{observé}$ (Figure 44). Cependant, en période de basses-eaux (juillet à septembre des années 2017, 2018 et 2019), Q_{loss} augmente lors d'évènements pluvieux alors que $Q_{observé}$ reste stable (Figure 44) suggérant donc que Q_{loss} incorpore une partie de la quantité d'eau servant à réhumecter la tourbe en période de basses-eaux.

De plus, le suivi des niveaux d'eau pour la somme des réservoirs E et M simulés par Karstmod montrent qu'il y a un cycle saisonnier mais qu'il n'y a pas d'augmentation comme cela a pu être mesurée dans la zone restaurée (Figure 45). Le logiciel Karstmod ne prend donc pas en considération l'effet de la restauration si celui-ci est significatif à l'échelle du BV (augmentation de dS sur la totalité du BV sur la période de l'étude) au niveau des réservoirs E et M.

Compte tenu de ces éléments, nous sommes en mesure de proposer quelles peuvent être, dans le contexte de la tourbière, les composantes intégrées dans la variable Q_{loss} (la quantité d'eau qui est rentrée dans le système mais qui ne contribue pas à l'évapotranspiration ou au débit observé en sortie) :

- Interception par les conifères ;
- Variation du stock d'eau dans la tourbière qui se traduit par des variations de l'altitude de la nappe ;
- Réhumectation de la tourbe après une période sèche. Les sphaignes et la tourbe peuvent être desséchés à proximité de la surface et l'apport d'eau va contribuer à réalimenter les tissus amenant à une réorganisation de la porosité (gonflement). Ce gonflement peut être chronique comme par exemple après une restauration hydraulique ou ponctuelle suite à un événement de sécheresse. Cette eau ne sera donc pas « disponible » pour alimenter les flux en direction de l'exutoire.

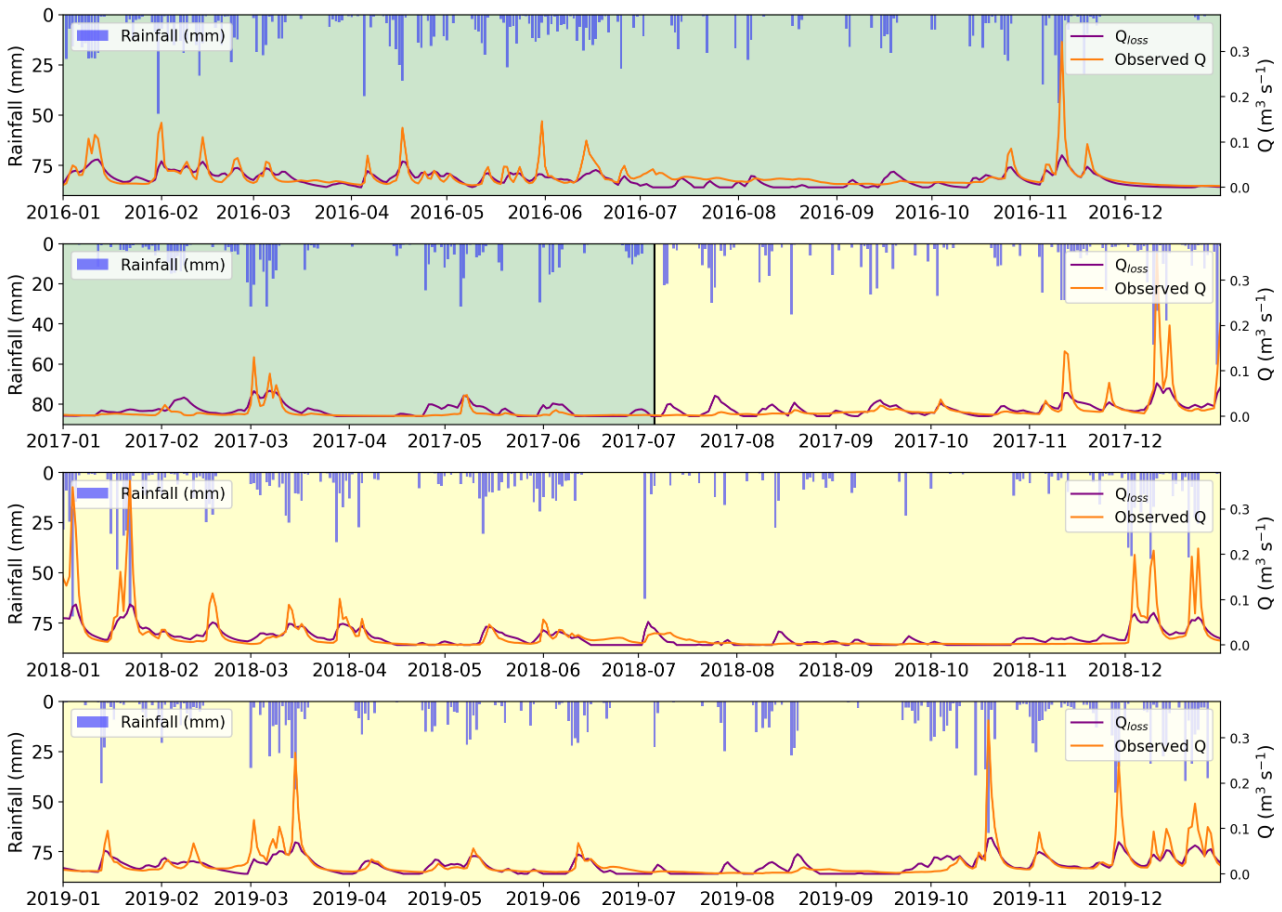


Figure 44 : Évolution du débit mesuré et du Q_{loss} en fonction du temps. Chaque partie représente une année civile. Le fond de couleur indique si la période est en calibration (vert) ou en validation (beige).

Partie I - Frasne – Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet

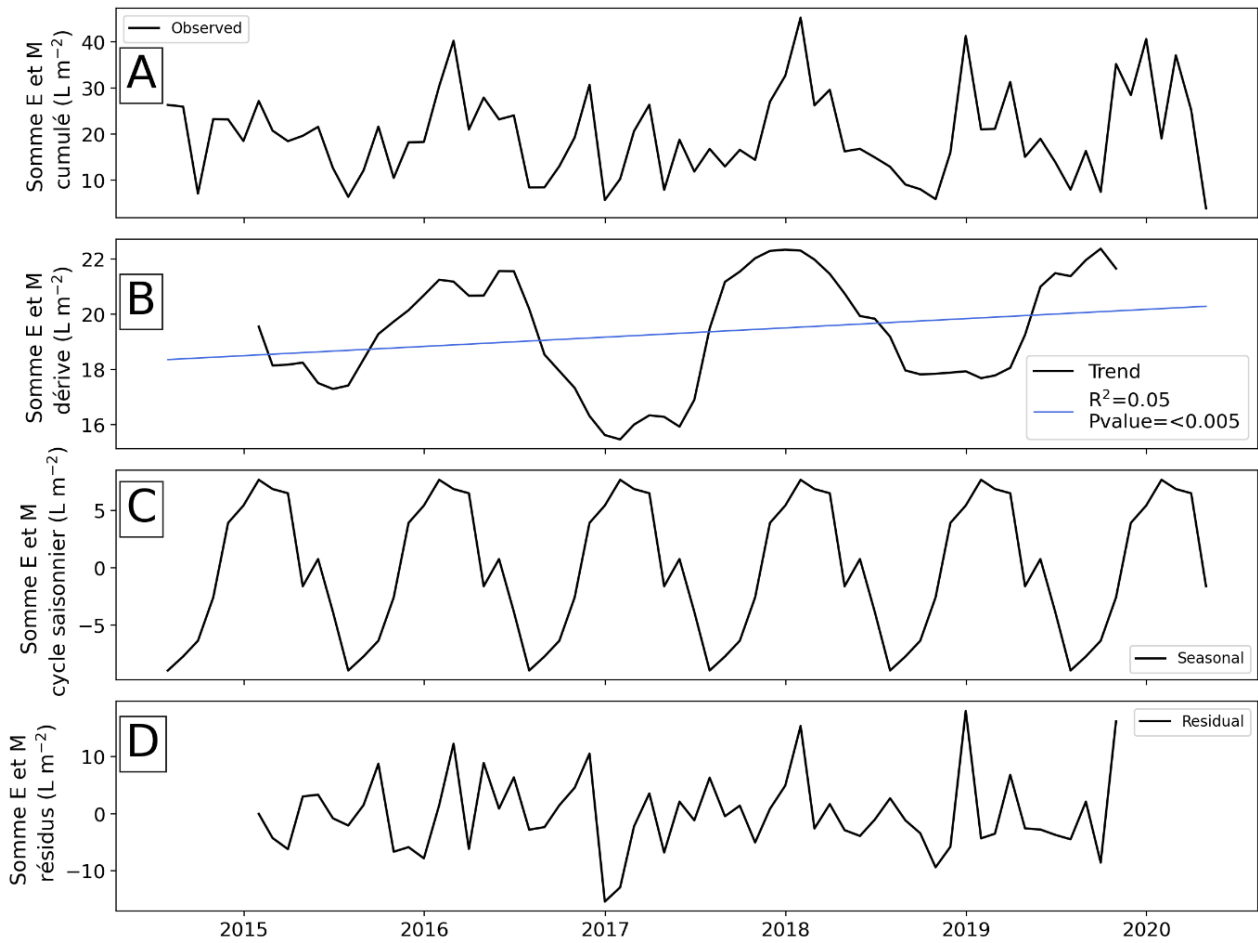


Figure 45 : Décomposition du signal de la courbe cumulée de la moyenne mensuelle de la somme du niveau d'eau dans les réservoirs E et M du modèle Karstmod avec la fonction seasonal décomposée. Le signal d'entrée est décomposé en trois signaux : 1) la tendance long terme, 2) un cycle saisonnier et 3) les résidus. La somme de ces trois signaux permet de reconstruire la courbe cumulée du Δ stock mensuel (modèle dit additif).

7. Campagnes géophysique (GPR) : juin 2018, janvier 2019 et septembre 2019



Figure 46 : Acquisition GPR en hiver sur la tourbière de Frasne (25) – Février 2022

7.1. Contexte de l'étude et objectifs

Cette partie s'inscrit au sein de la démarche « Méthodologie de terrain » où il s'agit d'utiliser des méthodes géophysiques, en particulier le radar géologique (ou GPR - *Ground Penetrating Radar*), afin d'obtenir des informations sur l'épaisseur des tourbières, la topographie de leurs fonds et éventuellement une image des structures internes. Cette technique ayant donné de très bons résultats lors de l'étude de la tourbière de Luitel (voir §12. p155), elle a été adoptée sur le site de Frasne.

Contrairement au site Luitel, les connaissances concernant l'interface tourbière/substratum du site de Frasne sont très faibles, il existe très peu de données (deux profils géophysiques peu exploitables, 505 sondages à la perche répartis inégalement et 4 carottes), de plus ce site est beaucoup plus vaste (230 ha contre 10 ha pour le Luitel). Dans ce cadre, l'acquisition de données géophysiques vise à mieux connaître :

- 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).

Plus précisément, il s'agit de déterminer la géométrie et les structures intermédiaires de la tourbière de Frasne à l'aide du GPR. À terme, une fois la géométrie et la structure bien comprise, il sera possible d'y appliquer des calculs hydrauliques pour essayer de quantifier le rôle de la tourbière de Frasne dans le soutien d'été des cours d'eau.

Partie I - Frasne – Campagnes géophysique (GPR)

Cette partie cherchera tout d'abord, en s'appuyant sur la bibliographie, à démontrer en quoi le *Ground Penetrating Radar* (GPR) est la méthode à privilégier pour l'obtention des profils géophysiques dans le cas de la tourbière de Frasne. La méthode générale de mesures sera ensuite détaillée, tout en montrant la robustesse de la méthode, en comparant les résultats avec des données obtenues à la « perche ». Les résultats seront enfin interprétés afin d'obtenir une représentation la plus précise de la structure profonde de la tourbière étudiée.

7.2. Éléments bibliographiques

Dans le contexte des tourbières, l'analyse du substrat par des carottages s'avère très efficace pour déterminer les propriétés hydrodynamiques et la caractérisation d'un échantillon, mais renseignent peu sur la forme et la continuité des structures, en particulier l'interface tourbière/substratum. En revanche, l'utilisation de méthodes géophysiques permet d'obtenir ces informations le long d'un profil. Globalement, dans ces milieux, trois méthodes peuvent être utilisées (Tableau 5).

| Méthode | Résultats | Observations | Bibliographie |
|------------------------------|--|--|---|
| Sismique réfraction | Forte atténuation des ondes mécaniques Rapport signal/bruit mauvais | Peu adaptée | Desplanque et Garambois (2010) |
| Sismique réflexion | Positif en contexte de contraste substratum calcaire/argile/tourbe | Inopérant dans d'autres contextes | Bossuet (1997) |
| Radar Géologique (GPR) | Mise en évidence les contrastes diélectriques dans le sous-sol Bonne résolution Facilité de mise en œuvre | Adapté en milieu faiblement résistif Recommandé | Lagneau (2006) Comas et al. (2005) Comas et al., (2011) Desplanque et Garambois (2010) Dallaire (2010) Lowry et al. (2009) |
| Tomographie électrique (ERT) | Mise en évidence de résistivité apparente Intéressant en contexte minérotophe Résolution faible Difficulté de mise en œuvre | Recommandé en contexte résistif | Desplanque et Garambois (2010) |

Tableau 5 : Synthèse bibliographique des principales méthodes géophysiques utilisées en contexte de tourbeux.

Dans la suite de cette partie, seule la méthode GPR sera développée car elle a été utilisée avec succès sur les deux sites du projet. La méthode ERT sera seulement évoquée car peu utilisée dans notre projet.

7.2.1. Principe du radar géologique ou GPR

La technique du GPR permet d'obtenir une image des remplissages sédimentaires de subsurface à haute résolution verticale. Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sous-sol, via une antenne émettrice, à une fréquence déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux (ou les sols) et, à chaque interface entre des milieux différents, une partie de son énergie est réfléchi vers la surface ; les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réflexion. La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radargramme, qui donne des informations géométriques sur la structure auscultée.

La profondeur d'auscultation dépend de plusieurs facteurs :

- la conductivité du matériau encaissant, principale cause de l'atténuation des ondes ;
- le choix de la fréquence (la profondeur d'investigation décroît lorsque la fréquence augmente) ;
- la dynamique du système radar, qui indique le rapport signal/bruit minimal détectable, et que l'on peut relier à une profondeur limite d'auscultation ;
- l'adaptation de l'antenne au matériau (l'aptitude à transmettre le maximum d'énergie rayonnée dans une direction donnée) ;
- la section équivalente radar (valeur décrivant l'énergie réfléchi dans une direction donnée suivant la forme et la taille de l'objet à détecter) ;

- le contraste électromagnétique de l'objet par rapport au matériau encaissant, en sachant que plus celui-ci est élevé et plus l'énergie rétrodiffusée est importante ;
- le niveau de bruit diffractant dû à la nature du matériau encaissant (taille et géométrie des granulats ou blocs).

Compte tenu de tous ces paramètres, la profondeur d'investigation peut aller de la surface (0 m) à quelques mètres dans les cas les plus courants. Elle peut exceptionnellement atteindre quelques dizaines de mètres dans la glace, le sable sec ou un rocher très sain.

Il existe une relation entre la profondeur d'investigation possible et la résolution qui est liée à la longueur d'onde émise. Cette résolution est définie comme la distance minimale entre deux interfaces pour que ces dernières soient visibles sur le radargramme. C'est une fonction de la fréquence de l'onde électromagnétique (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Elle est théoriquement égale à $\lambda/4$ (où λ est la longueur d'onde à la fréquence d'étude) ; la résolution réelle est comprise entre $\lambda/3$ et $\lambda/2$. D'après la relation de la vitesse des ondes électromagnétiques $v = \lambda.f$, la fréquence augmente lorsque la longueur d'onde diminue. La résolution étant proportionnelle à la longueur d'onde, elle sera d'autant plus importante que la fréquence augmente : une grande longueur d'onde induit une faible atténuation et l'onde électromagnétique va pénétrer en profondeur ; corrélativement, la résolution est faible et l'onde n'est pas affectée par les objets de dimension réduite (Tableau 6).

| Fréquence d'antenne | Résolutions verticales théoriques | Profondeurs théoriques |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 100 Mhz | 60 cm | 10 – 15 m |
| 200 MHz | 30 cm | 5 – 6 m |
| 400 MHz | 15 cm | 3 – 4 m |

Tableau 6 : Résolution verticale et profondeur de pénétration théoriques en fonction de la fréquence d'antenne dans les sédiments

La vitesse de propagation des ondes dépend principalement de la constante diélectrique (ou permittivité relative) du milieu environnant et peut être présentée en première approche sous la forme suivante : $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$, avec v = vitesse de l'onde électromagnétique en m/s ; c = célérité de la lumière dans le vide (3,108 m/s) ; ϵ_r = permittivité relative (sans dimension).

Plus un matériau est humide, plus la vitesse de propagation est lente ; cela peut influencer la précision des mesures lorsqu'il existe un gradient d'humidité au sein de ce milieu (comme pour le béton par exemple). En hydrologie, il est utilisé pour caractériser les variations des niveaux de nappes et les contrastes eau/substrat/Bedrock (Neal, 2004).

Le radar géologique est sensible aux interfaces air/eau/sédiments, à la quantité et au type de fluide occupant les pores des sédiments, au changement de porosité, de granulométrie, de forme des grains et de leur orientation. Les variations d'interface (Annan, 2003) peuvent être à l'origine de réflexions radar au sein d'un même faciès sédimentaire. Les permittivités diélectriques des phases air/eau/sédiments sont sensiblement différentes (80 pour l'eau, 4-6 pour les sédiments et 1 pour l'air ; Reynolds, 2005). Des réflexions radar peuvent interférer dans l'interprétation des données recueillies au radar géologique ; il est donc primordial de connaître la capacité d'un faciès sédimentaire à retenir l'eau. D'autres phénomènes peuvent interférer avec les ondes électromagnétiques de l'antenne émettrice comme le bruit environnant (téléphone portable, antennes relais, talkie-walkie...) et peuvent être supprimés avec des filtres fréquentiels.

Tous ces facteurs interagissent sur les ondes radar enregistrées au niveau de l'antenne réceptrice. Cependant, on peut retenir que dans un même environnement, suivant la nature et la forme d'un objet enterré, la profondeur maximale à partir de laquelle il ne sera plus détecté peut-être notablement différente.

7.2.2. Le GPR : un outil particulièrement adapté

D'une manière générale, la compréhension d'un hydrosystème repose sur la connaissance de son organisation (Dangeard, 2017). Ainsi l'utilisation du GPR s'avère particulièrement pertinente pour

Partie I - Frasne – Campagnes géophysique (GPR)

apprécier les grandes interfaces et l'épaisseur du substrat étudié, ainsi que le contact Bedrock/Gyttja ou l'épaisseur de tourbe (Dallaire, 2010 ; Lagneau, 2006 ; Lowry, 2009).

Si en France son utilisation est encore peu documentée dans la littérature, celle-ci est davantage présente dans l'étude des tourbières canadiennes et finlandaises (Duranel, 2015). L'aptitude remarquable à la pénétration des ondes radar dans certaines tourbières permet alors d'en définir les grands traits lithologiques (Doolittle et Butnor, 2009 ; Carrier, 2003). Hormis la caractérisation des grandes interfaces, l'utilisation d'ondes radar au moyen du GPR permet également de prolonger l'investigation au-delà du matériau tourbeux et d'identifier la zone de contact avec les formations périglaciaires au fond des anciennes cuvettes lacustres mais également sur les secteurs périphériques où le substratum affleure. L'emploi de cet outil est aussi validé dans l'étude de l'épaisseur de la matrice glaciaire du pergélisol et de la taille des formations palsiques des tourbières (Dallaire, 2010).

L'accumulation de neige ou de glace en surface est susceptible d'entraîner une altération du signal et de provoquer des réflecteurs et des multiples superflus dissimulant la présence d'interfaces sur les premières strates, en revanche il permet d'en estimer l'épaisseur. De même la présence de gaz retenu dans la fraction organique engendre la diffusion d'une onde de « *scattering zone* » (au lieu d'une réflexion), concourant à produire des radargrammes sans réflecteurs apparents. Ce mécanisme a notamment été observé dans l'étude de la tourbière du Caribou Bog dans l'état du Maine aux États-Unis (Comas et al., 2005). Cette forte présence de gaz a été attestée par des relevés de surfaces indiquant des concentrations élevées de CO₂ et de CH₄. Des investigations par quelques auteurs ont montré que certaines propriétés : densité apparente, concentration de matière organique, degré de dégradation ou composition botanique étaient susceptibles de favoriser des variations hydroécologiques, repérables par les ondes radars (Warmer et al., 1990 ; Doolittle et Butnor, 2009). Sous certaines conditions de quantité de matière organique, il est possible de détecter l'interface acrotelme/catotelme (Theimer et al., 1994).

Enfin, la continuité de l'information entre différents points de mesure (carottage, sondage à la perche, piézomètre, ...) repose soit sur un modèle de terrain supposé, soit sur une interpolation des données à partir de prélèvements. Ainsi le couplage de ces mesures avec les profils GPR est alors essentiel si l'on veut déterminer la continuité des faciès internes et prendre en compte l'hétérogénéité du milieu (Figure 47) (Lowry et al., 2009 ; Winiarski, T., 2014 ; Mermillod-Blondin et al., 2015).

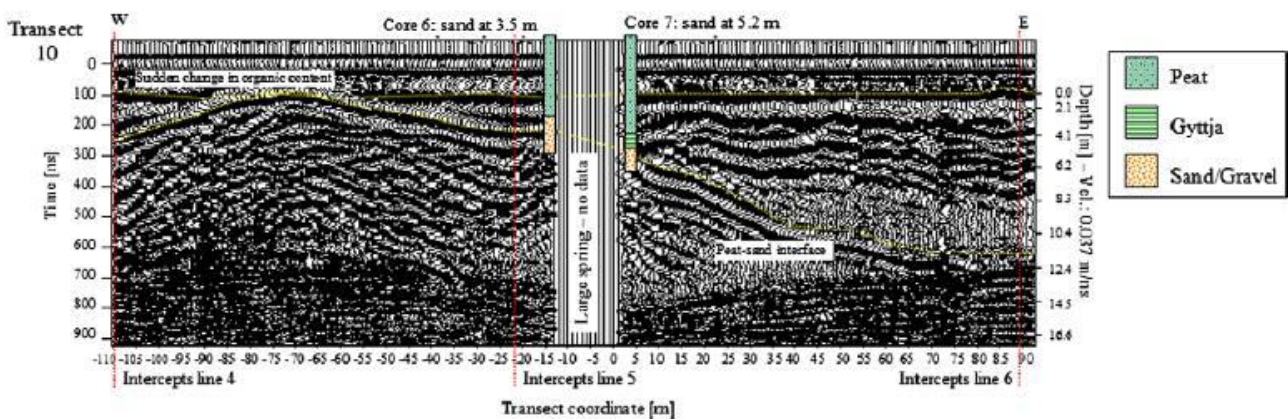


Figure 47 : Exemple de résultat obtenu par GPR dans une tourbière du Wisconsin (USA) qui permet une interprétation du profil en fonction des caractéristiques du milieu (Lowry et al., 2009).

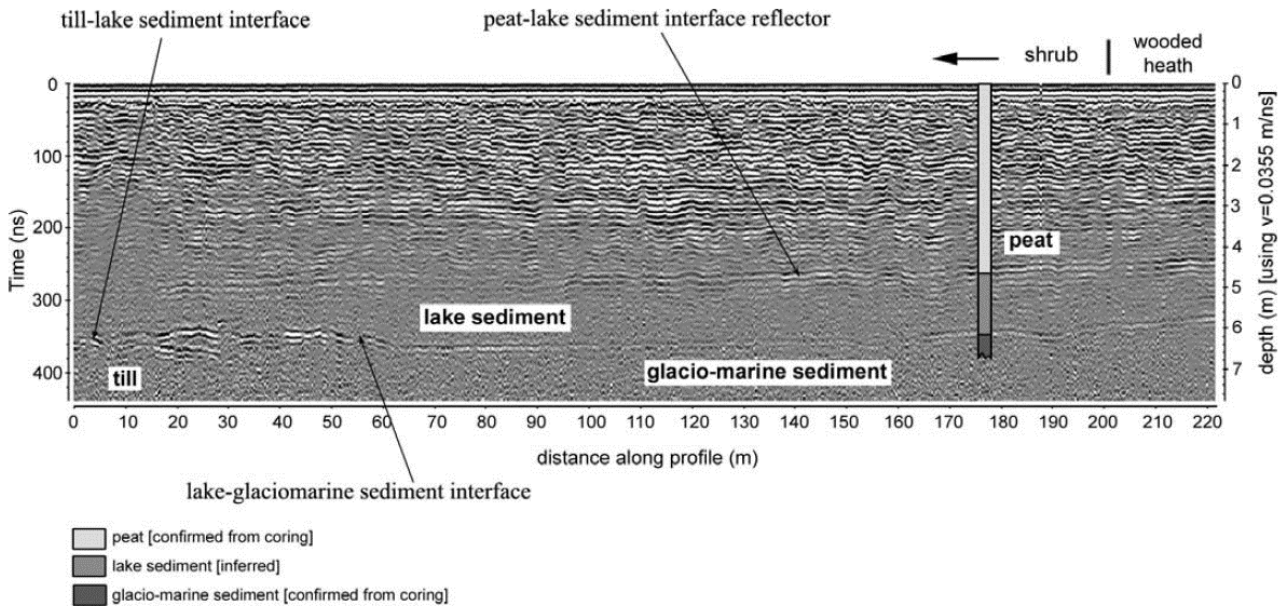


Figure 48 : Exemple de résultat obtenu par GPR dans une tourbière du Maine (USA) qui permet une interprétation du profil en fonction des caractéristiques du milieu (Comas et al., 2005)

7.2.3. Quelques mots sur la méthode ERT

La méthode ERT pour *Electric Resistivity Tomography* ou tomographie électrique mesure la résistivité des matériaux du sol analysé. Cela se fait par le biais d'un courant électrique propagé entre deux électrodes, permettant d'obtenir une différence de potentiel, dont on déduit par la suite les résistivités apparentes des différentes structures détectées. Cette méthode a pour avantage de permettre une grande profondeur d'investigation (jusqu'à 50 m) avec une assez faible résolution sur le plan vertical, ce qui rend difficile son interprétation (Figure 49). De plus, sa mise en œuvre est considérée comme longue, peu adaptée à un milieu marécageux et peu rentable en termes d'efficacité.

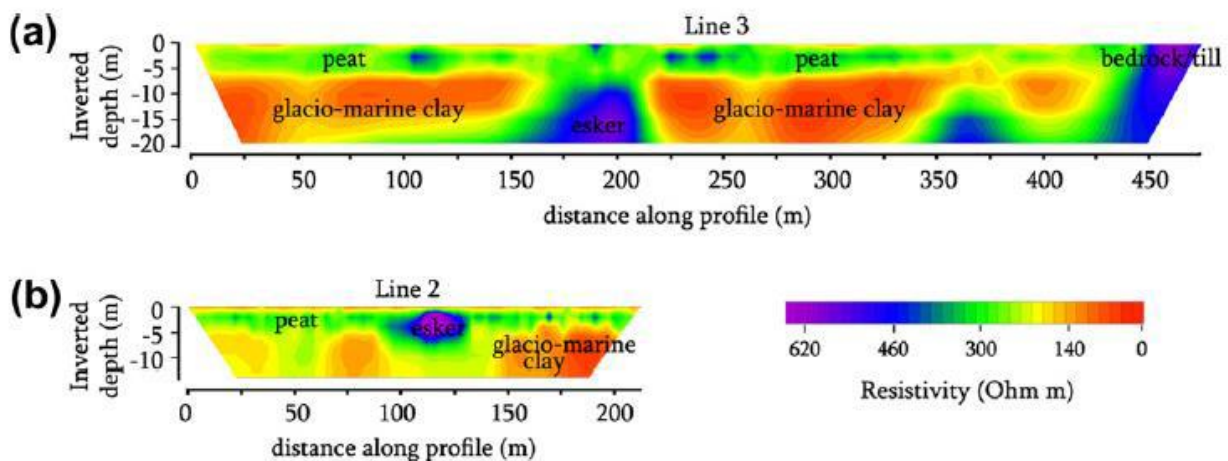


Figure 49 : Exemple de résultat obtenu par ERT (Comas et al., 2011).

7.2.4. Conclusion

La méthode GPR pour *Ground Penetrating Radar* ou radar à pénétration de sol permet de mettre en évidence un changement du milieu par le biais d'ondes électromagnétiques se propageant dans le sol. Il est possible d'obtenir une bonne résolution verticale avec un bon rapport temps/acquisition et particulièrement adaptée aux tourbières (Tableau 5 et Tableau 7). C'est cette méthode, utilisée sur le terrain, que nous développerons dans la suite du rapport.

| Méthodes | Avantages | Inconvénients |
|--------------------|---|---|
| Méthode ERT | Grande profondeur d'investigation (50 m) | Faible résolution verticale Difficulté d'interprétation Mise en œuvre lourde (environ 2 h pour 150 m) Matériel lourd et volumineux |
| Méthode GPR | Bonne résolution verticale Mise en œuvre aisée Vitesse d'acquisition (1 m.s ⁻¹) Facilité d'interprétation Matériel léger et adaptable | Profondeur d'investigation n'excédant pas 15 m Signal atténué en présence de gaz, d'un milieu trop conducteur |

Tableau 7 : Comparaison entre les méthodes ERT et GPR.

7.3. Matériels et méthodes

7.3.1. Le radar géologique ou GPR

Un GPR de la marque GSSI a été utilisé¹⁰. Le matériel est constitué d'un système d'acquisition SIR-3000 relié à une antenne radar au moyen d'un câble et à une antenne GPS. Le choix de l'antenne radar s'effectue de manière à obtenir le meilleur compromis entre la profondeur d'investigation et la résolution verticale (possibilité de séparer deux couches en profondeur). La profondeur maximale d'acquisition étant au préalable très difficile à estimer, deux types d'antennes ont été utilisés dans le cadre de cette étude : 200 Mhz et 400 Mhz (Figure 50).



Figure 50 : Le système d'acquisition SIR-3000 au premier plan, et de gauche à droite les antennes de 100 (non utilisée dans cette étude), 200 et 400 Mhz

Bien que les résultats d'études antérieures sur des sites identiques ont montré que le rapport résolution/profondeur d'investigation était optimal avec l'antenne de 200 MHz, nous avons aussi utilisé une antenne 400 MHz afin de mieux renseigner les premiers mètres. Le traitement du signal des profils radar (ou radargramme) a été effectué avec le logiciel de traitement du signal Radan7 de la société GSSI selon les étapes suivantes : 1) normalisation en distance ; 2) correction de l'offset ; 3) correction du bruit de fond ; 4) application de filtres (FIR et IIR) ; 5) migration ; 6) application d'un gain. La

10. Ce matériel appartient au laboratoire LEHNA-IAPHY (UMRS CNRS 5023) de l'ENTPE.

correction topographique a été effectuée en se basant sur les données Lidar fournies par la Réserve Naturelle.

La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est un paramètre essentiel qui permet de calculer la profondeur lors de l'opération de migration. Cette vitesse a été estimée à partir de plusieurs valeurs tirées de la littérature et obtenues dans des tourbières. Les valeurs sont : $0,0355 \text{ m.ns}^{-1}$ pour Comas et al. (2005) ; $0,037 \text{ m.ns}^{-1}$ pour Theimer et al. (1994) ; entre $0,035 \text{ m.ns}^{-1}$ et $0,047 \text{ m.ns}^{-1}$ pour Lowry et al. (2009). La vitesse choisie pour cette étude est de $0,035 \text{ m.ns}^{-1}$. La comparaison du réflecteur tourbière/substratum avec quelques sondages à la perche permet de justifier le choix de cette vitesse.



Figure 51 : Adaptation de l'antenne 200 Mhz sur une pulka pour les campagnes hivernales.

7.3.2. Campagnes d'acquisition et localisation des profils

L'acquisition des profils radar (ou radargramme) a été obtenue lors de trois campagnes de terrain (Figure 52) :

- **juin 2018** : 2 courts profils en juin 2018 qui ont permis de tester la méthode sur des « zones sèches » ;
- **janvier 2019** : 10 profils (soit 1,5 km) ciblées sur des secteurs humides à inondées mais englacées et recouvertes de neige au moyen d'une pulka qui permet de faire des acquisitions en milieux marécageux (Figure 51). Cette campagne a permis d'obtenir des profils de qualité moyenne avec un rendement faible ;
- **septembre 2019** : 54 profils (10,5 km) ont pu être acquis en zones sèches et humides, car l'été 2019 était particulièrement sec. Profitant de cette année exceptionnellement sèche, un maximum de profils a été acquis.

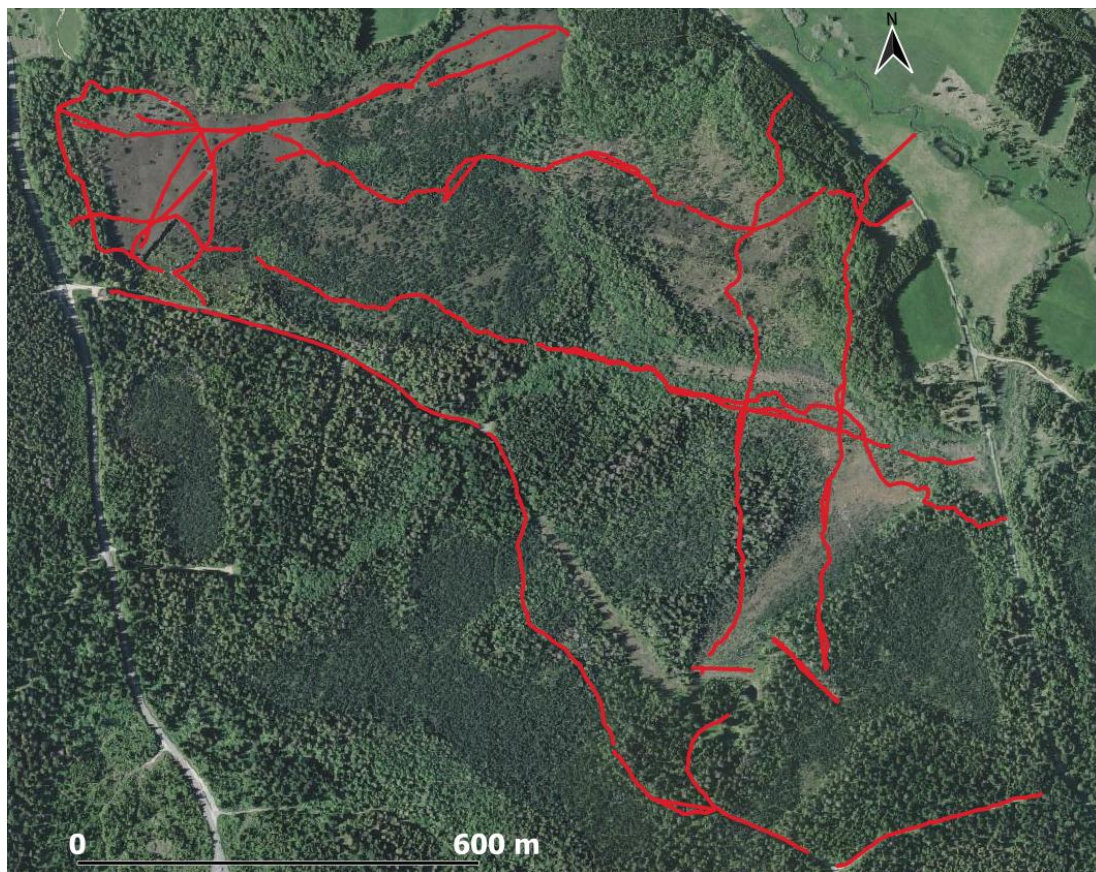


Figure 52 : Répartition et localisation de tous les profils acquis lors des trois campagnes de mesures.



Figure 53 : Répartition et localisation des profils traités et interprétés. Les points représentent le départ et l'arrivée des différents sous profils.

Sur la totalité des 74 profils (12 km) seulement 21 profils (4,5 km) ont été traités et interprétés et seront présentés dans cette partie (Figure 52 et Figure 53). Globalement, il s'agit de profils sur deux transects d'orientation est-ouest et sur deux transects d'orientation nord-sud permettant d'obtenir une vision globale de la totalité de la tourbière. Du fait du temps de traitement, d'analyse et d'interprétation, les profils non traités sont conservés et pourront faire l'objet d'un traitement et d'une interprétation ultérieure.

7.3.3. Données existantes

Pour cette étude, plusieurs types de données ont été utilisés, ils proviennent essentiellement de la Réserve Naturelle de Frasne.

- **Sondages à la perche**

Ces mesures ont été effectuées par les agents de la réserve au cours des 10 dernières années (2010-2020). À un point donné (coordonnées GPS), il s'agit d'enfoncer une perche jusqu'au refus et de mesurer la profondeur atteinte. Quelques points permettent de vérifier la profondeur de tourbe obtenue avec le profil GPR correspondant. De plus quand le signal électromagnétique est trop bruité, ces points permettent de situer l'interface tourbière/substratum. Les données sont sous forme de Shapefile (Tableau 8).

| Nom du fichier | Type de données | Nombre de points |
|---------------------------|---|------------------|
| Htourbe_t10 | Ligne SE-NW dans la partie l'Est | 13 |
| Htourbe_t11 | Ligne SE-NW dans la partie l'Est | 14 |
| Htourbe_tourbière vivante | Carroyage partie Est | 298 |
| Htourbe_nord | Plusieurs lignes dans la partie nord | 78 |
| Sondages_RNR2016_2020 | Données Htourbe_nord + points sur les profils GPR | 128 |

Tableau 8 : Ensemble des noms des fichiers Shapefile et données disponibles.

- **Données Lidar**

Il existe un fichier lidar (Nom du fichier : dblbnd2_georef) englobant la totalité de la réserve. C'est à partir de ce fichier que les corrections topographiques des profils GPR ont été effectuées. Les métadonnées concernant ce fichier n'ont pas été communiquées (précision X, Y et Z, corrections éventuelles, ...)

- **Positionnement et description rapide des carottes**

Les carottes sont situées essentiellement dans la partie sud-est du site (Figure 54), et non positionnées sur les profils étudiés. De plus, elles ont été prélevées soit à des fins de datation (Peatwarm 2011 et mai 2015), soit à des fins d'estimation de la conductivité hydraulique (3 carottes en 2014), soit à des fins d'études de macrorestes (mai 2015). Elles ne présentent donc pas d'intérêt concernant notre étude. Il semblerait pertinent d'effectuer quelques carottes sur les profils acquis durant cette étude afin d'en préciser la description. Pour information : 1) **2010** : 1 carotte « Peatwarm » / 4,10 m => datation environ 7 250 ans BP ; 2) **2014** : 3 carottes / CLA : 1,9 m ; CLB : 1,95 m ; CLC : 2,19 m => conductivité hydraulique et textures partielles (limon argilo-sableux et tourbe saprique ; $k = 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$) ; 3) **2015** : 1 carotte « Goubet » / 2,10 m => macrorestes + datation environ 1 100 ans BP.

- **Les profils ERT**

Trois profils ont été effectués en juillet 2015 au Creux du Lard sur plus de 30 m de profondeur¹¹ (Figure 54 et Figure 55) qui n'ont pas été utilisés dans ce rapport car difficile à interpréter car peu précis sur les premiers mètres. Cette méthode ne semble pas être adaptée à la tourbière de Frasne.

11. Travaux effectués par l'UMR CNRS 6249 Chrono-environnement.

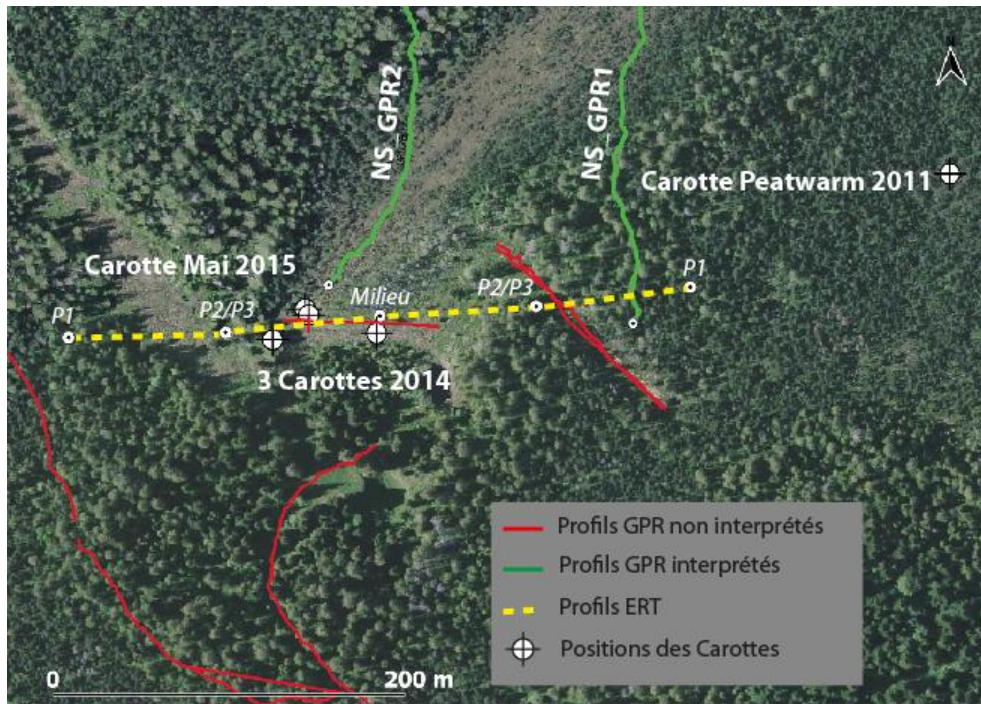


Figure 54 : Positionnements des 5 carottes existantes, des profils GPR acquis durant cette étude et des profils ERT acquis dans des travaux ultérieurs.

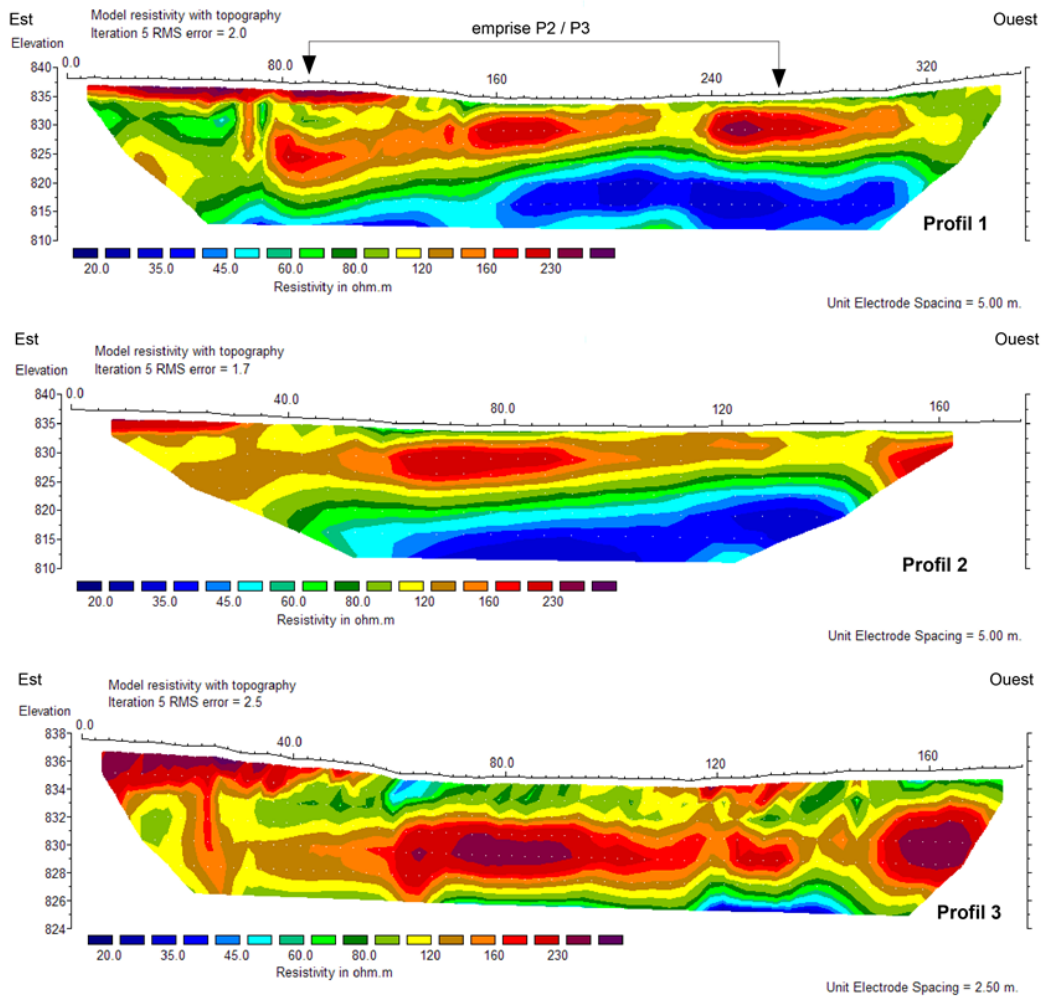


Figure 55 : Profils de Tomographie de Résistivité Électrique, dispositif Wenner-Schlumberger (UMR CNRS 6249- Chrono-environnement, juillet 2015).

7.3.4. Méthodologie adoptée

Dans un premier temps, l'utilisation d'un SIG (QGIS) a permis d'intégrer toutes les données géoréférencées à disposition : 1) la position des carottes et des sondages à la perche ; 2) les données lidar qui ont permis d'obtenir un MNT ; 3) les traces des profils ERT et 4) l'ensemble des profils GPR.

Puis pour chaque profil, la démarche suivante a été adoptée :

- **Étape 1** : obtenir une image interprétable par traitement du signal avec le logiciel Radan 7. Il s'agit de supprimer le bruit de fond, d'utiliser des filtres (IIR, FTIR), de transformer les double-temps de pénétration en profondeurs par migration (la vitesse utilisée est de $0,035 \text{ m.n.s}^{-1}$) et de modifier le gain pour obtenir une image contrastée.
- **Étape 2** : faire la correction topographique seulement des profils présentés. Elle a été effectuée tous les 2,5 m environ en utilisant l'altitude du MNT. Il s'agit d'une étape longue et fastidieuse car les logiciels ne sont pas compatibles, à chaque point du profil GPR (tous les 2,5 m) il faut entrer les altitudes manuellement.
- **Étape 3** : les profils sélectionnés sont très longs (Figure 53) - NS_GPR1 (860 m), NS_GPR2 (950 m), EW_GPR1 (1540 m) et EW_GPR2 (1540 m). Lors de l'acquisition, pour des raisons de stockage de données mais surtout en fonction de la topographie du terrain où il est nécessaire de faire des arrêts, des profils plus courts ont été nécessaires. Par exemple, pour le profil EW_GPR2, 6 sous profils d'acquisition ont été nécessaires - GPR2_AB (365 m), GPR2_C (168 m), GPR2_D (86 m), GPR2_E (111 m), GPR2_F (400 m) et GPR2_G (300 m). Enfin, pour faciliter l'interprétation, chaque sous profil a été découpés en sections d'environ 100 m de longueur, ce qui permet de s'affranchir des effets d'échelle concernant les distances (axe des X) et retravaillé sur le logiciel Adobe Photoshop.
- **Étape 4** : interprétation à partir des images de sous profils obtenus avec Adobe Illustrator. Pour chaque sous profil acquis, les résultats sont présentés sous formes de « Profil total » et de section de 100 m (Annexe 7). Les sondages à la perche sur les profils ou très proches ont été positionnés.
- **Étape 5** : pour chaque profil, une synthèse des résultats de traces topographiques et d'interfaces tourbière/substratum est présentée sur une même figure. Seuls les sondages à la perche sur les zones où l'interface n'était pas visible, ont été positionnés.

7.4. Résultats de la campagne géophysique

Dans cette partie, il s'agit d'illustrer la méthodologie adoptée à partir d'un profil, puis de présenter une synthèse des résultats sur deux transects d'orientation est-ouest et sur deux transects d'orientation nord-sud et enfin, de présenter quelques résultats ponctuels et caractéristiques.

7.4.1. De l'acquisition à l'interprétation

Afin de permettre au lecteur de se rendre compte de la démarche adoptée, le sous profil NS_GPR2E (220 m), qui correspond à la fin du profil NS_GPR2, est présenté sur les Figure 56 et Figure 57. Le profil brut sans traitement (Figure 56.a) montre un réflecteur continu et assez prononcé entre 100 ns et 150 ns, ce qui montre que ce réflecteur est bien significatif. Après un traitement et correction présentés dans le paragraphe précédent (Figure 56.b), un premier réflecteur continu situé entre 836,6 m et 835,4 m correspond à la surface topographique, il s'agit de la surface de la tourbière. Un second réflecteur subcontinu se trouve entre 833,7 m et 832 m, il est globalement horizontal jusqu'à 125 m de distance et à 833,7 m d'altitude, puis entre 125 m et 145 m il descend pour former une petite dépression en « V » où son point le plus profond est à 832 m, ensuite il remonte un peu pour se stabiliser à environ 833 m. **Ce réflecteur est interprété comme l'interface entre la tourbière et le substratum.**

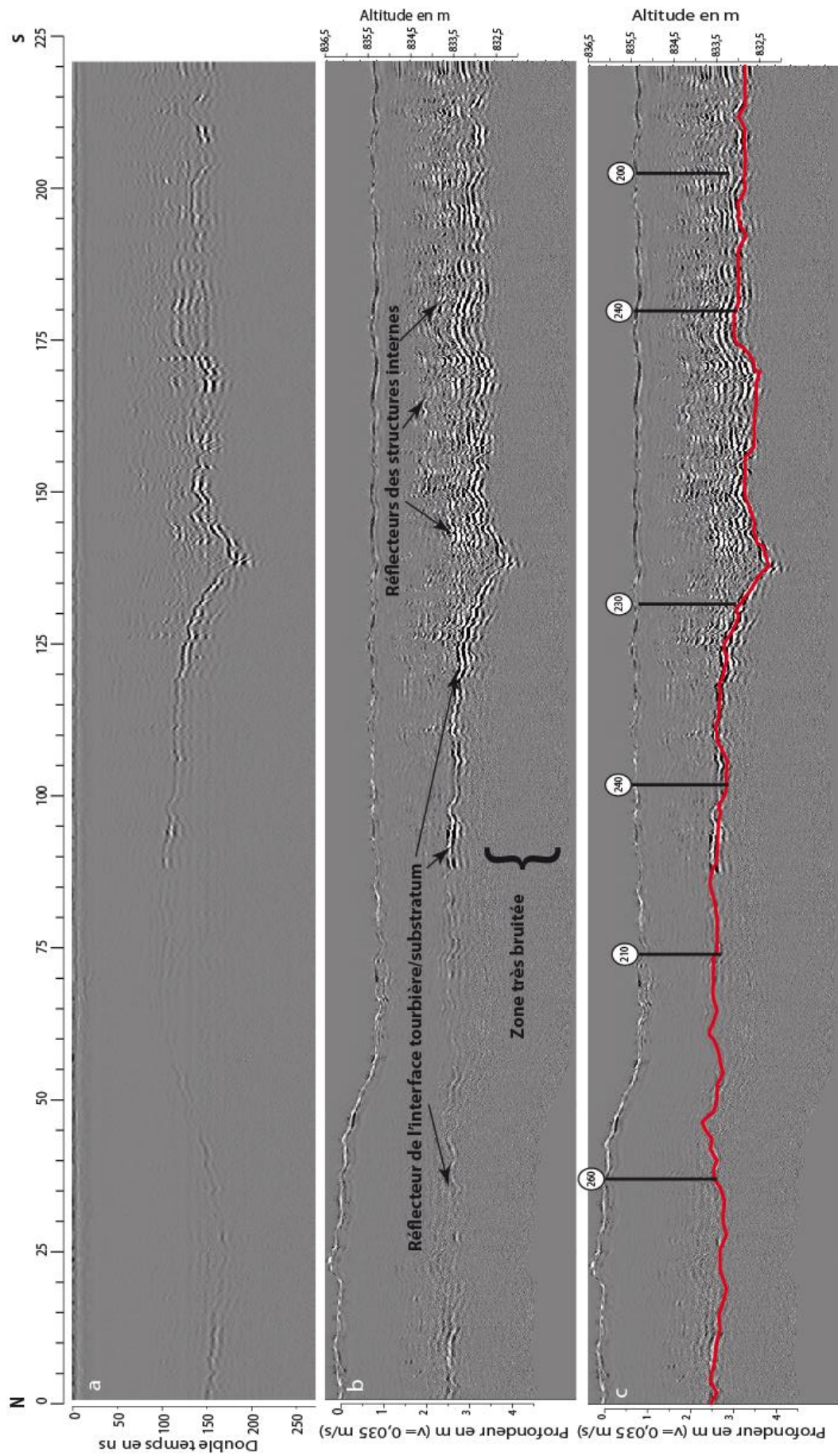


Figure 56 : Illustration de la démarche avec le sous profil NS_GPR2E : a) radargramme brut ; b) radargramme traité selon la procédure de l'étape 1 ; c) radargramme traité et interprété, avec positionnement des sondages à la perches.

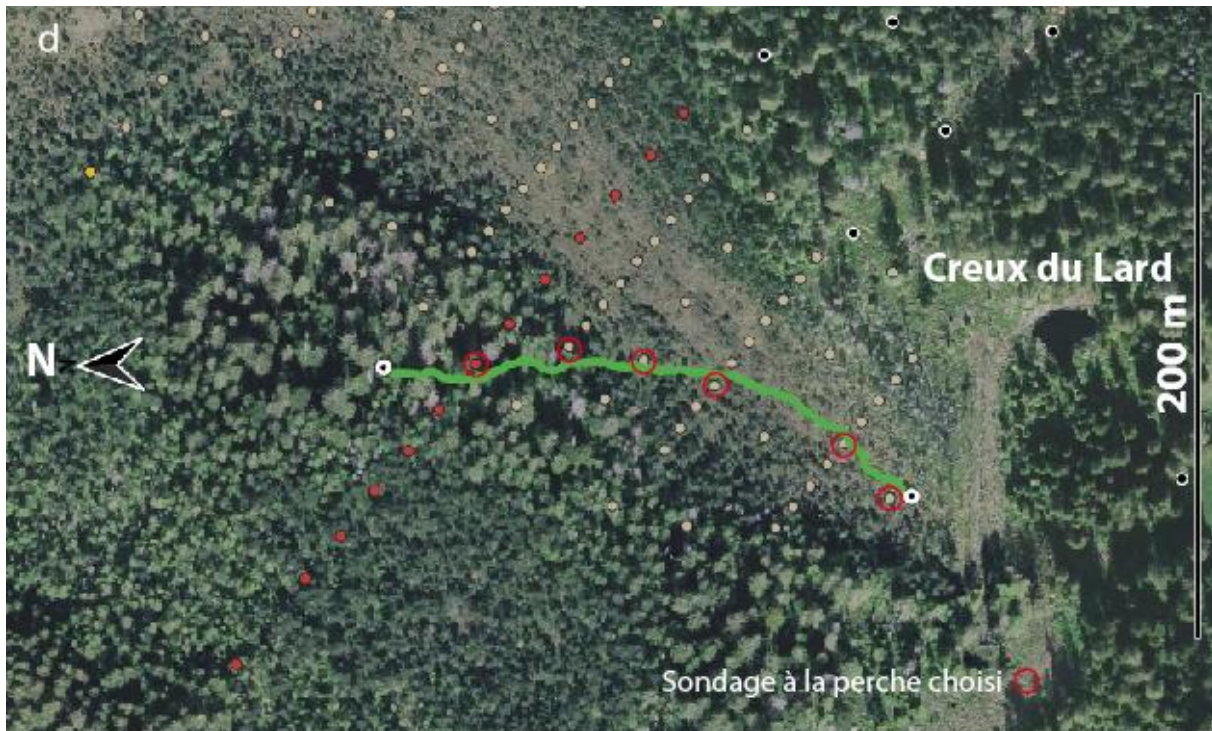


Figure 57 : Localisation du sous profil NS_GPR2E et position des sondages à la perche.

Entre ce réflecteur et la surface de 125 m à la fin du profil, il est possible de distinguer des **réflecteurs internes** montrant des structures sans doute dues à l'évolution temporelle et/ou bio-physicochimique de la tourbière. L'absence de carotte datée et décrite ne permet pas une interprétation plus fine. La partie située en dessous est une zone bruitée car le signal électromagnétique est perturbé, il est donc impossible sans l'aide d'une carotte de poursuivre l'interprétation sur la nature du substratum : moraine ou calcaire ou sédiment lacustre. Afin de valider cette interprétation, les sondages à la perche ont été placés sur le profil (Figure 56.c et Figure 57), ils permettent de valider l'interprétation. Cette démarche a été renouvelée pour l'ensemble des profils présentés.

7.4.2. Synthèse des deux longs profils est-ouest (EW_GPR1 et EW_GPR2)

D'une manière générale, la topographie du début des deux profils est assez similaire : une première partie relativement plate sur 500 m pour EW_GPR1 et sur 750 m pour EW_GPR2 (Figure 58 et Figure 59). Sur cette partie, la tourbière se situe entre la surface topographique et le réflecteur « interface tourbière/substratum ». Son épaisseur le long de EW_GPR1 varie de 1 m à 3,80 m d'est en ouest, à part les premiers mètres où un bombement du substratum se distingue, l'interface est pratiquement parallèle à la topographie (Figure 58). Cette interface est sensiblement différente pour le profil EW_GPR2, elle est plus vallonnée et peu parallèle à la surface tandis que l'épaisseur de la tourbière varie de quelques dizaines de centimètres à un peu plus de 2 m (Figure 59).

À la suite de cette première partie, un bombement topographique apparaît sur dix à douze mètres sur les deux profils. Bien que l'interface tourbière/substratum subisse aussi une élévation, celle-ci est moins monotone que la topographie. Pour le profil EW_GPR1, l'épaisseur moyenne de la tourbière se situe entre 5 m et 4 m, mais celle-ci n'est pas constante, en effet, le substratum présente un ressaut entre 720 m et 940 m où l'épaisseur de la tourbière passe d'une épaisseur de 5 m à 1 m (Figure 58). Pour le profil EW_GPR2, l'épaisseur de la tourbière se situe entre 3 m et 6 m, un ressaut, de moindre amplitude (2 m d'épaisseur de tourbe) et en continuité avec celui précédemment décrit, est observé entre 1 040 m et 1 300 m (Figure 59).

L'ensemble des sous profils traités et interprétés pour EW_GPR1 et EW_GPR2 sont respectivement en annexe 7.3. et en Annexe 7.4.

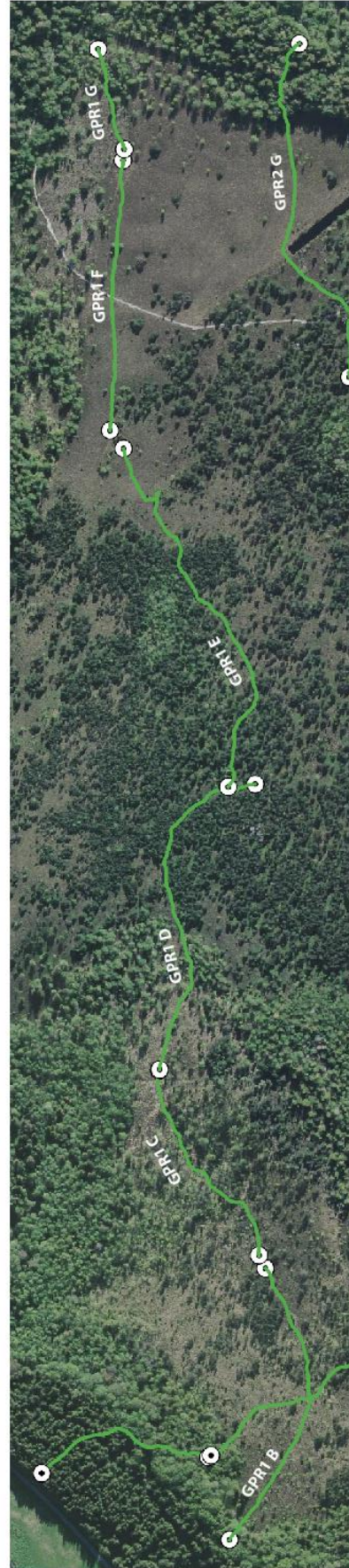
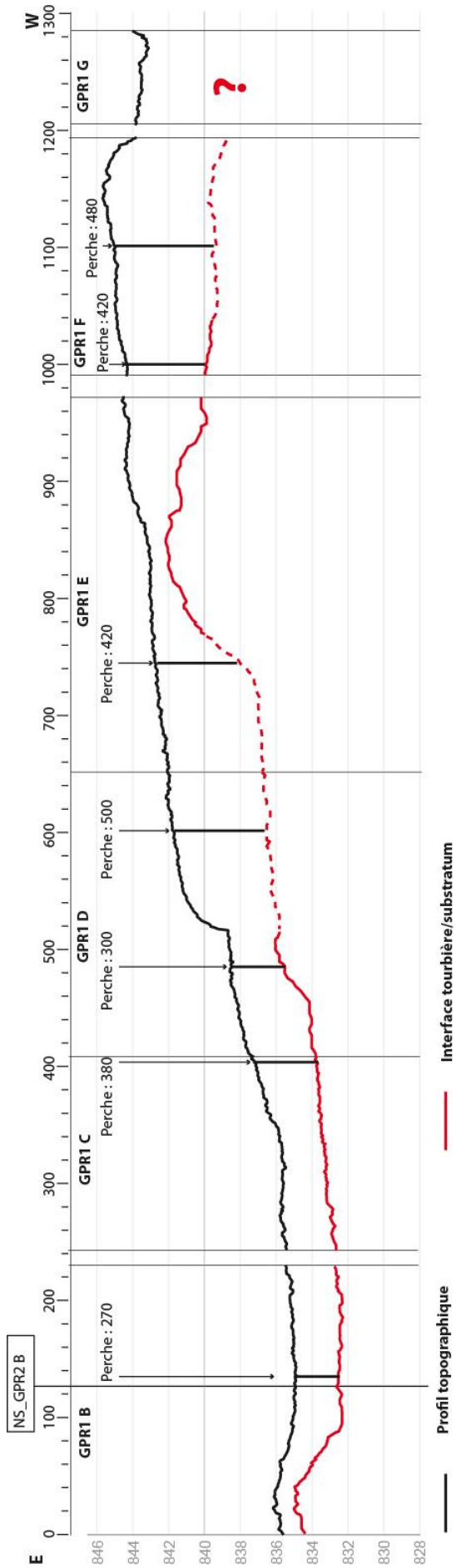


Figure 58 : Synthèse des résultats du profil EW_GPR1

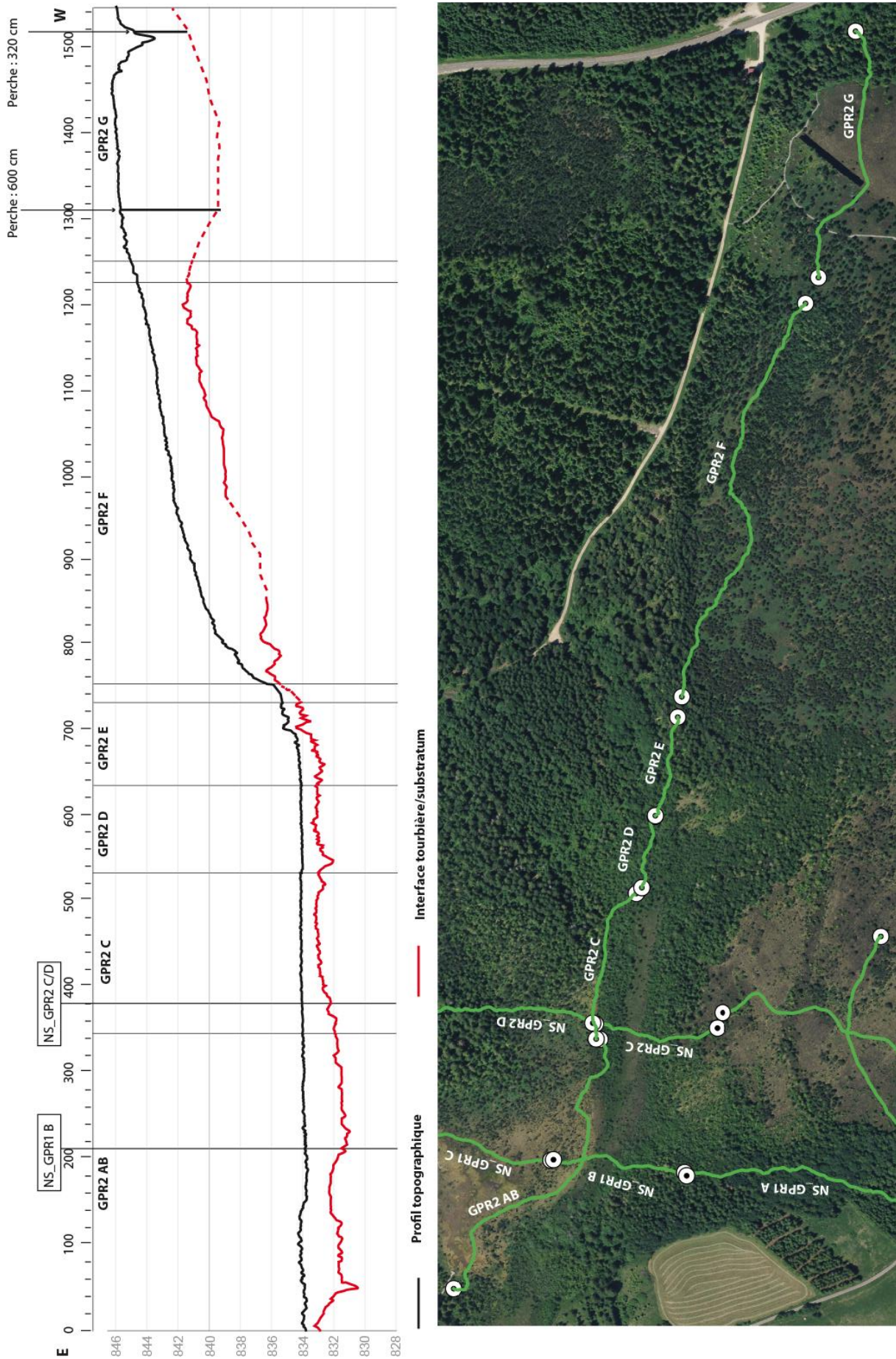


Figure 59 : Synthèse des résultats du profil EW_GPR2

7.4.3. Synthèse des deux longs profils nord-sud (NS_GPR1 et NS_GPR2)

La topographie de la surface du départ des deux profils est assez similaire : ils débutent par une butte culminant à environ 837 m d'altitude NGF (IGN 69) qui semblent délimiter la limite nord de la tourbière, puis la ligne topographique se poursuit d'une manière assez rectiligne pour aboutir à : 1) un bombement pour NS_GPR1 et 2) un secteur vallonné et ponctué de ressaut pour NS_GPR2.

Concernant l'épaisseur de la tourbière située entre la surface et l'interface tourbière/substratum, pour le profil NS_GPR1, elle est de l'ordre de 1 m sur les 150 premiers mètres (entre les distances de 300 m et 450 m), ensuite elle varie entre 2 m et 3 m jusqu'au bombement topographique où elle atteint une épaisseur de 5 m. Pour NS_GPR2, cette épaisseur est du même ordre, cependant l'interface paraît moins vallonnée.

L'ensemble des sous profils traités et interprétés de NS_GPR1 et NS_GPR2 sont respectivement en annexe 7.1. et en annexe 7.2.

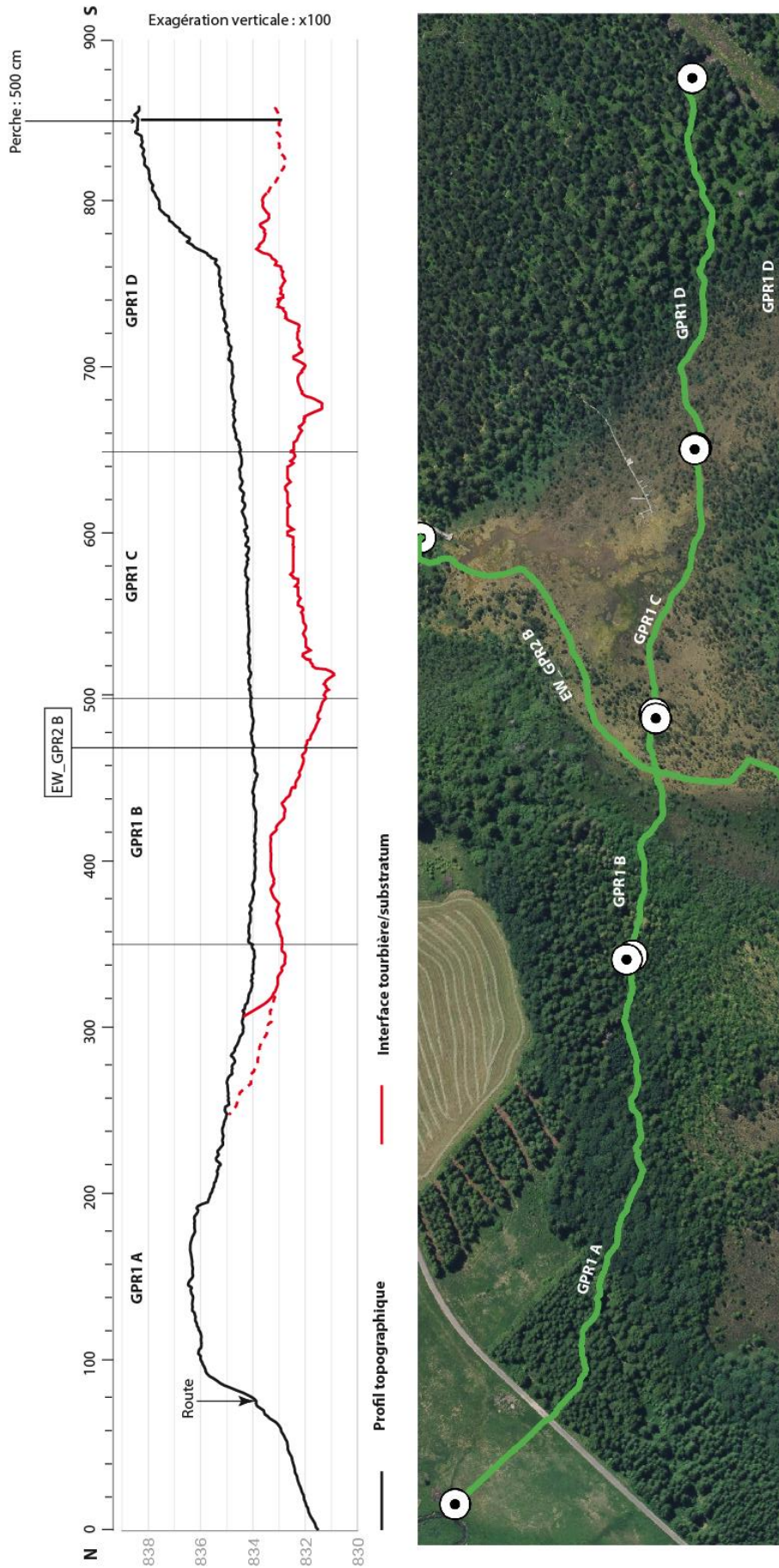


Figure 60 : Synthèse des résultats du profil NS_GPR1.

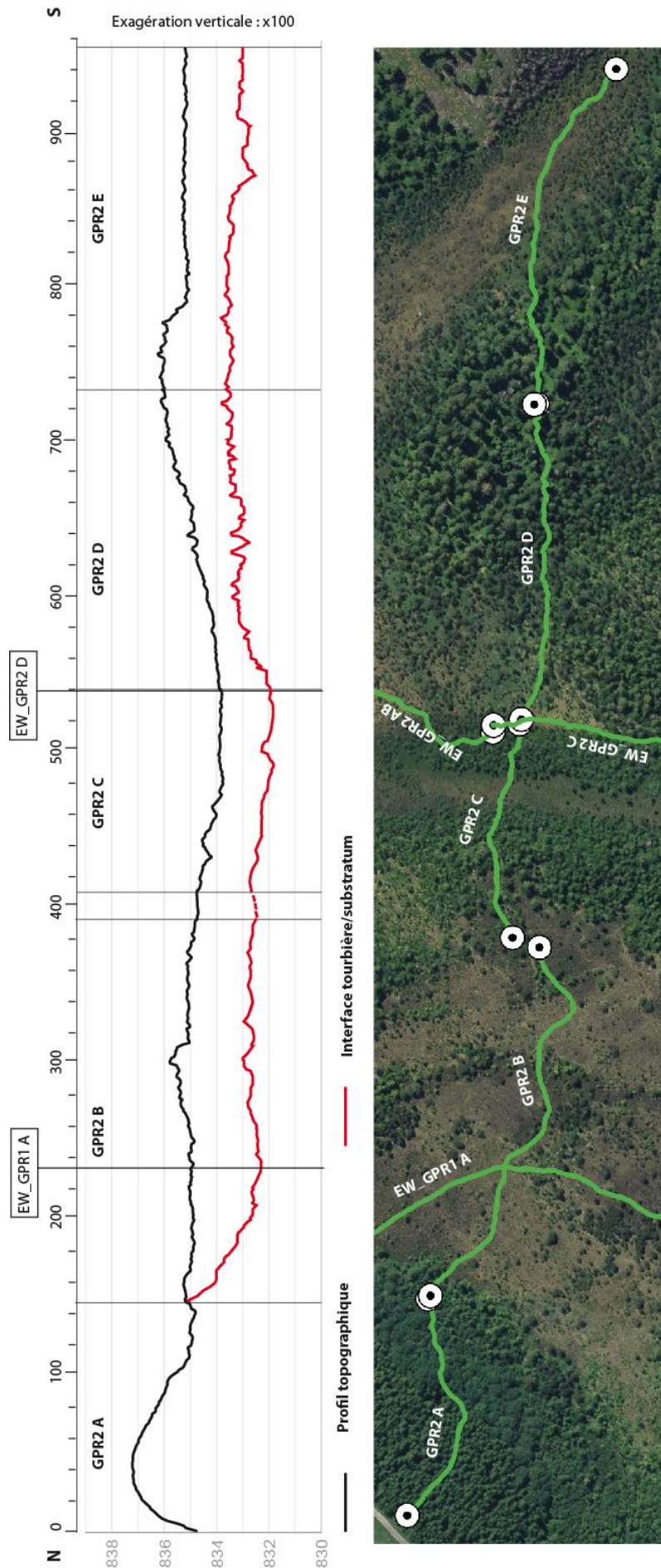


Figure 61 : Synthèse des résultats du profil NS_GPR2

7.4.4. Quelques résultats spécifiques

7.4.4.1. Réflecteurs internes

Ces réflecteurs internes se retrouvent assez régulièrement dans les profils. Ils montrent des structures plus ou moins rectilignes sans doute dues à l'évolution temporelle et/ou biophysicochimique de la tourbière. L'absence de carottes datées et décrites ne permet pas une interprétation plus fine.

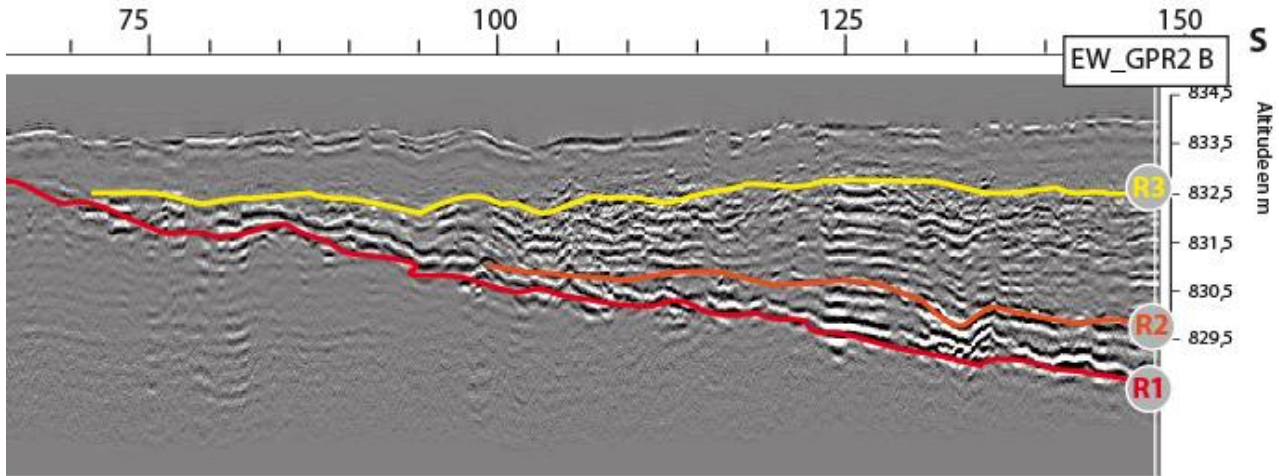


Figure 62 : Exemple du profil NS_GPR1_B structures internes (extrait)

7.4.4.2. Anomalies dans le substratum

Le réflecteur de l'interface tourbière/substratum peut montrer des « anomalies », il peut s'agir de karst, de blocs erratiques, de drains naturels ou anthropiques (Figure 63). L'absence de carottes datées et décrites ne permet pas une interprétation plus fine.

7.5. Conclusion

Dans le cas de la tourbière de Frasné, la méthode utilisée, basée sur le radar géologique, a donné de très bons résultats et un rendement excellent. Elle a permis de bien connaître la profondeur et la forme de l'interface tourbière/substratum ce qui permet une très bonne représentation du profil du substratum. De plus, elle a permis de détecter des structures internes et des « anomalies » du substratum (karst).

L'apport de la connaissance de la morphologie du fond de la tourbière est primordial pour connaître les principaux axes d'écoulement de la nappe d'eau libre (Figure 64). En prenant l'hypothèse que le substratum de la tourbière est formé soit de moraine soit de calcaire donc d'une perméabilité très faible, celui-ci constitue alors le mur de la nappe. Ainsi la présence d'un bombement du substratum au centre de la tourbière (Figure 58 et Figure 59) pourrait partager l'écoulement des eaux entre l'est et l'ouest. La présence de dépression au sein des profils transversaux (Figure 60 et Figure 61) peut correspondre à des drains pour un écoulement vers l'est. De plus, certains profils montrent des structures pouvant s'apparenter à des conduits karstiques (Figure 63) qui peuvent provoquer des pertes de quantité d'eau importante.

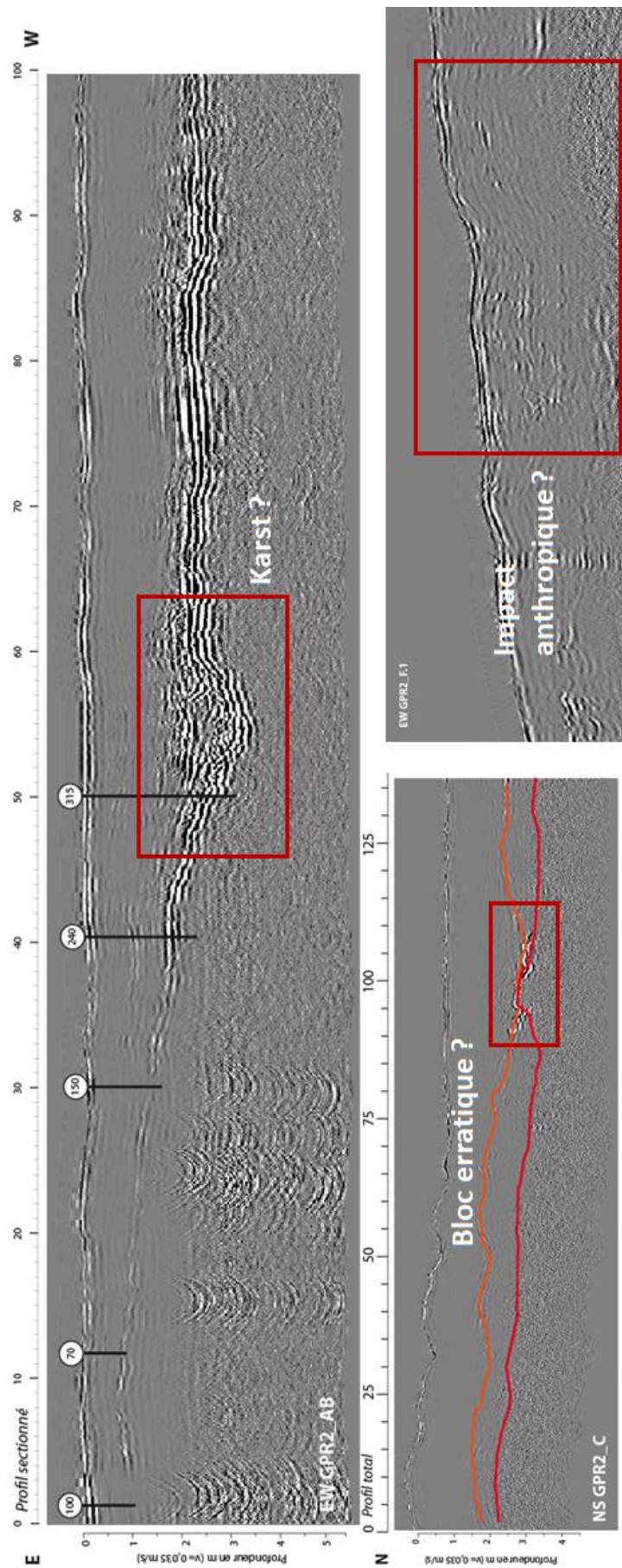


Figure 63 : Exemples d'anomalies rencontrées et premières tentatives d'interprétation.

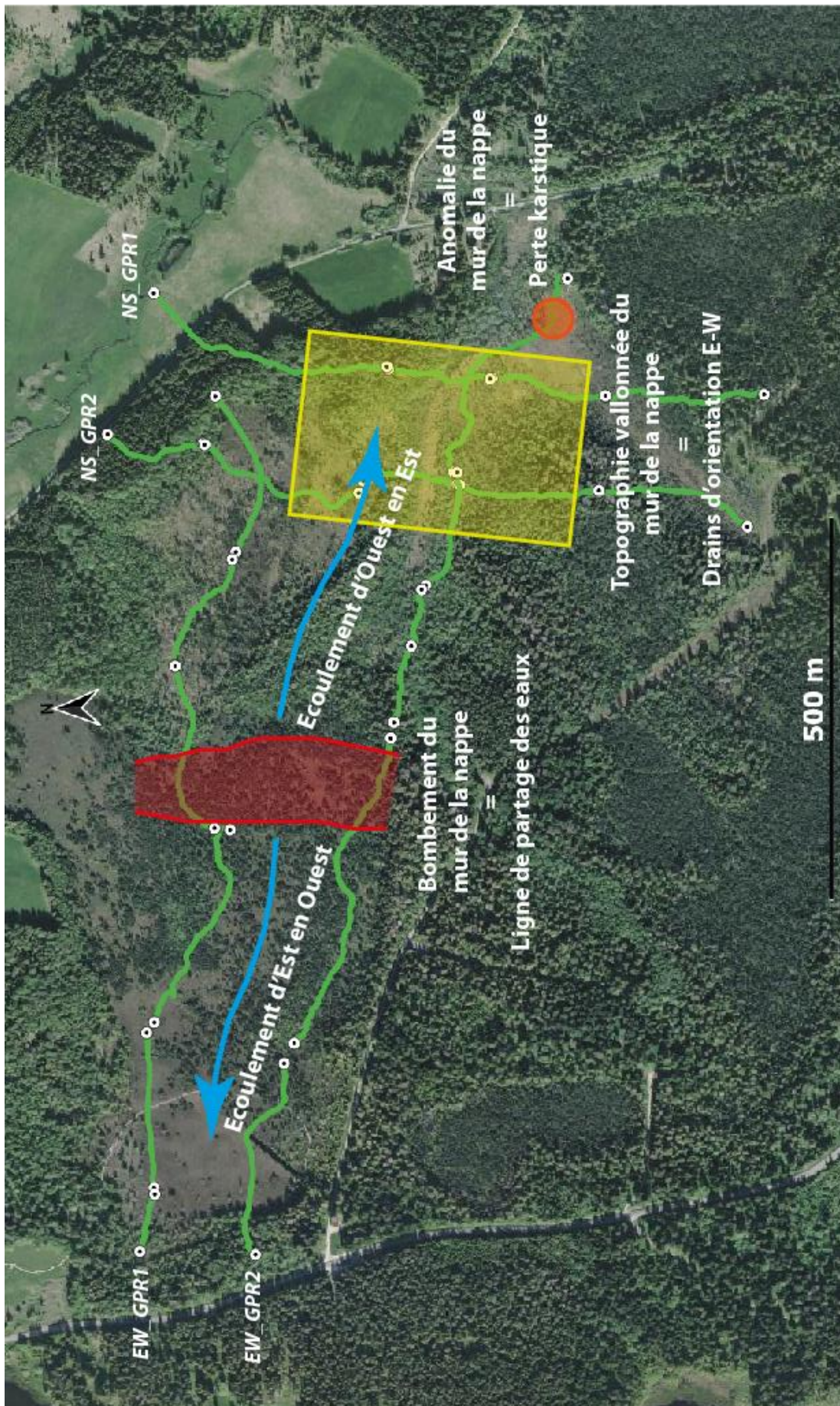


Figure 64 : Tentative d'interprétation globale sur influence de la morphologie du mur de la nappe sur les écoulements dans la tourbière de Frasne

8. Synthèses – Frasne

8.1. Suivi hydrologique, analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones

Dans la tourbière de Frasne, l'instrumentation pour le suivi hydrologique est fondée principalement sur l'existant, complété par l'implantation de quelques sondes complémentaires. Le dispositif est le suivant :

- une station météorologique ;
- 1 section jaugée à l'exutoire principal de la tourbière avec 2 sondes CTD ;
- 2 sondes CTD pour chaque tributaire de l'exutoire principal ;
- 14 sondes enregistreuses TD dans les piézomètres dont certains en flute de pan ;
- 1 sonde CTD dans la doline du Creux au lard.

Pour le site de Frasne, nous avons rencontrés différents problèmes : 1) d'acquisition de données du fait du dysfonctionnement des sondes complémentaires CTD à l'exutoire ; 2) d'analyse statistique hydrologiques des données liée aux travaux de réaménagement de la tourbière vivante qui conduisent à une augmentation du niveau d'eau au milieu des chroniques de données. Les résultats et les interprétations concernant le fonctionnement hydrologique de la tourbière de Frasne seraient donc limités sans la contribution des travaux de thèse d'Alexandre Lhosmot (voir §6. p47 et §8.3. p95).

Malgré ces limites, le suivi hydrologique et l'analyse statistique des données nous apporte les informations suivantes.

On observe une augmentation de la conductivité électrique de l'eau en période estivale. Ceci peut être dû à : 1) la chaleur qui concentre les éléments présents dans l'eau ; ou 2) à une source d'eau plus minéralisée devenant prépondérante à l'exutoire. Il pourrait s'agir d'eau souterraine en provenance des formations sous-jacentes morainiques et/ou calcaires. Après le déstockage à l'exutoire des eaux de pluie peu minéralisées, la signature des eaux souterraines deviendrait prépondérante.

On note que les débits à l'exutoire principal peuvent être très faibles et inférieurs à 1l/s. En période de basses-eaux, les apports en provenance de la tourbière vivante sont généralement prépondérants. On peut donc faire l'hypothèse que : soit 1) le tarissement de l'aire d'alimentation du second tributaire est plus rapide ; soit 2) son débit d'alimentation est globalement plus faible, voire très faible à l'été. Il semble donc que c'est le flux en provenance de la tourbière vivante qui joue un rôle majeur dans le soutien d'été.

Le suivi du Creux au lard, nous a permis de mesurer une vingtaine d'épisodes de remplissage/vidange. Le remplissage peut atteindre une hauteur de 11 m, voire un peu plus, ce qui correspond à environ 6 200 m³ d'eau stockée. La surface équivalente de l'orifice d'évacuation de la doline est estimée entre 10 et 50 cm². L'analyse des données semble montrer que le Creux au lard n'a pas de fonctionnement émissif qui contribuerait à l'alimentation en eau en provenance du karst sous-jacent de la tourbière de Frasne. La doline ne semble avoir au final qu'un comportement capacitif permettant l'évacuation d'eau de la tourbière, notamment à saturation même si un faible flux hypodermique persiste avant tarissement complet (au moins en visuel), vers le karst sous-jacent et les sources de l'Ain. On observe en effet des ruissellements temporaires dans la doline (cote -3 m environ par rapport au terrain naturel) provenant vraisemblablement de la tourbière.

L'analyse statistique des données hydrologiques souligne : 1) la grande complexité du système tourbeux de Frasne ; 2) l'interdépendance variable dans le temps des différents secteurs du complexe tourbeux ; 3) la difficulté à délimiter les aires d'alimentation et les limites du système.

Les coefficients d'écoulement calculés sont variables, mais souvent particulièrement faibles, ce qui atteste :

- soit de pertes liées à l'infiltration diffuse et/ou dans les dolines, à de fortes ETP caractéristiques en situation de fond de combe ;
- soit d'incertitudes dans la mesure des débits impliquant qu'ils ne représentent pas l'ensemble des écoulements sortants. Ceci peut être lié à : 1) des incertitudes liées à la mesure ; 2) la non prise en compte des pertes (écoulements diffus, infiltration dans le karst et les dolines) ; 3) la non prise en compte des autres exutoires de la tourbière au fonctionnement intermittent et qui contribuent à l'évacuation de l'eau à saturation.

Malheureusement, l'analyse statistique des données hydrologiques ne permet pas de mettre en avant des éléments caractérisant le soutien d'étiage de la tourbière aux cours d'eau à l'exutoire. Afin d'élargir l'horizon de réflexion, il est difficile de ne pas songer à une relation entre l'existence de ces milieux humides en altitude et la fréquence à laquelle sont observés les averses et orages d'évolution diurne sur le massif jurassien (pompe biotique). Le maintien de conditions humides associé à l'orographie est connu pour favoriser l'éclosion de ce type de phénomène qui, par des apports estivaux relativement réguliers au système, joue aussi, indirectement, un rôle de mitigation des étiages.

8.2. Traceurs géochimiques

L'étude géochimique de la tourbière de Frasne s'est concentrée : 1) spatialement, sur la tourbière vivante du Forbonnet et sa périphérie ; 2) temporellement, sur deux contextes hydrologiques différents, les basses-eaux (juillet 2019) et les moyennes/hautes-eaux (novembre 2020). Pour les deux saisons, les prélèvements d'eau ont été effectués dans 14 piézomètres (P^{**} , G^{**} , BM^{**} dans la tourbière vivante et le bas-marais), 6 ruisseaux (RU), 1 dépression en eau (petit LAC ou étang lié aux travaux d'aménagement), 3 trous (TR : zones d'excavation liées aux travaux d'aménagement), 2 zones d'excavation de tourbes anciennes ($Fosses$) et plusieurs fossés (FO).

La méthodologie mise en œuvre est la même qu'au Luitel. Afin de contraindre l'origine, le chemin des eaux et les échanges eaux de surface/eaux souterraines, différents traceurs géochimiques ont été utilisés : 1) $\delta^{18}O$ et δD dépendants des interactions eau-atmosphère ; 2) les éléments majeurs dépendants des interactions eau-roche. Les paramètres physico-chimiques des eaux (T , pH , EC , O_2) ont été mesurés sur le terrain et les concentrations en espèces majeures (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) et les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et δD) ont été déterminées en laboratoire. Concernant les précipitations, 2 droites des eaux météoriques locales différentes ont été utilisées pour 2019-2020 et 2020-2021.

La **campagne de juillet 2019 basses-eaux** révèle :

- 1) de fortes amplitudes de conductivités électriques (EC) de l'eau : i) faibles valeurs d' EC , moins de $100 \mu S/cm$, associées à des faibles pH , dans les trous (TR), la *fosse 1* de la tourbière bombée, le ruisseau 4 ($RU4$: tributaire rive droite de l'exutoire principal), les piézomètres intermédiaires de la tourbière vivante et ceux du bas-marais ; ii) fortes valeurs d' EC , plus de $500 \mu S/cm$, dans la tourbière vivante ;
- 2) deux pôles principaux (d'un côté des eaux riches en Ca , Mg associées à de forts pH et EC en amont de la tourbière vivante ; de l'autre des eaux de faibles pH et EC dans les excavations (TR), la *fosse 2* et la tourbière de bas-marais) ;
- 3) des eaux de surface au niveau des trous d'excavation (TR) et des *fosses* affectées par des processus d'évaporation indiquant un taux de renouvellement faible à nul sur cette période.

Cette campagne permet de mettre en avant 2 pôles géochimiques :

- **Pôle 1** : masse d'eau enrichie en Ca^{2+} et Mg^{+} , avec une EC élevée et des $\delta^{18}\text{O}$ et δD moyens suggérant **l'influence des formations sédimentaires carbonatées sous-jacentes** à la tourbière. On note que le *piézomètre PC* dans la tourbière vivante est le plus représentatif de ce pôle.
- **Pôle 2** : masse d'eau présentant de faibles EC, des pH acides dont le *piézomètre BM18*, la zone d'excavation *TR4* et la *fosse 1* sont caractéristiques. Ces eaux exposées aux échanges avec l'atmosphère semblent affectées par le processus d'évaporation. Elles ont peu ou pas interagi avec le substratum rocheux et sont influencées par l'acidité du milieu tourbeux.

On note que des propriétés en dehors des tendances précédentes pour les eaux de la *fosse 2* enrichies en Na et Cl suggèrent localement une contribution différente de celle des **pôles 1 et 2**.

Lors de cette campagne de basses-eaux, l'alimentation de la tourbière du Forbonnet et la circulation en eaux peuvent-être décrites de la façon suivante :

- La *tourbière vivante* semble alimentée à partir d'eau ayant interagi avec les formations carbonatées sous-jacentes (**Pôle 1**). Cette influence n'est pas homogène dans la tourbière vivante, le **Pôle 1** et le **Pôle 2** agissent probablement en proportions variables selon les endroits ;
- Le *bas-marais* montre une influence plus marquée du **Pôle 2** que du **Pôle 1** (notamment pour *BM18*). On observe donc une alimentation d'origine différente ou à partir de mêmes masses d'eau intervenant en proportions différentes pour la *tourbière vivante* et le *bas-marais* ;
- Les *zones d'excavation* (*TR2*, *TR3*, *TR4*) et la *Fosse 1* semblent alimentées par des eaux de pluie ayant essentiellement interagi avec la tourbière (**Pôle 2**). Elles sont sensibles à l'évaporation et ne montrent pas de renouvellement durant la période de basses-eaux de juillet 2019 ;
- Le *ruisseau 2* (*RU2* : longeant la tourbière à l'est) et le *ruisseau 3* (*RU3* : tributaire rive gauche de l'exutoire principal) montrent une influence marquée du **Pôle 2**, plus importante que pour le *ruisseau 4* (*RU4* : tributaire rive droite de l'exutoire principal). L'alimentation du *ruisseau 2* (*RU2*) se fait probablement à partir d'un réservoir de surface soumis à l'évaporation ou la vitesse d'écoulement de ces eaux est très lente. Pour le *ruisseau 4* un apport souterrain le long de son parcours est possible ;
- Les *ruisseaux 3*, *4* et *7* (*RU7* : exutoire principal de la tourbière à l'aval de la confluence des *ruisseaux 3* et *4*) sont **marqués par une forte contribution de la tourbière**.

Pour la **campagne de novembre 2020 moyennes/hautes-eaux** :

- 1) on trouve de manière plus marquée qu'en juillet 2019 une forte corrélation positive pH/EC (il s'agit des traceurs les plus discriminants pour cette campagne) ;
- 2) une analyse en composantes principales montre 2 tendances : 1) l'une associant pH, conductivité, Ca^{2+} et Mg^{2+} (*FO* : *fossés* ; *RU2* et *RU4* : *Ruisseaux 2* et *4*) ; 2) l'autre associant Na^{+} et Cl^{-} (*RU6* : *ruisseau 6*, exutoire sud de la tourbière ; *fosse 2* ; *FO1* et *FO4* : *fossés 1* et *4*, respectivement exutoire nord et sud de la tourbière bombée ; *RU5* : *ruisseau 5*, amont du *ruisseau 6*). On observe des eaux différentes à ces 2 tendances dans le bas-marais et les zones d'extraction.
- 3) toutes les données isotopiques sont calées sur la droite des eaux météoriques mondiales sauf pour la *fosse 1* (évaporation), le *ruisseau 2* et le *piézomètre 18*. Pour tous les autres points, il semble que les eaux proviennent d'une alimentation par des eaux issues de mêmes événements pluvieux ou de réservoirs homogénéisés.

Lors de la campagne de moyennes/hautes-eaux, les pôles, l'alimentation de la tourbière du Forbonnet et la circulation en eaux peuvent-être décrites de la façon suivante :

- On retrouve les 2 pôles décrit dans la campagne précédente : 1) **pôle 1** caractérisé par le piézomètre *PC* ; 2) **pôle 2** caractérisé par le piézomètre *BM18* et les *zones d'excavation TR3* et *TR4* ;
- Un **pôle 3** est mis en évidence par l'influence d'apports enrichis en NaCl (salage des routes) en bordure ouest (*FO1*, *FO4*, *Fosse 2*) et sud (*RU5* et *RU6*) de la zone d'étude ;

- Le *bas-marais* et la zone du *piézomètre GB* apparaissent alimentées par les eaux peu minéralisées du **Pôle 2**. Les eaux de la tourbière vivante quant à elles sont influencées à des degrés différents (mélanges ?) par les eaux plus minéralisées et enrichies en Ca du **pôle 1** ;
- Les *ruisseaux 2 et 4 amont* (RU2 et RU4) et dans une moindre mesure le *ruisseau 3 amont* (RU3) apparaissent influencés par les eaux en provenance des formations carbonatées. Pour les *ruisseaux 3 et 4*, la diminution du pH, de la conductivité et des concentrations en Ca de l'amont vers l'aval suggèrent une contribution des eaux de la tourbière à leur alimentation ;
- Les *fossés (FO)* de drainage sont le réceptacle d'un mélange d'eau en provenance des formations carbonatées et en provenance de la tourbière ;
- Les *zones d'excavation (TR)* apparaissent alimentées par l'eau des précipitations modifiée lors de son séjour dans la zone humide. La *Fosse 1* a la particularité malgré la période de moyennes-eaux/hautes-eaux d'être marqués par un processus d'évaporation. Ceci pose la question du renouvellement complet ou partiel de ces eaux au cours des saisons et donc de sa connexion avec le milieu environnant.

Pour conclure, si l'on synthétise les apports de l'interprétation des résultats de l'analyse des traceurs géochimiques pour les 2 situations hydrologiques :

- L'alimentation en eau de la tourbière de Forbonnet se fait à partir de deux masses d'eau principales et d'origines différentes :
 - **Pôle 1 eaux de surface** : eaux de pluie évoluées par interaction avec le milieu tourbeux influençant principalement le bas-marais pour les 2 situations hydrologiques ;
 - **Pôle 2 eaux souterraines carbonatées** : eaux ayant interagi de manière très significative avec les formations sous-jacentes (calcaire, marnes, moraines) influençant principalement la tourbière vivante à moyennes-eaux/hautes-eaux comme à basses-eaux et les écoulements des ruisseaux à moyennes-eaux/hautes-eaux ;
- Les zones de stockage d'eau superficiels et les ruisseaux des bordures est et sud de la tourbière sont influencés par des apports en NaCl vraisemblablement liés au salage des routes.
- Les ruisseaux de l'exutoire principal de la tourbière (RU3, RU4 et RU7) sont alimentés par le bas-marais en basses-eaux comme à moyennes-eaux/hautes-eaux.
- Les entités hydrologiques périphériques de la tourbière de Forbonnet (RU5, RU6, FO1, FO4, Fosse 2) sont influencées par des apports anthropiques de NaCl. Ces entités peuvent s'assécher entièrement en basses-eaux (sauf la fosse 2). On note que la tourbière vivante, le bas-marais ainsi que les ruisseaux 3 et 4 ne subissent pas l'influence des eaux enrichies en Na et Cl.
- Les zones d'excavation TR2 à 4 et la Fosse 1 sont soumises à l'évaporation en période de basses-eaux. Il n'y a pas de renouvellement significatif de leurs eaux. En revanche en période de moyennes-eaux/hautes-eaux, un renouvellement total des eaux pour TR2 à 4 et un renouvellement partiel pour la Fosse 1 en période sont probables.
- Les fossés et les ruisseaux assurent un rôle de drainage des eaux issues du karst et de la zone humide en période de moyennes-eaux/hautes-eaux. Seuls les ruisseaux R3 et R4 continuent à jouer ce rôle aux basses-eaux pour les eaux du bas-marais.

8.3. Fonctionnement hydrologique et modélisation (thèse A. Lhosmot)

Les travaux de thèse d'Alexandre Lhosmot dans le cadre du projet Régional CRITICAL PEAT (région Bourgogne Franche-Comté) ont permis d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrologique de la tourbière active de Forbonnet (Frasne) et notamment des exports d'eau de la tourbière vers les hydrosystèmes en aval. Ce travail est fondé sur l'analyse de nombreuses données acquises sur cette tourbière.

Un modèle statistique a été mis en œuvre (Bertrand et al. 2021) pour prévoir au pas de temps journalier la profondeur de la nappe en fonction de la pluviométrie et de l'ETP pour 6 piézomètres de la tourbière active de Forbonnet. Les résultats montrent que ce modèle rencontre des problèmes pour prédire précisément les hauteurs de nappe inférieures à -20 cm. Ceci reflète vraisemblablement le changement de propriétés hydrodynamiques à la limite acrotelme-catotelme. Le reste des résultats étant satisfaisants, deux scénarios de changements climatiques ont été simulés. Pour le scénario RCP 8,5, les simulations montrent une baisse niveau de nappe en été de -3 cm à l'horizon 2100. Les changements attendus dans la répartition saisonnière de la pluviométrie, avec moins de pluie en été et plus en hivers (notamment sous forme liquide – moins de neige), permettrait à la tourbière de rester saturée en hiver, mais augmenterait la fréquence des sécheresses (5 journées consécutives avec un niveau de nappe inférieur de 5 cm à la moyenne de l'année).

À la suite de ce modèle statistique, un modèle hydrogéologique conceptuel a été bâti sur la base du suivi long terme des variables hydrométéorologiques (Lhosmot et al., 2021). Ces données montrent que la relation débit à l'exutoire/profondeur de nappe est non-linéaire. Ceci est vraisemblablement lié à la nature diplotelmique de la tourbière, de façon similaire à ce qui a été évoqué via le modèle statistique. En effet, pour des variations de niveau de nappe de -0,3 à -0,1 m le débit varie peu ($< 0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) alors qu'on observe une augmentation exponentielle du débit à partir de -0,1 m pour la tranche de la tourbière présentant les propriétés hydrodynamiques permettant une réponse rapide aux précipitations et à l'ETP.

L'analyse des données permet aussi d'apprécier l'effet des travaux de restauration à travers l'augmentation des niveaux de nappe. La hausse de la pression hydraulique plus importante pour les niveaux intermédiaires de tourbe (1 à 1,5 m de profondeur) reflète la reconnexion de la tourbière active aux tourbières boisées via des flux d'eau latéraux suite à la restauration. Du point de vue de la qualité de l'eau, ce niveau est caractérisé par un mélange des eaux des niveaux de surface ($\text{pH} \approx 4-5$; $\text{EC} < 50 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) et des niveaux profond ($\text{EC} > 300 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ avec un pH plus fort $\approx 6,5$).

Le suivi de la conductivité électrique (EC) à l'exutoire principal de la tourbière active semble au premier ordre montrer que l'augmentation de l'EC est liée à l'effet de concentration par évapotranspiration. Cependant, l'EC estivale à l'exutoire répond linéairement à la recharge pluviométrique de l'hiver précédent même si la recharge estivale explique le mieux le débit à l'exutoire de la tourbière en période estivale. L'origine de la minéralisation est sans doute en relation avec des apports d'eau souterraine (karst, moraine).

Au final, l'analyse de données a permis de construire un modèle hydrogéologique conceptuel de la tourbière active intégrant les interactions entre 3 niveaux de tourbes et 2 niveaux d'apports souterrains (karst, moraine) locaux voire régionaux. Ce modèle sous-tend l'hypothèse de transferts de masse (lien hydrologique direct) et/ou de pression (lien hydrologique indirect) entre les aquifères karstiques des anticlinaux et les tourbières logées dans les synclinaux du massif du Jura.

Les nombreuses données hydrométéorologiques ont permis de calculer le bilan hydrologique de la tourbière active et de quantifier ces principales composantes (70 mois étudié ; juillet 2014 à avril 2021). À l'exutoire, l'affluent rive droite draine entre autres la tourbière active du Forbonnet ; l'affluent rive gauche draine majoritairement les tourbières boisées au nord et nord-ouest de la tourbière active. Un tel bilan intègre la variation de la surface du bassin versant avant ($0,82 \text{ km}^2$) et après restauration ($0,92 \text{ km}^2$).

Le bilan hydrologique cumulé (Δstock) est positif pour chaque année hydrologique avec des valeurs de 170 à 376 $\text{mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ($\mu = 297 \pm 140 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$). Cependant, en considérant les valeurs minimums d'ETP et de débit, le bilan cumulé est bien plus important ($\mu = 864 \pm 165 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$), soit en moyenne 52% des précipitations. Au contraire, lorsque les valeurs maximums d'ETP et de débit sont utilisées, le bilan cumulé est négatif, $\mu = -289 \pm 124 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. La plupart des mois de l'année sont caractérisés par un bilan excédentaire alors que les mois d'étés sont déficitaires (notamment 2018).

Afin de comprendre l'origine de ces écarts importants, plusieurs hypothèses sont avancées. Premièrement, l'interception des précipitations, dont l'ordre de grandeur est de 30 à 40% des précipitations annuelles pour des couverts de résineux, peut jouer un rôle important dans le bilan hydrologique car le BV est couvert à 92% par des épicéas.

La prise en compte de l'interception dans le bilan hydrologique (à partir de la littérature) suggère qu'il est possible de fermer le bilan hydrologique du système avec la surface du bassin versant topographique. Il s'agit donc des situations où Δstock est compris entre 457 ± 59 et $609 \pm 79 \text{ mm.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$. Cependant, dans la configuration où Δstock est supérieur à l'estimation de l'interception, le système reçoit encore trop d'eau par rapport à ce qu'il est capable d'exporter par le débit et l'ETP. Réciproquement, lorsque Δstock est négatif, le système ne reçoit pas assez d'eau pour compenser les pertes du système (Q et ETP). Considérer l'interception dans cette situation accentue le déficit en eau du système, suggérant qu'il est nécessaire de faire intervenir des apports d'eau souterrains non comptabilisés lorsque seule la surface topographique du bassin versant est utilisée. Ainsi, l'incertitude associée au bilan hydrologique cumulée, résultant de l'incertitude sur le débit et sur l'ETP, montre que malgré la prise en compte de l'interception dans le bilan, le système peut être soit déficitaire soit excédentaire en eau (respectivement Δstock négatif et positif).

Ces résultats sont compatibles avec des échanges d'eau entre la tourbière et le système karstique sous-jacent dont la typologie (temporalité, quantité, spatialisation) reste à étayer. Également, la variation de stock d'eau dans la tourbière montre une augmentation pour la zone à proximité immédiate des ouvrages de restauration et décroît de manière significative (~50%) à seulement 40 m des ouvrages de restauration. Néanmoins, cette zone ne représente que quelques pourcents de la surface du bassin versant topographique. Ainsi, un suivi piézométrique étendu à l'ensemble du BV est nécessaire pour mieux appréhender cette variable et donc affiner le bilan hydrologique. En parallèle des processus pouvant affecter le bilan hydrologique et qui ne sont pour l'heure pas quantifiés (interception, variation de stock d'eau, échanges avec le karst), une contrainte plus forte sur l'incertitude associée au débit et à l'ETP permettrait d'affiner le bilan hydrologique.

Enfin, l'ensemble des travaux a permis de proposer une modélisation du débit à l'exutoire à l'aide de Karstmod. Le modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la tourbière suggère trois composantes (réservoirs) contribuant à l'exutoire du système : 1) acrotelme-transfert rapide (journalier à horaire en période de crue) ; 2) catotelme-écoulement lent/débit d'étiage (niveaux de tourbe intermédiaire et profond) ; 3) bassin versant-aire d'alimentation (eau minéralisée, recharge hivernale).

Le travail de modélisation montre que la surface optimale pour le bassin versant est de 0,882 km^2 . La lame d'eau « dynamique » mise en évidence avec la modélisation est inférieure à 100 mm alors que la hauteur d'eau dans la tourbière est supérieure à 800 mm (considérant 2 m de tourbe avec une porosité efficace de 42%). Ces travaux ont mis en évidence que la majorité de la lame d'eau est considérée comme immobile. Compte-tenu des vitesses d'écoulement faibles dans le catotelme et du comportement vraisemblablement advectif des apports d'eau profonds, le modèle en l'état peut difficilement quantifier ces contributions. Cependant, ce modèle permet de reproduire de manière convenable les débits mesurés à l'exutoire ($\text{KGE} = 0,79 \pm 0,05 \text{ s.d.}$) et le bilan d'eau exporté sur une année (2% d'écart).

En basse-eaux, on note que le modèle surestime les débits à l'exutoire et exagère le temps de réponse. L'analyse des résultats des simulations montre qu'une partie de ce débit est incorporé dans le débit théorique perdu par la tourbière mais qui ne contribue pas à l'ETP et au débit à l'exutoire. Ce flux

perdu pourrait contribuer : 1) à la recharge de la tourbière ; 2) à la réhumectation des niveaux secs en surface, 3) à l'interception des précipitations, et 4) à la recharge de l'aquifère karstique régional via les dolines par exemple.

8.4. Campagnes géophysiques

Cette partie fondée sur une approche géophysique grâce à l'utilisation du GPR vise à mieux connaître la géométrie et les structures intermédiaires de la tourbière de Frasne afin de : 1) préciser les limites latérales de la tourbière contraintes par des moraines dont la localisation est mal connue ; 2) identifier l'interface substratum/tourbière (topographie de fond) ; 3) préciser la structure du complexe tourbeux.

Au total, lors de 3 campagnes, 74 profils GPR (12 km) ont été acquis. Sur ce total, 21 profils (4,5 km) ont été traités et interprétés. Il s'agit de profils sur deux transects d'orientation est-ouest et sur deux transects d'orientation nord-sud. Leur interprétation a permis d'obtenir une vision globale de la totalité de la tourbière.

L'interprétation des profils a permis de : 1) positionner avec précision l'interface sol/air bien visible (corrigée avec le lidar) ; 2) de positionner avec peu d'incertitude l'interface tourbière substratum bien visible (validation par sondage à la perche) ; 3) d'identifier des structures internes liées vraisemblablement à l'évolution temporelle et/ou biophysicochimique de la tourbière (structures non validées) ; d'identifier des anomalies dans le substratum (nature du substratum et anomalies non déterminables en l'état).

L'interprétation des profils a donc principalement permis de déterminer d'une manière précise la topographie du substratum et d'estimer l'épaisseur de la tourbière par rapport à la topographie de surface :

- EW_GPR1 : sur les 500 premiers mètres l'épaisseur de tourbe est de l'ordre de 1 à 3,8 m et la topographie du substratum est parallèle à la topographie de surface jusqu'à un bombement topographique (vraisemblablement le front de taille de l'exploitation de tourbe). À partir de là, l'épaisseur de la tourbière atteint 4 à 5 m sauf au niveau d'un ressaut du substratum à 720 à 940 m où l'épaisseur tourbe est de l'ordre de 1 m.
- EW_GPR2 : sur les 750 m premiers mètres l'épaisseur de tourbe est de l'ordre de 0,1 à 2 m. La topographie du substratum est vallonnée et non parallèle à la surface jusqu'à un bombement topographique (front de taille ou limite de la tourbière bombée ?). À partir de là, l'épaisseur de tourbe varie de 3 à 6m sauf au niveau d'un ressaut du substratum de 1 040 à 1 300 m où l'épaisseur de tourbe chute à 2 m.
- NS_GPR1 : la limite de nord de la tourbière est marquée à environ 300 m. La topographie de surface est assez rectiligne jusqu'à un bombement final. L'épaisseur de tourbe est de 1 m sur les 150 premiers mètres, puis 2 à 3 m jusqu'au bombement pour atteindre 5 m au droit du « barrage ».
- NS_GPR2 : la limite nord de la tourbière est bien marquée à environ 150 m. La topographie de surface est assez rectiligne au début pour devenir vallonnée et marquée de ressauts. L'épaisseur de la tourbière est plus homogène et de l'ordre de 2 à 3 m.

Au final, ce travail a permis de bien connaître la profondeur et la forme de l'interface tourbière/substratum ce qui permet une très bonne représentation du profil du substratum. De plus, il a permis de détecter : 1) des structures internes, au moins deux qui pourraient refléter la structure diplotelmique de la tourbière ; 2) des « anomalies » du substratum (karst ?). De plus, la connaissance de la morphologie du fond de la tourbière a permis d'émettre une hypothèse sur le sens des principaux axes d'écoulement de la nappe d'eau libre. Si l'on considère que le substratum de la tourbière (farine glaciaire, dépôts limnogènes, moraine ou calcaire) a une conductivité hydraulique très faible, il constitue alors le mur de la nappe. En conséquence : 1) le bombement du substratum au centre de la tourbière pourrait partager l'écoulement des eaux entre l'est et l'ouest ; 2) la présence de dépression au sein des profils transversaux pourrait constituer des drains d'écoulement préférentiel vers l'est ; 3) certains

Partie I – Frasne - Synthèses

profils montrent des structures pouvant s'apparenter à des conduits karstiques qui pourraient provoquer des pertes d'eau importantes.

Pour aller plus loin, il conviendrait :

- de construire sous SIG les profils en 3D et de construire une interprétation du modelé 3D du substratum et du volume de tourbe ;
- de traiter les profils non utilisés qui sont conservés et pourront faire l'objet d'un traitement et d'une interprétation ultérieure ce qui permettrait de compléter l'interprétation concernant les axes d'écoulement ;
- de valider et/ou de déterminer à l'aide de carottes de validation sur les profils les structures internes identifiées et la nature du substratum.

PARTIE II

–

Tourbière du Luitel

| | |
|--|------|
| §9. Suivi hydrologique | p101 |
| §10. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones | p117 |
| §11. Traceurs géochimiques | p133 |
| §12. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col | p155 |
| §13. Synthèses – Luitel | p225 |

9. Suivi hydrologique

9.1. Partage de données et suivis existants

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

La bibliographie et les données de la RN Luitel sont donc utilisées dans le cadre du projet ZHTB. Il s'agit principalement de données météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau), géophysiques et écologiques. Une partie des données (météorologiques et hydrologiques) est acquise par l'Université de Grenoble – IGE. L'ensemble de ces données sont présentées de manière rapide dans le rapport ZHTB phase 2. De plus, les données hydrologiques et météorologiques de Luitel ont été largement exploitées dans le volet hydrologique du projet ZHTB notamment pour les travaux de modélisation et d'analyses statistiques (voir §10. p117). Les volets géophysique et pédologique (voir §12. p155) et géochimique (§11. p133) utilisent non seulement les données hydrologiques mais aussi d'autres types de données disponibles (ex : carte de végétation, carottes de tourbes, datation, traçage...).

9.2. Instrumentation et mesures

9.2.1. Dispositif de suivi

Le dispositif de suivi hydrologique existant sur la tourbière de Luitel inclus : 1) une station météorologique avec télétransmission des données ; 2) 1 seuil jaugé aval avec une sonde enregistreuse (pression, température) ; 3) 7 sondes enregistreuses (pression, température) dans les piézomètres (Figure 65).

De plus, un relevé manuel estival de l'ensemble des piézomètres est assuré par le ou la garde de la réserve.

Ce dispositif a été complété par :

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

Les seuils implantés ont été dimensionnés pour mesurer de faibles hauteurs d'eau et donc de faibles débits (Figure 66).

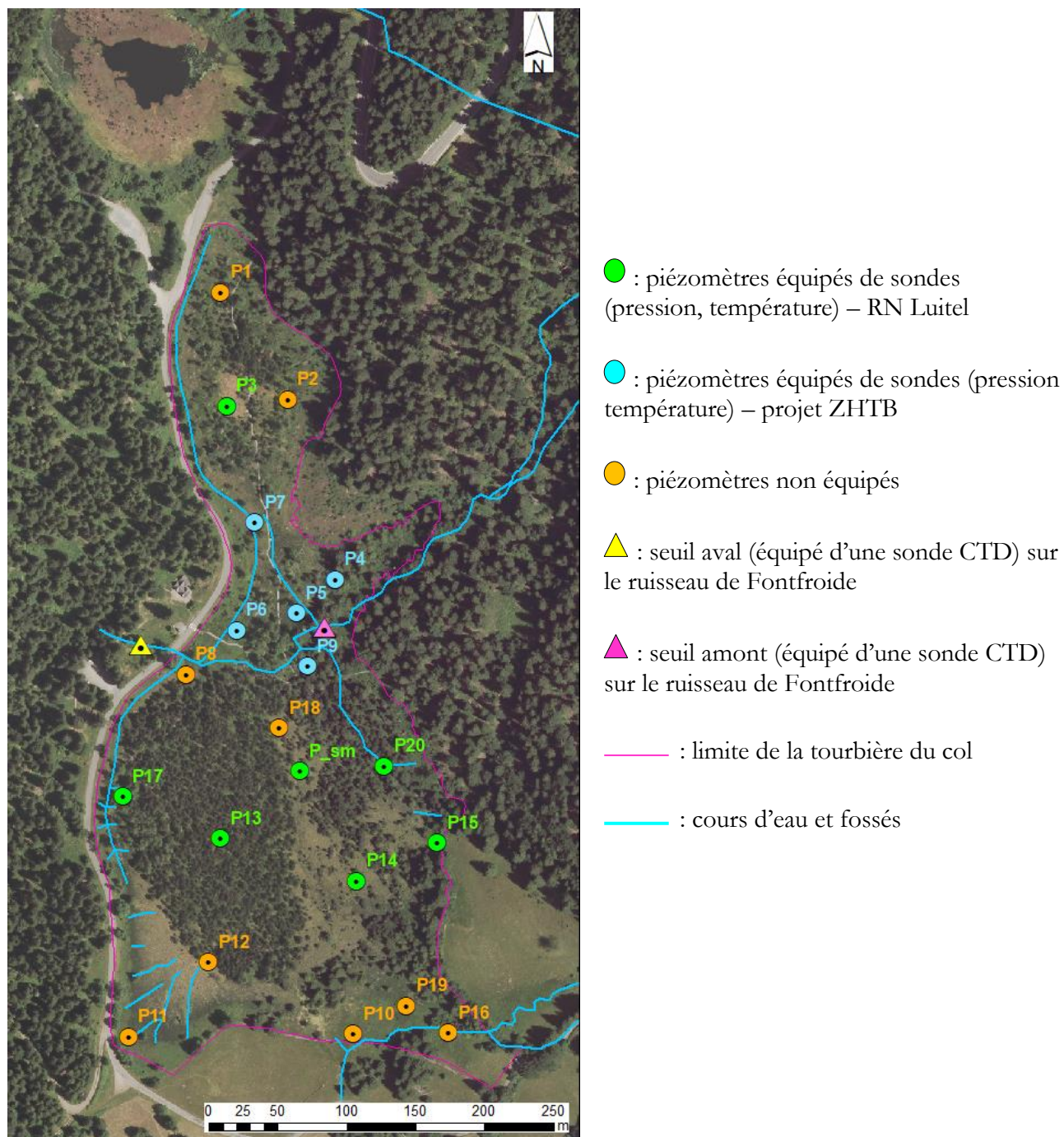


Figure 65 : Instrumentation hydrologique au Luitel

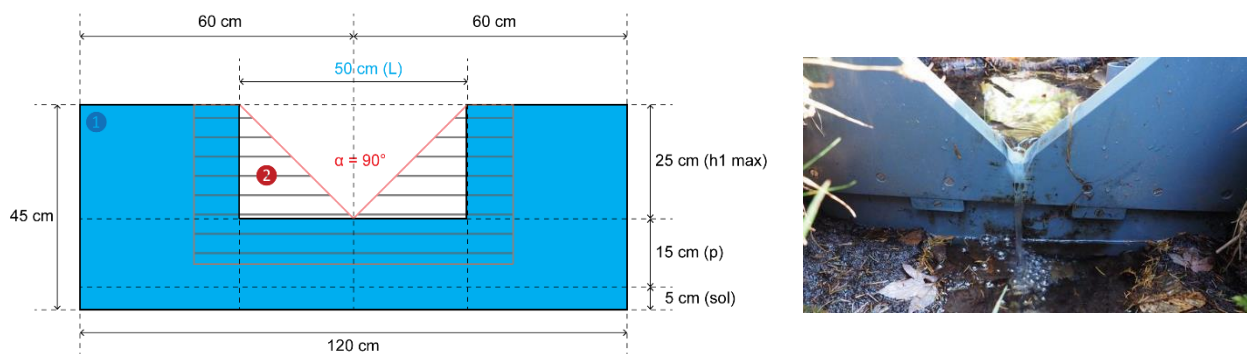


Figure 66 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel

- 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]

La transformation hauteur/débit est calculée à l'aide la formule de Thomson :

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

Avec :

Q : débit en m³/s

h : hauteur d'eau en m

9.2.2. Présentation rapides des données acquises

9.2.2.1. Débits de Fontfroide

Comme indiqué précédemment, les hauteurs (m) du ruisseau de Fontfroide sont enregistrées au niveau de 2 seuils, à l'amont et à l'aval de la tourbière. Ces hauteurs sont converties en débits (l/s) avec la formule de Thomson (voir ci-avant). Les données acquises couvrent le période du 26 avril 2018 au 27 juillet 2022, soit 5 étiages estivaux (Figure 67). Les sondes CTD enregistrent de plus la température (°C) et la conductivité électrique (EC en µs/cm) de l'eau.

La Figure 67 montre les données acquises sur cette période au pas de temps journalier et intègre le cumul de la pluviométrie (mm). Sur cette figure et à cette échelle, on observe que :

- le débit répond rapidement aux précipitations ;
- les variations amont-aval sont globalement similaires.

Les figures suivantes proposent un zoom sur les étiages estivaux 2018 (Figure 68), 2019 (Figure 69), 2020 (Figure 70), 2021 (Figure 71) et 2022 (Figure 72). La Figure 73 montre un exemple d'étiage hivernal en 2019. L'ensemble de ces figures au pas de temps journalier présente les mêmes données de Fontfroide amont et Fontfroide aval que précédemment sur la Figure 67 : température (°C), débits (l/s), conductivités électriques (µs/cm) et pluviométrie (mm). On note que les données de pluviométrie s'arrêtent pour l'instant le 1 juin 2022 : elles ne sont donc pas complètes sur l'étiage 2022 (en cours d'acquisition). De plus, pour les étiages 2018, 2019 et 2020, les données au pas de temps journaliers acquises par la sonde de la réserve à l'aval de Fontfroide ont été intégrées sur les figures (en pointillés) : débits (l/s), température (°C) et conductivité électrique (µs/cm) de l'eau.

Les étiages estivaux 2018, 2019 et 2020 débutent en juin après de fortes pluies printanières et se terminent en octobre, interrompus seulement par des orages estivaux en juillet et août. L'étiage 2021 est moins marqué et couvre la période du 7 juin au 19 juillet. On observe cette année-là un printemps et un été très pluvieux. Au contraire, l'étiage 2022 est très marqué (données en cours d'acquisition) puisque

qu'il débute en mai. De plus, l'hiver et le printemps précédents sont caractérisés par de faibles pluviométries.

L'étiage estival 2018 (Figure 68) couvre la période du 11 juin au 29 octobre. Il est seulement interrompu par des pluies qui font remonter les débits sur la première quinzaine d'août. Cette année-là, les débits (Q) amont sont supérieurs aux débits aval. Une fuite sous le seuil aval a dénoyé la sonde pour certaines périodes ($EC = 0 \mu S/cm$). On observe une bonne correspondance avec les valeurs de débits de la sonde de la réserve. Les températures et les conductivités électriques amont-aval suivent des tendances similaires.

L'étiage estival 2019 (Figure 69) couvre la période du 13 juin au 23 octobre. Il est interrompu par plusieurs épisodes pluvieux en juillet, août et fin octobre. Comme pour l'étiage 2018, les valeurs (EC, T et Q) amont-aval et sonde de la réserve montrent une bonne correspondance. On observe que les valeurs de débits amont sont plus fortes que les valeurs aval pour les débits les plus faibles. On observe l'inverse pour des débits plus forts notamment ceux liés à des épisodes pluvieux.

L'étiage estival 2020 (Figure 70) couvre la période du 4 juin au 10 octobre. Il est seulement interrompu par de fortes pluies fin août. Comme pour 2019, les tendances amont-aval sont similaires et les débits amont sont plus forts que les débits aval sauf lors des pics de pluviométrie.

L'étiage estival 2021 (Figure 71) est court et couvre la période du 7 juin au 19 juillet. Cette fois, comme en 2018, les valeurs de débits aval sont plus fortes que les valeurs amont (données en cours de validation). Les autres valeurs montrent des tendances similaires.

Pour terminer l'étiage estival 2022 (Figure 72) est très intéressant car très marqué puisqu'il débute le 5 mai seulement interrompu pour l'instant par une courte période de pluie durant le mois de mai. Concernant les valeurs de débits, on observe 2 tendances (données à valider) : 1) de mai à juin le débit amont est inférieur au débit aval ; 2) de juin à juillet le débit amont est supérieur au débit aval. Compte-tenu de la quasi absence de pluie en juillet, l'étude de cet étiage estival dans un contexte de forte sécheresse (hivers 2021-2022 et premier semestre 2022) sera très intéressante.

Pour finir sur la présentation des données de débits à l'étiage, la Figure 72 montre un cas d'étiage hivernal en 2019 sur la période du 21 décembre au 2 mars.

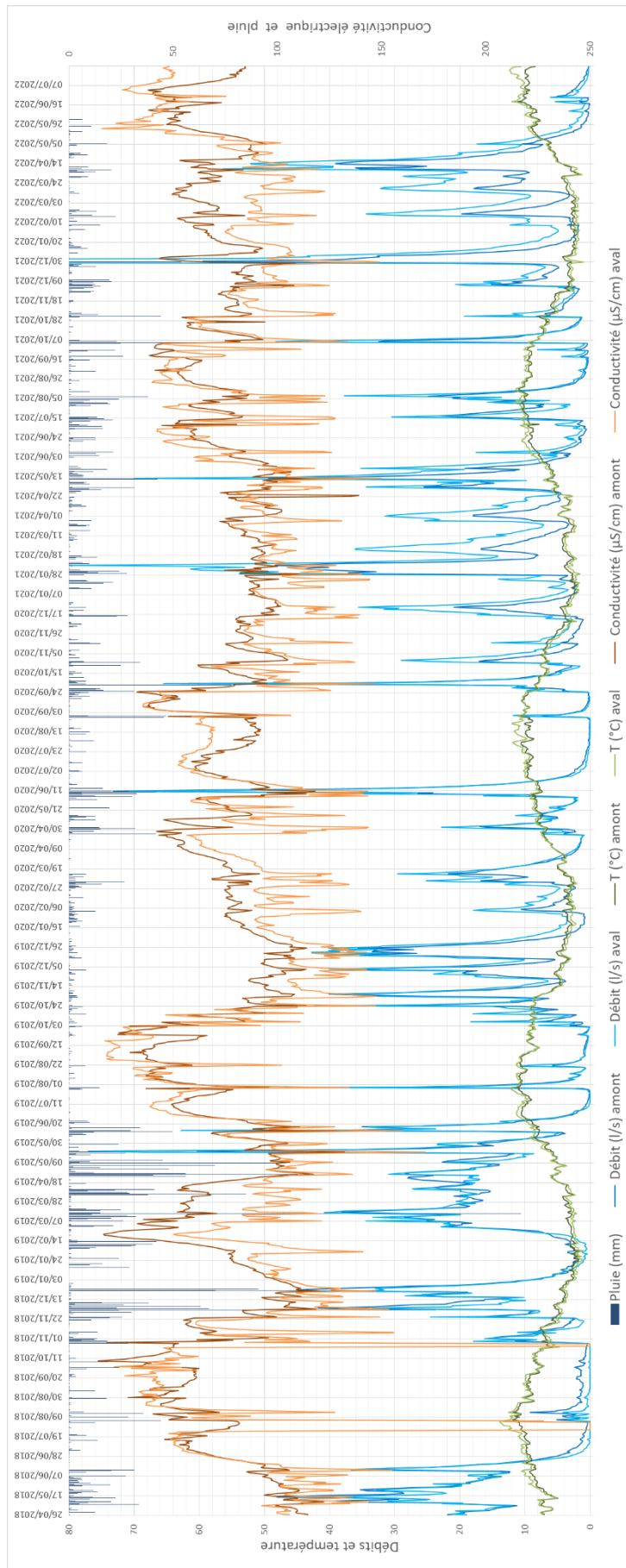


Figure 67 : Chronique de données du ruisseau de Fontfroide (26 avril 2018 au 27 juillet 2022)

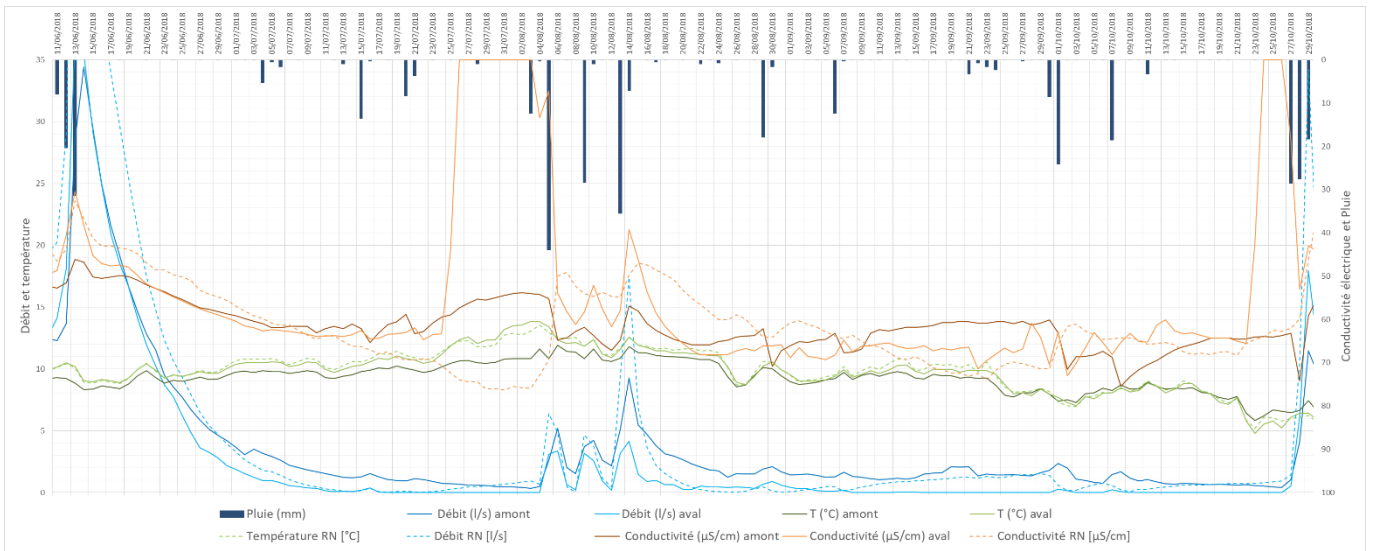


Figure 68 : Étiage estival 2018 (11 juin au 29 octobre 2018)

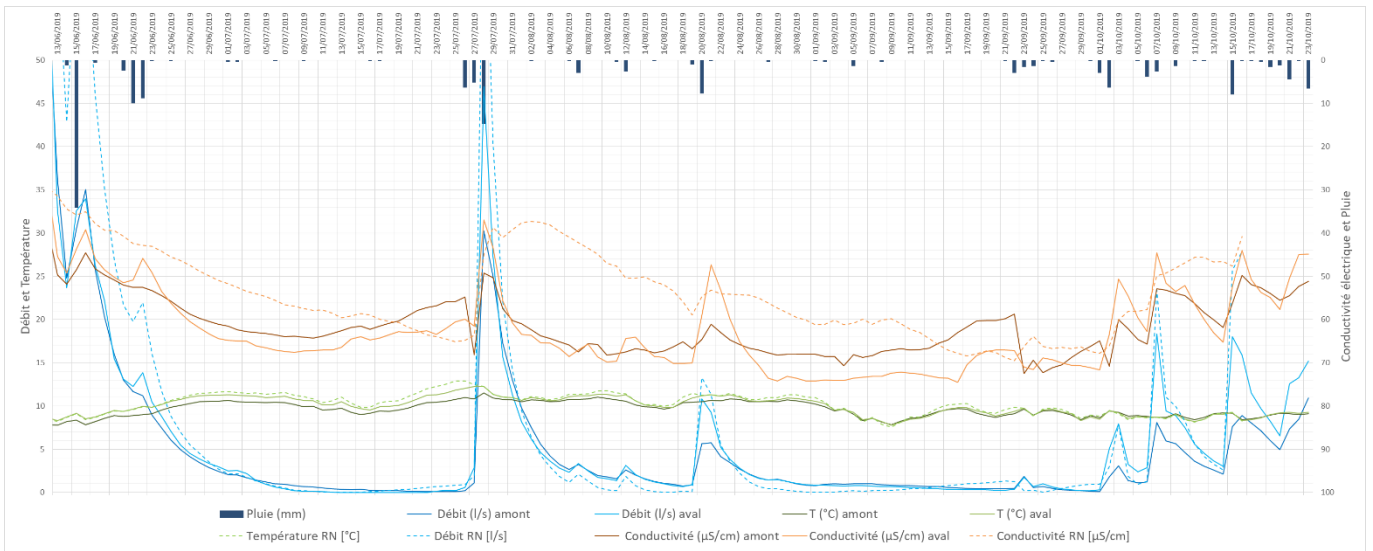


Figure 69 : Étiage estival 2019 (13 juin au 23 octobre 2019)

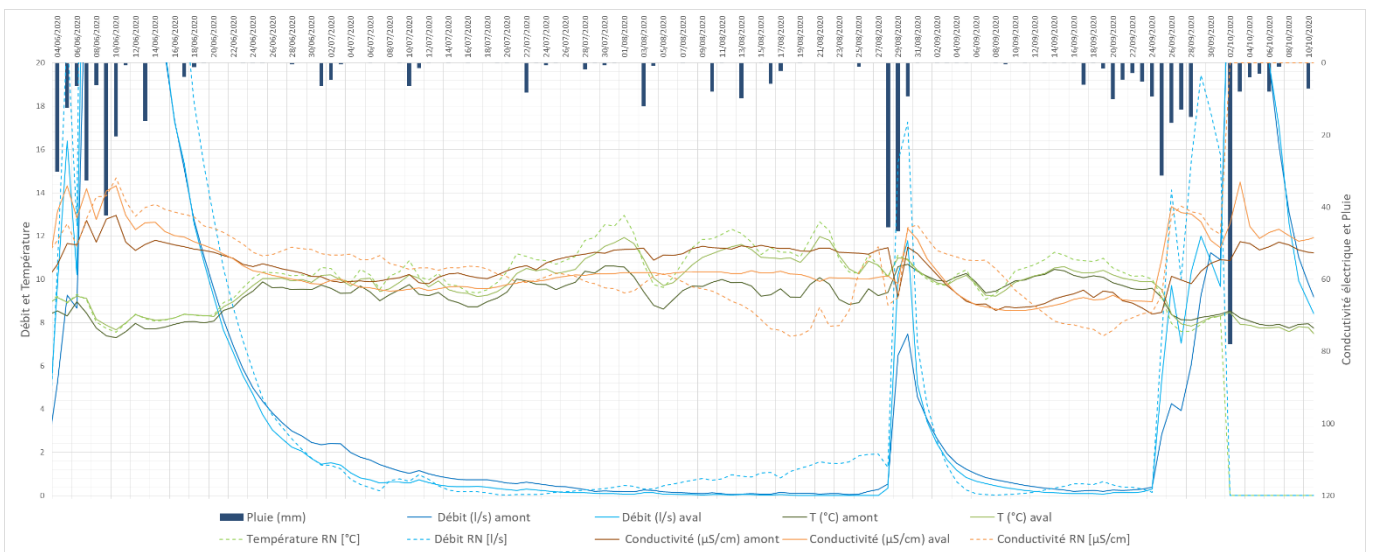


Figure 70 : Étiage estival 2020 (4 juin au 10 octobre 2020)

Projet Zabr/AE-RMC - ZHTB Soutien d'été phase 3 (2019-2022)

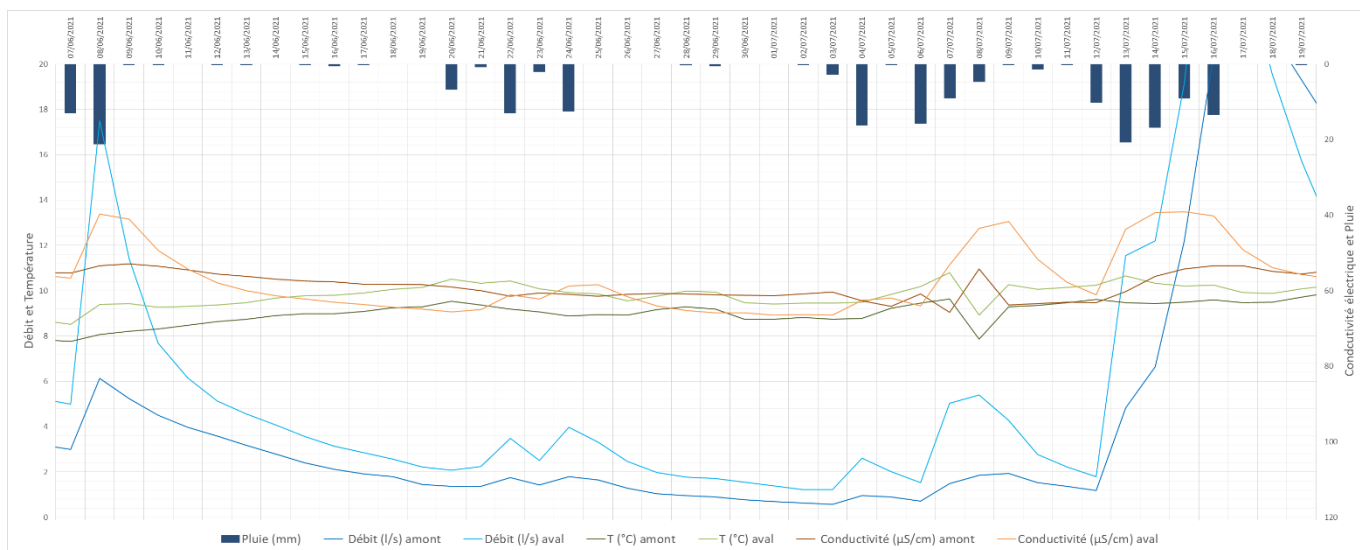


Figure 71 : Étage estival 2021 (7 juin au 19 juillet)

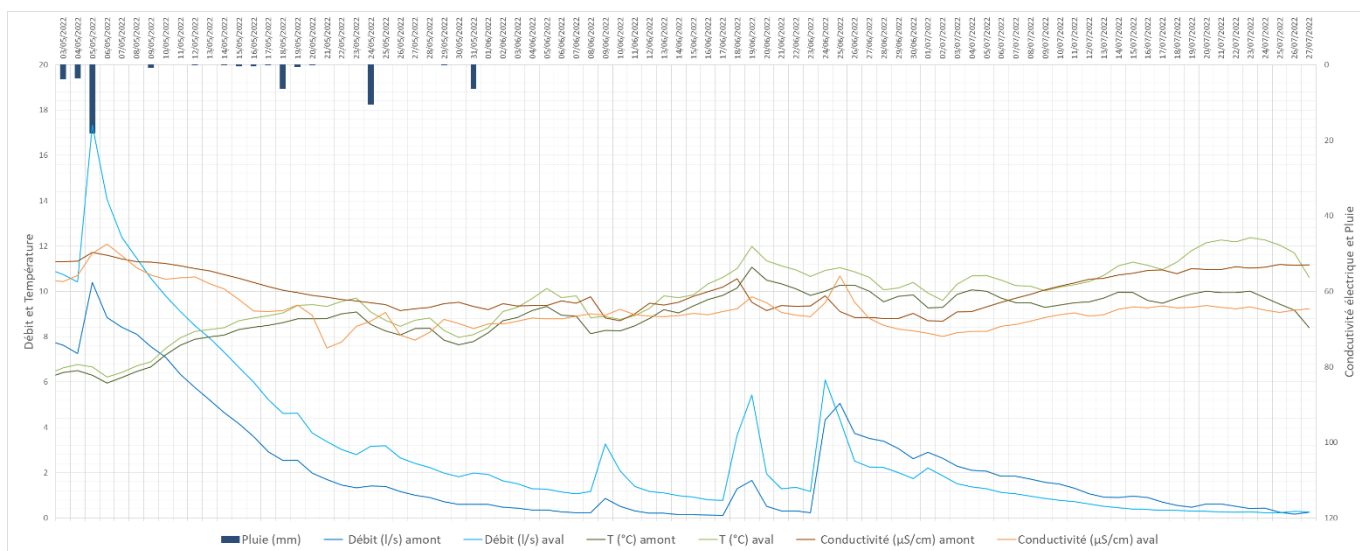


Figure 72 : Étage 2022 (en cours d'acquisition)

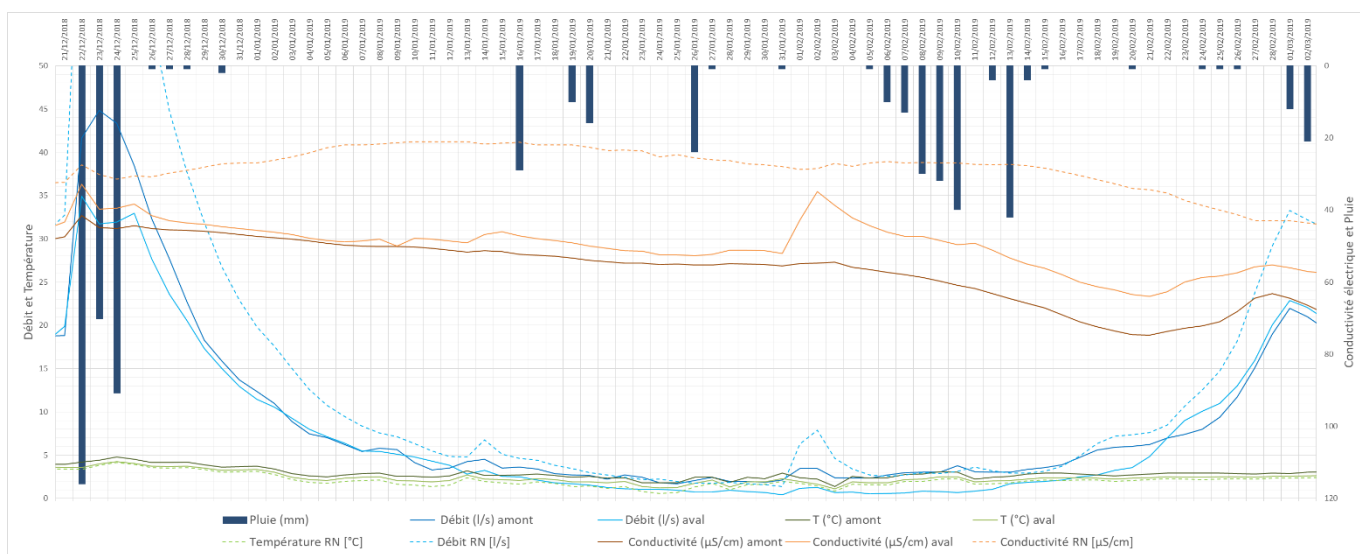


Figure 73 : Étage hivernal 2018-2019 (21 décembre au 2 mars)

9.2.2.2. Niveaux piézométriques

Les figures suivantes présentent les étiages estivaux 2018, 2019 et 2020 à partir des données de niveaux d'eau enregistrées avec les piézomètres équipés de sondes. Les figures montrent la variation d'altitude du niveau (m NGF) d'eau et de température de l'eau (°C) au pas de temps journalier dans les piézomètres groupés en 3 secteurs jugés représentatifs de la tourbière du col : 1) zone nord : piézomètres P3 et P7 ; 2) zone centrale de Fontfroide : piézomètres P4, P5, P6, P9, P20 ; 3) zone sud : piézomètres P13, P14, P15, P17, P20. On note que les données de tous ces piézomètres ne sont pas disponibles pour chacune des 3 années du fait de l'historique d'installation et des pannes de matériel. De plus, seul le piézomètre P4 dispose d'une sonde enregistrant la conductivité électrique de l'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

L'ensemble des figures proposées intègre de plus : 1) le cumul des pluies journalier (P en mm) ; 2) le cumul de l'ETP journalier (ETP mm) ; 3) les conductivités électriques (EC_amont été EC_aval en $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les débits journaliers (Q_amont et Q_aval en l/s) de Fontfroide amont et aval.

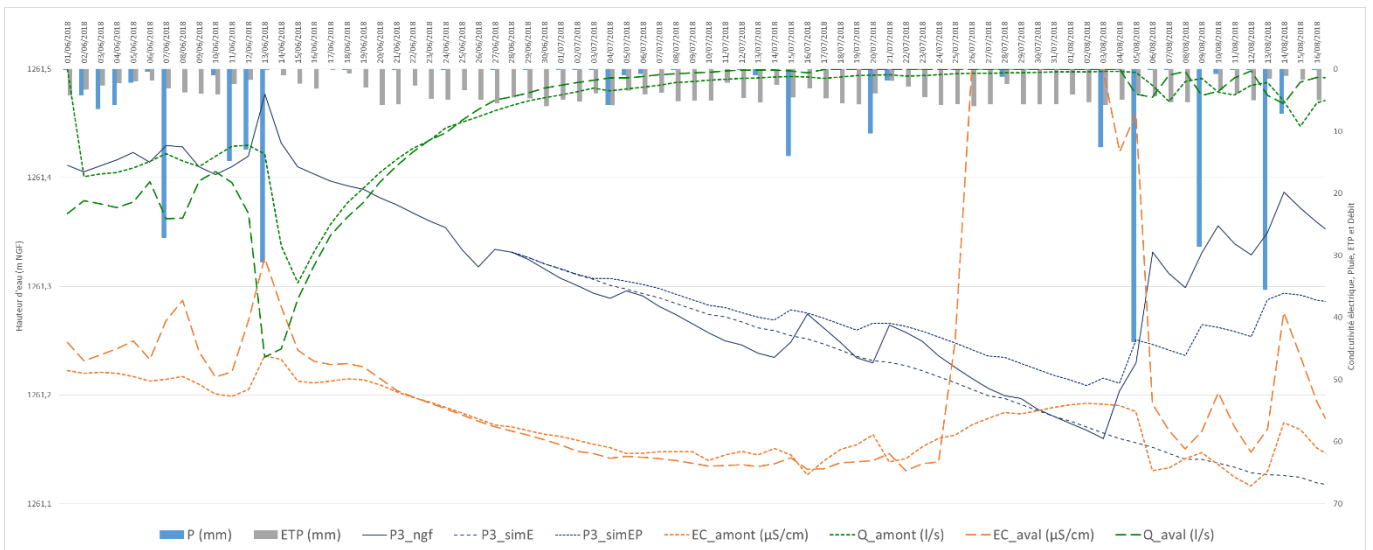


Figure 74 : Étiage 2018 – zone nord (1 juin au 16 aout)

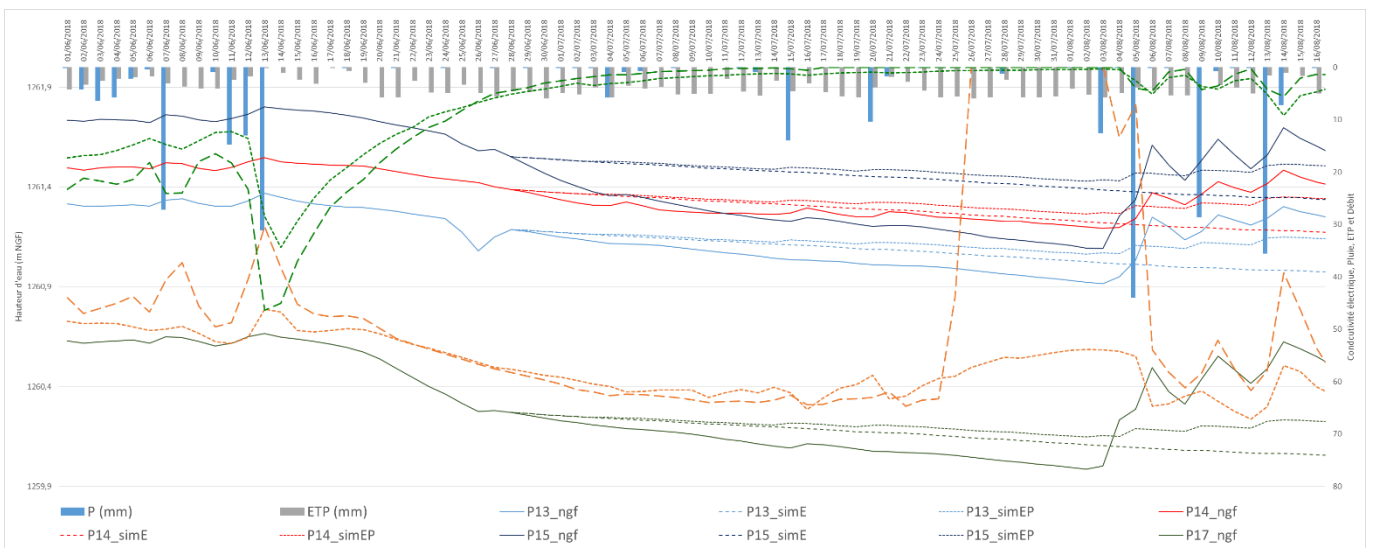


Figure 75 : Étiage 2018 – zone sud (1 juin au 16 aout)

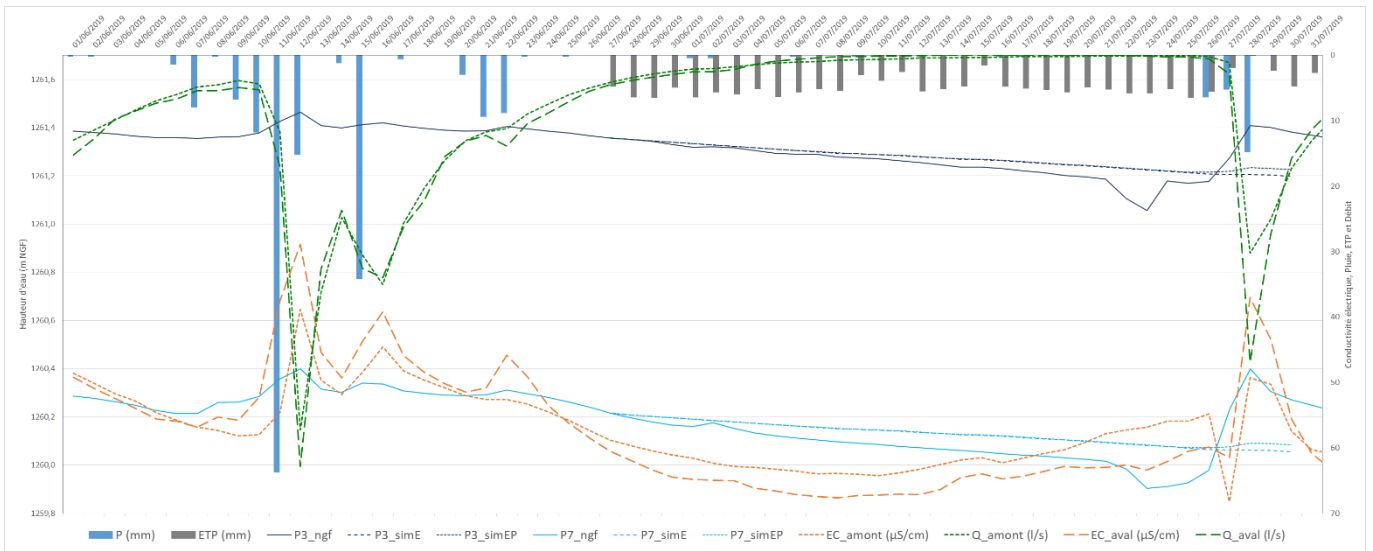


Figure 76 : Étiage 2019 – zone nord (1 juin au 31 juillet)

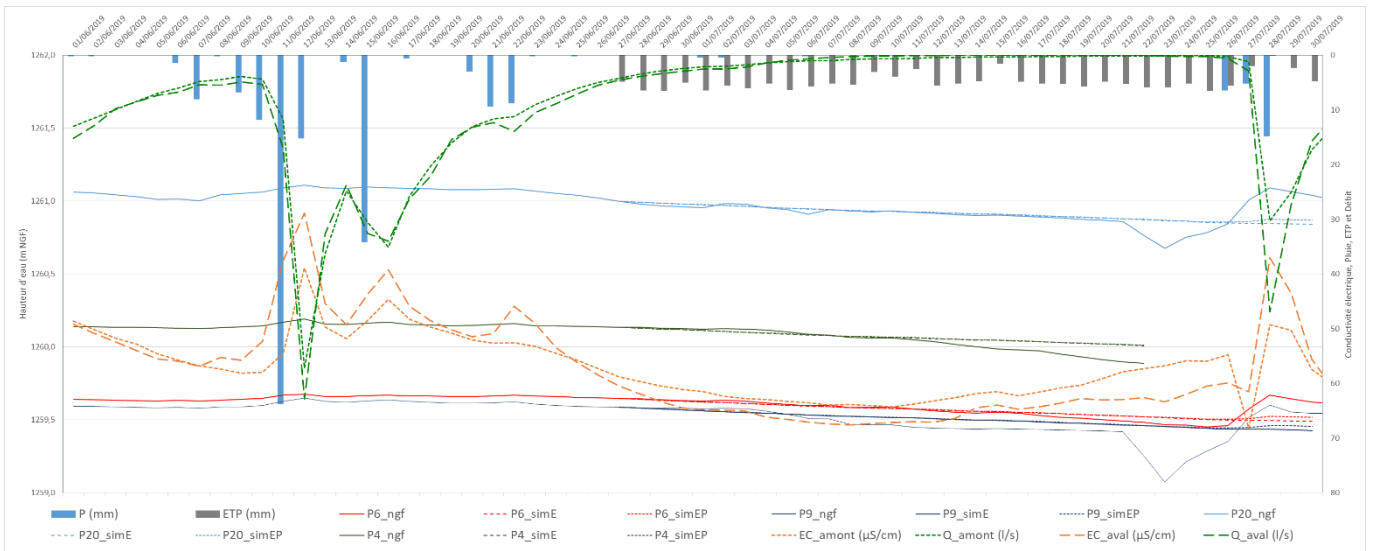


Figure 77 : Étiage 2019 – zone centrale - Fontfroide (1 juin au 31 juillet)

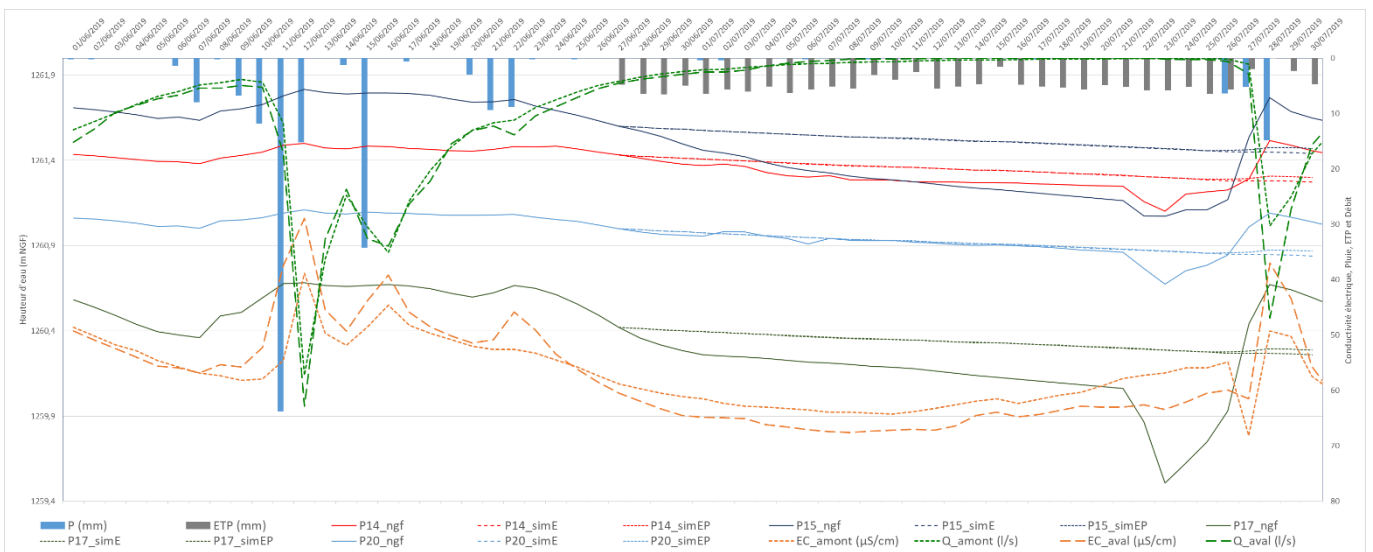


Figure 78 : Étiage 2019 – zone sud (1 juin au 31 juillet)

Partie II – Luitel – Suivi hydrologique

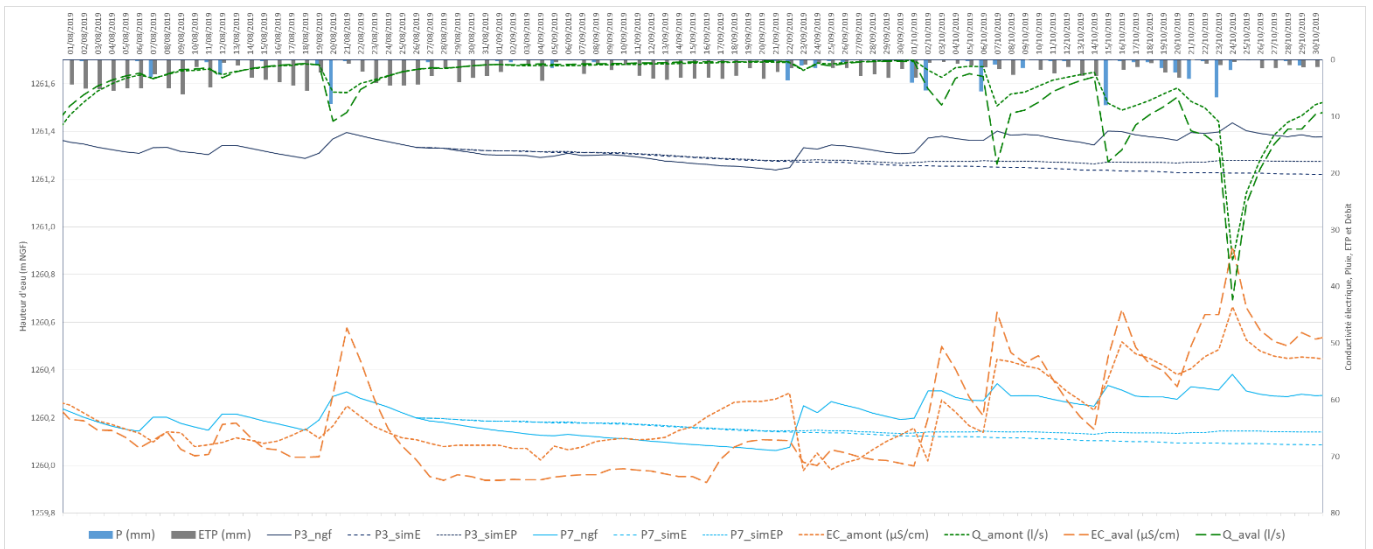


Figure 79 : Étiage 2019 – zone nord (1 aout au 30 septembre)

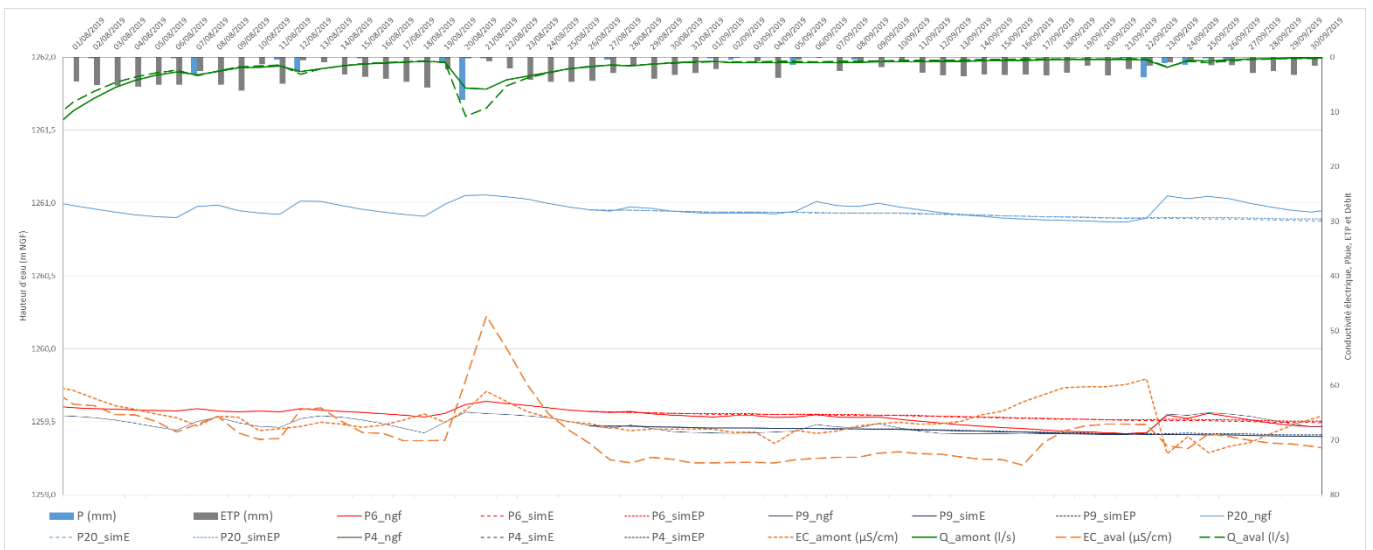


Figure 80 : Étiage 2019 – zone centrale - Fontfroide (1 aout au 30 septembre)

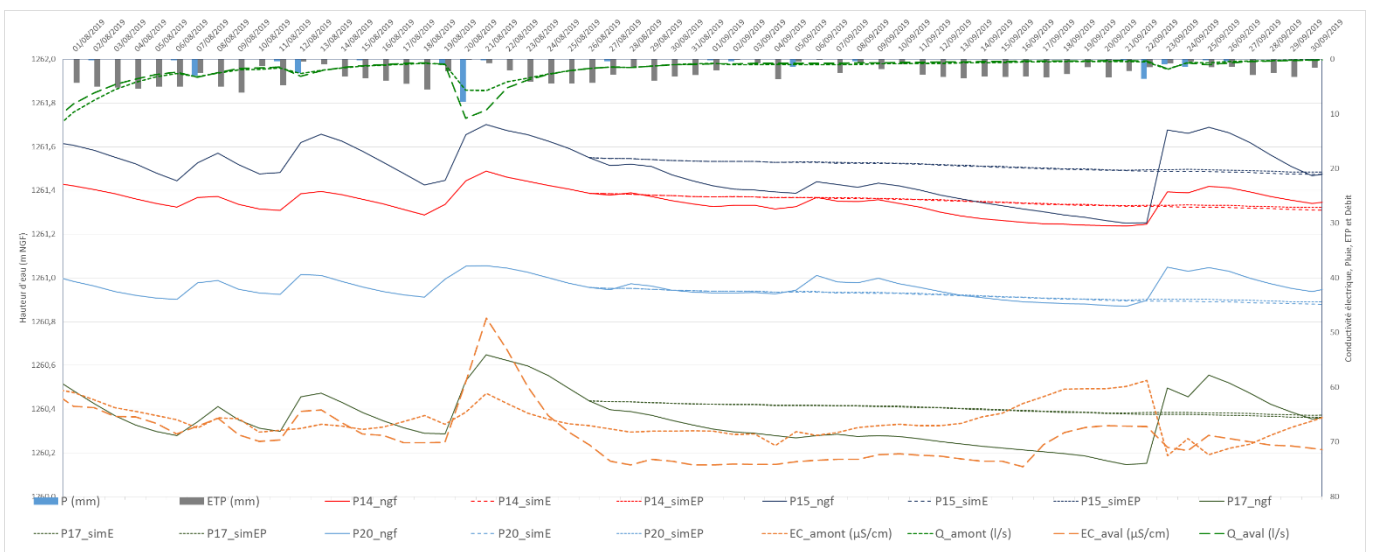


Figure 81 : Étiage 2019 – zone sud (1 aout au 30 septembre)

Projet Zabr/AE-RMC - ZHTB Soutien d'été phase 3 (2019-2022)

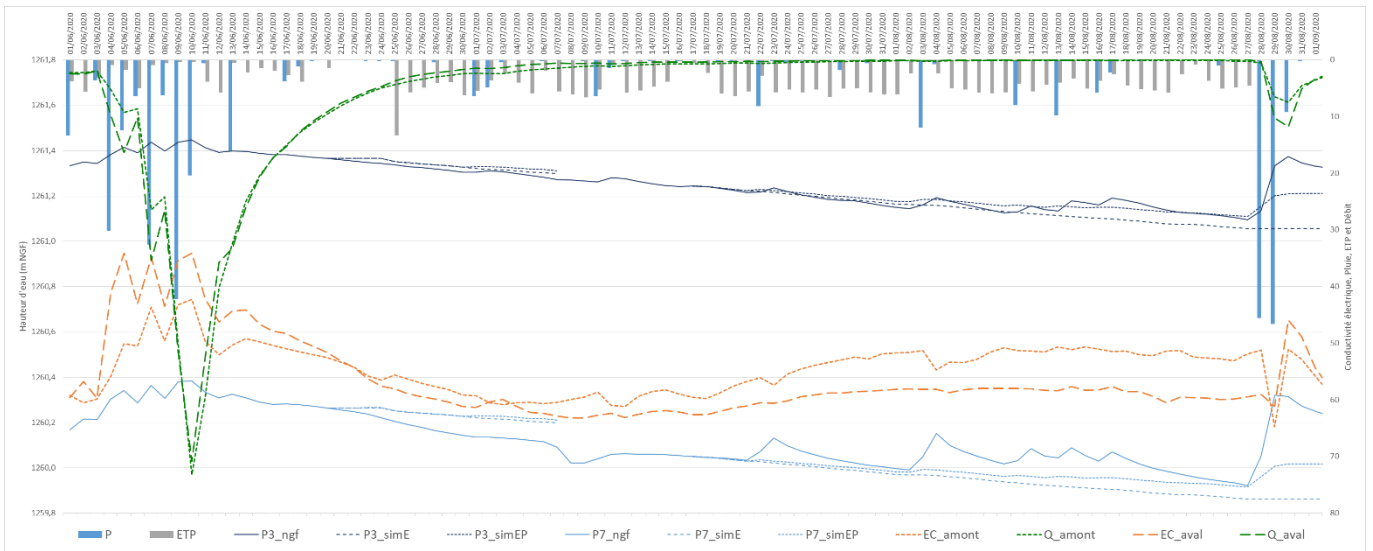


Figure 82 : Étiage 2020 – zone nord (1 juin au 1 septembre)

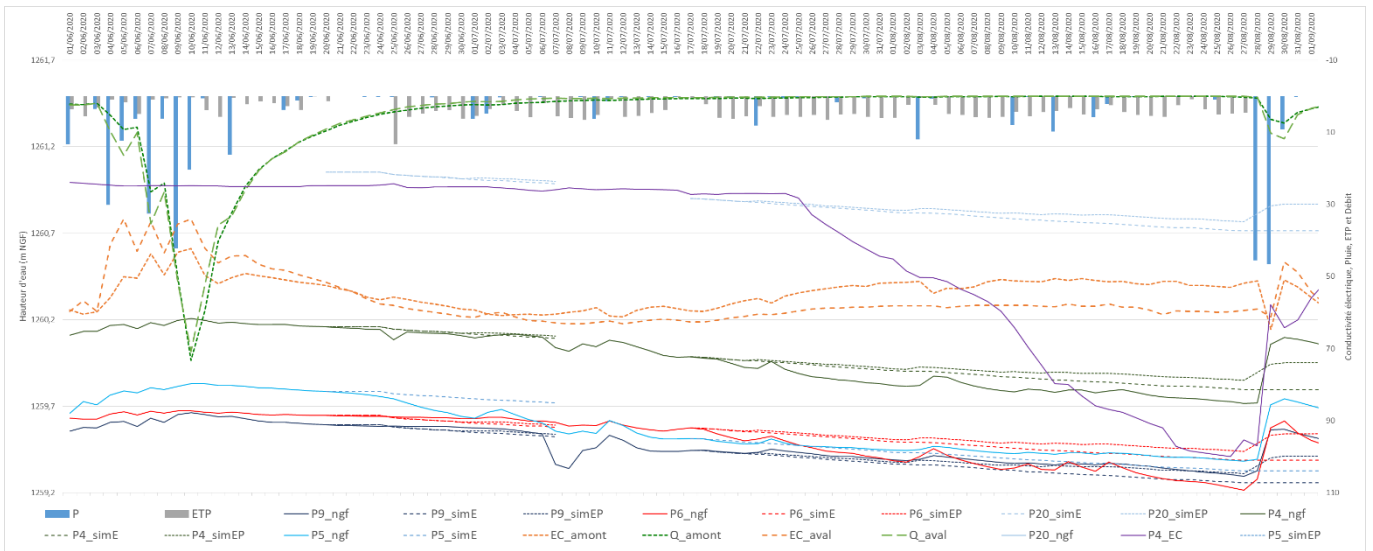


Figure 83 : Étiage 2020 – zone centrale - Fontfroide (1 juin au 1 septembre)

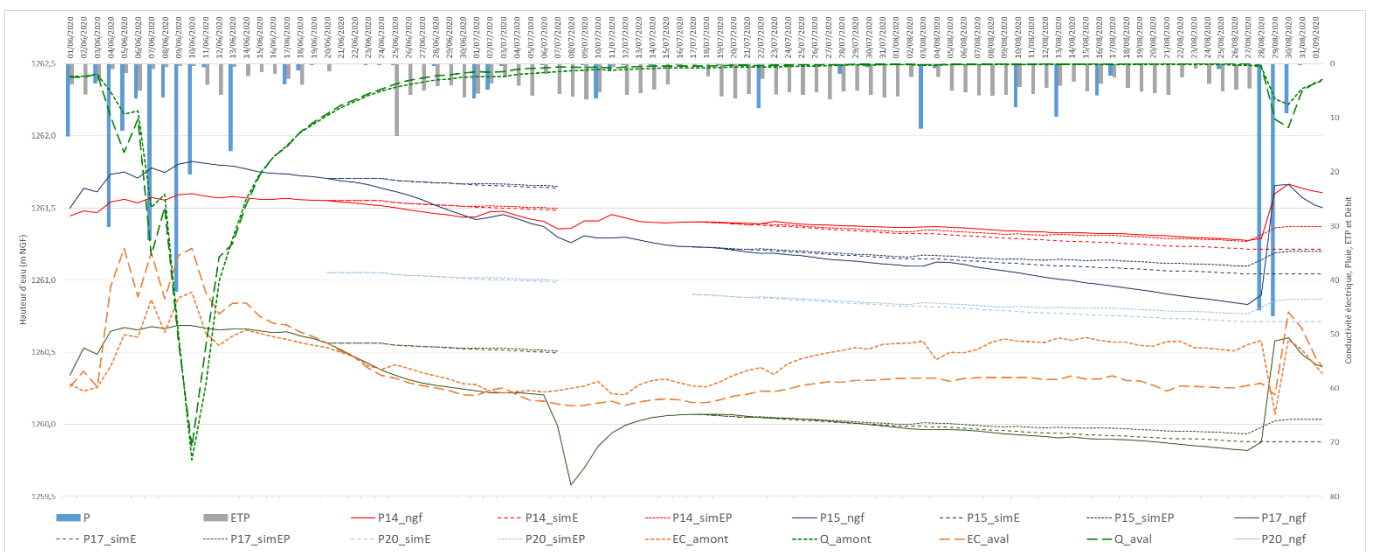


Figure 84 : Étiage 2020 – zone sud (1 juin au 1 septembre)

Pour terminer, ces figures montrent un bilan hydrologique simplifié qui simule une baisse théorique du niveau d'eau dans les piézomètres en fonction de la pluie et de l'ETP. Si l'on prend l'exemple du piézomètre P3 :

- 1) P3_ngf montre les variations d'altitude du niveau d'eau (m NGF) enregistré par la sonde ;
- 2) P3_simE simule les variations d'altitude du niveau d'eau (m NGF) en retranchant la quantité d'eau correspondant à l'ETP à chaque pas de temps en considérant la tourbière comme un réservoir contenant toujours de l'eau disponible (ETP=ETR) ;
- 3) P3_simEP simule les variations d'altitude du niveau d'eau (m NGF) en retranchant l'ETP comme précédemment et en ajoutant la quantité d'eau correspondant à la pluie à chaque pas de temps.

Pour l'étiage estival 2018, la zone nord est décrite uniquement par le piézomètre P3 (Figure 74) et la zone sud (Figure 75) par les piézomètres P13, P14, P15, P17 pour la période du 1 juin au 16 août.

Pour la zone nord, P3 montre un tarissement régulier, mais plus rapide au début, marqué par de rares hausses de niveau lors des épisodes pluvieux (7, 15 et 20 juillet). On note que le pic généré par la pluie est rapidement évacué pour reprendre un tarissement régulier. Le creux observé à partir du 26 juin est lié à un prélèvement d'eau correspond à 2 vidanges du piézomètre sur 2 jours consécutifs pour un prélèvement d'eau pour les analyses géochimiques. Ce piézomètre perd plus d'eau que ne le simule le bilan P-ETP. Le niveau final atteint le niveau simulé en retranchant uniquement l'ETP.

Pour la zone sud, les piézomètres sont positionnés en transect de l'est vers l'ouest. On observe un gradient hydraulique dans le sens de ce transect depuis le contact avec le versant de Chamrousse (P15), en traversant le pré-bois (P14), puis la tourbière bombée boisée (P13) et enfin proche du fossé (drain) le long de la route (P17). L'ensemble de ces piézomètres montrent un tarissement très régulier, mais un peu plus rapide au début, et très peu (voire pas) influencé par les épisodes pluvieux. Les prélèvements des 26 et 27 sont très marqués pour P13, et marqués à peu marqués pour les autres piézomètres. Globalement, le tarissement est parallèle pour tous les piézomètres : seul P15 semble montrer un tarissement plus rapide. De plus, tous ces piézomètres perdent plus d'eau que ne le simule le bilan P-ETP.

L'étiage estival 2019 est intéressant car il pleut très peu. Il peut être divisé en 2 périodes : du 1 juin au 31 juillet (Figure 76, Figure 77, Figure 78) et du 1 août au 30 septembre (Figure 79, Figure 80, Figure 81). De plus, les données sont disponibles pour les 3 secteurs de la tourbière avec plus de piézomètres : zone nord avec les piézomètres P3 et P7 (Figure 76 et Figure 79) ; zone centrale avec les piézomètres P14, P15, P17 (Figure 77 et Figure 80) ; zone sud avec les piézomètres P4, P6, P9, P20 (Figure 78 et Figure 81).

Pour la zone nord, sur les 2 périodes (du 27 juin au 27 juillet ; du 26 août au 21 septembre) et pour les 2 piézomètres on observe un tarissement très régulier du fait de la quasi absence de pluie. Les très faibles pluies (1 et 2 juillet) s'observent à peine sur les niveaux d'eau contrairement aux prélèvements d'eau pour la géochimie le 23 juillet. Ces 2 piézomètres perdent plus d'eau que le simple prélèvement par l'ETP. Il y a donc un écoulement gravitaire plus fort pour P7 que pour P3. Il existe de plus un gradient hydraulique de P3 (œil de la tourbière) vers P7 (surverse nord vers sud).

Pour la zone centrale, sur les 2 périodes (du 27 juin au 27 juillet ; du 26 août au 21 septembre), observe un tarissement à pente très faible et régulier. L'influence des pluies est peu marquée. Les prélèvements du 23 juillet sont bien marqués pour P20 et P9. Il existe un gradient hydraulique de P20 (versant de Chamrousse, proche du ruisseau sans nom) vers P9 (zone Fontfroide amont) et P6 (marais à proche de l'exutoire de Fontfroide) dont les niveaux sont très proches (mais inversé par rapport à leur position). Il existe un gradient hydraulique de P4 (combe, versant Chamrousse) vers P6. Par rapport, au tarissement simulé : P20 et P6 semblent suivre la tendance prévue, P9 perd légèrement plus d'eau que simulé, quant à P4, il décroche de la tendance à partir du 11 juillet.

Pour la zone sud, sur les 2 périodes (du 27 juin au 27 juillet ; du 26 août au 21 septembre), on observe un tarissement à pente faible et régulier, mais plus rapide au début. L'influence des pluies est peu marquée. Les prélèvements du 23 juillet sont bien marqués notamment pour P17. Le gradient hydraulique est le même qu'en 2018 si ce n'est que la sonde de P13 était en panne. En revanche, les

données de P20 ont été ajoutées. Comme en 2018, on observe le tarissement plus rapide de P15. Tous les piézomètres perdent plus d'eau que la tendance simulée notamment P17 et P15.

L'analyse de l'étiage 2020 ne présente pas de différence majeure avec les étiages 2018 et 2019. On note comme pour les années précédentes un creux dans la courbe à la faveur de prélèvement d'eau pour analyses géochimiques les 7 et 8 juillet. Seul fait marquant, le remplacement de la sonde CTD défectueuse du piézomètre P4 qui a permis d'obtenir (enfin) des chroniques de conductivité électrique de l'eau. Au début de l'étiage, les valeurs sont stables (environ $20\mu\text{S}/\text{cm}$) puis les valeurs décrochent sans raison apparente à partir du 25 juillet pour atteindre environ $100\mu\text{S}/\text{cm}$ le 26 août avant de chuter à nouveau en raison des fortes pluies. La Figure 85 montre l'évolution conjointe des niveaux d'eau (au-dessus de la sonde CTD), de la conductivité électrique, de température et de la pluie sur la période du 17 mai 2019 au 27 juillet 2022. Au contraire, la conductivité varie très peu lors de l'étiage peu marqué et pluvieux de 2021. Pour l'étiage 2022 (en cours), la conductivité a décroché à partir de début mai (environ $20\mu\text{S}/\text{cm}$) pour atteindre $62\mu\text{S}/\text{cm}$ le 27 juillet. Cette hausse de conductivité peut être due à des apports d'eau de versant plus minéralisée dans le piézomètre. Les baisses brutales quant à elles semblent liées à de fortes pluies. On observe par ailleurs, des hausses de conductivité en hiver qu'il est pour l'instant difficile d'expliquer (salage des routes ?).

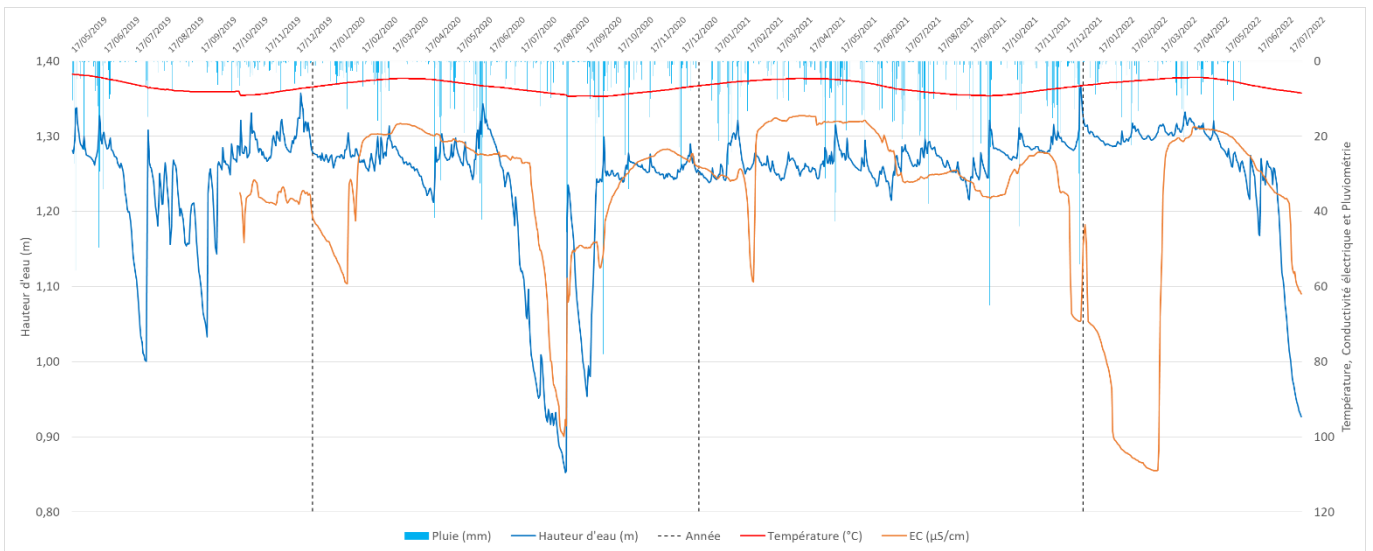


Figure 85 : Chronique de données du piézomètre P4 (17 mai 2019 au 27 juillet 2022)

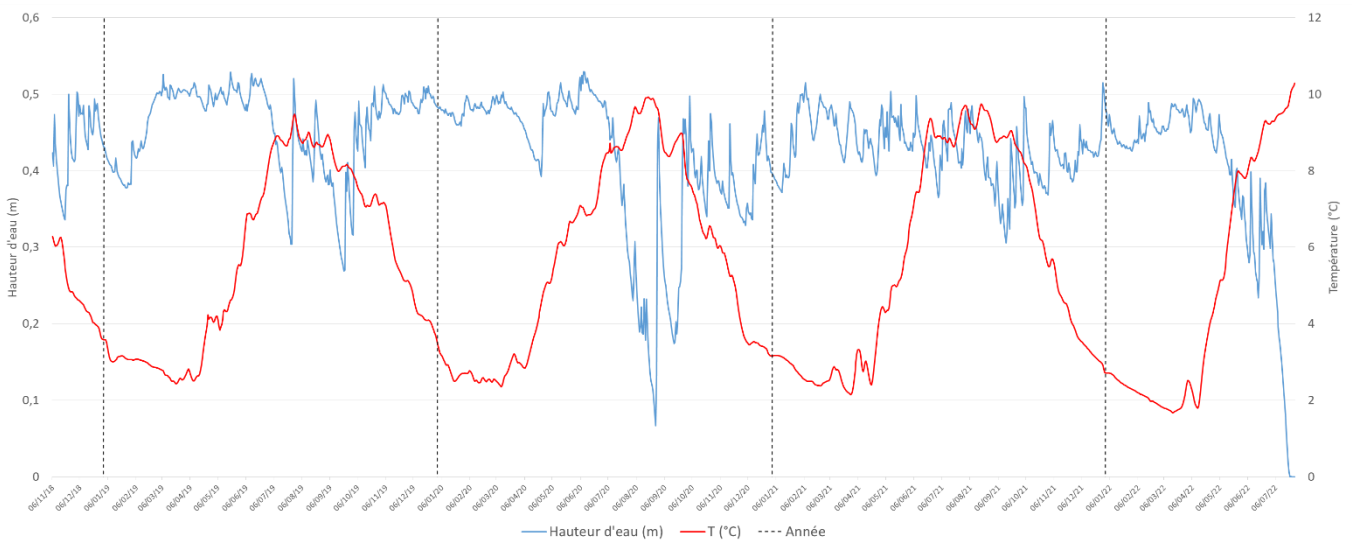


Figure 86 : Chronique de données du piézomètre P6 (6 novembre 2018 au 27 juillet 2022)

Quelques soient les données que l'on consulte, pluviométrie au Luitel, débits de Fontfroide niveau d'eau dans les piézomètres, l'année 2022 sera très intéressante à étudier lorsque nous aurons les données complètes de l'étiage. On constate d'ores et déjà que l'étiage 2022 est marqué par une forte sécheresse (qui débute dès l'hiver 2021-2022 et se poursuit au printemps), avec des débits de Fontfroide faibles depuis le mois de mai et des niveaux d'eau dans les piézomètres (Figure 85 et Figure 86) faibles aussi depuis mai et qui chutent fortement à partir de début juillet. Pour le piézomètre P6 (Figure 86), on observe que la sonde est d'ores et déjà dénoyée depuis le 22 juillet et que l'étiage à ce moment de l'année est déjà plus sévère que tous ceux enregistrés depuis 2018.

9.2.3. Essais d'eau

Afin de d'estimer la conductivité hydraulique de la tourbe, et de préciser les valeurs obtenues dans la littérature à partir de l'analyse des fibres, des essais d'eau ont été effectués dans plusieurs piézomètres de la tourbière du col les 7 et 8 juillet 2021. Durant ces 2 journées, nous avons enregistré à l'aide de sonde CTD la remontée de niveau d'eau après pompage de vidange dans les piézomètres P3, P9, P7, P4, P1, P17, P13, P18, P14, P12, P15, P19, P11 et P8. La Figure 87 montre la remontée du niveau d'eau après pompage dans le piézomètre P3.

Ces essais d'eau ont été réalisés et interprétés selon la NF EN ISO 22282-2 (Essai Lefranc, Essai de perméabilité à charge variable à forage ouvert). De plus, les essais d'eau ont aussi été interprétés selon la méthode des essais de perméabilité de Theiss corrigée pour les aquifères libres. Le Tableau 9 présente les résultats d'interprétation de la conductivité hydraulique selon les 2 méthodes, ainsi que ceux tirés de la littérature suite à l'analyse des fibres d'échantillons de tourbe (voir §12. p155). Outre la perméabilité, l'analyse des fibres permet aussi d'estimer la porosité efficace de la tourbe.

Les résultats montrent des valeurs de perméabilités très proches de du même ordre de grandeur avec les méthodes Lefranc et Theiss. Globalement, ces valeurs sont plus faibles d'au moins deux ordres de grandeurs par rapport à celles obtenues par analyses des fibres. Les écarts sont très importants quand les carottages pédologiques mettent en évidence de la tourbe fibrique ($K = 10^{-1}$ m/s) notamment pour P3.

| Piézomètre | Perméabilité (K) en m/s | | | | Porosité efficace (Pef) en % | |
|------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------------|----------|
| | Essai d'eau | | Littérature (voir Tableau 23) | | Littérature | |
| | Lefranc | Theiss | K max. | K min. | Pef max. | Pef min. |
| P3 | 5,6.10 ⁻⁷ | 3,78.10 ⁻⁷ | 1.10 ⁻¹ | | 30 | 30 |
| P9 | 1,1.10 ⁻⁷ | 8,12.10 ⁻⁸ | 1.10 ⁻⁵ | | 15 | 10 |
| P7 | 1,5.10 ⁻⁶ | 2,95.10 ⁻⁶ | 1.10 ⁻⁵ | | 15 | 10 |
| P4 | 6,0.10 ⁻⁸ | 2,44.10 ⁻⁸ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P1 | 2,5.10 ⁻⁸ | 2,48.10 ⁻⁸ | 1.10 ⁻⁹ | | 15 | 10 |
| P17 | 1,7.10 ⁻⁶ | 1,45.10 ⁻⁶ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P13 | 1,2.10 ⁻⁶ | 1,68.10 ⁻⁶ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P18 | 3,3.10 ⁻⁷ | 3,77.10 ⁻⁷ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P14 | 4,9.10 ⁻⁷ | 1,95.10 ⁻⁷ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P12 | 6,7.10 ⁻⁷ | 3,38.10 ⁻⁷ | 1.10 ⁻¹ | 1.10 ⁻⁵ | 30 | 10 |
| P15 | 2,1.10 ⁻⁶ | 2,45.10 ⁻⁶ | – | – | – | – |
| P19 | 2,5.10 ⁻⁶ | 3,83.10 ⁻⁶ | – | – | – | – |
| P11 | 3,3.10 ⁻⁶ | 5,95.10 ⁻⁶ | – | – | – | – |
| P8 | 2,1.10 ⁻⁵ | 8,35.10 ⁻⁵ | – | – | – | – |

Tableau 9 : Perméabilités et porosité efficace au niveau des piézomètres. Les données de perméabilités issues de la littérature sont données Tableau 23

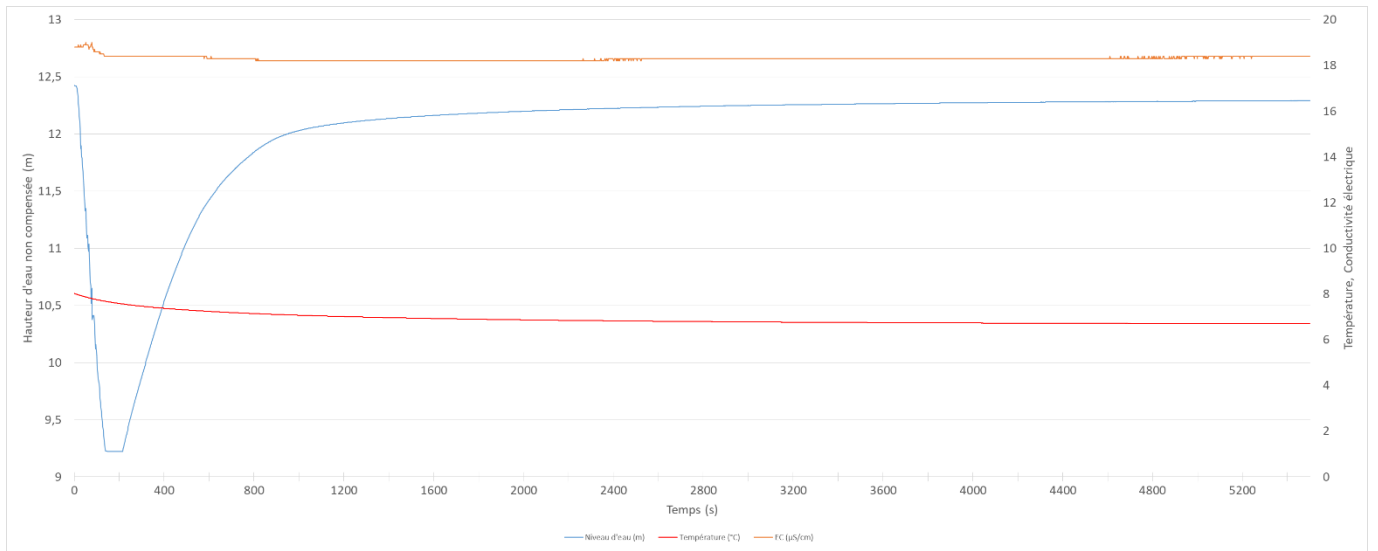


Figure 87 : Essai d'eau sur le piézomètre P3 - courbe de remontée après pompage

10. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones

Cette partie fait suite aux travaux de modélisation et d'analyses statistiques de la Phase 2. Pour les éléments méthodologiques concernant les analyses et la modélisation par réseaux de neurones, le lecteur sera donc renvoyé au rapport phase 2 (p37, p51 et p75).

Il s'agit ici avec l'accumulation de données bien plus importante que pour la phase 2 de détecter, dans les différents éléments du système tourbeux du Luitel, d'éventuels comportements particuliers qui pourraient nous éclairer sur l'existence ou non d'un soutien d'étiage et sur la sensibilité de ces systèmes à différents éléments climatiques.

10.1. Données disponibles

La liste des données disponibles est présentée dans le Tableau 10. Les données ont été traitées de sorte que les erreurs qu'elles contiennent sont limitées et que leur représentativité est, la plupart du temps, assurée. Le piézomètre P3 a été considéré comme statistiquement représentatif de l'ensemble des piézomètres sur un plan hydrologique. Il n'en est certainement pas de même lorsque l'on veut analyser les écoulements au sein du système tourbeux, ce qui n'était pas l'objet de la présente analyse.

| Nom | Variable | Unité | Pas de temps | Première entrée | Dernière entrée | Durée (ans) |
|-----------------|----------------|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Ruisseau du Lac | Hauteur | cm | jour | 03.09.2014 | 27.10.2021 | 7.15 |
| Ruisseau du Lac | Température | °C | jour | 03.09.2014 | 27.10.2021 | 7.15 |
| Ruisseau du Lac | Conductivité | µS/cm | jour | 03.09.2014 | 27.10.2021 | 7.15 |
| Ruisseau du Lac | Débit | l/s | jour | 03.09.2014 | 27.10.2021 | 7.15 |
| Station météo | Précipitations | mm | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | Rayonnement | kWh/m ² | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | Tm | °C | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | Tn | °C | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | Tx | °C | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | Hauteur neige | cm | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Station météo | ETP | mm | jour | 27.11.2009 | 31.12.2020 | 11.10 |
| Piézomètre P3 | Hauteur | m | jour | 07.08.2014 | 09.06.2021 | 6.84 |
| Piézomètre P3 | Température | °C | jour | 07.08.2014 | 09.06.2021 | 6.84 |
| Fontfroide | Hauteur | cm | jour | 14.01.2012 | 28.10.2020 | 8.79 |
| Fontfroide | Débit | l/s | jour | 14.01.2012 | 28.10.2020 | 8.79 |
| Fontfroide | Température | °C | jour | 14.01.2012 | 28.10.2020 | 8.79 |
| Fontfroide | Conductivité | µS/cm | jour | 14.01.2012 | 28.10.2020 | 8.79 |

Tableau 10 : Liste des données disponibles sur le site de Luitel.

Une représentation de la disponibilité des données en fonction du temps est quant à elle présentée dans le Tableau 11.

| Nom | Variable | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-----------------|----------------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|------|------|------|------|------|--------|--------|
| Ruisseau du Lac | Hauteur | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Ruisseau du Lac | Température | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Ruisseau du Lac | Conductivité | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Ruisseau du Lac | Débit | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Station météo | Précipitations | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | Rayonnement | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | Tm | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | Tn | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | Tx | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | Hauteur neige | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Station météo | ETP | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | rouge |
| Piézomètre P3 | Hauteur | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Piézomètre P3 | Température | rouge | rouge | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange |
| Fontfroide | Hauteur | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange | rouge |
| Fontfroide | Débit | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange | rouge |
| Fontfroide | Température | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange | rouge |
| Fontfroide | Conductivité | rouge | rouge | rouge | orange | vert | vert | vert | vert | vert | vert | vert | orange | rouge |

Tableau 11 : Représentation de la disponibilité des données en fonction du temps (vert : disponible ; orange : partiellement disponible ; rouge : indisponible).

10.2. Analyses statistiques : Ruisseau du Lac contre Fontfroide aval

10.2.1. Régime hydrologique

La Figure 88 présente les débits moyens mensuels sur l'ensemble des données disponibles pour le Ruisseau du Lac et de Fontfroide (voir Figure 65).

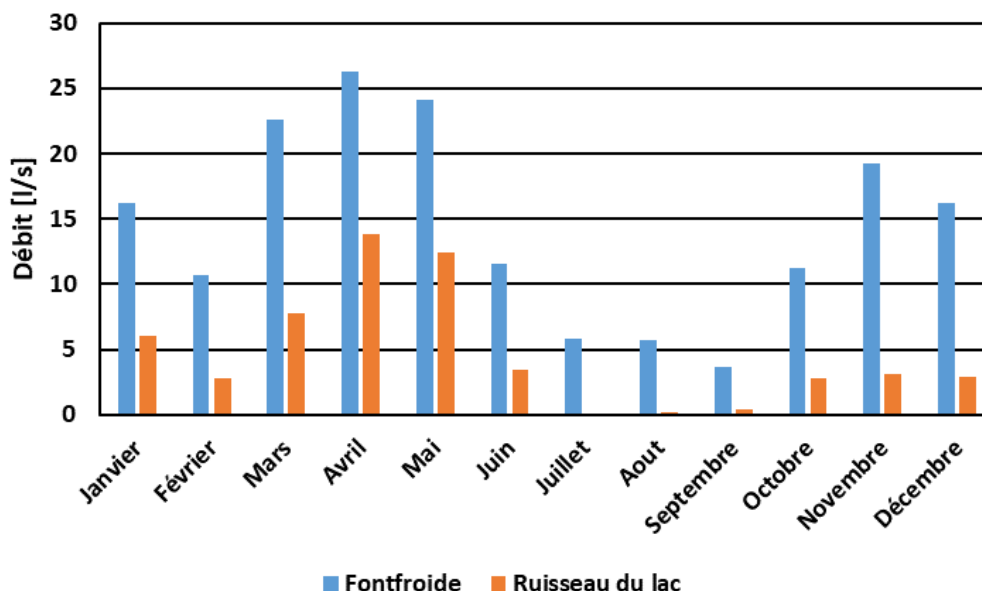


Figure 88 : Débits moyens mensuels sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide.

On constate dans les deux cas que le régime est nivo-pluvial, avec des hautes-eaux printanières (fonte de neige et fortes précipitations) puis automnales et hivernales (battement de la limite pluie-neige et

précipitations liquides). L'étiage est marqué et voit le Ruisseau du Lac tarir fréquemment. Ce régime est typique des cours d'eau de moyenne montagne dans les Alpes de l'ouest.

La Figure 89 reprend les données de la Figure 88 mais en débit spécifique.

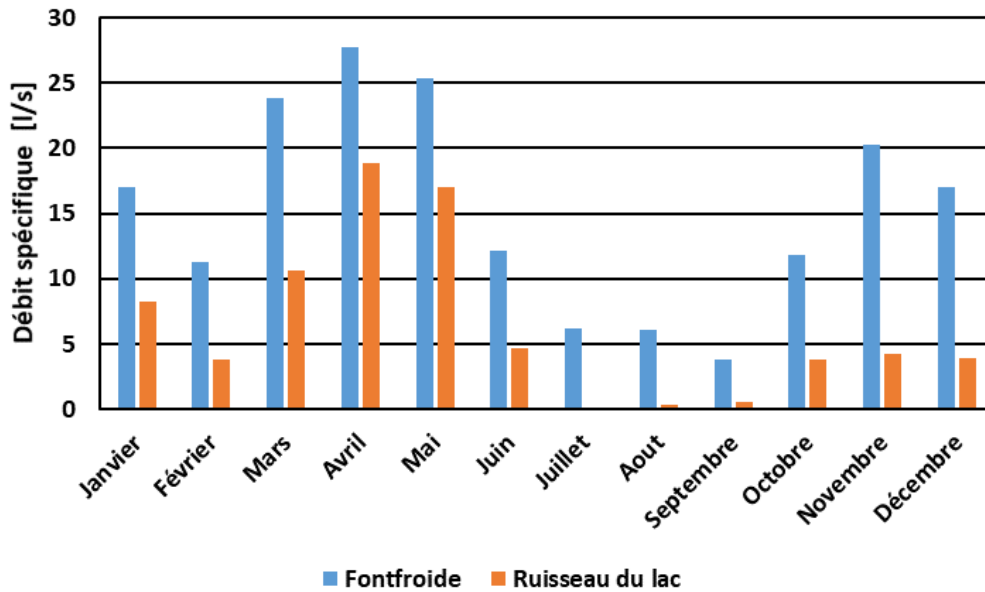


Figure 89 : Débits spécifiques moyens mensuels sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide.

Les débits spécifiques du ruisseau de Fontfroide sont nettement plus importants que ceux du Ruisseau du Lac, en particulier à l'étiage et en automne. Mises à part des incertitudes de mesure ou sur la surface des bassins, ce comportement soulève des interrogations que d'autres analyses pourront éventuellement éclaircir.

10.2.2. Débits classés

Les débits classés des deux stations ont été tracés sur l'ensemble de la période disponible et n'ont pas permis de révéler de comportement particulier, à l'exception du fait que le tarissement est bien plus précoce sur le Ruisseau du Lac, ce qui avait déjà été constaté dans la section précédente (Figure 90).

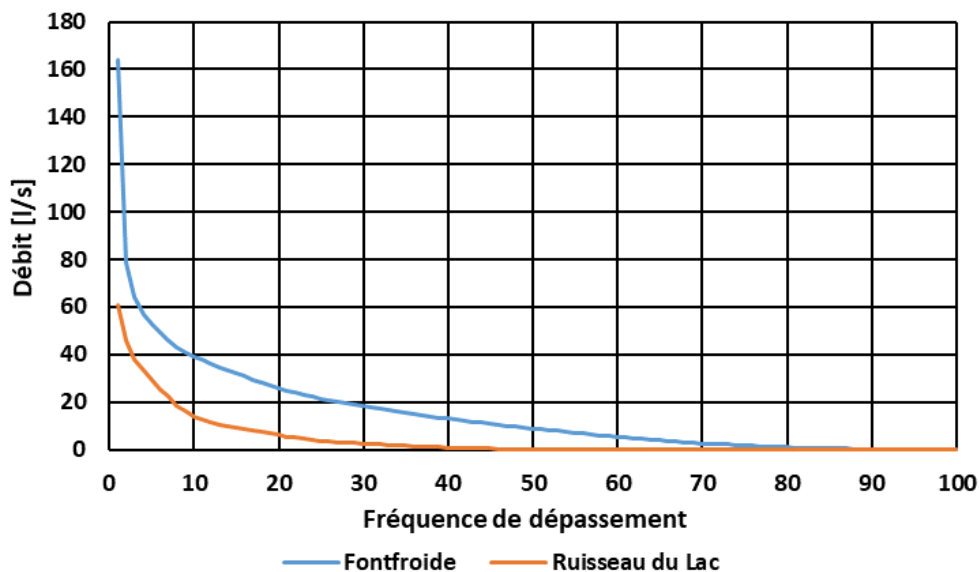


Figure 90 : Débits classés de Fontfroide et du Ruisseau du Lac.

10.2.3. Autocorrélations

L'autocorrélation des débits permet de définir la durée pendant laquelle un débit à un instant donné influence les débits suivants. La Figure 91 présente l'autocorrélation des débits de Fontfroide et du Ruisseau du Lac.

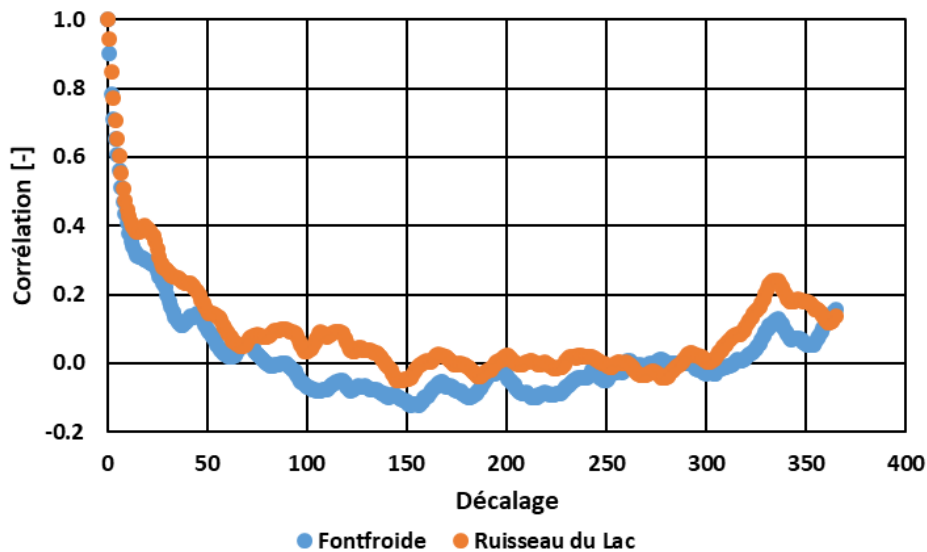


Figure 91 : Autocorrélation des débits sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide.

Les différences structurelles sont faibles. Tout juste peut-on noter que le seuil de 0,2 (connu pour être la valeur à partir de laquelle il n'existe statistiquement plus de corrélation significative) est franchi plus tardivement pour le Ruisseau du Lac que pour Fontfroide.

10.2.4. Corrélations croisées

Les corrélations croisées entre précipitations et débits et températures et débits ont été tracées pour le Ruisseau du Lac (Figure 92) et pour Fontfroide aval (Figure 93) sur l'ensemble des périodes disponibles pour chacune des stations. Les corrélations tracées par saison n'ont révélé aucun comportement inattendu.

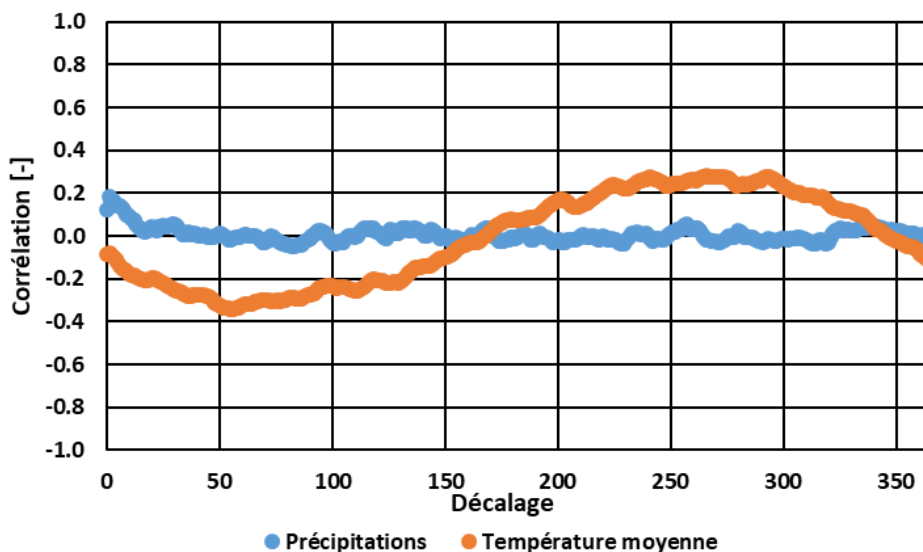


Figure 92 : Corrélation croisée Précipitations – débit et Température moyenne journalière – débit pour le Ruisseau du Lac.

On constate que le niveau de corrélation entre précipitations et débit est faible, avec un temps de réponse d'un jour, quoique la corrélation maximale ne dépasse pas 0,2. La température, quant à elle, pourrait influencer les débits à la baisse avec un délai d'un peu moins de deux mois.

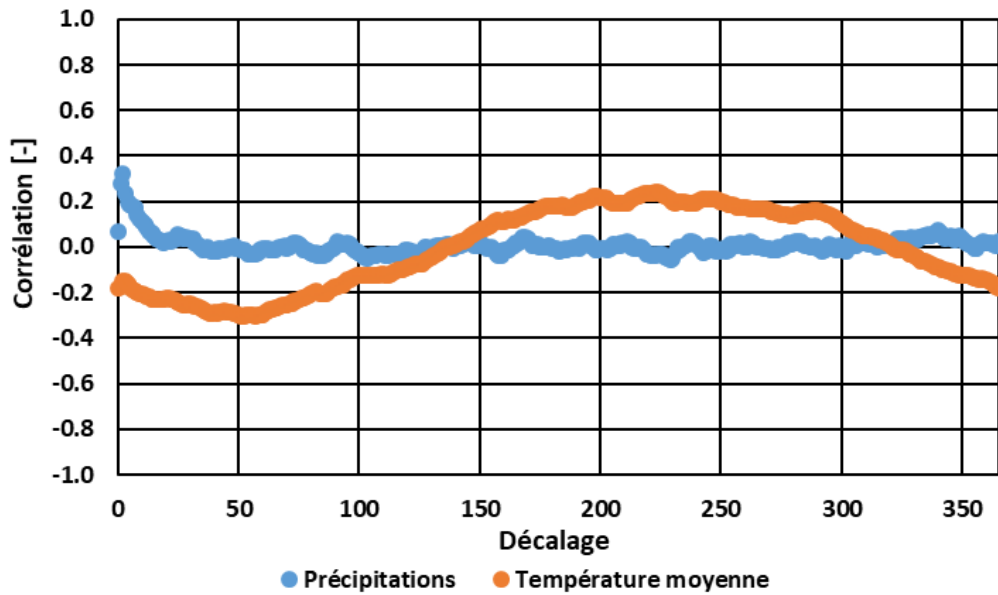


Figure 93 : Corrélation croisée Précipitations – débit et Température moyenne journalière – débit pour Fontfroide.

La corrélation entre précipitations et débit connaît un maximum à deux jours mais est déjà forte à un jour. La valeur de la corrélation est par ailleurs plus forte que pour le Ruisseau du Lac. En revanche, on ne constate aucune différence fondamentale entre les corrélogrammes des deux stations.

Si l'on s'intéresse aux corrélations par saison, la différence n'est pas plus importante. Par exemple, la Figure 94 présente les corrélations croisées précipitations – débit pour les deux stations en période estivale. La corrélation représentée est la médiane des corrélations croisées de chaque été (90 jours environ) ce qui explique que le décalage ne puisse guère dépasser 30 jours.

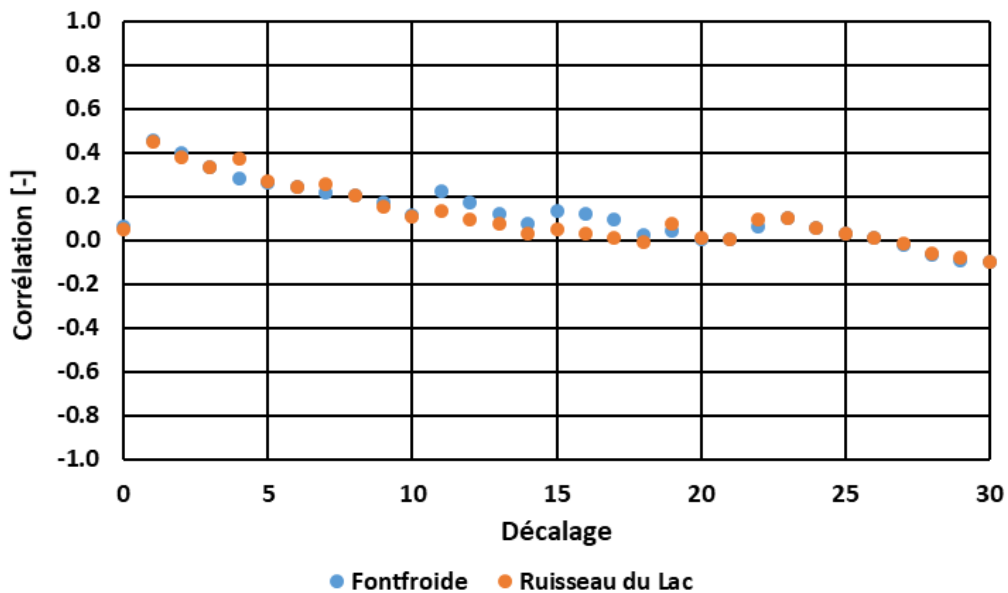


Figure 94 : Corrélation croisée Précipitations – débit pour Fontfroide et le Ruisseau du Lac sur les périodes estivales (juin à août).

10.2.5. Coefficients d'écoulement

Les coefficients d'écoulement par année (Figure 95) et par mois (Figure 96) ont été calculés sur les deux cours d'eau. Ils mettent en avant une forte évapotranspiration sur les deux bassins et soulignent à nouveau que les débits du Ruisseau du Lac sont particulièrement faibles.

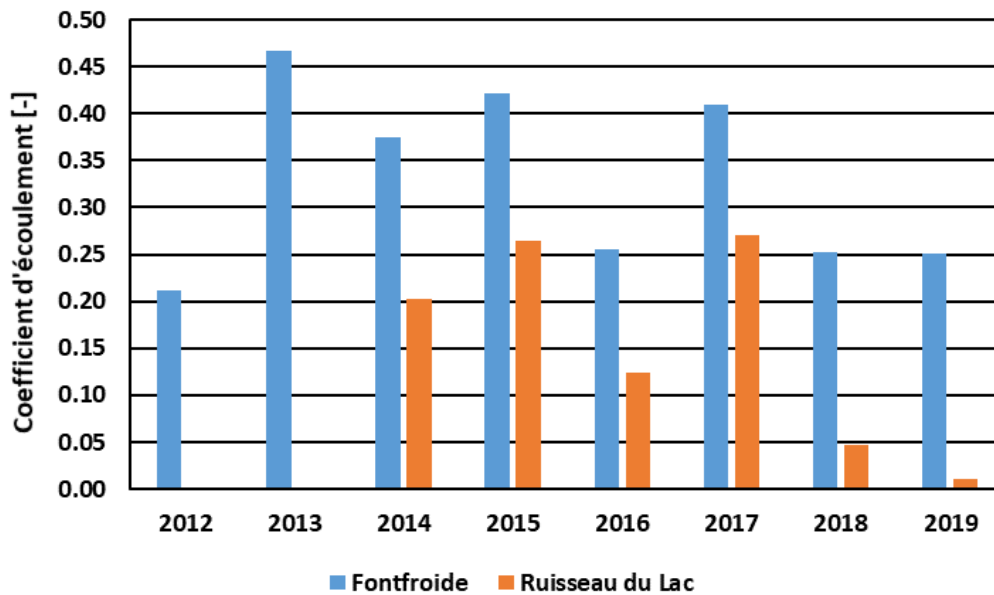


Figure 95 : Coefficients d'écoulement comparés sur Fontfroide (2012-2019) et le Ruisseau du Lac (2014-2019) par année.

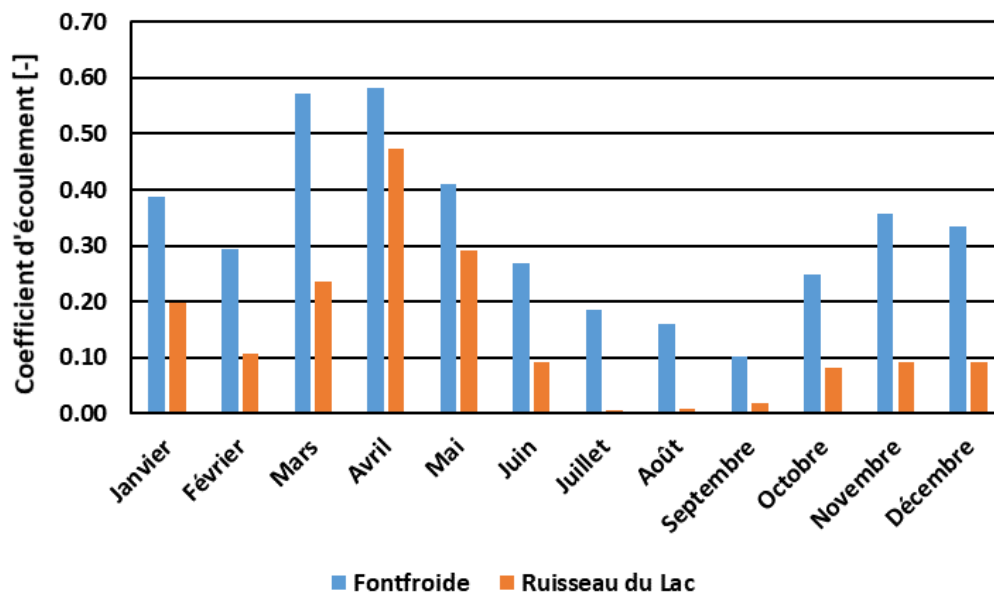


Figure 96 : Coefficients d'écoulement comparés sur Fontfroide et le Ruisseau du Lac par mois.

En comparant les débits moyens, deux hypothèses pouvaient être considérées : soit des débits particulièrement élevés à Fontfroide, soit des débits particulièrement faibles au Ruisseau du Lac. Au regard de la faiblesse exceptionnelle des coefficients d'écoulement du Ruisseau du Lac, il apparaît que c'est plutôt la seconde hypothèse qui devrait être privilégiée. Les coefficients d'écoulement obtenus sur le Ruisseau du Lac sont incompatibles avec les gammes de valeurs possibles dans ce type de climat et de morphologie, en dehors d'une erreur de mesure ou d'une perte souterraine relativement importante.

10.3. Analyses statistiques autour du piézomètre P3

10.3.1. Régime de hauteurs

Les hauteurs médianes, moyennes, minimales et maximales sont tracées date à date pour l'ensemble des données du piézomètre P3 dans la Figure 97.

On constate que le régime des hauteurs est soutenu par les précipitations durant l'automne et l'hiver, puis par la fonte des neiges au printemps. Un premier étiage apparaît généralement en fin de période de fonte suivi d'une rehausse en lien avec les précipitations printanières. S'en suit une longue phase de tarissement, rarement perturbée par des précipitations, entre le courant du mois de juin et la fin juillet. En général, aout marque le retour d'orages et limite la plupart du temps le tarissement.

Comme pour les ruisseaux étudiés ci-avant, la sensibilité du système à la fonte de neige et aux températures semble être très forte.

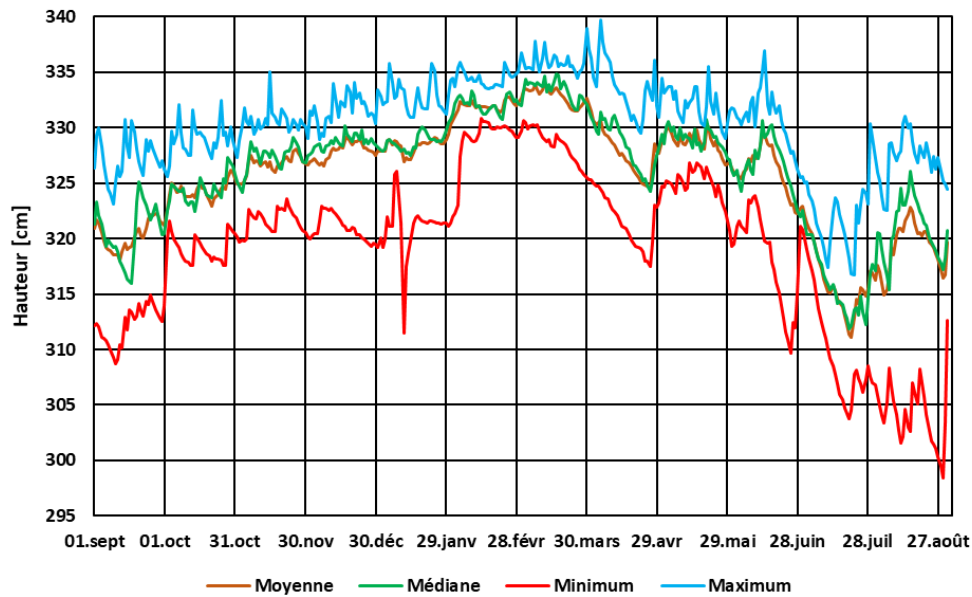


Figure 97 : Valeurs moyennes, médianes, maximales et minimales par date pour le piézomètre P3.

10.3.2. Valeurs classées

Les valeurs classées sont tracées pour le piézomètre P3 dans la Figure 98. On ne constate pas de comportement particulier pour ce piézomètre. Les analyses mensuelles et saisonnières n'ont pas non plus montré de comportement particulier.

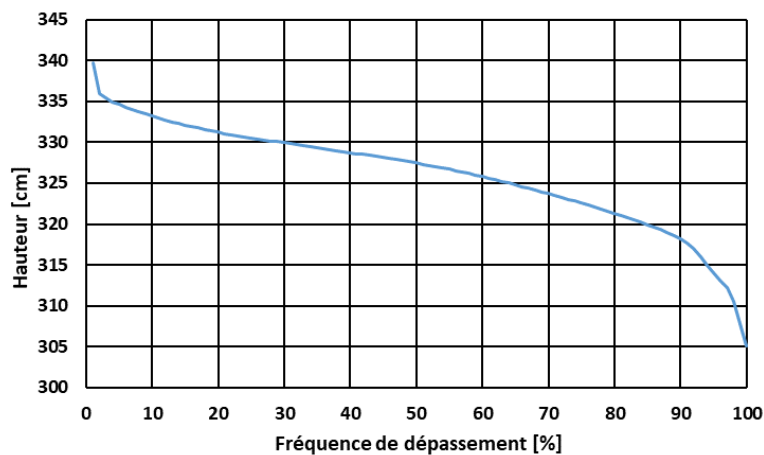


Figure 98 : hauteurs classées pour le piézomètre P3.

10.3.3. Autocorrélation

L'autocorrélation de la hauteur par elle-même a été calculée sur l'ensemble de la période et est présentée dans la Figure 99. On constate que les valeurs sont corrélées avec elles-mêmes pendant environ 60 jours (effet mémoire), mais aussi qu'un palier de corrélation supérieur se produit autour d'environ 3 semaines.

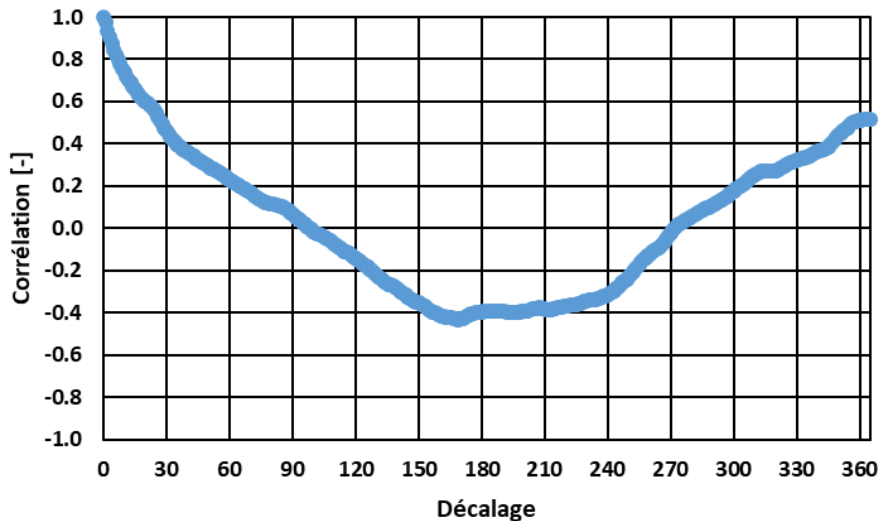


Figure 99 : Autocorrélation du piézomètre P3 sur l'ensemble de la durée de mesure. Le décalage en abscisse est donné en jours ainsi que pour les figures suivantes.

10.3.4. Corrélations croisées

La corrélation croisée pluie-niveau a été calculée et est présentée dans la Figure 100. Il semble que la réponse, faiblement corrélée à la pluie, prenne 1 jour et que l'influence de la pluie (effet mémoire) sur le niveau soit de quelques jours tout au plus.

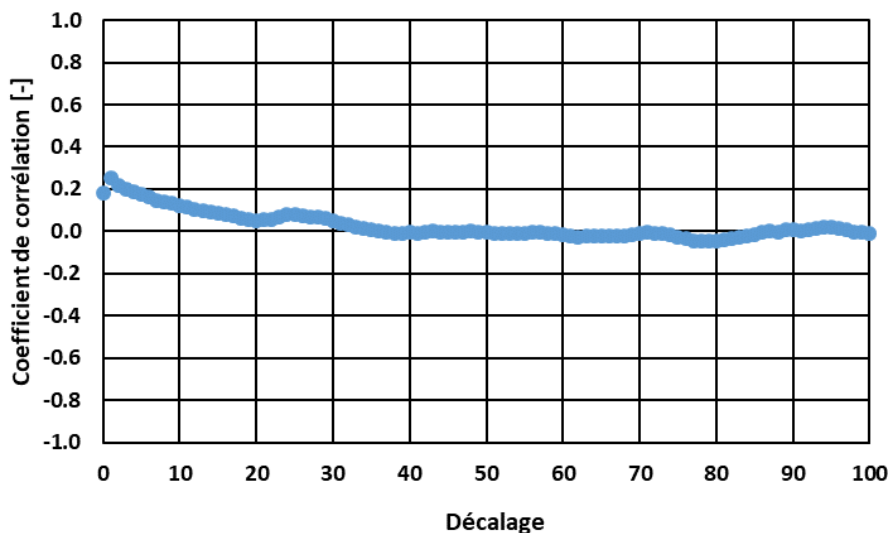


Figure 100 : Corrélation croisée pluie-niveau sur l'ensemble des données du piézomètre P3.

La corrélation croisée température niveau a aussi été calculée et est présentée dans la Figure 101. Les valeurs absolues de corrélation sont cette fois élevées (de l'ordre de 0,6) et présentent, fort logiquement, une cyclicité annuelle et une saisonnalité forte. L'impact, négatif, de la température sur le niveau est maximal après environ un mois. Ces analyses semblent montrer que le système est plus sensible aux températures (évaporation et évapotranspiration) qu'aux pluies (effet intégrateur du système).

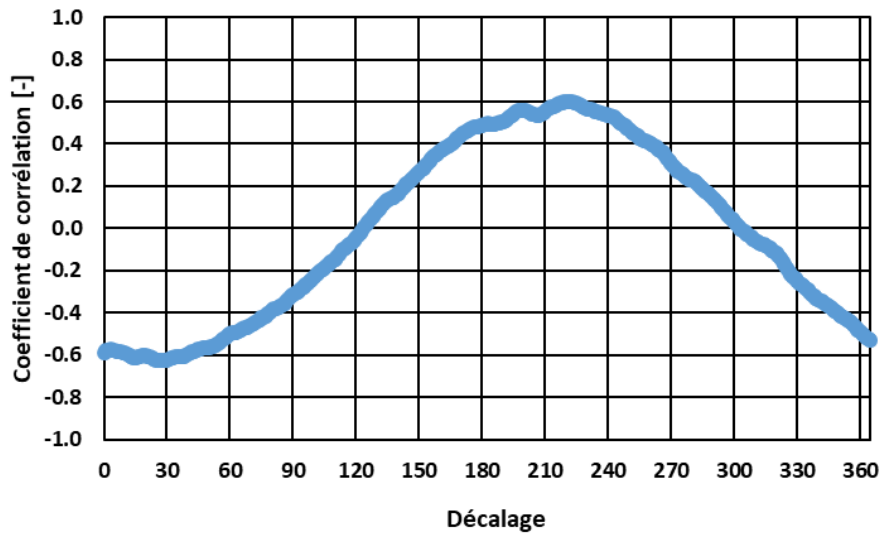


Figure 101 : Corrélation croisée température-niveau sur l'ensemble des données du piézomètre P3.

10.4. Analyses statistiques entre amont et aval

Au terme des analyses menées sur les données du Ruisseau du Lac, de Fontfroide et d'un piézomètre considéré représentatif, aucun comportement particulier ou inattendu n'a pu être décelé, à l'exception d'une probable perte ou erreur de mesure sur le Ruisseau du Lac. La comparaison entre amont et aval de l'hydrosystème pourra peut-être permettre de détecter plus d'éléments. Les analyses statistiques entre amont et aval de la tourbière ne peuvent se faire que sur la période où les données sont communes, à savoir entre le 26 avril 2018 et le 27 octobre 2020.

10.4.1. Différences en valeur

Les débits sur l'ensemble de la période commune sont tracés dans la Figure 102. On constate un comportement très similaire, à l'exception de l'été 2018 et de l'hiver 2018-2019 où l'on a plus de débit en amont et de l'hiver 2019-2020 où l'on a plus de débit en aval.

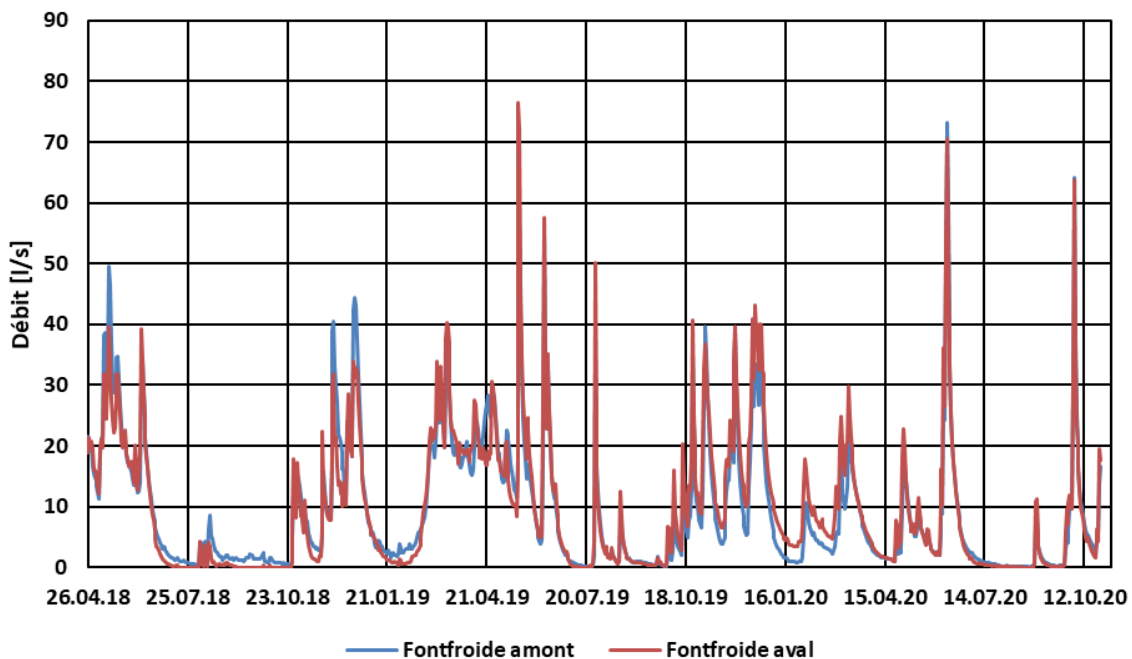


Figure 102 : Débits observés sur Fontfroide amont et Fontfroide aval.

Pour mieux observer ces écarts, la différence aval amont a été tracée dans la Figure 103. Lorsque la différence est positive, le comportement est intuitif (il y a plus d'eau en aval qu'en amont). À l'inverse, le comportement est contre intuitif (il y a plus d'eau en amont qu'en aval). On appellera le premier comportement « normal » et le second « anormal ». Afin de rendre le graphique plus lisible, une moyenne mobile centrée sur 10 jours a été tracée.

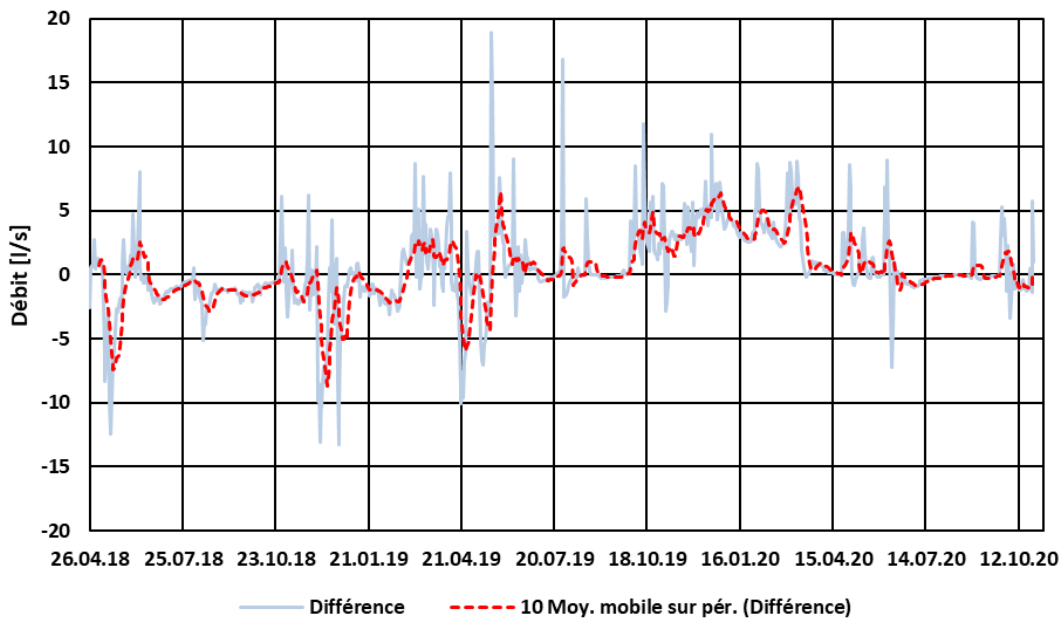


Figure 103 : Différence entre aval et amont à Fontfroide et moyenne mobile sur 10 jours

Du début de la période, jusqu'au printemps 2019, le comportement est globalement anormal, avec plus d'eau en amont qu'en aval, en particulier durant l'été 2018 qui était assez sec. Au-delà, le comportement devient à nouveau « normal » la plupart du temps, à l'exception d'une période sèche au début de l'été 2020.

10.4.2. Débits classés

Les débits classés amont et aval ont été tracés sur le même graphique (Figure 104). Jusqu'aux 15% de débits les plus élevés, le comportement est identique, ce qui est logique dans le sens où une saturation du système le rend transparent. En revanche, la contribution de l'aval est plus importante jusqu'à 65%. Elle redevient moins importante pour les 35% des débits les plus faibles.

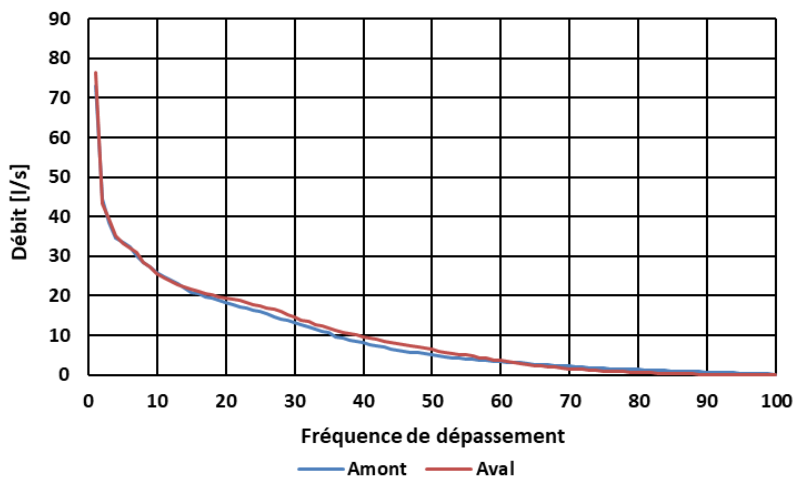


Figure 104 : Débits classés comparés amont et aval.

10.4.3. Autocorrélations et corrélations croisées

L'autocorrélation des deux valeurs a été calculée et tracée dans la Figure 105. On ne constate pas de différence d'effet mémoire entre les deux valeurs. Les valeurs ne sont plus corrélées à elles-mêmes après environ 30 jours.

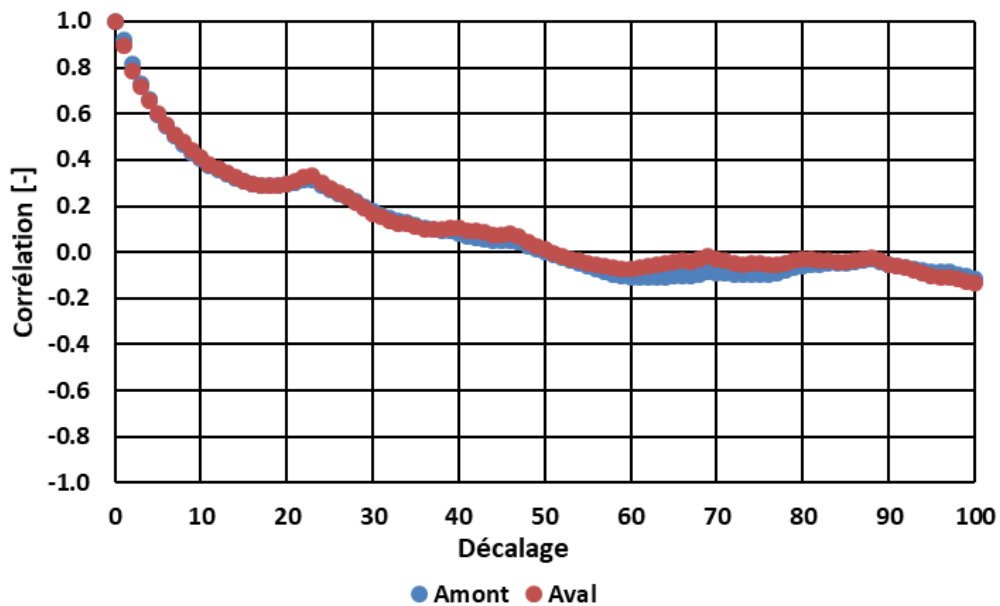


Figure 105 : Autocorrélation des valeurs de débit amont et aval.

La corrélation croisée pluie-débit des deux valeurs a été calculée et est tracée dans la Figure 106. On ne constate aucune différence significative entre les deux stations. Le temps de réponse est de 1 jour et l'effet mémoire¹² dure environ 7 jours dans les deux cas.

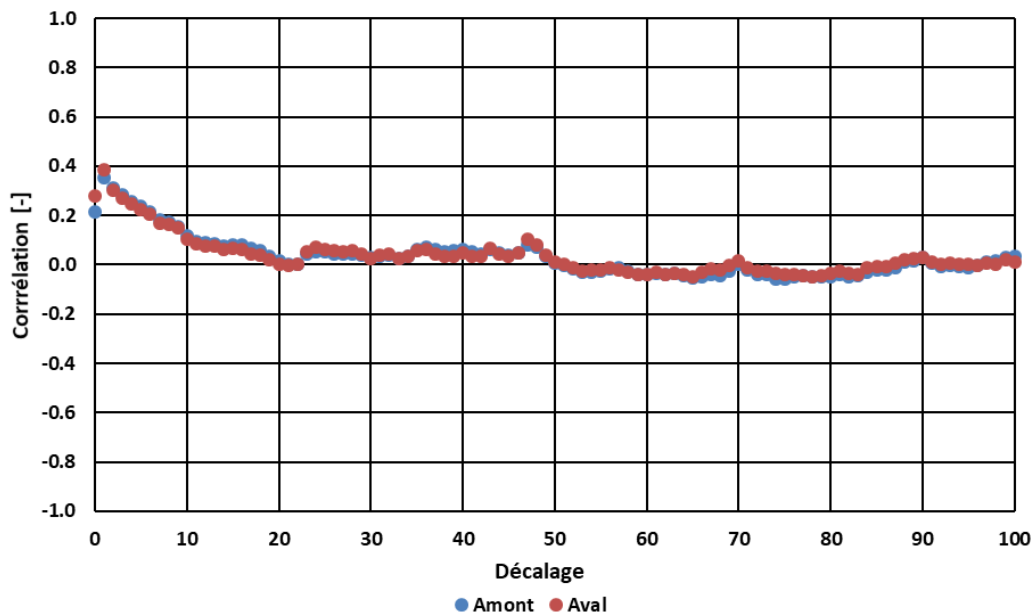


Figure 106 : Corrélation croisée pluie-débit amont et aval.

12. En hydrologie, l'effet mémoire est défini comme l'inertie du système, c'est-à-dire la durée d'influence d'un événement comme une pluie sur une chronique de débits par exemple.

La corrélation croisée température débit a aussi été calculée et est tracée dans la Figure 107. Ici encore, aucune différence significative n'est constatée avec une réponse négative du débit à la température à environ 35 à 40 jours dans les deux cas.

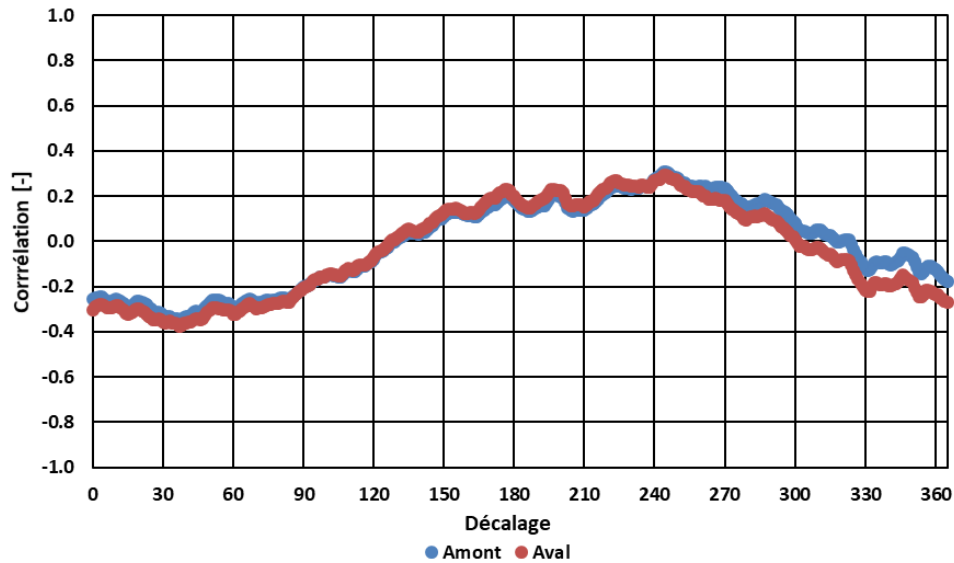


Figure 107 : Corrélation croisée température-débit.

10.4.4. Coefficients d'écoulement

Dans de telles conditions de similitude, les coefficients d'écoulement n'ont pas été calculés. Leurs différences seront dans la marge d'erreur de la mesure et les valeurs seront légèrement plus élevées pour l'amont dans les périodes « anormales » et inversement dans les périodes « normales ».

10.5. Modélisation par réseaux de neurones

La modélisation statistique par réseaux de neurones peut révéler des comportements inhabituels temporaires, comme ce fut expliqué dans le rapport de la phase 2. Nous renvoyons le lecteur à ce rapport concernant le détail des méthodes de régularisation employées ainsi que concernant la sélection du modèle.

10.5.1. Modèle sélectionné

Le modèle a été sélectionné pour ses performances selon le critère de Nash, sur la médiane de 10 initialisations aléatoires, par validation croisée, en utilisant l'arrêt précoce. Les données de 2012 à 2020 sont utilisées, divisées en ensembles d'une année civile, au pas de temps journalier. Pour la sélection, l'ensemble d'arrêt est 2019 et l'ensemble de test est 2020. Le modèle est de type statique dirigé. La complexité et la dimension des fenêtres temporelles d'entrée ont été la cible des optimisations. L'intervalle d'investigation pour les fenêtres temporelles d'entrée a été fixé grâce aux analyses statistiques précédentes. Il en résulte le modèle présenté dans la Figure 108.

Le modèle a été divisé en deux parties :

- l'une dédiée aux contributions, négatives ou positives, en eau (neige, évapotranspiration, précipitations)
- l'autre dédiée aux températures maximales, minimales et moyennes

Ces deux parties sont injectées sur deux couches cachées distinctes, qui convergent elles-mêmes sur une couche moins profonde. Cette architecture permet de mettre le modèle sur la voie d'une séparation des processus durant l'apprentissage. Elle a donné de meilleurs résultats que toutes les architectures plus ou moins complexes testées jusque-là. Cette approche s'est faite au bénéfice de travaux récents.

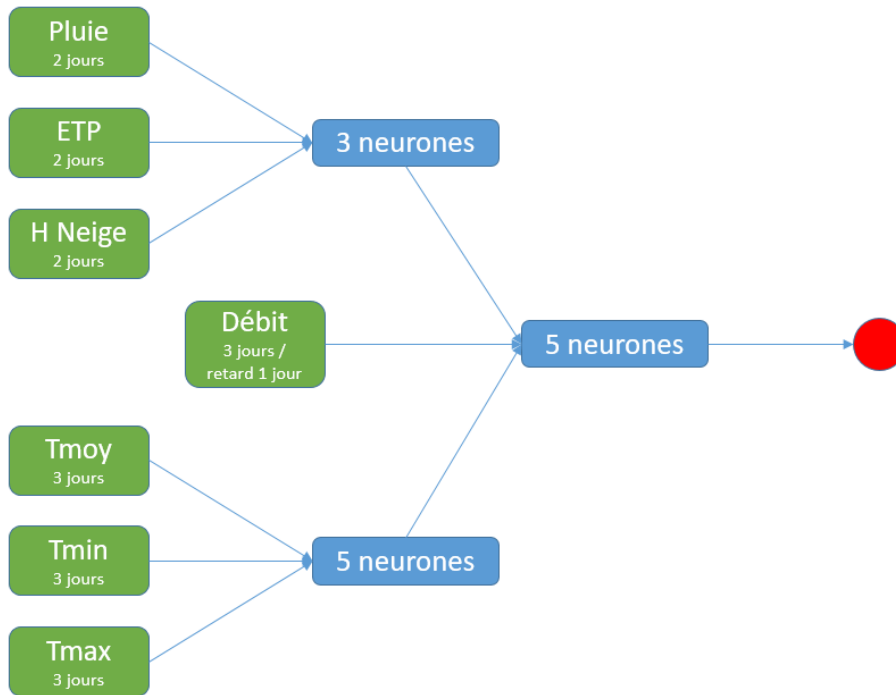


Figure 108 : Architecture sélectionnée. La sortie (point rouge) donne le débit simulé.

10.5.2. Tests croisés

Afin d'extraire des quantités de résultats plus importantes et de procéder à leur analyse, des tests croisés ont été pratiqués. Avec le modèle sélectionné, les années 2020, 2018, 2017, 2016, 2015 et 2014 ont été testées par permutations de l'ensemble de test.

Les critères de Nash de chacune des années s'échelonnent de 0,84 à 0,91 (en moyenne : 0,88). Les résultats sont donc d'excellente qualité mais, à l'image de l'ensemble 2020 présenté dans la Figure 109, des périodes durant lesquelles le modèle produit des débits négatifs apparaissent. Ce phénomène avait déjà été observé lors de certaines expériences de la phase 2 et pourrait être interprété comme une non stationnarité du système. Le modèle serait alors optimisé pour des processus étant stationnaires la très grande majorité du temps et ne saurait pas reproduire les débits durant des périodes où le fonctionnement serait différent.

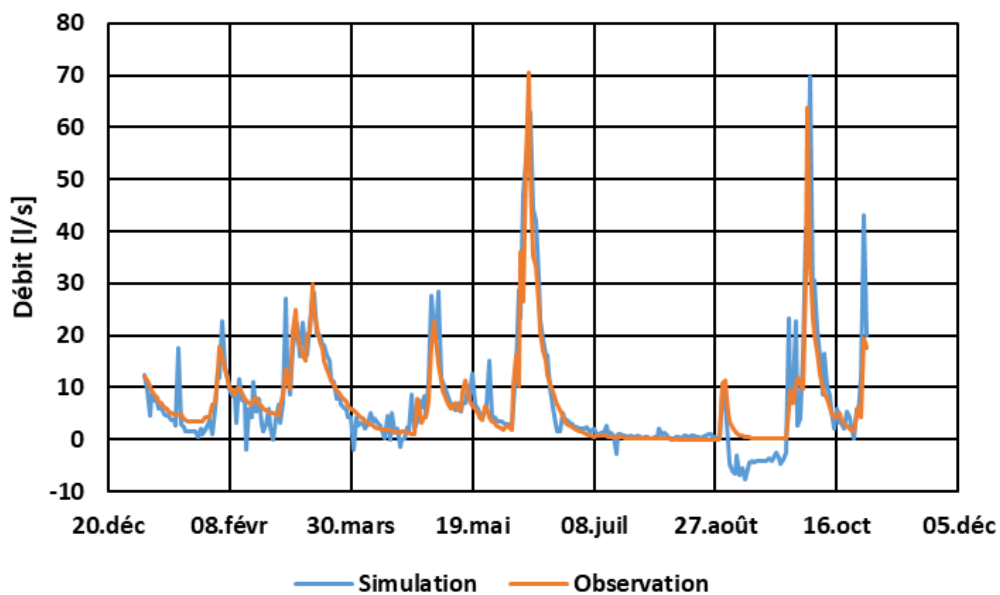


Figure 109 : Résultat en test pour l'année 2020.

10.5.3. Analyse des résultats

On s’est tout particulièrement intéressé aux périodes estivales où les valeurs simulées sont négatives. Il s’agit ici de déterminer dans quelles conditions le modèle ne parvient pas à reproduire le débit avec le fonctionnement qu’il a appris sur l’ensemble de la base.

Le premier constat que l’on peut faire est que ces débits négatifs surviennent en été ou au début de l’automne (Figure 110). Les analyses suivantes se concentreront donc sur les périodes s’étalant de juillet à octobre compris.

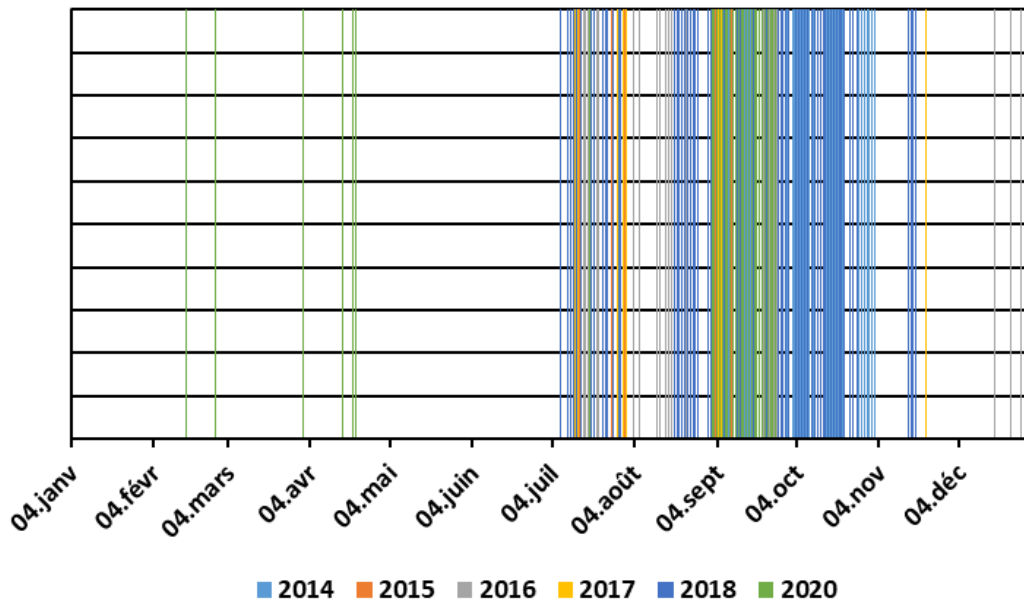


Figure 110 : Marquage temporel de l'apparition de débits négatifs simulés dans l'année.

On a donc tracé plusieurs valeurs caractéristiques du climat en fonction du débit simulé. La Figure 111 présente le cumul de pluie sur les 30 derniers jours en fonction du débit simulé. On constate qu’il n’existe presque pas d’occurrence de débit simulé négatif pour des valeurs de plus de 150 mm.

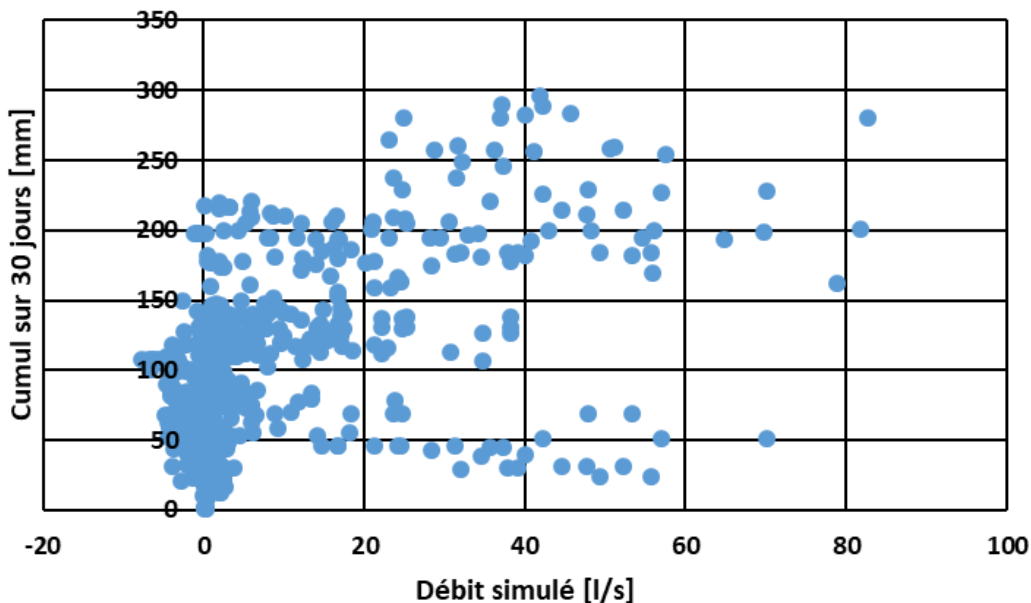


Figure 111 : Cumul sur 30 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus.

Le même constat peut être fait avec le cumul sur 60 jours pour une valeur seuil de 250 mm (Figure 112).

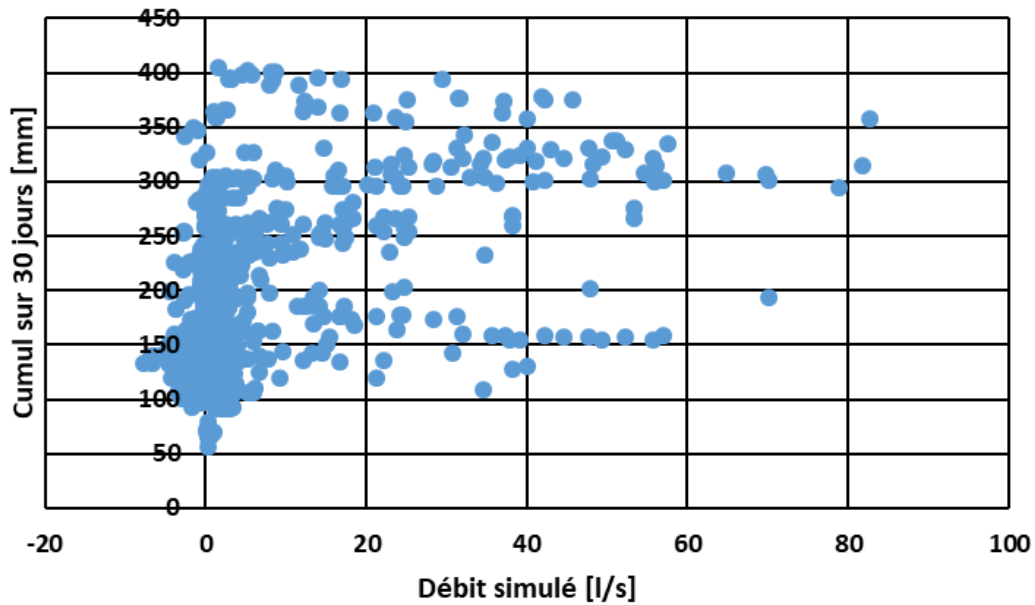


Figure 112 : Cumul sur 60 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus.

Ces deux dernières analyses tendent à montrer que ces débits négatifs apparaissent plutôt en période sèche, ce qui n'est guère surprenant compte tenu de leur date de survenue.

La même analyse a été réalisée avec les températures moyennes des 10 (Figure 113), 20 et 30 derniers jours. Seule l'analyse sur la température sur 10 jours a été présentée graphiquement mais l'on constate nettement que le phénomène se produit alors que la température moyenne sur 10 jours est comprise entre 10 et 15°C pour les trois durées de calcul. Il apparaît donc qu'en plus d'un temps sec, il faille un temps plutôt chaud. Il est toutefois étonnant qu'aucune valeur franchement négative n'apparaisse pour des valeurs supérieures à 15°C, pourtant bien représentées. Cela tendrait à montrer que la sécheresse est un facteur plus important que la température dans l'apparition du phénomène.

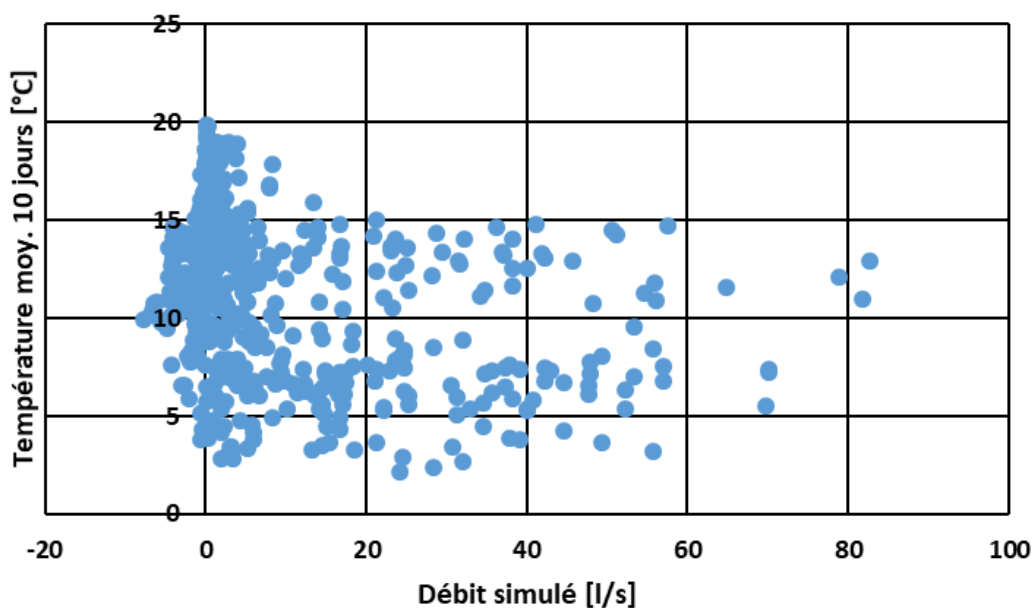


Figure 113 : Température moyenne des 10 derniers jours en fonction du débit simulé de juillet à octobre inclus.

Les mêmes analyses menées sur les températures maximales moyennes sur les 10, 20 et 30 derniers jours montrent une occurrence plus élevée autour de $20 \pm 4^\circ\text{C}$, excluant ici aussi les périodes les plus chaudes. Le même constat peut être fait pour les minimales avec des valeurs autour de 7 à 8°C mais pas d'apparition de débits très négatifs au-delà de 9°C .

Enfin, cette analyse a été menée pour l'évapotranspiration cumulée sur 30 (Figure 114) et 60 jours. Pour les valeurs négatives simulées, la quasi-totalité des valeurs d'évapotranspiration est représentée, suggérant une faible dépendance du phénomène à cette variable, d'autant que pour les valeurs d'évapotranspiration élevées, les débits négatifs n'apparaissent pas aussi souvent.

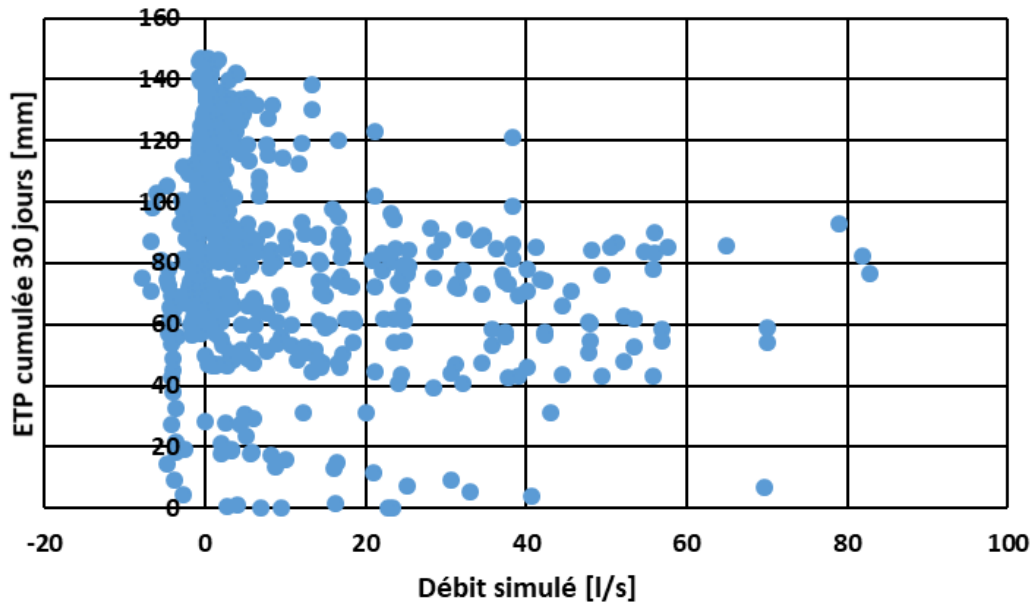


Figure 114 : ETP cumulée sur 30 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus.

10.6. Discussions et conclusions

Au travers des différentes analyses menées, il n'a pas été possible de distinguer un soutien d'étiage de la zone humide du Luitel. En comparant, sur une période trop courte pour assurer une robustesse élevée, les débits entre amont et aval du site, on constate même que pendant certains étés, de l'eau se perd pendant la traversée de l'hydrosystème.

Pour des durées plus longues, les comportements des différents éléments hydrologiques ne semblent jamais vraiment s'écarter d'une certaine norme, à l'exception d'erreurs de mesures ou de pertes.

En revanche, les résultats de bonne qualité obtenus par modélisation statistique ont permis de détecter et de confirmer des résultats entrevus lors de la phase 2. En effet, l'apparition de débits négatifs et donc aberrants dans la modélisation suggère que, parfois, le comportement de l'hydrosystème dévie et ne correspond plus à ce que le modèle a appris sur la grande majorité de la base d'apprentissage. Ainsi, ces débits aberrants mettent en avant une non stationnarité dont nous avons décidé d'analyser les conditions d'apparition.

Il s'avère que les débits négatifs sont observés à peu près quelle que soit l'évapotranspiration sur les 30 à 60 derniers jours, pour des températures élevées mais pas extrêmes, et surtout pour des cumuls plutôt faibles. Le changement de comportement du système, qui pourrait s'apparenter à une mise en défense du système tourbeux, semblerait donc plus dépendant de la sécheresse que des températures ou de l'évapotranspiration (valeurs fortement corrélées du reste).

11. Traceurs géochimiques

11.1. Contexte de l'étude¹³

L'objectif de cette approche était de caractériser les propriétés géochimiques des eaux du site du Luitel (Isère) afin d'apporter des éléments de compréhension sur l'alimentation et le fonctionnement de cette zone humide.

Ce travail vient renforcer les données acquises lors des travaux géochimiques préliminaires réalisés sur le site du Luitel au cours de la Phase 2 du programme d'étude. Par rapport au descriptif du site présenté dans le rapport de la phase 2 (p13) du projet, quelques précisions s'imposent.

11.2. Les zones humides du Luitel

Les zones humides de Luitel sont situées sur la commune de Séchilienne en Isère. Il s'agit d'un espace naturel de faible étendue géographique (< 0,3 km²) situé à 1 250 m d'altitude.

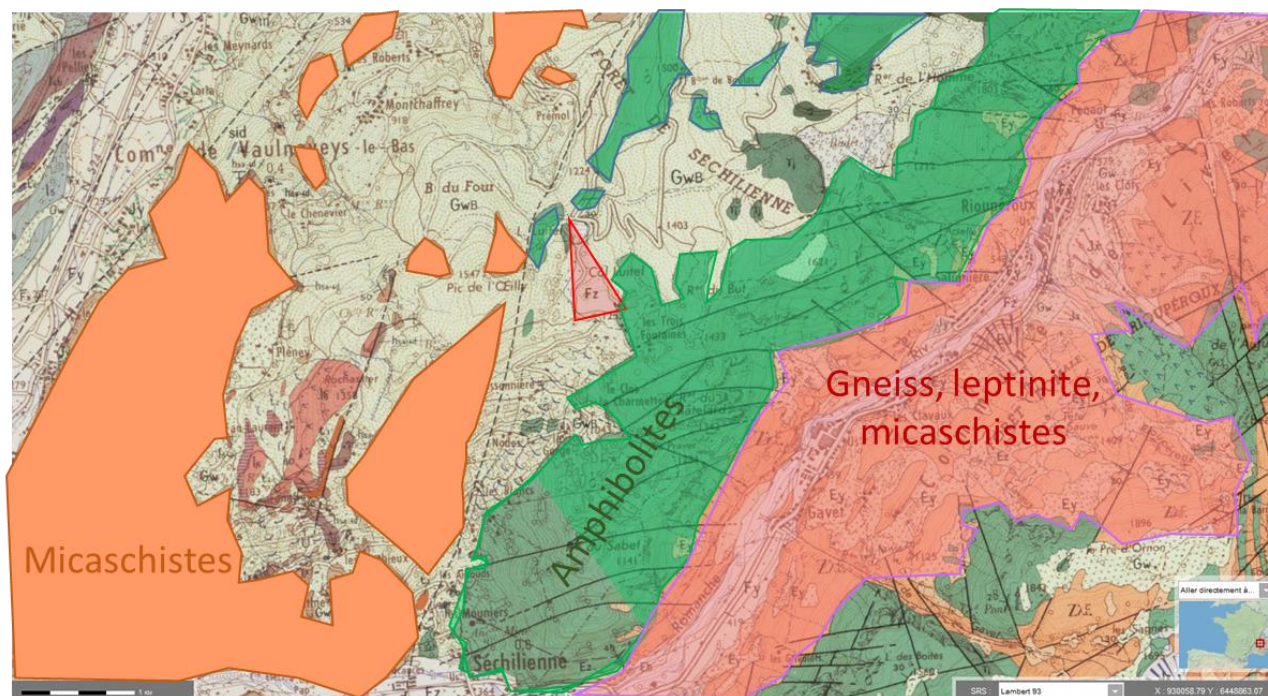


Figure 115 : Extrait de la carte géologique au 1/50000ème. La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge

Selon la carte géologique (Figure 115), les zones humides du Luitel se superposent 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 du Luitel est essentiellement constitué d'amphibolites, de gneiss et micaschistes. Ces formations géologiques sont parcourues par

13. Contributeurs :

- . Véronique Lavastre et June Chevet - Université Jean Monnet, CNRS-UMR 5276 Laboratoire de Géologie de Lyon, Terre, Planètes, Environnement, 23 rue du Docteur Paul Michelon, 42 023 Saint Etienne Cedex
- . Frédéric Paran, Didier Graillot et Yvan Pascoletti - École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, CNRS-UMR 5600, Géosciences et environnement, 158 Cours Fauriel, 42 023 Saint Etienne
- . Patrick Verdoux - Université de Nîmes, EA7352 Chrome, Parc Georges Besse, 30 000 Nîmes
- . Jean-Paul Laurent - Institut des sciences de l'Environnement, UGA – IGE, CS 40700, 38 058 Grenoble Cedex 9
- . Carole Desplanque - ONF Isère, Hôtel des Administrations 9, quai Créqui 38 026 Grenoble

Partie II – Luitel – Traceurs géochimiques

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 115 environ 500 mètres à l'ouest de la zone d'étude (Figure 115 ; Sarrot-Reynauld et al., 1972). Une deuxième famille de failles SO-NO recoupe la précédente et a des étendues moindres (Figure 115 ; Sarrot-Reynauld et al., 1972). Des formations sédimentaires du Trias sont répertoriées au niveau du col de la Balme à proximité de Chamrousse.

Les zones humides du Luitel s'étendent du nord (amont) au sud (aval) sur environ 900 mètres et d'est en ouest sur 200 à 400 mètres (Figure 116). Trois cuvettes sont recensées depuis l'amont (sud) vers l'aval (nord). Les deux cuvettes en amont sont à l'heure actuelle occupées par une tourbière (Tourbière du Col ; Figure 116), la cuvette la plus à l'aval est un lac (le lac Luitel ; Figure 116).

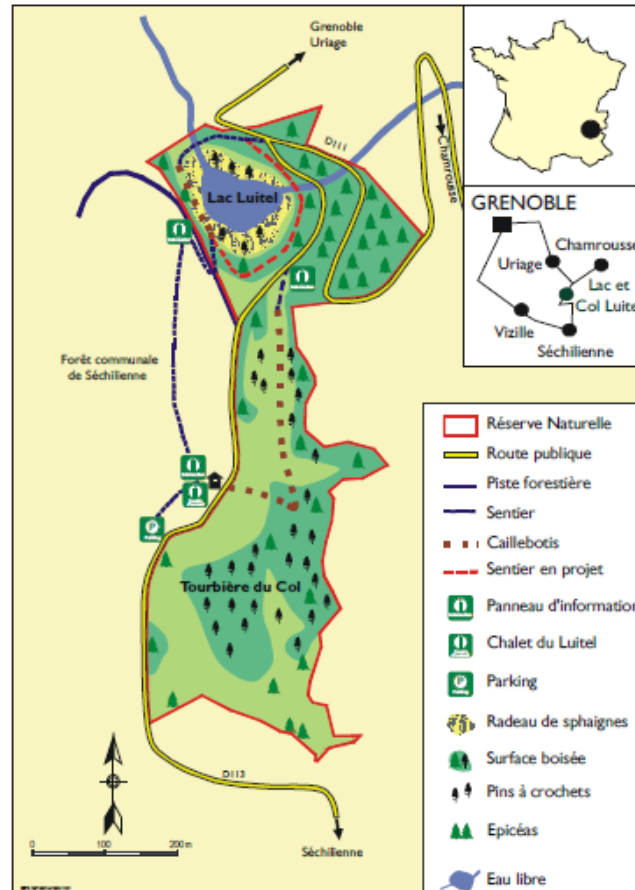


Figure 116 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac Luitel (Desplanque, 2001 in Guiter et al., 2015)

Le bassin versant du Luitel s'étend principalement à l'est et englobe différentes zones humides (Sagne du pin, Sagne de l'ours, Tourbière de l'Arselle) d'étendues très variables (Figure 117).

Deux principaux ruisseaux alimentent la tourbière du Col :

- le ruisseau de Pezanti prenant sa source au niveau de la Sagne de l'ours et arrivant en amont de la tourbière ;
- le ruisseau de Fontfroide prenant sa source au niveau de la Sagne du pin et traversant la tourbière à proximité de la jonction entre le réservoir nord et le réservoir sud (Figure 117 et Figure 118).

Les différents aménagements de la zone ont amené à la construction d'une route (D113 ; Figure 116 et Figure 118) en bordure ouest de la tourbière et la création de fossés de drainage qui se retrouvent en bordure de route (Fo3 ; Figure 116 et Figure 118) et en bordure est de la tourbière (Fo1 ; Figure 118). Les études antérieures de cet hydrosystème ont amené à l'instrumentation du site avec la mise en place de piézomètres et d'une station météo (P_sm ; Figure 118).

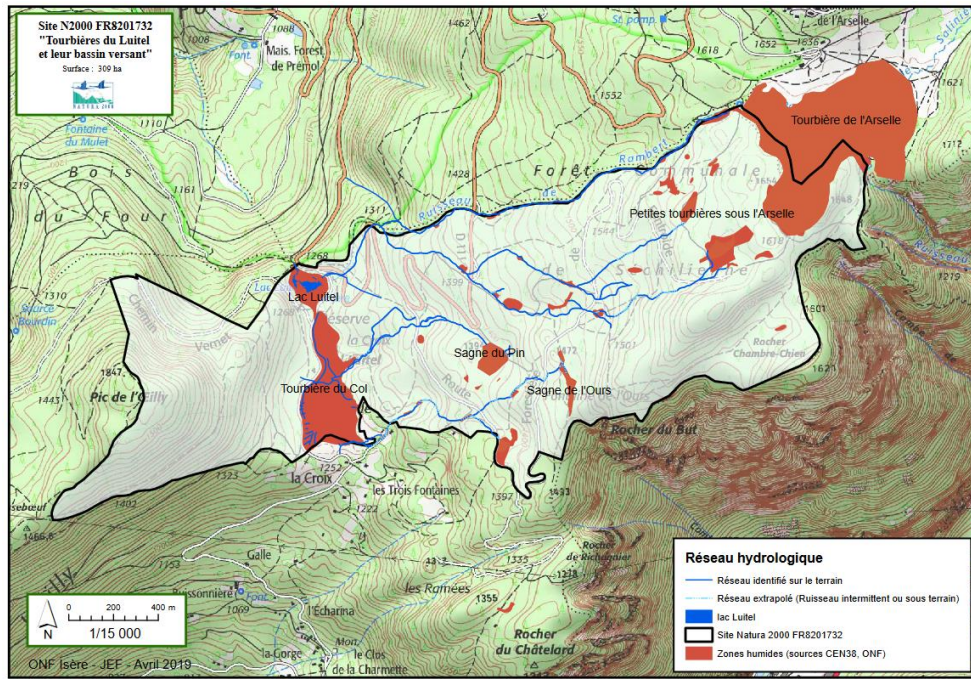


Figure 117 : Bassin versant des tourbières de Luitel (ONF, 2019)

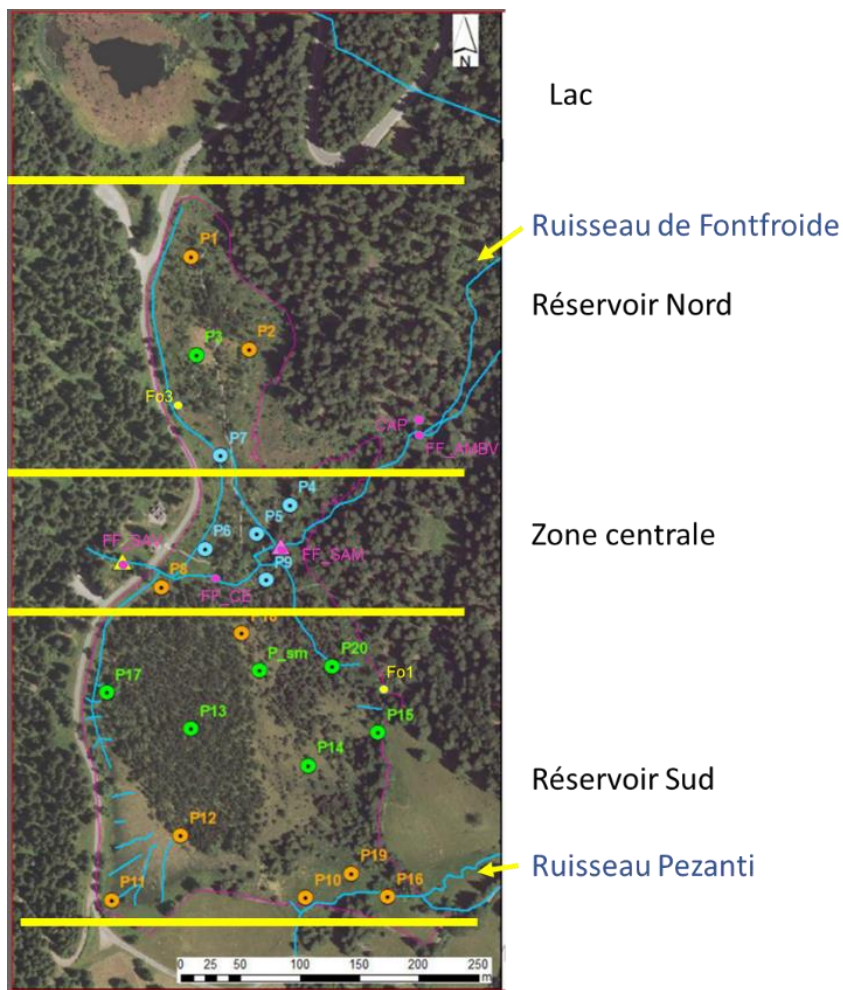


Figure 118 : Localisation des points d'échantillonnage [les piézomètres de la zone humide sont notés P_{xx} ; les fossés/drains sont notés Fo_x ; le ruisseau de Fontfroide est noté FF (AMBV = amont bassin versant ; SAV = seuil aval ; SAM = seuil amont ; CE = centre) ; CAP = captage ; P_{sm} = station météorologique

11.3. Campagnes de prélèvements et méthodologie

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées à la tourbière de Luitel en période de moyennes-eaux (26 juin 2018, 26 échantillons) et en période de basses-eaux (22 et 23 juillet 2019 ; 21 échantillons). Une troisième campagne a été organisée les 7 et 8 juillet 2020 en contexte de basses-eaux moins marqué que pour la campagne de juillet 2019. Cette dernière campagne a permis la collecte de 25 échantillons. Les trois campagnes se sont focalisées sur les piézomètres implantés sur la tourbière et les cours d'eau à l'amont et l'aval immédiat de la zone d'étude (Tableau 12). Les piézomètres de la tourbière ont été purgés 24 h en amont des prélèvements afin de garantir la représentativité des eaux collectées.

En complément de ces trois campagnes, des prélèvements ont été réalisés en tête de bassin versant au niveau de la Sagne du pin et la Sagne de l'ours (Figure 117) en novembre 2019, janvier, mars, avril et juin 2020.

Un collecteur d'eau de pluie a été installé au niveau de la station météorologique le 25 septembre 2018, il a permis la collecte de 26 échantillons d'eau de pluie entre juillet 2019 et septembre 2020 avec un pas de temps irrégulier contraint par l'accessibilité au site (enneigement, crise sanitaire) et la disponibilité des membres du programme pour les prélèvements (Tableau 13).

| | juin-18 | juil-19 | nov-19 | janv-20 | mars-20 | avr-20 | mai-20 | juin-20 | juil-20 |
|--|--------------------------|--------------------------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------------------------|
| | Moyennes eaux | Basse eaux | | | | | | | Moyennes eaux |
| P1 | X | X | | | | | | | X |
| P2 | X | X | | | | | | | X |
| P3 | X | X | | | | | | | X |
| P4 | X | X | | | | | | | X |
| P5 | Niveau d'eau insuffisant | X | | | | | | | X |
| P6 | X | X | | | | | | | X |
| P7 | X | X | | | | | | | X |
| P8 | X | Niveau d'eau insuffisant | | | | | | | Niveau d'eau insuffisant |
| P9 | X | X | | | | | | | X |
| P10 | | X | | | | | | | X |
| P11 | X | | | | | | | | X |
| P12 | X | X | | | | | | | X |
| P13 | X | X | | | | | | | X |
| P14 | X | X | | | | | | | X |
| P15 | X | X | | | | | | | X |
| P16 | Niveau d'eau insuffisant | X | | | | | | | X |
| P17 | X | Niveau d'eau insuffisant | | | | | | | X |
| P18 | X | | | | | | | | X |
| P19 | X | X | | | | | | | X |
| P20 | X | X | | | | | | | X |
| Sagne du Pin 1 | | | X | X | X | X | | X | |
| Sagne du Pin 2 | | | X | X | X | X | | X | |
| Aval Sagne du Pin | | | | | | | | X | |
| Ruisseau Font-Foride amont du bassin versant (FF_AMBV) | X | | | | | X | | | Pas d'écoulement |
| Captage (CAP) | X | | | | | | | | X |
| Ruisseau Fontfroide seuil amont (FF_SAM) | X | | | | | | | | X |
| Ruisseau fontfroide centre tourbière (FF_CE) | X | | | | | | | | X |
| Ruisseau Fontfroide seuil aval (FF_SAV) | X | | | | | X | | | X |
| Fossé est (Fo1) | X | | | | | | | | Pas d'écoulement |
| Fossé ouest (Fo3) | X | | | | | | | | Pas d'écoulement |
| Sagne de l'Ours | | | | | | | | X | |
| Ruisseau Pezanti amont (Pe_AM) | X | | | | | | | X | X |
| Ruisseau Pezanti aval (Pe_AV) | X | | | | | | | | X |
| Lac Praver | | | | X | | | X | | |

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des prélèvements d'eaux de surface et d'eaux souterraines réalisés lors des 3 campagnes et de manière plus isolée (P_{xx} = piézomètres)

| Périodes des épisodes pluviaux échantillonnés | | | |
|--|------------|------------|------------|
| du | au | du | au |
| 28/08/2018 | 06/11/2018 | 06/11/2019 | 20/12/2019 |
| 07/11/2018 | 01/04/2019 | 21/12/2019 | 08/01/2020 |
| 02/04/2019 | 03/06/2019 | 09/01/2020 | 16/03/2020 |
| 04/06/2019 | 10/07/2019 | 17/03/2020 | 29/04/2020 |
| 11/07/2019 | 22/07/2019 | 30/04/2020 | 07/05/2020 |
| 23/07/2019 | 27/07/2019 | 08/05/2020 | 05/06/2020 |
| 28/07/2019 | 01/08/2019 | 06/06/2020 | 24/06/2020 |
| 02/08/2019 | 13/08/2019 | 25/06/2020 | 08/07/2020 |
| 14/08/2019 | 25/09/2019 | 09/07/2020 | 03/08/2020 |
| 26/09/2019 | 02/10/2019 | 04/08/2020 | 12/08/2020 |
| 03/10/2019 | 16/10/2019 | 13/08/2020 | 14/08/2020 |
| 17/10/2019 | 23/10/2019 | 15/08/2020 | 16/08/2020 |
| 24/10/2019 | 05/11/2019 | 17/08/2020 | 11/09/2020 |

Tableau 13 : Périodes de cumuls des précipitations échantillonnées au niveau du collecteur d'eau de pluie installé sur la tourbière du col

11.3.1. Approche géochimique mise en œuvre

Afin de comprendre au mieux l'origine et le chemin des eaux et les échanges eaux de surface/eaux souterraines sur le site d'étude, différents traceurs géochimiques ont été utilisés dépendant des interactions eau-atmosphère ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et dépendant des interactions eau-roche (éléments majeurs). Les paramètres physico-chimiques des eaux (T : température ; pH ; EC : conductivité électrique de l'eau ; O_2) ont été mesurés sur le terrain et les concentrations en espèces majeures (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) et les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) ont été déterminées en laboratoire.

Les attentes vis-à-vis des différents traceurs naturels utilisés et les techniques employées pour l'acquisition des données sont présentées ci-dessous.

11.3.2. Paramètres physico-chimiques

Le pH, la température, la conductivité électrique et l'oxygène dissous ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'une sonde multi-paramètres VWT 3420Tc. L'alcalinité a été déterminée sur le terrain par titration volumétrique (1,6 et 0,6 N H_2SO_4) avec un kit de Hach. La mise en œuvre de ce test colorimétrique a été rendue difficile par la coloration naturelle (brune) et le faible pH de certaines eaux de la tourbière.

11.3.3. 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'échange entre l'eau et ces derniers. Certaines espèces ioniques peuvent également avoir une origine anthropique (activité industrielle, agricole, rejets domestiques, ...).

Les eaux prélevées ont été conditionnées sur le terrain dans des flacons HDPE 60 mL puis filtrées sur le terrain ou au laboratoire à 0,45 μm avec un filtre en nitrate de cellulose. Les échantillons ont ensuite été stockés à 5°C jusqu'à analyse. Les concentrations en cations et en anions des échantillons du Luitel de la campagne 2018 ont été mesurées au laboratoire Chrome de l'Université de Nîmes, sur une double chaîne de chromatographie ionique Metrohm 930 compact IC Flex. Les échantillons des campagnes suivantes ont été analysés par chromatographie ionique (modèle : Metrohm ECO IC) au LGL-TPE à Saint Etienne. Une solution 3,2 mM Na_2CO_3 / 1 mM NaHCO_3 a été utilisée comme éluant pour l'analyse des anions et un suppresseur chimique (MSM) permet d'abaisser la conductivité. Pour les cations, une solution 1,7 mM HNO_3 est utilisée comme éluant. Les anions et les cations sont séparés en utilisant des colonnes chromatographiques, Metrosep A Supp5 Guard / 4.0 et Metrosep C4 250 / 4.0, respectivement. L'intervalle de confiance pour les concentrations mesurées est de $\pm 5\%$.

11.3.4. Les isotopes de l'eau

Les isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^{16}O , ^1H , Deutérium ou ^2H) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux (zone de recharge ; mélange, saisonnalité) dans des environnements variés [montagne, aquifères fracturés, etc. (Coplen et al., 2000 ; Barbieri et al., 2005 ; Chapman et al., 2003 ; Gurrieri et Furniss, 2004 ; Kendall et Caldwell, 1998 ; Maréchal et Etcheverry, 2003 ; Rademacher et al., 2002)]. Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}\text{O}$ et δD , expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau de mer (SMOW). Les $\delta^{18}\text{O}$ et δD des précipitations sont contrôlés par les conditions de formation de ces dernières : température de surface (effet saisonnier), latitude, altitude. Sur un diagramme « δD vs $\delta^{18}\text{O}$ », les eaux de pluies se répartissent le long de la droite des eaux météoriques mondiales. Des droites des eaux météoriques locales sont définies, par exemple pour les précipitations de Thonon (IAEA/WMO, 2022), localité située dans le massif des Alpes à environ 150 kilomètres de la zone d'étude. L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux de rivière et des eaux souterraines présentent les mêmes caractéristiques que les eaux de pluie qui les alimentent : variations saisonnières et effet d'altitude. Dans un contexte d'eaux circulantes le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'origines spatiales et/ou temporelles différentes.

Les eaux prélevées ont été conditionnées sur le terrain dans des flacons en verre ambré de 20 mL, acheminés et stockés au laboratoire à 5°C jusqu'à analyse. Les eaux ont ensuite été analysées sur un banc d'équilibration isotopique (Gas Bench, Thermo) couplé à un spectromètre de masse (Delta V plus, Thermo). L'équilibration de la vapeur d'eau échantillon avec un mélange hélium - CO_2 2% est menée durant 24 heures à température ambiante avant analyse isotopique pour détermination du $\delta^{18}\text{O}$. Pour l'analyse isotopique de l'hydrogène (δD), l'équilibration entre la vapeur d'eau et le mélange de gaz He - H_2 0% est menée durant 2 heures à température ambiante en présence d'un barreau de platine qui sert de catalyseur. Les standards internationaux GISP, SMOW-2 et SLAP ont été utilisés pour la calibration.

Les valeurs isotopiques sont reportées avec la notation δ en ‰ vs SMOW :

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \times 1000$$

avec $R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et $R = \frac{\text{H}}{\text{D}}$ pour le δD

L'incertitude des mesures est de $\pm 0,1\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $\pm 1\text{‰}$ pour le δD .

11.4. Caractérisation chimique et isotopique des eaux de pluie

La composition chimique moyenne des eaux de pluie obtenue à partir des 26 échantillons collectés est de : $\text{Ca}^{2+} = 0,68\text{mg/L}$; $\text{Mg}^{2+} = 0,03 \text{ mg/L}$; $\text{Na}^+ = 0,38\text{mg/L}$; $\text{K}^+ = 0,44 \text{ mg/L}$; $\text{Cl}^- = 0,71 \text{ mg/L}$; $\text{NO}_3^- = 0,51\text{mg/L}$; $\text{SO}_4^{2-} = 0,65 \text{ mg/L}$.

Le $\delta^{18}\text{O}$ est compris entre -14,58 et -3,12‰/SMOW et le δD entre -104,49 et -30,19‰/SMOW avec les valeurs les plus élevées obtenues pour les précipitations des mois de juillet et août. Ces données isotopiques obtenues sur les eaux de pluies se répartissent le long de la droite des eaux météoriques locales définie par l'IAEA (IAEA/WMO, 2022) pour la station de Thonon (Figure 119) et suivent les mêmes tendances saisonnières (Figure 120 et Figure 121). Le suivi isotopique des précipitations sur 2 ans sur le site du Luitel est insuffisant pour effectuer un traitement statistique et définir la droite des eaux météoriques locales. La bonne superposition des données obtenues au Luitel et des données disponibles pour Thonon permet de considérer la droite des eaux météoriques locales de Thonon représentative du site d'étude. Pour la suite de la discussion la droite des eaux météoriques locales de Thonon sera prise comme référence pour les précipitations du Luitel.

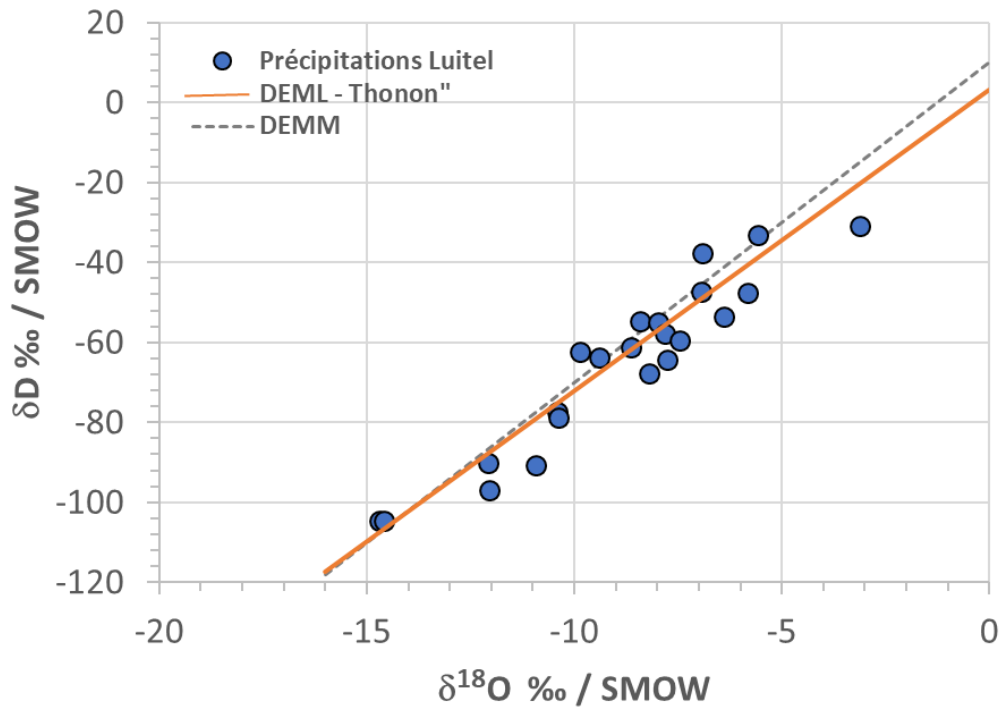


Figure 119 : Distribution des précipitations du Luitel dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ [DEMM : droite des eaux météoriques mondiales ; DEML-Thonon : droite des eaux météoriques locales de Thonon (IAEA/WMO, 2022)]

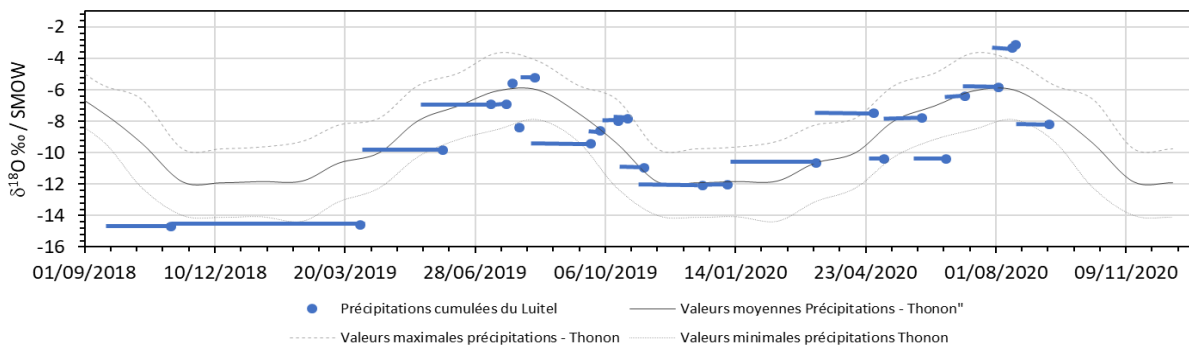


Figure 120 : Évolution du $\delta^{18}O$ des précipitations mensuelles à Thonon (IAEA/WMO, 2022) (valeurs maximales = pointillés fin gris ; valeurs moyennes = trait continu gris ; valeurs minimales = trait gris pointillés fins. Pour les $\delta^{18}O$ des précipitations cumulées à Thonon : points bleus = date de collecte ; trait bleu = période de cumul des précipitations du Luitel)

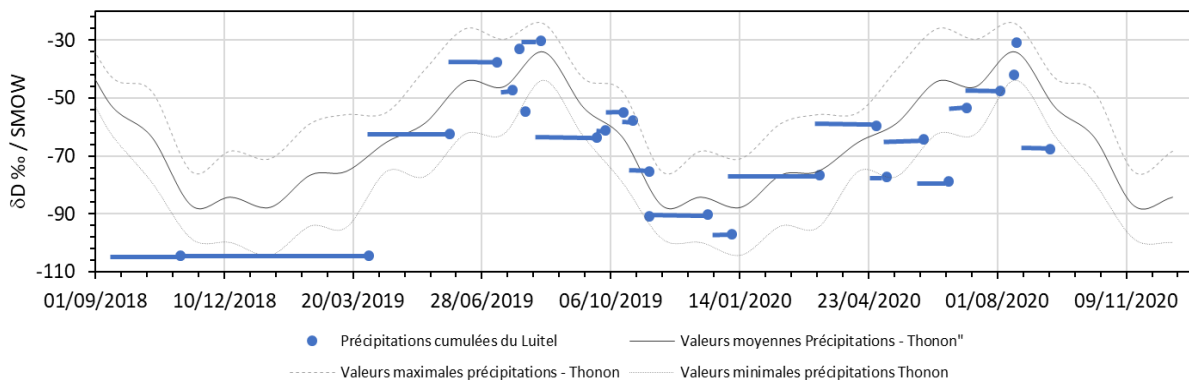


Figure 121 : Évolution du δD des précipitations mensuelles à Thonon (IAEA) (valeurs maximales = pointillés fin gris ; valeurs moyennes = trait continu gris ; valeurs minimales = trait gris pointillés fins. Pour le δD des précipitations cumulées à Thonon : points bleus = date de collecte ; trait bleu = période de cumul des précipitations du Luitel)

11.5. Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux de surface

Les eaux de surface ont été collectées dans les sous-bassins des ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti depuis les zones humides leur donnant naissance jusqu'à l'aval de la tourbière du Luitel. Des écoulements ont été observés en moyennes-eaux dans les fossés bordant la tourbière et ont fait l'objet de prélèvements et analyses chimiques et isotopiques.

11.5.1. Sous-bassin versant de Fontfroide

Les eaux prélevées en surface sur le bassin versant du ruisseau de Fontfroide, depuis la Sagne du pin (Figure 116) jusqu'à l'aval de la tourbière (point SS-AV ; Figure 118) présentent un pH moyen de $6,8 \pm 0,8$ sans évolution systématique de l'amont à l'aval ou en fonction du contexte hydrologique. Les conductivités électriques mesurées sur ces eaux couvrent une gamme de 36 à 94 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 25°C) avec les valeurs les plus faibles mesurées en tête du sous-bassin versant au niveau de la Sagne du pin (36 à 61,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les valeurs les plus élevées mesurées au niveau du seuil en aval de la tourbière (75 à 93 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Il est également observé des valeurs élevées et homogènes pour les eaux du ruisseau de Fontfroide au niveau de la traversée de la tourbière en période de basses-eaux (juillet 2019) avec des valeurs de 93-94 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le faciès chimique de ces eaux est de type bicarbonaté calcique (Figure 122). Il est cependant observé une différence de typologie entre les eaux de tête de bassin versant (Sagne du pin ; Figure 123) et les eaux du ruisseau de Fontfroide prélevées en différents points depuis l'amont jusqu'à l'aval de la tourbière. Cette différence de typologie est marquée par une modification du rapport Cl/Na (Figure 123 et Figure 124).

Na et Cl peuvent être apportés aux eaux par différentes sources. Le chlore, peu présent dans les roches, est principalement amené par les sels marins (halite, NaCl) transportés par les masses nuageuses et par la remobilisation de ces sels déposés au niveau des sols lors de l'évaporation de la pluie. Une troisième source peut influencer la composition chimique des eaux, il s'agit des sels utilisés pour le salage des routes et qui rejoignent les cours d'eau par ruissellement et les eaux souterraines par infiltration. Pour ces trois sources de chlore le sel en jeu est la halite (NaCl) qui permet d'apporter les deux éléments dans un rapport massique Cl/Na = 1,54. Les eaux influencées par ces sels marins se distribuent le long d'une droite Cl/Na (exemple des eaux de pluie) de pente 1,54 sur un diagramme Cl vs Na (Figure 125), cette droite est appelée droite de dissolution de la halite. Les processus d'interaction eau-roche sont en capacité d'influencer les concentrations en Na des eaux, dans ce cas le rapport Cl/Na mesuré sera inférieur à 1,54 et les données se distribueront "en dessous" de la droite de dissolution de la halite.

Ainsi les eaux de la Sagne du pin et du ruisseau de Fontfroide de l'ensemble des campagnes de prélèvement définissent une très bonne corrélation Cl/Na ($[\text{Cl}]_{\text{mg/l}} = 1,23 [\text{Na}]_{\text{mg/l}}$, $R^2 = 0,95$) (Figure 125). Les eaux du ruisseau de Fontfroide apparaissent enrichies en Na et Cl par rapport aux eaux de pluie et aux eaux de la Sagne du pin (Figure 12 et 13). Les données s'écartent légèrement de la droite de dissolution de l'halite avec un enrichissement relatif en Na par rapport à Cl. Ce qui suggère l'influence couplée d'apports de Na et Cl à partir de sels d'origine marine auxquels se rajoutent des apports préférentiels en Na résultant probablement des interactions eau-roche. Les apports couplés Na-Cl pourraient résulter de la remobilisation des apports atmosphériques par la dissolution des sels déposés sur le sol lors de l'évaporation de l'eau de pluie ou pourraient également être influencés par les apports par salage des routes.

Les compositions isotopiques des eaux du BV de Fontfroide varient de -10,8 à -9,5‰/SMOW pour le $\delta^{18}\text{O}$ (valeur moyenne : $-10,4 \pm 0,4\text{‰}$) et -90,7 à -69,6‰/SMOW pour le δD (valeur moyenne $-76,4 \pm 5,2\text{‰}$ /SMOW) (Figure 126). Les gammes de variation observées sont relativement réduites par rapport à celles observées pour les eaux de pluie (§ 11.4, p138) et se différencient des $\delta^{18}\text{O}$ et δD mesurés pour les précipitations synchrones aux prélèvements des eaux de surface (Figure 127). Ces valeurs se placent dans la gamme basse des compositions isotopiques observées sur les précipitations de Thonon (Figure 127). Les $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux du ruisseau de Fontfroide et les eaux de tête de bassin versant prélevées à la Sagne du Pin varient au cours du temps (Figure 128). Les valeurs les plus élevées

sont obtenues pour les mois de novembre 2019 et de juin 2020 et les valeurs les plus basses sont obtenues pour les mois de mars, janvier et avril 2020.

Les différences de typologie chimique entre les eaux de la Sagne du pin et les eaux du ruisseau de Fontfroide suggèrent un apport le long du cours d'eau à partir d'un réservoir souterrain enrichi en Na et Cl. Les variations isotopiques observées d'une campagne à l'autre reflètent des variations saisonnières et suggèrent ainsi des temps de transfert relativement réduits.

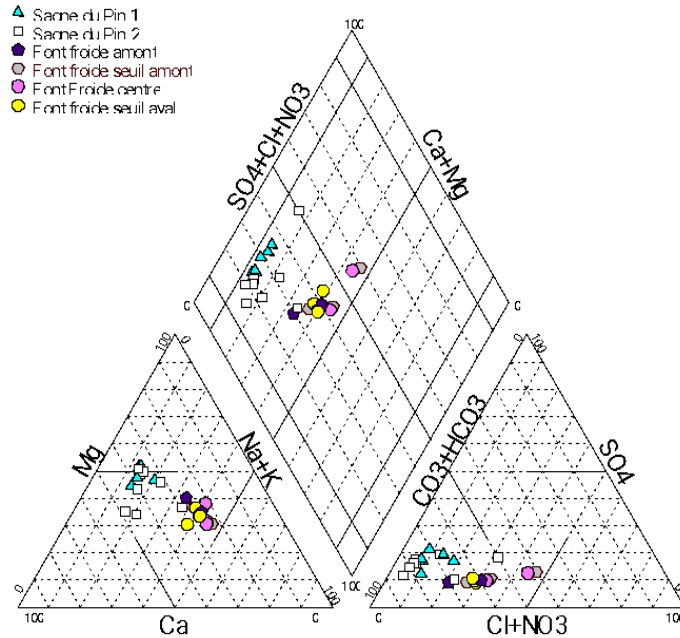


Figure 122 : Distribution des eaux de surface du bassin versant de Fontfroide dans un diagramme de Piper

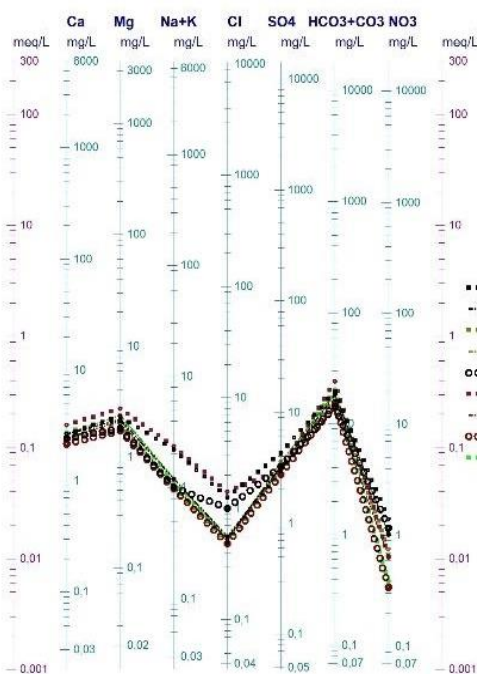


Figure 123 : Distribution des eaux de la Sagne du Pin en tête du bassin versant de Fontfroide dans un diagramme de Schoeller

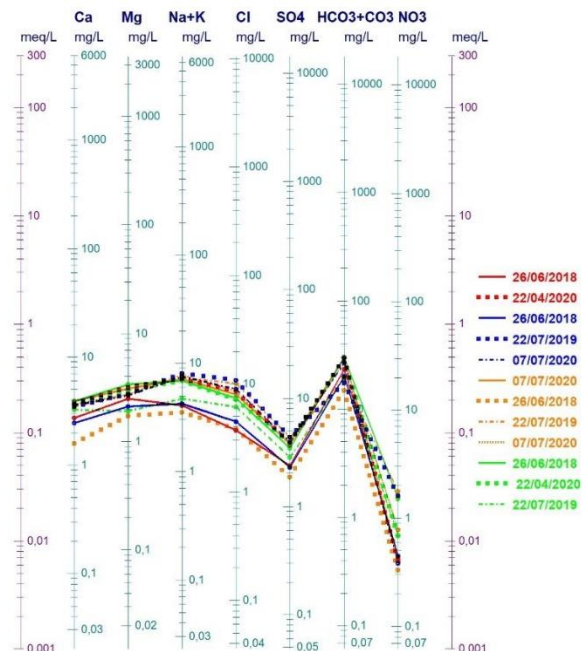


Figure 124 : Distribution des eaux du ruisseau de Fontfroide dans un diagramme de Schoeller pour les eaux prélevées en amont (rouge), en entrée (bleu), au passage (orange) et en sortie (vert) de la tourbière du Col pour différentes dates

Partie II – Luitel – Traceurs géochimiques

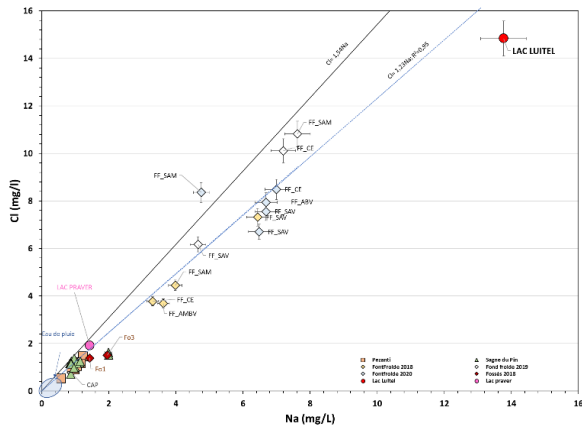


Figure 125 : Distribution des eaux du bassin versant de Fontfroide dans le diagramme Cl (mg/L) vs Na (mg/L) pour les eaux de pluies et les eaux prélevées dans les lacs de Praver et du Luitel et pour les eaux prélevées en tête de bassin versant (Sagne du pin), dans le ruisseau de Fontfroide entre la Sagne du pin et la tourbière (Libellé des points, voir Tableau 12)

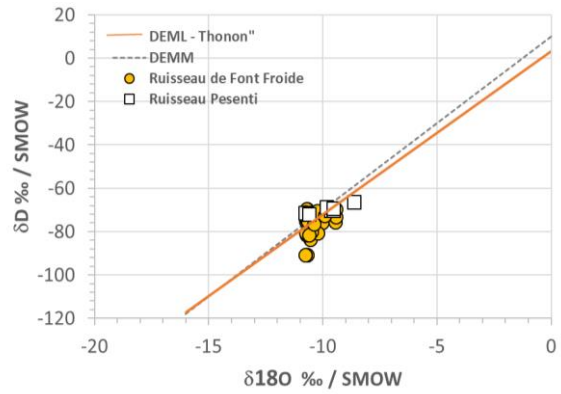


Figure 126 : Distribution dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ des eaux de surface de la Sagne du pin et du ruisseau de Fontfroide et de la Sagne de l'ours et du ruisseau Pezanti (carrés blancs [DEMME = Droite des Eaux Météoriques Mondiales ; DEML-Thonon = Droite des Eaux Météoriques Locales de Thonon (DEML-Thonon ; IAEA)])

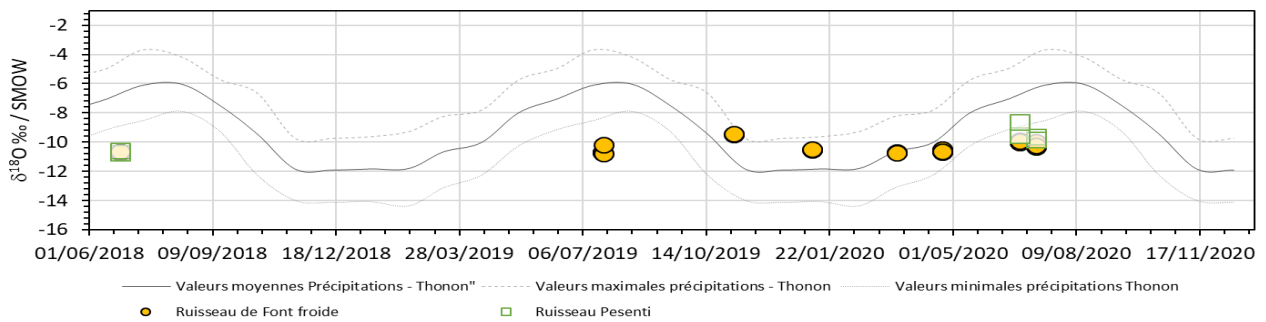


Figure 127 : Évolution du $\delta^{18}O$ des eaux du ruisseau de Fontfroide (cercles pleins oranges) et de Pezanti (carrés verts) au cours de la période d'étude

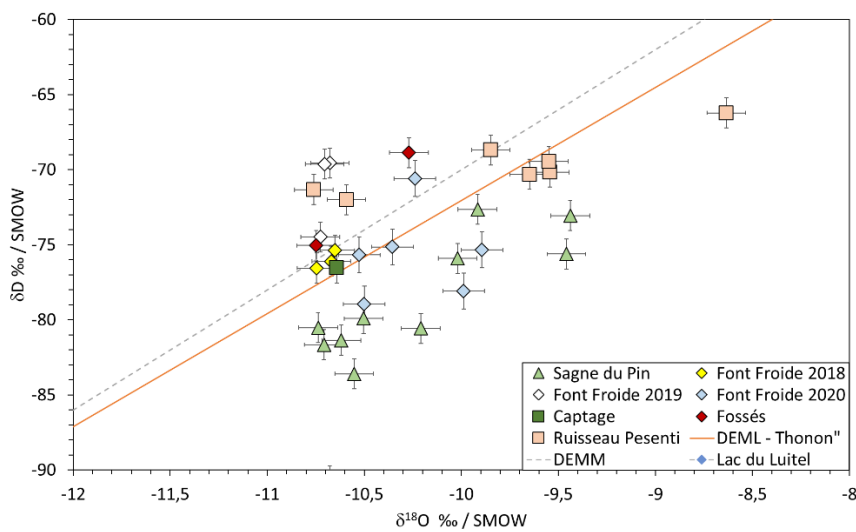


Figure 128 : Distribution des δD vs $\delta^{18}O$ des eaux de la Sagne du pin et du ruisseau de Fontfroide, du captage et du ruisseau de Pezanti. La droite en pointillés correspond à la droite des Eaux Météoriques Mondiales (DEMME) et la droite en trait plein orange correspond à la droite des eaux météoriques locales de Thonon (DEML – Thonon ; IAEA).

11.5.2. Sous-bassin versant de Pezanti

Le ruisseau de Pezanti a une faible étendue et n'a pu être échantillonné lors de la campagne de juillet 2019 où le régime hydrologique de basses-eaux a conduit à son assèchement. Les eaux de l'amont (Sagne de l'ours) et du ruisseau présentent un pH moyen de $6,5 \pm 0,3$ et une conductivité électrique moyenne de $27,9 \pm 6,5 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Les eaux se répartissent dans le faciès bicarbonaté calcique (Figure 129). Il est observé pour la campagne de juin 2018 une évolution entre l'amont et l'aval de la tourbière avec un enrichissement systématique de toutes les espèces dissoutes majeures (Figure 130). Ceci suggère un apport depuis la tourbière au ruisseau Pezanti. Cette tendance ne se retrouve pas de manière aussi marquée pour la campagne de juillet 2020. Le diagramme Cl vs Na (Figure 125) permet de mettre en évidence un enrichissement couplé en Na et Cl des eaux du sous-bassin versant du Pezanti par rapport aux eaux de pluie mais qui reste faible en comparaison de celui observé pour les eaux du ruisseau de Fontfroide.

Les compositions isotopiques des eaux du ruisseau de Pezanti varient de $-10,8$ à $-8,6\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ (valeur moyenne $9,8 \pm 0,7\text{‰}$) et de $-71,9$ à $-66,2\text{‰}$ /SMOW pour le δD (valeur moyenne $-69,7 \pm 0,7\text{‰}$ /SMOW). Il est observé d'une part l'absence d'évolution des compositions isotopiques des eaux du ruisseau au passage de la tourbière et d'autre part la présence de variations de compositions isotopiques au cours du temps. Pour juin 2020, les $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux prélevées à l'exutoire de la Sagne de l'ours se différencient de ceux des eaux prélevées à la même date au niveau du ruisseau de Pezanti : l'ensemble de ces données est découplé des $\delta^{18}\text{O}$ et δD des précipitations des mêmes périodes. L'évolution de la chimie des eaux et des $\delta^{18}\text{O}$ et δD de l'amont à l'aval du sous-bassin versant suggèrent que les propriétés chimiques des eaux du ruisseau de Pezanti ne sont pas exclusivement contrôlées par les eaux de la Sagne de l'ours, des processus d'interaction eau-roche sur le parcours et l'alimentation à partir d'un réservoir souterrain peuvent être évoqués.

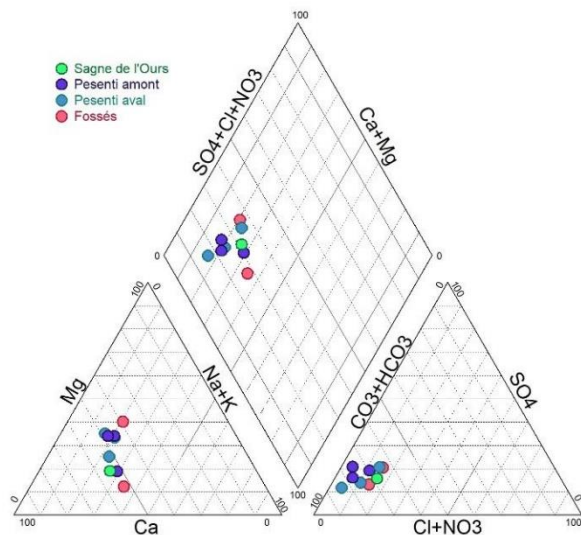


Figure 129 : Distribution des eaux du ruisseau de Pezanti dans le diagramme de Piper.

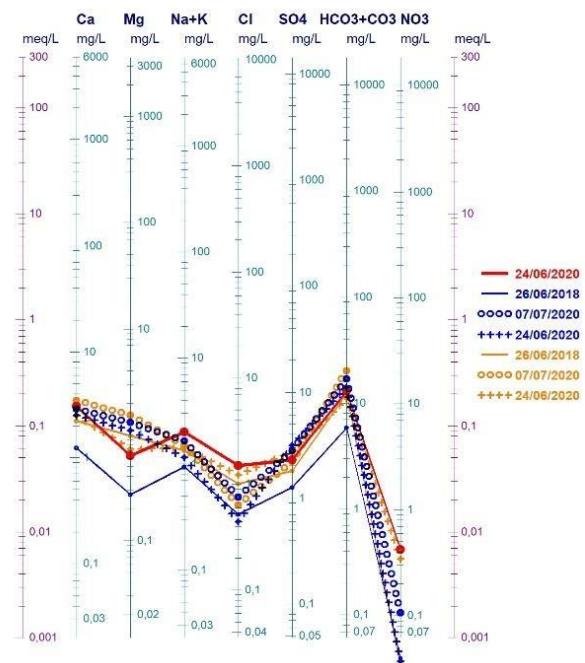


Figure 130 : Typologie des eaux de la Sagne de l'Ours (rouge) et des eaux du ruisseau de Pezanti à l'amont (bleu) et à l'aval (orange) de la tourbière pour différentes dates de prélèvement

11.5.3. Les eaux des fossés de drainage

Seul un écoulement au niveau des fossés de drainage a été observé en juin 2018 en période de moyennes-eaux. Le pH des eaux des deux fossés échantillonnés est de 6,1 pour le fossé 3 (Fo3) et 6,5 pour le fossé 1 (Fo1), et les conductivités électriques sont de l'ordre de 35 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux se répartissent dans le faciès bicarbonaté calcique et présentent des compositions chimiques légèrement différentes avec notamment un enrichissement en Na par rapport à Cl plus marqué pour les eaux du fossé 3 que pour les eaux du fossé 1. Les similitudes de typologie observées avec les eaux de la Sagne du pin et de la Sagne de l'ours suggèrent une alimentation des fossés de drainage à partir d'eau de pluie faiblement évoluée.

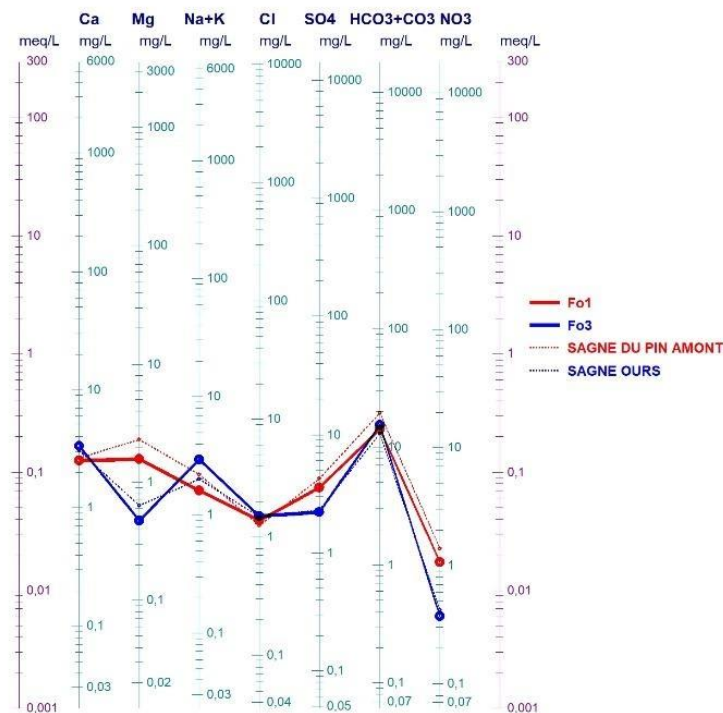


Figure 131 : Diagramme de Schoeller - Comparaison des tendances définies par les eaux prélevées au niveau des têtes de sous-bassins versants (Sagne du pin et Sagne de l'ours) et des fossés 1 et 3.

11.5.4. Les eaux des lacs

Les eaux du lac Praver situé au sud de la tourbière du Luitel présentent une faible minéralisation et se placent dans le domaine des eaux de la Sagne du pin sur le diagramme Cl vs Na (Figure 125). Les eaux du lac du Luitel présentent en revanche des concentrations au-delà des gammes observées pour les précédentes masses d'eau avec une concentration en Na de 13,8 mg/L et en Cl de 14,8 mg/L. Cette donnée se place dans le prolongement de la tendance définie par les eaux de la Sagne du pin, de la Sagne de l'ours, et des ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti suggérant la contribution de sel type NaCl plus marquée que pour les eaux de Fontfroide et l'influence des processus d'interaction eau-roche (Figure 125).

11.5.5. Comparaison des différentes masses d'eau de surface

Les eaux prélevées au niveau de la Sagne du pin et de la Sagne de l'ours, respectivement zone d'alimentation du ruisseau de Fontfroide et du ruisseau de Pezanti, montrent une faible minéralisation avec un enrichissement des différentes espèces dissoutes majeures par rapport aux eaux de pluie. Pour les deux sous-bassins versants, des typologies chimiques et isotopiques différentes sont observées entre les eaux de tête de bassin versant et les parties aval des ruisseaux. Ceci suggère la contribution d'une masse d'eau souterraine à l'alimentation des ruisseaux entre les zones humides leur donnant naissance et l'aval de leur parcours. Cette même masse d'eau contribuerait de manière plus significative à

l'alimentation du lac. Les eaux des ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti présentent des similitudes au niveau du rapport Cl/Na ($Cl/Na = 1,23$; Figure 125) et des différences au niveau des teneurs en Mg et SO_4 qui sont plus élevées pour les eaux de Fontfroide (Figure 124 et Figure 130). Ces observations et les connaissances de géologie structurale du secteur d'étude (Sarrot-Reynaud, 1972) suggèrent que les masses d'eau alimentant les ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti appartiennent à des réseaux de circulation différents avec une influence probablement plus marquée des formations sédimentaires triasiques pour les eaux de Fontfroide. Ces formations triasiques sont identifiées à l'affleurement au niveau du Col de la Balme situé en amont du sous bassin versant de Fontfroide à environ 1 800 mètres d'altitude et 4 à 5 km. Le jeu de failles reporté par Sarrot-Reynaud (1972) pourrait permettre l'acheminement des précipitations infiltrées à l'amont (pluies et eaux de fonte des neiges) jusqu'au secteur du ruisseau de Fontfroide. Les $\delta^{18}O$ et δD globalement plus négatifs observés pour les eaux de Fontfroide par rapport à ceux mesurés pour les eaux de Pezanti suggèrent des zones d'alimentation d'altitude différentes et/ou des périodes d'alimentation différentes avec pour Fontfroide une alimentation réalisée à partir d'altitude plus élevée et/ou lors des saisons plus froides.

Ces différentes observations et hypothèses permettent d'identifier deux masses d'eau contribuant à l'alimentation des eaux de surface :

- Masse d'eau n°1 : eaux superficielles à transfert rapide mobilisant les sels du sol et/ou influencées par les actions de salage des routes, influence des processus d'interaction eau-roche négligeable ;
- Masse d'eau n°2 : apport de versant (Fontfroide et Pezanti) mobilisant les sels du sol et/ou influencés par les actions de salage des routes et faible influence des processus d'interactions eau-roche.

11.6. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines ont été accessibles au niveau d'un captage dans le sous-bassin versant du ruisseau de Fontfroide et au niveau des piézomètres implantés sur la tourbière.

11.6.1. À l'amont du bassin versant

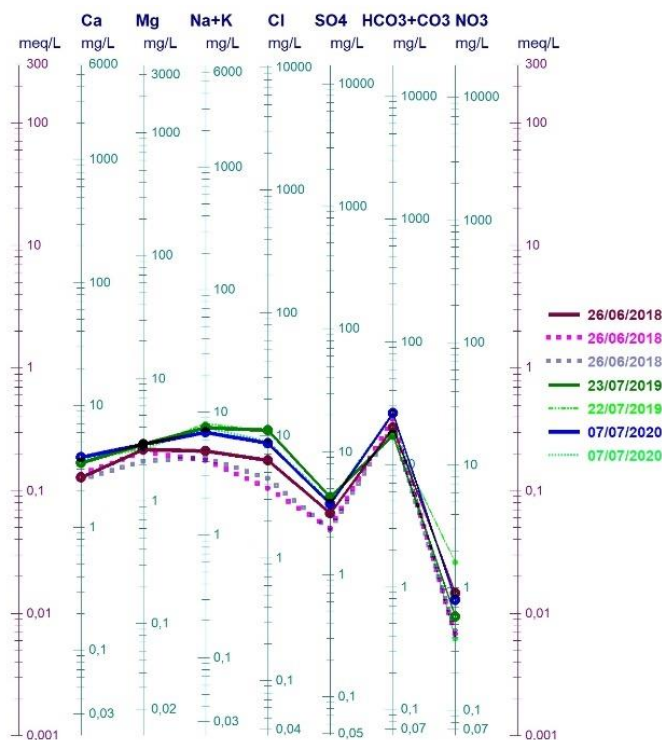


Figure 132 : Diagramme de Schoeller, comparaison des tendances définies par les eaux prélevées au niveau du captage et de la partie amont du ruisseau de Fontfroide pour les campagnes de juin 2018, juillet 2019 et 2020 (Trait plein = captage ; traits pointillés = eaux du ruisseau de Fontfroide)

Les eaux souterraines prélevées dans le sous bassin versant du ruisseau de Fontfroide, au niveau du captage pour l'alimentation en eau de la cabane forestière (Figure 118) ont un pH de 6,3-6,5 en juillet 2019 et 2020 et un pH de 8,6 en 2018. Les conductivités électriques varient également d'une période à l'autre avec des valeurs de 54,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en contexte de moyennes-eaux de juillet 2018, 99 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en contexte d'étiage de juillet 2019 et 79 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en juillet 2020 qui est également un contexte de moyennes-eaux. La typologie chimique de ces eaux (Figure 132) et leurs compositions isotopiques δD et $\delta^{18}\text{O}$ s'avèrent similaires à celles observées pour les eaux du ruisseau de Fontfroide (Figure 128) suggérant une même origine pour ces eaux de surface et souterraines. Les eaux du captage sont donc à rattacher à la masse d'eau n°2 identifiée précédemment.

11.6.2. Les eaux de la tourbière

11.6.2.1. Les propriétés chimiques

Le pH des eaux prélevées dans les piézomètres de la tourbière varie entre 3,8 et 5,9 avec une valeur moyenne de $4,8 \pm 0,6$ (Figure 133). Les conductivités électriques couvrent une gamme allant de 7,9 à 149 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 134). Des variations de conductivité électrique sont observées d'un piézomètre à l'autre et au cours du temps, avec par exemple la valeur la plus faible observée au niveau des eaux du piézomètre 19 en juin 2018 et les valeurs les plus élevées observées pour les piézomètres 2 et 7 situés dans le réservoir nord (Figure 118). De manière générale, pour un même piézomètre la conductivité des eaux est minimale lors de la campagne de juin 2018 et maximale durant la période d'étiage de 2019. Les variations de conductivités des eaux prélevées lors de l'étiage de juillet 2019 et la période de moyennes-eaux de juin 2018 sont très marquées pour les échantillons de P1 (facteur 2), P2 (facteur 3) et P19 (facteur >5).

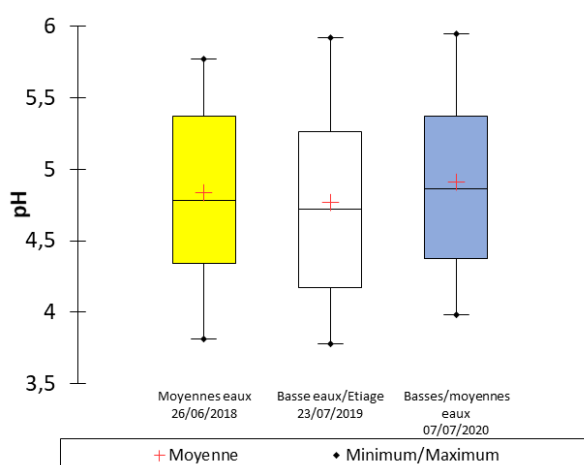


Figure 133 : Variations des valeurs de pH pour les eaux de la tourbière prélevées en juin 2018, Juillet 2019 et 2020

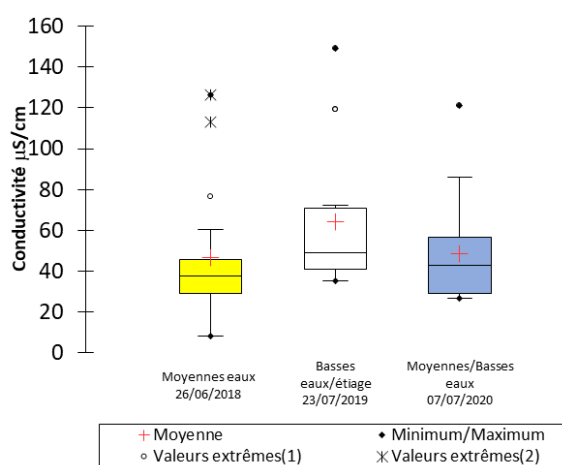


Figure 134 : Variations des conductivités mesurées sur les eaux de la tourbière pour juin 2018, Juillet 2019 et 2020

Ces eaux se placent majoritairement dans le faciès bicarbonaté calcique et magnésien (Figure 135). Certains échantillons se placent dans le faciès chloruré calcique et magnésien notamment du fait de la présence significative de nitrates dans ces eaux. Les gammes de variations des concentrations en espèces dissoutes majeures sont similaires d'une campagne à l'autre pour les différents paramètres mesurés (Figure 136). Cependant les concentrations des espèces dissoutes majeures varient au sein de la tourbière d'un piézomètre à l'autre et au cours du temps.

Suite à l'observation d'une différenciation des eaux de surface à partir du rapport Cl/Na et afin de discuter des éventuels liens entre eaux de surface et eaux souterraines, les données obtenues pour les eaux de la tourbière ont été reportées dans le diagramme Cl vs Na défini précédemment (Figure 125).

Il est ainsi observé pour les 54 échantillons collectés lors des 3 campagnes une distribution entre la tendance définie pour les eaux superficielles (masse d'eau n°1 ; $[Cl]_{mg/l} = 1,54$ $[Na]_{mg/l}$; 4 échantillons) et la tendance définie par les apports de versant (masse d'eau n° 2 ; $[Cl]_{mg/l} = 1,23$ $[Na]_{mg/l}$; 6 échantillons). Seize échantillons peuvent être décrits par un rapport massique Cl/Na = 0,62 et définissent ainsi une troisième tendance représentative d'une troisième masse d'eau contribuant à l'alimentation de la tourbière (masse d'eau n°3). Enfin 26 échantillons se répartissent en intermédiaire à ces trois tendances. L'enrichissement en Na des eaux du troisième groupe peut résulter de processus d'interaction eau-roche plus marqués lors d'un temps de transfert plus long dans le milieu souterrain.

La Figure 137 permet de visualiser l'appartenance des eaux de chacun des piézomètres à ces différents groupes. En contexte de moyennes-eaux :

- l'alimentation du réservoir nord (P1, P2, P3 et P7) apparaît influencée par les eaux superficielles (masse d'eau n°1) ;
- elle est découplée du réservoir sud où se retrouve une influence des eaux de versants (masse d'eau n°2 ; P8, P9, P20, P12, P19) et des eaux à transfert plus lent (masse d'eau n°3 ; P11 et P15)
- une influence mixte pour les eaux de la zone centrale de la tourbière est observée (P13, P14, P18).

En période de basses eaux de juillet 2019 :

- l'influence des eaux à transfert lent se retrouve à la fois dans le réservoir nord (P3 et P2) et dans réservoir sud (P10, P12, P13, P14, P15, P16, P18, P19, P20)
- l'influence des apports de versants est visible au niveau de P4
- les eaux de la partie centrale de la tourbière (P4, P6) sont à la fois influencées par les apports de versants et les eaux à transfert lent.

Une configuration très similaire à juillet 2019 est observée pour la campagne de juillet 2020 à basses-eaux.

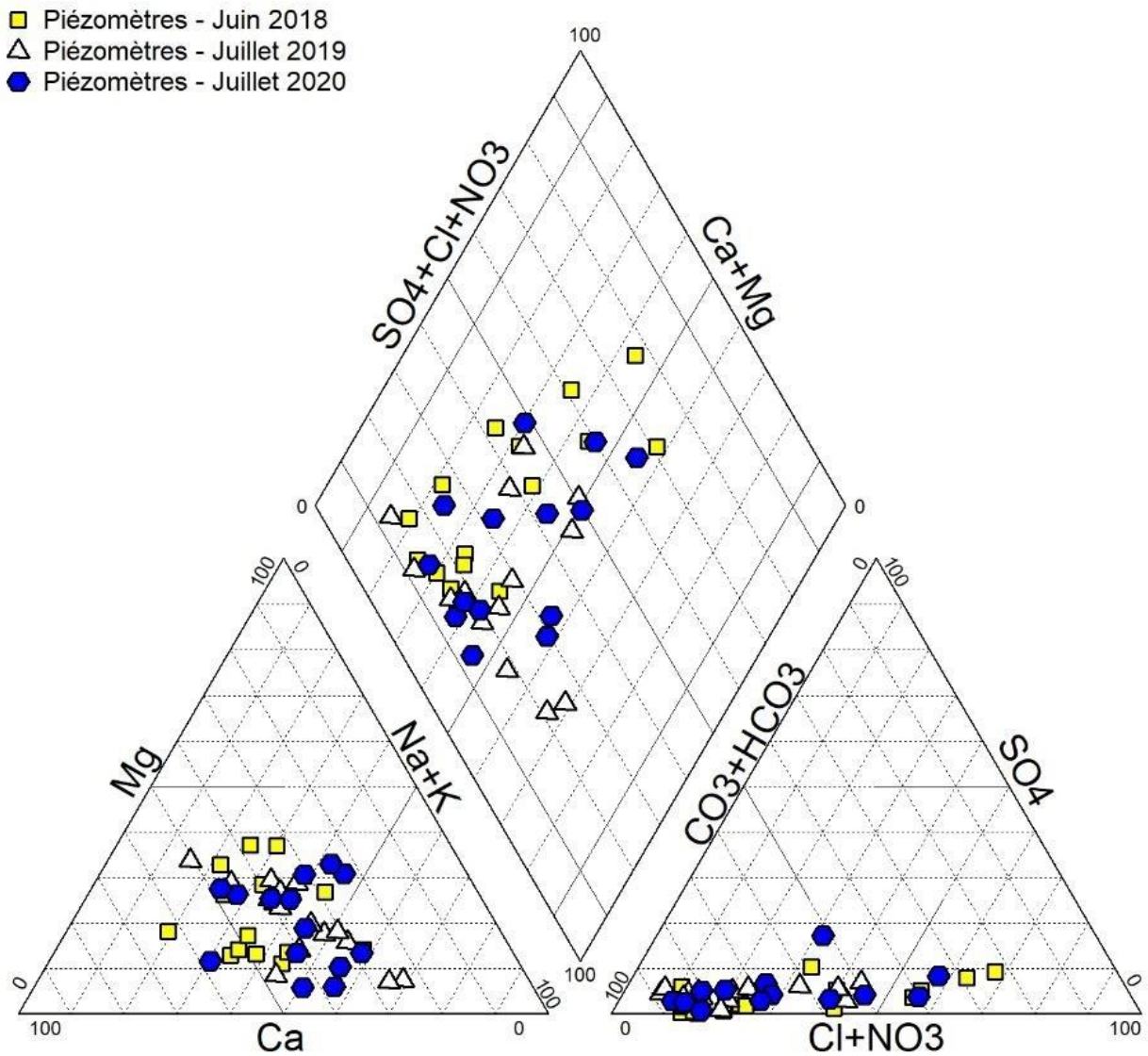


Figure 135 : Distribution des eaux de la tourbière (juin 2018 et juillet 2019-2020) dans un diagramme de Piper pour les campagnes de juin 2018 (carrés jaunes), juillet 2019 (triangles blancs) et 2020 (hexagones bleus)

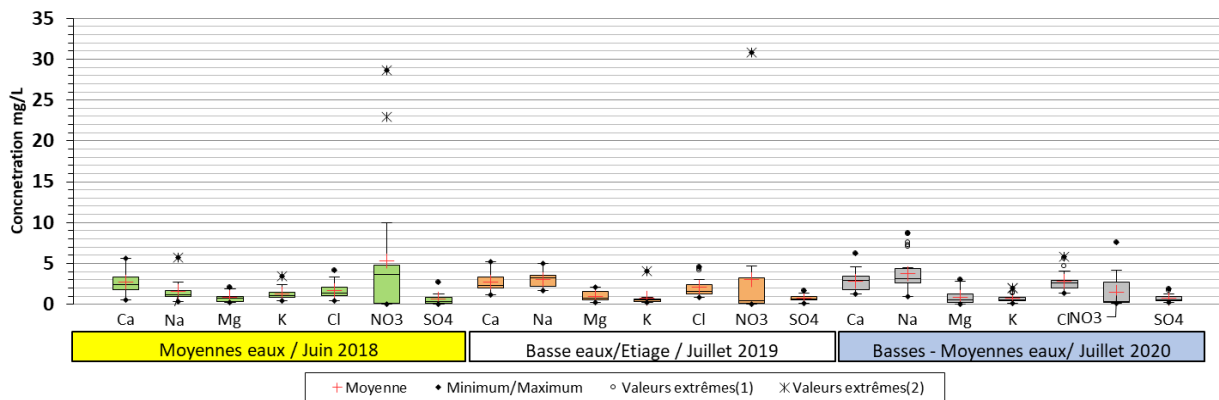
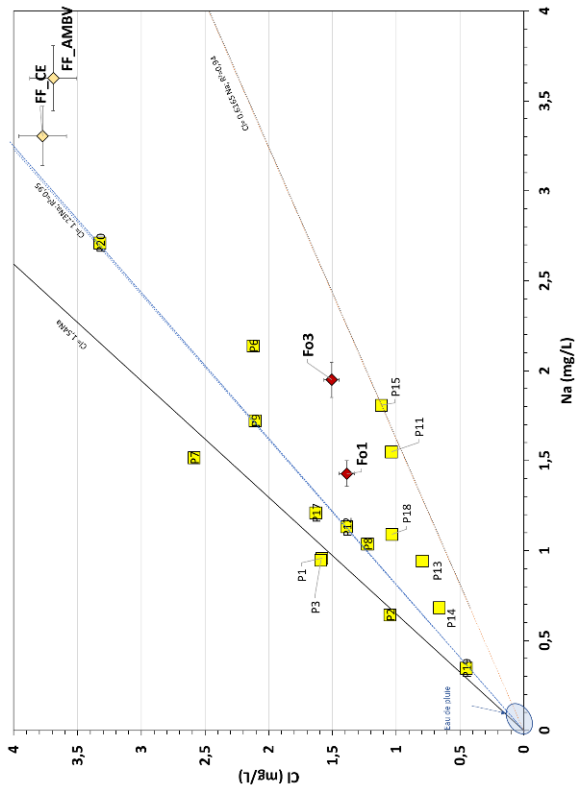
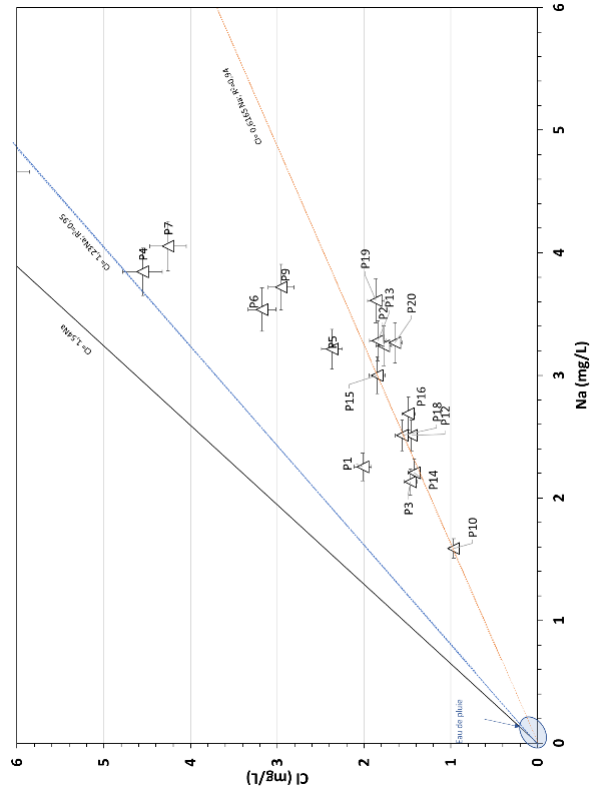


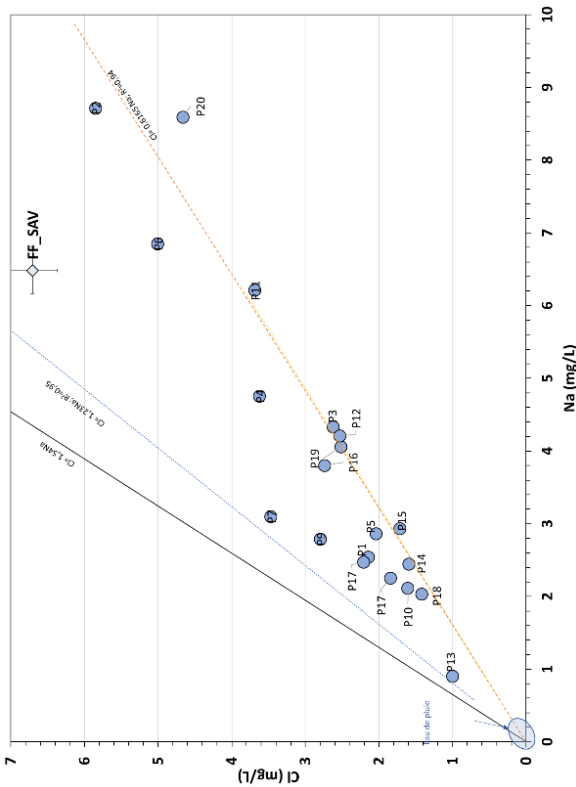
Figure 136 : Gamme de variations des concentrations en espèces dissoutes majeures pour les eaux prélevées dans la tourbière en juin 2018, juillet 2019 et 2020



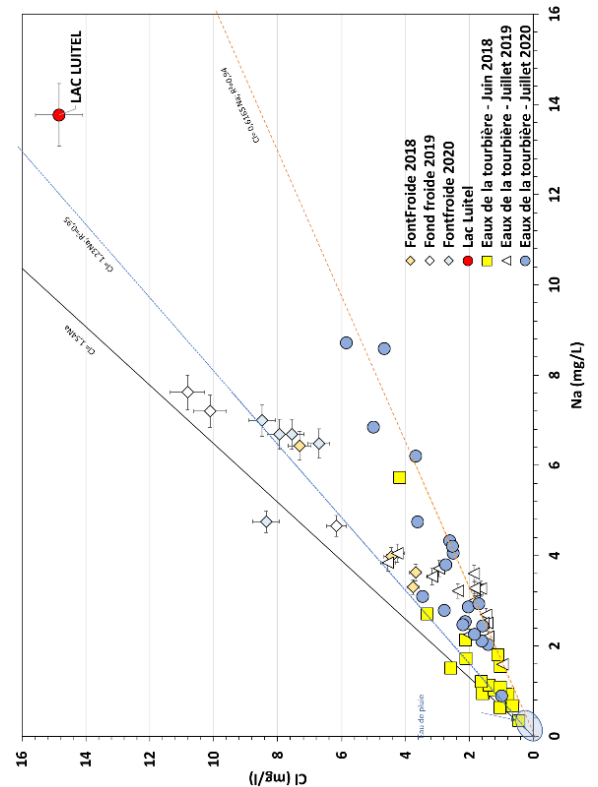
(A) Campagne 2018



(B) Campagne 2019



(C) Campagnes 2020



(D) Campagnes 2018, 2019, 2020

Figure 137 : Distribution sur un diagramme Cl vs Na des données obtenues pour les eaux de pluie, les ruisseaux et les eaux de la tourbière pour les campagnes de juin 2018 (A), juillet 2019 (B) et 2020 (C) et pour l'ensemble des données (D). Sont représentées par les droites les tendances pour une influence des eaux par la dissolution de la halite (NaCl ; masse d'eau n° 1, trait noir plein), l'influence par les apports de versants (masse d'eau n° 2 ; trait pointillé bleu) et une troisième influence plus marquée par les interactions eau-roche (masse d'eau n° 3 ; trait pointillés orange)

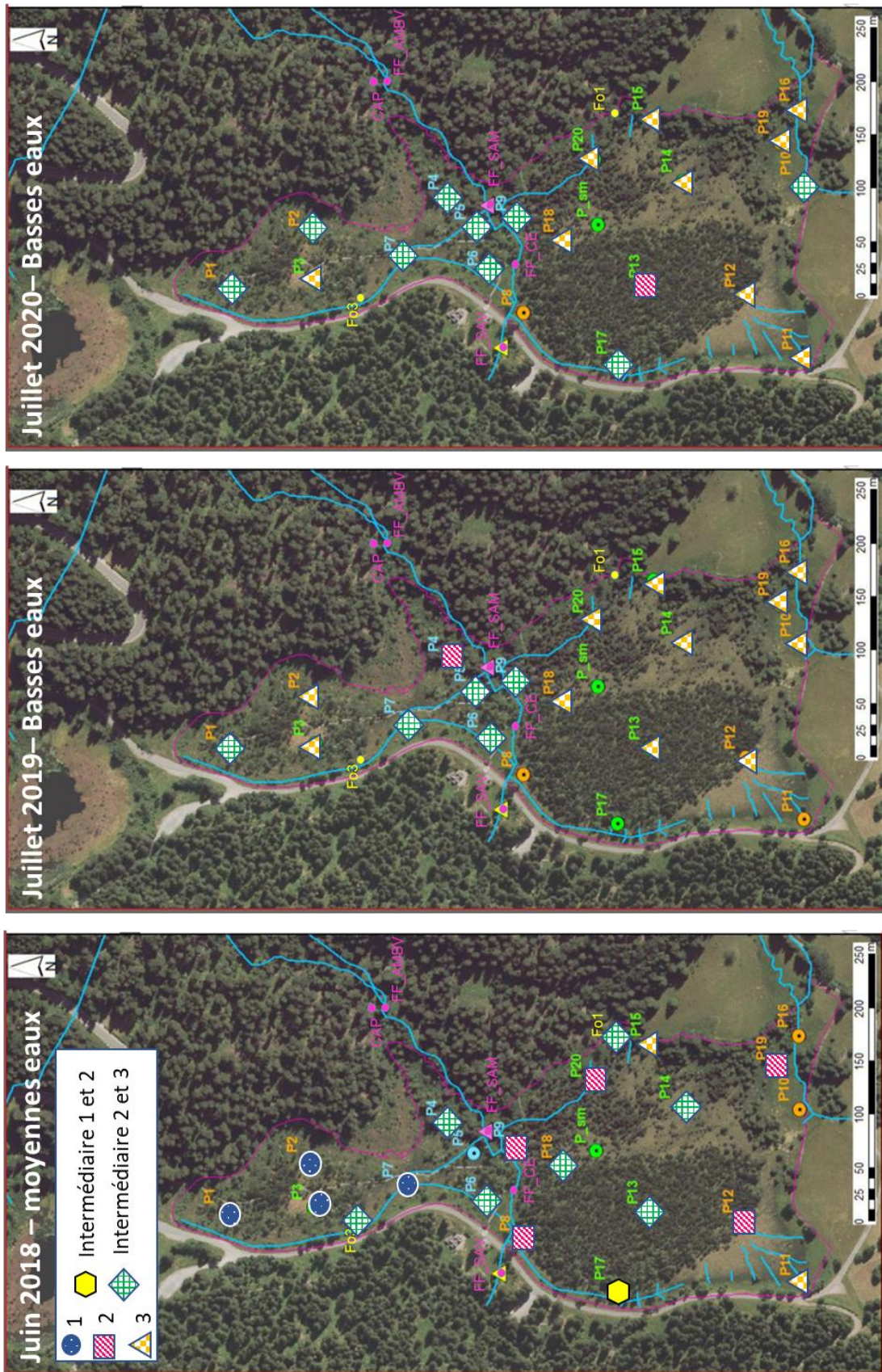


Figure 138 : Visualisation de la distribution des eaux de la tourbière du Luitel collectées lors des campagnes de juin 2018 (moyennes-eaux), juillet 2019 et 2020 (basses-eaux) dans les différents groupes définis par des rapports Cl/Na. [Rond bleu = masse d'eau n°1, 1 : Influence processus interaction eau-roche négligeable ; Carré rose = masse d'eau n° 2, 2 : faible influence interaction eau-roche ; Triangle jaune = masse d'eau n° 3, 3 : influence interaction eau-roche modérée ; Hexagone jaune = Intermédiaires groupes 1 et 2 ; losange vert = Intermédiaires groupes 2 et 3]

L'analyse des propriétés chimiques des eaux de la tourbière et leur différenciation selon le rapport d'abondance Cl/Na permet de mettre en évidence trois masses d'eau qui contribuent à l'alimentation de la tourbière :

- une masse d'eau non influencée par les processus d'interaction eau-roche (masse d'eau n°1) qui alimente le réservoir nord de la tourbière en moyennes-eaux (pluie et circulations rapides) ;
- des apports de versant (influence des ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti ; masse d'eau n°2) directement identifiables en moyennes-eaux sur les bordures du réservoir sud ;
- une masse d'eau influencée par les interactions eau-roche (masse d'eau n°3) qui est visible essentiellement en basses-eaux dans le réservoir sud et dans le réservoir nord.

L'influence du mélange de ces deux dernières masses d'eau est principalement visible en moyennes-eaux dans la zone centrale et le réservoir sud et en basses-eaux dans la zone centrale et le réservoir nord.

11.6.2.2. Les propriétés isotopiques

Les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD évoluent d'un piézomètre à l'autre et d'une campagne à l'autre. La gamme totale décrite s'étend de -10,8 à -8,9‰/SMOW pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de -80,8 à -60,2‰/SMOW pour le δD (Figure 29). Ces gammes correspondent à la partie médiane des gammes de variations des $\delta^{18}\text{O}$ et δD des précipitations du Luitel (§ 11.4, p138).

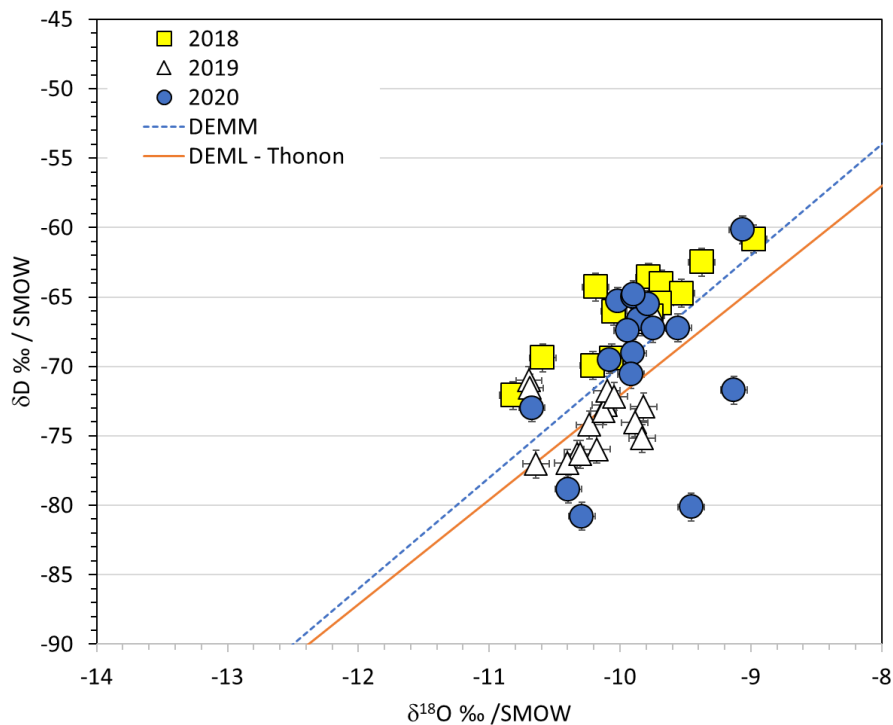


Figure 139 : Distribution des eaux de la tourbière sur un diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ pour les campagnes de juin 2018, juillet 2019 et 2020

Pour la campagne à moyennes eaux de juin 2018, les $\delta^{18}\text{O}$ et δD varient de -10,8 à -9,0‰ et de -72,1 à -60,8‰/SMOW respectivement (Figure 140). Les données se répartissent le long de la droite des eaux météoriques locales de Thonon avec les eaux des piézomètres P4 et P9 de la zone centrale qui présentent les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et δD les plus basses et les plus proches de celles obtenues pour les eaux des ruisseaux de Fontfroide. Les eaux des piézomètres P14 et P18 se distinguent des eaux précédentes avec des $\delta^{18}\text{O}$ et δD de -9,0 et -9,7 ‰/SMOW et de -60,8 et -65,5‰ respectivement. Les eaux collectées dans les autres piézomètres se distribuent entre ces deux extrêmes. Cette tendance suggère des origines spatiales et/ou temporelles différentes pour l'alimentation de la tourbière au niveau de la

Partie II – Luitel – Traceurs géochimiques

zone centrale (P4 et P9) et du réservoir sud (P14 et P18) avec notamment une influence marquée des apports de versants pour la zone centrale de la tourbière. Les caractéristiques isotopiques de la masse d'eau influençant le réservoir sud suggèrent une zone de recharge de plus faible altitude et/ou une recharge préférentielle à partir des précipitations des saisons plus chaudes.

Des tendances similaires sont observées pour la période de basses-eaux de juillet 2019 avec une influence des apports de versants plus marqués au niveau de la zone centrale de la tourbière (P4, P6, P9) et l'influence d'une masse d'eau avec des $\delta^{18}\text{O}$ et δD plus élevés pour les réservoirs sud (P18, P12) et nord (P1, P2, P3). Les eaux prélevées en juillet 2020 montrent peu de variation des $\delta^{18}\text{O}$ et δD . Seules les eaux prélevées dans la partie centrale (P7, P9) et dans la partie sud-ouest du réservoir sud (P11) se démarquent avec des $\delta^{18}\text{O}$ et δD plus négatifs et moins négatifs respectivement.

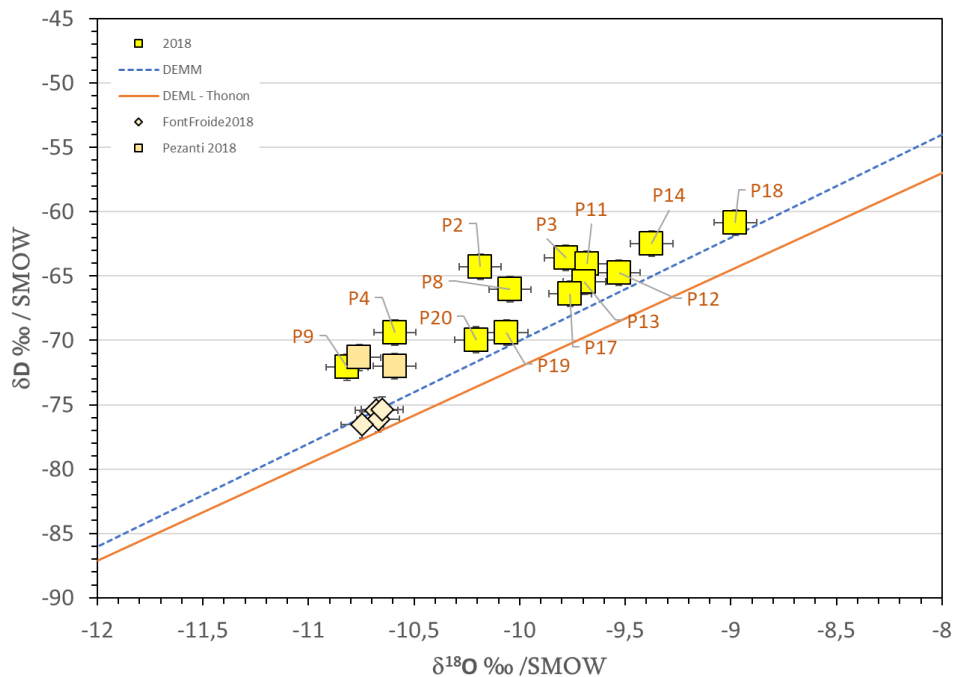


Figure 140 : Distribution sur un diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de la tourbière prélevées à moyennes-eaux en juin 2018. Représentation de la droite des eaux météoriques mondiales (Trait pointillés bleu) et de la droite des eaux météoriques locales (trait orange)

Les variations de $\delta^{18}\text{O}$ et δD observées d'un piézomètre à l'autre pour une même campagne suggèrent pour les périodes de moyennes-eaux (juillet 2018) et de basses-eaux (juillet 2019 et 2020) la contribution de deux masses d'eau principales :

- des apports de versant représentés par les ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti (masse d'eau n°2) ;
- des apports à partir d'une troisième masse d'eau présentant une zone de recharge et/ou une période de recharge différente de la précédente.

11.7. Synthèse des observations géochimiques

L'identification des masses d'eau alimentant la tourbière a été initiée par l'analyse des variations des rapports Cl/Na observées pour les eaux de surface et les eaux souterraines et complétée par l'analyse des données isotopiques. Le croisement des observations réalisées permet de mettre en évidence trois masses d'eau contribuant à l'alimentation de la tourbière du col. Ces masses d'eau peuvent être décrites comme suit.

- **Masse d'eau n°1** - eaux de surface caractérisées par un rapport massique Cl/Na = 1,54
 - Pas d'influence significative des processus d'interaction eau-roche ;
 - Transfert superficiel rapide ;
 - Significativement présentes dans la tourbière en moyennes-eaux dans le réservoir nord.

- **Masse d'eau n°2** - apports de versant caractérisés par un rapport massique Cl/Na = 1,23
 - Pour le sous-bassin versant de Fontfroide enrichissement relatif en Mg et SO₄ et $\delta^{18}\text{O}$ et δD indicateur d'une zone de recharge en altitude ;
 - Influence en moyennes-eaux visible au niveau de la tourbière principalement dans la zone centrale et en mélange avec une autre masse d'eau dans le réservoir sud ;
 - Influence en basses-eaux visible en mélange avec une autre masse d'eau dans le réservoir nord et la partie centrale.

- **Masse d'eau n°3** - eaux souterraines caractérisées par un rapport massique Cl/Na = 0,62
 - Influence marquée des processus interaction eau-roche ;
 - $\delta^{18}\text{O}$ et δD indicateurs d'une recharge à plus faible altitude que celle observée pour la masse d'eau n°2 et/ou une période de recharge à partir des précipitations de saisons chaudes qui contribueraient pour partie à l'alimentation du réservoir sud en basses-eaux et de la zone centrale en basses et moyennes-eaux ;
 - Principale source d'alimentation des réservoirs nord et sud en basses-eaux.

Les zones de recharge des apports de versants et de la troisième masse d'eau peuvent être discutées au regard des données. L'enrichissement en Mg et SO₄ des eaux du ruisseau de Fontfroide suggère l'influence des formations triasiques présentes en amont du bassin versant au niveau du col de la Balme à une altitude de l'ordre de 1 800 mètres. Les contrastes isotopiques observés entre les eaux des ruisseaux de Fontfroide ($\delta^{18}\text{O}$ et δD moyens de $-10,5 \pm 0,3\text{‰}$ et $-73,6 \pm 3,6\text{‰}$ /SMOW) et les eaux représentatives de la troisième masse d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ max = -9‰ et δD max = -60‰) permettent d'envisager des zones de recharge d'altitudes différentes. Les valeurs plus négatives mesurées sur les eaux du ruisseau de Fontfroide appuient l'hypothèse d'une recharge en altitude. La troisième masse d'eau pourrait quant à elle résulter de l'infiltration de précipitations (pluie et eaux de fonte des neiges) à une altitude plus basse, intermédiaire au sommet du bassin versant et à la tourbière du Luitel (1 250 m) avec un temps de résidence plus long dans le milieu souterrain permettant un enrichissement en Na.

Cette étude géochimique des eaux de surface et des eaux souterraines met en évidence malgré la faible étendue de la tourbière du Luitel un fonctionnement hydrogéologique complexe avec une alimentation se faisant à partir de trois masses d'eau principales en proportions variables suivant le secteur de la tourbière considéré et suivant le contexte hydrologique. À moyenne comme à basses eaux la chimie des eaux du ruisseau de Fontfroide apparaît fortement influencée par les apports de versant avec l'absence d'évolution de typologie ou des concentrations en espèces dissoutes majeures entre l'amont et l'aval de la zone humide. Les apports depuis la tourbière notamment à l'étiage ne peuvent être mis en évidence à partir du jeu de données acquises.

12. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col du Luitel

Cette partie présente et finalise les travaux menés par T. Jolly (2018 et 2019) dans le cadre de 2 stages de master¹⁴. L'objectif de ces travaux visait à :

- caractériser la pédologie de la tourbière de Luitel ;
- articuler les approches pédologique et géophysique afin de caractériser la géométrie de la tourbière du col (interface tourbière/substratum) et sa structure interne. La caractérisation pédologique de la tourbière a permis de valider les profils géophysiques

Suite à ces 2 stages, le travail de T. Jolly a été finalisé afin de construire une interprétation 3D : 1) de la topographie des 2 cuvettes de la tourbière du col et 2) de leur structure interne à l'aide du logiciel ArcGIS Pro.

12.1. Rappels : éléments de contexte

12.1.1. Mise en place, texture et sols d'une tourbière

La mise en place d'une tourbière ombrotrophe bombée est un processus lent qui peut prendre des milliers d'années. Pour mémoire, dans le cas du Luitel, suite à la fonte des glaciers, la tourbière du col se serait formée par comblement progressif d'un ou plusieurs lacs ((Figure 141). Dans ces conditions de formation, la texture de la tourbe présente des variabilités latérales, longitudinales et verticales. La variation du degré d'humification résulte de la composition botanique, du tassement, de l'âge, des apports en eau, de la température moyenne et de la proximité avec les faciès lacustres ou de la roche mère altérée (Manneville et al., 2010 ; Cubizolle, 2019). Cette hétérogénéité au sein d'un même milieu conduit au concept d'éco-complexes pour qualifier un hydrosystème tourbeux qui présente des disparités spatiales de couvert végétal et de ses modes de dépôts ou d'incorporation à la tourbe. Il existe plusieurs nomenclatures reconnues pour classer les types d'histosols (sols tourbeux). Une telle pluralité est liée à la diversité observée inter et intra tourbières (Payette et Rochefort, 2001 ; Manneville et al., 2010 ; Cubizolle, 2019). La classification retenue (Tableau 14) repose sur une nomenclature scindée en trois grandes catégories et bâtie à partir du degré d'humification.

| Type de tourbe | % de fibres | Informations complémentaires |
|-----------------------------|-------------|---|
| Fibriques -Hf (Fibric peat) | > ou = 40 % | Test de Von Post, H1 à H3 : eau limpide, conservation la texture |
| Mésiques - Hm (Mesic peat) | 10 à 40 % | Test de Von Post, H4 à H8 : proportion notable de matière organique (MO) |
| Sapriques - Hs (Humic peat) | > 10 % | Test de Von Post, H7 à H10 : composition botanique difficilement identifiable, forte humification |

Tableau 14 : Typologie des textures de tourbe (d'après Payette et Rochefort, 2001 ; Cubizolle, 2019)

La détermination du type de tourbe peut se faire en utilisant la méthode des fibres frottées, ou à l'œil avec de l'expérience du terrain, et le test de Von Post. Une détermination plus précise peut être effectuée à partir du triangle des textures de Gobat et al. (1991).

14. 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 (Projet ZABR, action 57). 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.

Jolly T. (2019) Caractérisation géométrique des faciès pédologiques 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 (Projet ZABR, action 68). Rapport de stage de master 2 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE, Université de Saint-Etienne, EVS UMR 5600, ENTPE, Mines Saint-Etienne, ZABR, AERMC, 141p.

De plus, dans les hydrosystèmes tourbeux perturbés, on observe souvent la présence d'horizons dits « assainis » notés Ha, que l'on retrouve parfois sous la dénomination fortement discutée de KTH (Kultureller TrockenHorizont). Cette forme dégradée de l'histosol (Manneville et al, 2010 ; Cholet et Magnon, 2010) résulte :

- du piétinement induit par une activité pastorale ayant entraîné le compactage des horizons de surface et la relance de l'activité microbienne concourant à la minéralisation ;
- des opérations de drainage induisant l'abaissement artificiel du toit de la nappe. La baisse des niveaux d'eau dans les secteurs proches des fossés favorise le processus de minéralisation à la suite de la rupture des conditions anoxiques responsables de l'inhibition des minéralisateurs.

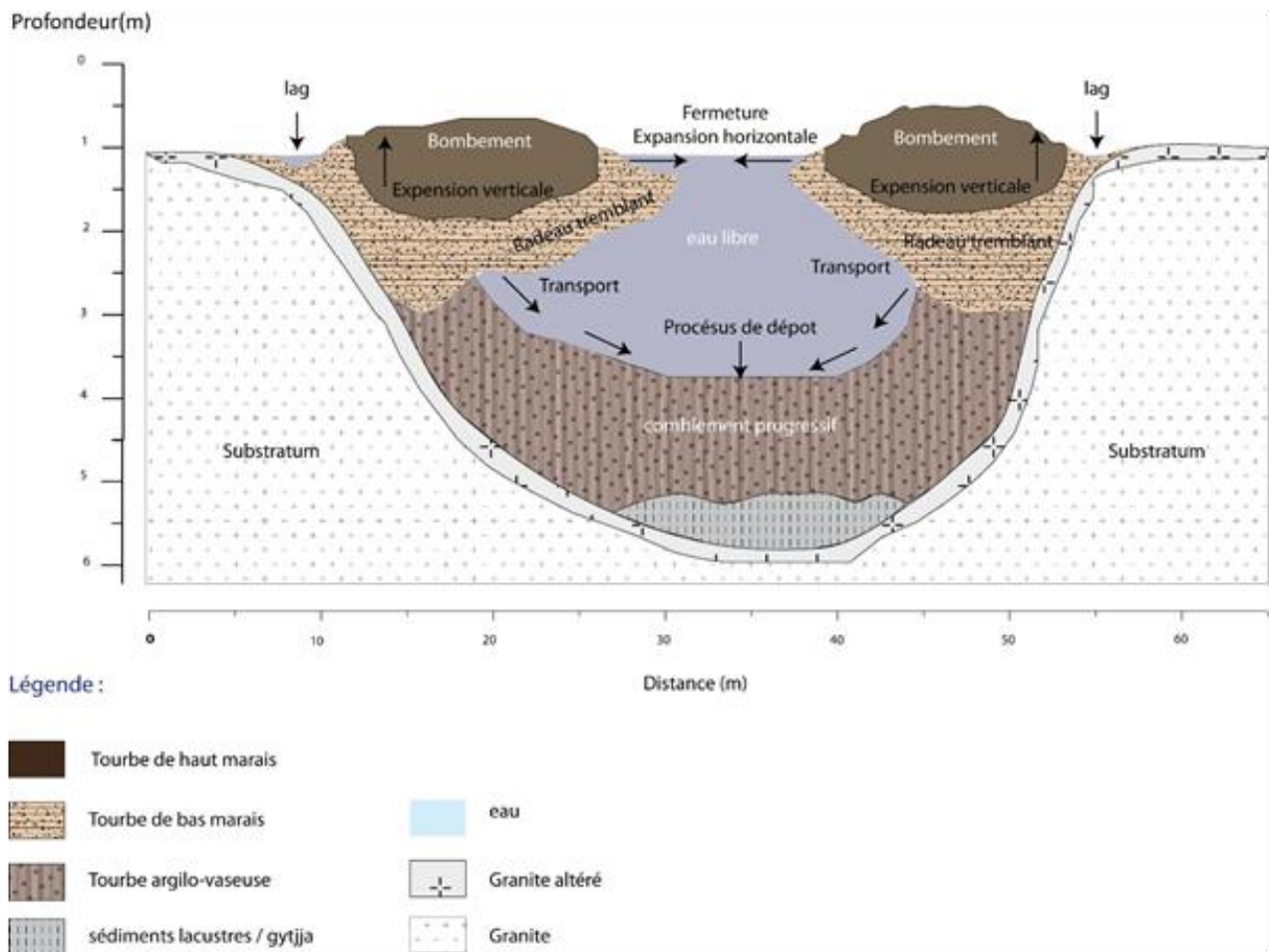


Figure 141 : Processus de formation d'une tourbière ombrotrophe bombée

Lors de l'analyse des dépôts tourbeux, il est fréquent de rencontrer des strates à caractère limnique. Ces sédiments sont souvent identifiés dans les paléochenaux traversant la zone humide ou encore à l'interface tourbe/substratum. La littérature fait référence à un cortège de termes pour désigner ces formations lacustres allochtones (ex : tourbe limnique, tourbe telmatique, marl, gyttja, dy, vase siliceuse, mud, organosapropel...). Les gyttja (gyttje au singulier) désignent un sédiment composite à dominante organique déposé sur le fond d'une cuvette lacustre ou à proximité d'un cours d'eau.

Dans les tourbières limnogènes de socle, on observe souvent la présence de sols paratourbeux sur les secteurs périphériques qui ne présentent pas les mêmes propriétés (notamment hydro-pédologiques) que la tourbe. Le Tableau 15 récapitule les principaux sols paratourbeux rencontrés en contexte de tourbière de tête de bassins.

Cette synthèse typologique permet considérer la diversité des sols hydromorphes souvent qualifiés d'anisotropes (Duranel, 2016). Dans le cadre d'une étude hydro-pédologique sur les histosols, l'intégration des secteurs attenants dans la caractérisation géométrique des faciès est essentielle pour appréhender correctement la transformation du signal hydrologique à l'échelle de la zone humide.

| Dénomination | Définitions |
|---|--|
| Fluvisols | Sols jeunes alluviaux non-différenciés d'origines fluviales |
| Luviosols | Sols hydromorphes subissant ou ayant subi un lessivage des argiles, présence d'horizon éluvial E et d'accumulation (Bt) |
| Colluviosols | Sols de pente développés dans les colluvions |
| Réductisols, dont réductisols histiques ou à horizons histiques | Sols hydromorphes dans lesquels les processus d'oxydoréductions dominent la pédogenèse et pour lesquels la saturation en eau est permanente. Ils sont majoritairement localisés en contexte de reliefs montagneux ou collinéens sous climat froid et humide, dans d'anciennes cuvettes lacustres ou sur des zones de replats. Il existe deux grandes catégories de réductisols : <ul style="list-style-type: none"> - Les réductisols stagniques qui résultent de l'existence d'une nappe perchée permanente. Les horizons surfaciques sont en permanence saturés. Les conditions réductrices sont dues à la présence d'un plancher peu profond et à des apports d'eaux cumulés par précipitations et ruissellements latéraux ; - Les réductisols typiques dont la saturation par une nappe d'origine profonde est permanente au moins dans la partie inférieure du solum avec des variations saisonnières. Ces solums peuvent présenter des formes d'humus hydromorphes caractéristiques : anmoor, horizon histiques, hydromoder... Ces sols sont fréquemment rencontrés en contexte alluviaux avec nappe peu profonde stagnante. Des variantes existent en contexte paratourbeux et présentent des formes de dégradations de l'histosol à la suite de perturbations hydro-pédologiques. |
| Rédoxysols | Ces sols résultent de l'occupation temporaire des espaces poreux interstitiels par l'eau. L'origine de l'eau provient de précipitations et de la présence d'une nappe perchée qui confère aux horizons de surface une couleur rouille qui s'intensifie en profondeur. |
| Pélosols | Sols peu évolués caractérisés par une forte teneur en argile (>40%) se développant sur une roche mère imperméable. |
| Podzols ou podzol | Sols de l'étage montagnard à subalpin, qui se développent sur des matériaux acides et pauvres en cations échangeables en climat humide et froid. Ces sols sont caractérisés par la migration du fer et de l'aluminium et de la matière organique en profondeur (horizon podzologique BP meuble et/ou induré) et la présence d'un horizon cendré de surface caractéristique (E). |

Tableau 15 : Synthèse typologique des sols paratourbeux (d'après Cubizolle, 2019 ; Graillet et al., 2016 ; Afes, 2008)

12.1.2. Structure interne et propriétés hydrodynamiques

| Paramètres hydrodynamiques | Définition | Gamme de valeur acceptée |
|----------------------------|---|---|
| Porosité totale | Volume total des vides par rapport au milieu considéré (Wastiaux, 2008). En hydrologie, elle exprime la quantité d'eau qu'un aquifère ou substrat poreux est susceptible de contenir. | Tourbe saprique : 85 % (Wastiaux, 2008) |
| | | Tourbe peu humifiée (fibrique) : 90 à 95 % (Duranel, 2015 ; Cubizolle, 2019) |
| Porosité efficace | Quantité d'eau qui peut s'écouler librement par gravité. Celle-ci décroît à mesure que la taille des interstices diminue, que la tourbe s'humifie et que l'on s'enfonce en profondeur (Wastiaux, 2008). | Tourbe très fibrique et coussins de sphaignes : 30 % (Wastiaux, 2008) |
| | | Tourbe humifiée (mésique et saprique) : 10 à 15 % (Wastiaux, 2008) |
| Conductivité hydraulique | Capacité d'un aquifère à transmettre l'eau (Wastiaux, 2008). Les tourbes à sphaignes ont des valeurs de conductivité proches des sables et graviers (Wastiaux, 2008). La conductivité hydraulique serait divisée par quatre à 50 centimètres de profondeur (Porteret, 2008 ; Duranel, 2016) | Coussins de sphaignes : 10 ⁻¹ m/s |
| | | Tourbe mésique : 10 ⁻⁴ m/s |
| | | Tourbe saprique : 10 ⁻⁹ à 10 ⁻¹⁰ m/s |
| Densité apparente | Rapport entre la masse sèche et le volume d'un échantillon humide (Payette et Rochefort, 2001) | de 0,02 à 0,254 g.cm ³ (Rezanezhad et al., 2016) |

Tableau 16 : Paramètres hydrophysiques de la tourbe

Les écosystèmes tourbeux sont structurés selon un modèle diplotelmique (Manneville et al, 2010 ; Porteret, 2008 ; Wastiaux, 2008 ; Duranel, 2015 ; Chunjing, 2019). L'acrotelme constitue la partie supérieure de l'histosol et le catotelme la partie inférieure. L'acrotelme correspond à la fluctuation du niveau hydrostatique entre le zéro topographique et la profondeur maximale que peut atteindre le toit

de la nappe. Il constitue la zone la plus intéressante du point de vue hydrologique car il concentre 98% des écoulements (Wastiaux, 2008 ; Cholet et Magnon, 2010). Les valeurs des paramètres hydrodynamiques (ex : conductivité hydraulique, porosité efficace) y sont plus élevées que dans le catotélme du fait d'un degré de moindre d'humification du substrat. Le modèle diplotelmique peut être perturbé par des fissurations occasionnées par des sécheresses prolongées de la masse tourbeuse (Porteret, 2008), appelés pipes (Holden et Burt, 2002 ; Cubizolle, 2019), qui sont susceptibles de concentrer une fraction des écoulements dans la profondeur du catotélme.

L'étude des propriétés hydrauliques et structurales des tourbières est d'importance pour comprendre les mécanismes de transfert des eaux et de modification du milieu. Par exemple, un abaissement de la nappe engendrera un phénomène de subsidence par compression des horizons histiques, entraînant une oxydation de la tourbe et la formation de matériaux granulaires aux propriétés hydrophobes (Duranel, 2015). Si cet abaissement se prolonge, la minéralisation de l'histosol peut s'amorcer et rompre la structure diplotelmique par modification des conditions hydro-pédologiques (Wastiaux, 2008).

Ces éléments illustrent l'importance d'intégrer les paramètres hydrodynamiques pour caractériser le soutien d'étiage. Le Tableau 16 présente les principaux paramètres et les gammes de valeurs rencontrées en fonction du type de tourbe.

12.1.3. Intérêt du couplage géophysique/pédologie dans les tourbières

Si l'analyse du substrat par des techniques relatives à la pédologie s'avère être très efficace pour déterminer les propriétés hydrodynamiques d'un échantillon, l'analyse de la structure des zones humides peut-être réalisée au moyen de méthodes géophysiques. L'association des deux est essentielle pour apprécier avec précision les différentes structures présentes dans une tourbière. Il existe de nombreuses méthodes géophysiques pour déterminer la structure d'un sol et d'un sous-sol (Tableau 17).

| Méthode géophysique | Observations/Résultats | Conclusion | Bibliographie |
|------------------------------|---|--|---|
| Sismique réfraction | Peu de résultats Rapports signal bruit/mauvais | Trop forte atténuation ondes sismiques Peu adaptée | Garambois (2006, 2008) ; Allègre (2007) |
| Sismique réflexion | Résultats probants à haute fréquence en contexte contrasté (ex : substratum calcaire/argile/tourbe) | Inopérant dans certains contextes | Bossuet (1997) |
| Sismique par onde de surface | Absence d'ondes de surface | Inopérant | Garambois (2006, 2008) ; Allègre (2007) |
| Radar géologique (GPR) | Mets en évidence les contrastes diélectriques dans le sous-sol. Forte capacité de résolution | Très adapté en milieu faiblement résistif (ombrotrophe) Facilité de mise en œuvre Recommandé | Lagneau (2006) ; Comas et al. (2005 et 2011) ; Desplanque et Garambois (2010) ; Dallaire (2010) ; Lowry et al. (2009) |
| Tomographie électrique | Mesure de la résistivité apparente Intéressant en contexte minérotrophe | Recommandé en contexte résistif Lenteur d'acquisition | Garambois (2006, 2008) ; Allègre (2007) |

Tableau 17 : Méthodes géophysiques testées en contexte tourbeux

Le radar géologique, ou GPR (Ground Penetrating Radar) est un outil qui repose sur l'émission, la propagation et la réflexion d'une onde à travers un matériau (Dallaire, 2010 ; Garambois, 2006 et 2008). Cet outil peut être utilisé dans différents contextes tels que la recherche d'énergies fossiles, le génie civil ou encore en sciences de l'environnement. En géologie, il est employé pour comprendre et caractériser les mécanismes tectoniques. En hydrologie, il est utilisé pour caractériser les variations des niveaux de nappes et les contrastes eau/substrat/substratum. La compréhension d'un hydrosystème à petite ou grande échelle repose sur la connaissance de son organisation stratigraphique et géologique et ses propriétés hydromorphologiques (Dangeard et al., 2017). L'utilisation du radar géologique peut être intéressante pour caractériser les grandes interfaces, l'épaisseur du substrat étudié, ainsi que les zones de contact, par exemple substratum/gyttja ou tourbe (Dallaire, 2010 ; Lagneau, 2006 ; Lowry et al., 2009).

Le radar géologique est un outil qui permet de définir des unités morphologiques. Si en France l'utilisation de cette méthode d'investigation reste peu documentée, celle-ci est davantage présente dans l'étude des tourbières canadiennes et finlandaises (Cholet et Magnon, 2010 ; Duranel, 2015). La pénétration des ondes radar dans certaines tourbières permet d'en définir les grands traits lithologiques du matériau tourbeux (Dallaire, 2010). Hormis la caractérisation des grandes interfaces, l'utilisation d'ondes radar permet également d'identifier la zone de contact avec le substratum (ex : formations périglaciaires au fond des anciennes cuvettes lacustres) mais également sur les secteurs périphériques ou le substratum affleure.

Le radar géologique est très utilisé dans la détection des canalisations souterraines telles que des oléoducs (Jol et Smith, 1995). Il est également capable de détecter des structures de types pipes (Cubizolle, 2019). L'emploi de cet outil est aussi validé dans l'étude de l'épaisseur de la matrice glaciaire du pergélisol et des formations palsiques des tourbières (Dallaire, 2010). L'accumulation de neige ou de glace en surface est susceptible d'entraîner une altération du signal et de provoquer des réflecteurs et des multiples superflus dissimulant la présence d'interfaces sur les premières strates.

Le radar géologique est un outil utilisé pour caractériser les propriétés des unités stratigraphiques. Le GPR est aussi utilisé pour estimer la présence de gaz retenu dans la fraction organique des systèmes tourbeux (Dallaire, 2010). Prendre en considération la présence de gaz lors d'une étude géophysique est importante car l'abondance de ce dernier est susceptible d'engendrer une diffusion de l'onde (scattering zone) au lieu d'une réflexion, concourant à produire des radargrammes sans réflecteurs apparents. Ce mécanisme a notamment été observé dans l'étude de la tourbière du Caribou Bog dans l'état du Maine aux États-Unis (Comas et al., 2005 et 2011). La forte présence de gaz carbonés a été attestée par des relevés de surfaces indiquant des concentrations élevées de CO₂ et de méthane (CH₄). Ces données sont très intéressantes au regard d'une problématique intégrant la connaissance des propriétés hydrodynamiques d'un site, car si la quantité de gaz varie elle aura pour effet de faire fluctuer la concentration en eau.

Des investigations au radar géologique ont également accrédité que les propriétés stratigraphiques de la tourbe (ex : densité apparente et de matière organique, degré de dégradation et composition botanique) étaient susceptibles de favoriser des variations hydroécologiques, repérables par les ondes radars (Warmer et al., 1990 ; Dallaire, 2010). La structure des tourbières étant basée sur un modèle diplotelmique théorique, mettre en évidence la zone de contact entre l'acrotelme et le catotelme peut s'avérer intéressant. Le radar géologique est susceptible de détecter cette interface (Warmer et al., 1990).

L'interpolation des structures déterminées par méthodes géophysiques et validées par des investigations pédologiques nécessite une bonne compréhension des propriétés du sol. La prospection des sols par la géophysique s'appuie traditionnellement sur la mise en place de campagnes de mesures afin d'obtenir une représentation ponctuelle, selon une coupe (profil) ou une cartographie de la variabilité spatiale des propriétés physiques du sol étudié (Guererro, 2014). La continuité de l'information entre ces différents points de mesure repose soit sur un modèle de terrain supposé (géologie), soit sur une interpolation des données obtenues à partir de prélèvements pédologiques. Le couplage de méthode géophysique et d'analyse stratigraphique aux moyens d'investigations pédologiques est alors essentiel si l'on veut déterminer avec précision la nature des faciès internes (Winiarski et al., 2014 et 2017).

La vitesse de propagation de l'onde est fonction de la permittivité relative (constante diélectrique) du milieu ausculté. L'équation de calcul de la vitesse de pénétration de l'onde dans le sol est la suivante :

$$V = 2 \cdot D / t$$

V : la vitesse (mm.ns⁻¹)

D : distance (mm)

t : temps (ns)

La vitesse moyenne estimée dans les dépôts tourbeux est acceptée entre $0,032 \text{ m}\cdot\text{ns}^{-1}$ et $0,042 \text{ m}\cdot\text{ns}^{-1}$ (Bradford et al, 2005 ; Leopold et Volkel, 2003 ; Rosa, 2007 ; Rosa et al., 2009). L'analyse comparée des informations obtenues par radar géologique et relevés manuels à la perche graduée sur une tourbière minérotrophe de la Baie de James (Québec) met en évidence des vitesses différentes en fonction des couches stratigraphiques traversées. L'interprétation du signal brut a permis de définir des vitesses distinctes pour le manteau neigeux ($0,200 \text{ mm}\cdot\text{ns}^{-1}$), la tourbe gelée ($0,150 \text{ mm}\cdot\text{ns}^{-1}$), la tourbe saturée en eau ($0,035 \text{ mm}\cdot\text{ns}^{-1}$) et l'eau ($0,033 \text{ mm}/\text{ns}^{-1}$). La vitesse de l'onde radar dans la tourbe est donc susceptible de varier selon le degré d'humification (densité), l'état et la part de l'eau qui la compose (Comas et al., 2005). Afin d'obtenir une estimation correcte de la variabilité spatiale de la vitesse des ondes, Rosa et al. (2009) recommandent d'établir 30 mesures à la perche manuelle graduée. Cette technique est essentielle si aucune investigation géophysique par méthode radar n'a été réalisée au préalable sur le site d'étude. Une autre méthode consiste à réaliser une tranchée ou une fosse pour apprécier visuellement les horizons afin de valider le signal du profil radar. Cependant cette méthode présente plusieurs limites : (1) elle est particulièrement destructrice pour ces écosystèmes si fragiles déjà soumis à de fortes contraintes ; (2) elle ne tient pas compte de la variabilité horizontale et verticale des faciès.

En somme, les informations acquises par le radar géologique seront fluctuantes d'un site à l'autre et les conditions de terrain sont susceptibles de faire varier les résultats, même sur des sites considérés comme ayant des propriétés similaires. Certains types de marais seront plus propices à l'utilisation de cet instrument de mesure. Les tourbières ombrotrophes (alimentées par des eaux de précipitations) permettent une meilleure pénétration de l'onde et une plus grande résolution des résultats que les tourbières minérotrophes (alimentées par des eaux de ruissellement) et/ou dégradées du fait de leur plus grande acidité et de leurs faibles teneurs en cations (Dallaire, 2010).

12.1.4. Investigations paléoenvironnementales antérieures menées au Luitel

12.1.4.1. Carotte de tourbe : 10,5 m de profondeur daté à 15 000 ans BP

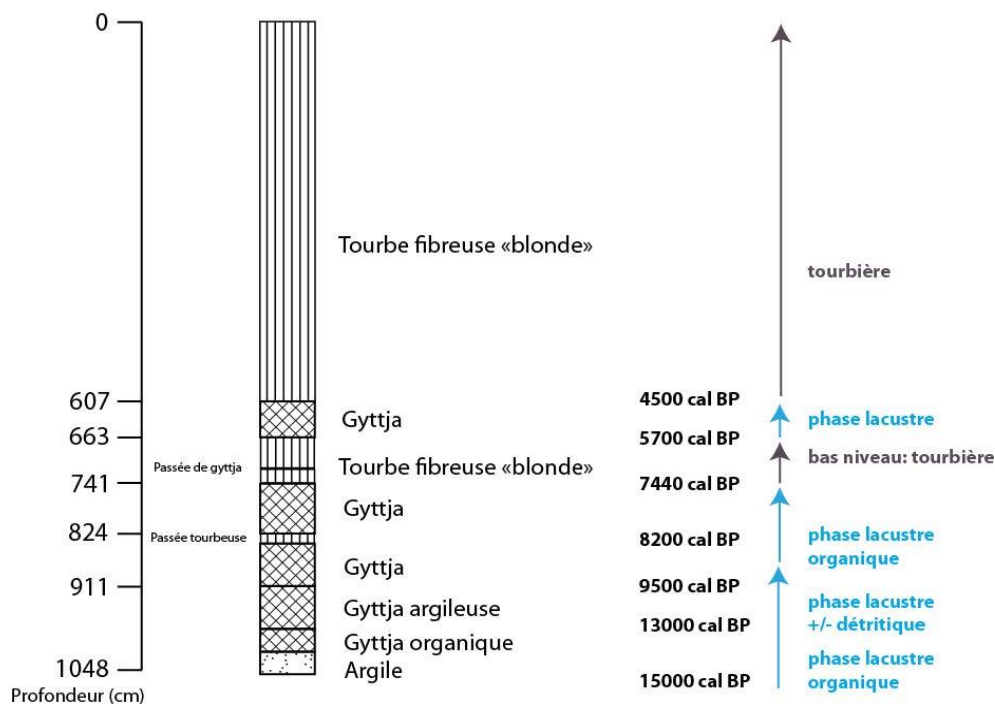


Figure 142 : Interprétation de la série sédimentaire – secteur Nord tourbière du col (Güter et al., 2013).

Des investigations paléoenvironnementales réalisées en 2013 ont posé les bases qui ont permis de connaître les formes d'accumulation et de remplissage sédimentaires sur le secteur nord de la tourbière du col. La série sédimentaire présentée sur la Figure 142 indique des faciès de tourbes fibriques sur les

607 premiers centimètres pour une période estimée à 4 500 ans (Guiter et al., 2013). Entre 607 et 663 centimètres se trouve un faciès de gyttja qui surmonte une passée de tourbe fibrique blonde sur 78 centimètres. Les dernières strates (741 centimètres à 1048 centimètres) correspondent à des gyttja liées à une phase lacustre et détritique du lac. Une couche d'argile vaseuse (dépôts plutôt minéraux) est présente sur les derniers centimètres de la carotte. Même si cette carotte ne représente qu'un travail d'observation et de description in situ et n'a pas fait l'objet d'analyses plus précises sur le plan pédologique en laboratoire, elle permet néanmoins de se faire une première idée de l'histoire paléoenvironnementale du Luitel, mais aussi d'estimer (par datation au ^{14}C) l'âge des sédiments (15 000 BP) et la vitesse de remplissage.

12.1.4.2. Investigations géophysiques : un paléorelief lié à des héritages glaciaires

Afin de reconstituer l'histoire paléoenvironnementale et d'apprécier les relations entre groupements végétaux et épaisseurs de substrat, une étude géophysique a été conduite à partir de 2006 par l'Université de Grenoble (Garambois, 2006 et 2008 ; Allègre, 2007 ; Desplanque et Garambois, 2010 ; Desplanque, 2011). Au préalable, l'analyse des informations issues des piézomètres de la tourbière du col a permis la construction d'une première estimation de la paléotopographie du socle (Figure 143).

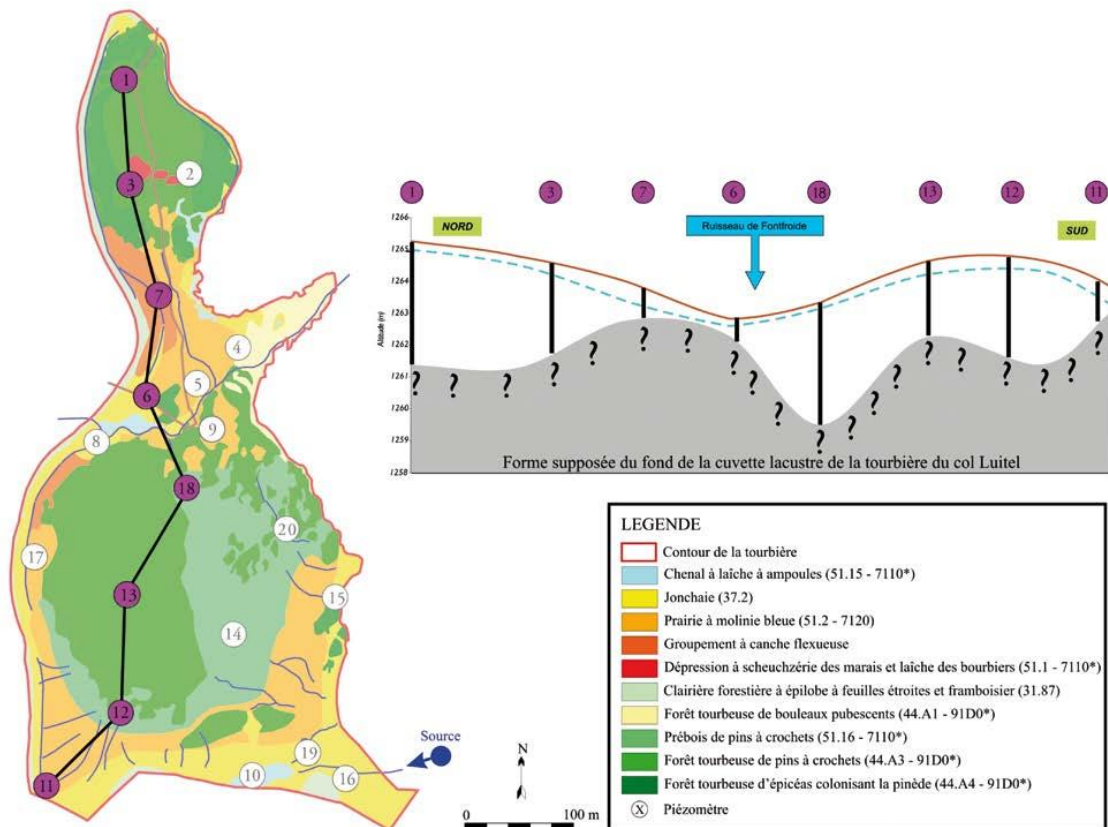


Figure 143 : Première estimation de la paléogéographie du socle de la tourbière du col du Luitel (Desplanque et al., 2010)

Cette première approche, même si elle présente des limites, s'apparente à des sondages à la perche manuelle souvent utilisée comme technique préalable pour caractériser la variabilité spatiale du sol (Rosa et al., 2009). Cela a permis de poser l'hypothèse de l'existence de deux cuvettes lacustres à la fin de la dernière grande glaciation (Würm, 20 000 BP). Afin de tester ces hypothèses et d'estimer le paléorelief de la tourbière du col, deux laboratoires de Grenoble¹⁵ ont sélectionné des méthodes

15. LIRIGM : Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche impliquant la Géologie et la Mécanique ; LGIT : Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique

géophysiques adaptées pour les investigations et la préservation du milieu étudié : différentes méthodes fondées sur des essais de sismique réflexion, l'inversion des ondes de surface et de bruit de fond ont été testées (Garambois et al, 2006). Le caractère organique et spongieux du site atténue la réflexion et a rendu infructueux les premiers essais. Les dispositifs de mesures utilisés lors des phases de tests enregistreraient seulement le passage des véhicules motorisés sur la route bordant la tourbière. Une campagne de tomographie électrique a quant à elle montré des résultats plus intéressants. En effet, celle-ci a mis en évidence le caractère conducteur d'une zone localisée à dix mètres de profondeur ainsi qu'un ensemble plus résistif correspondant au substratum.

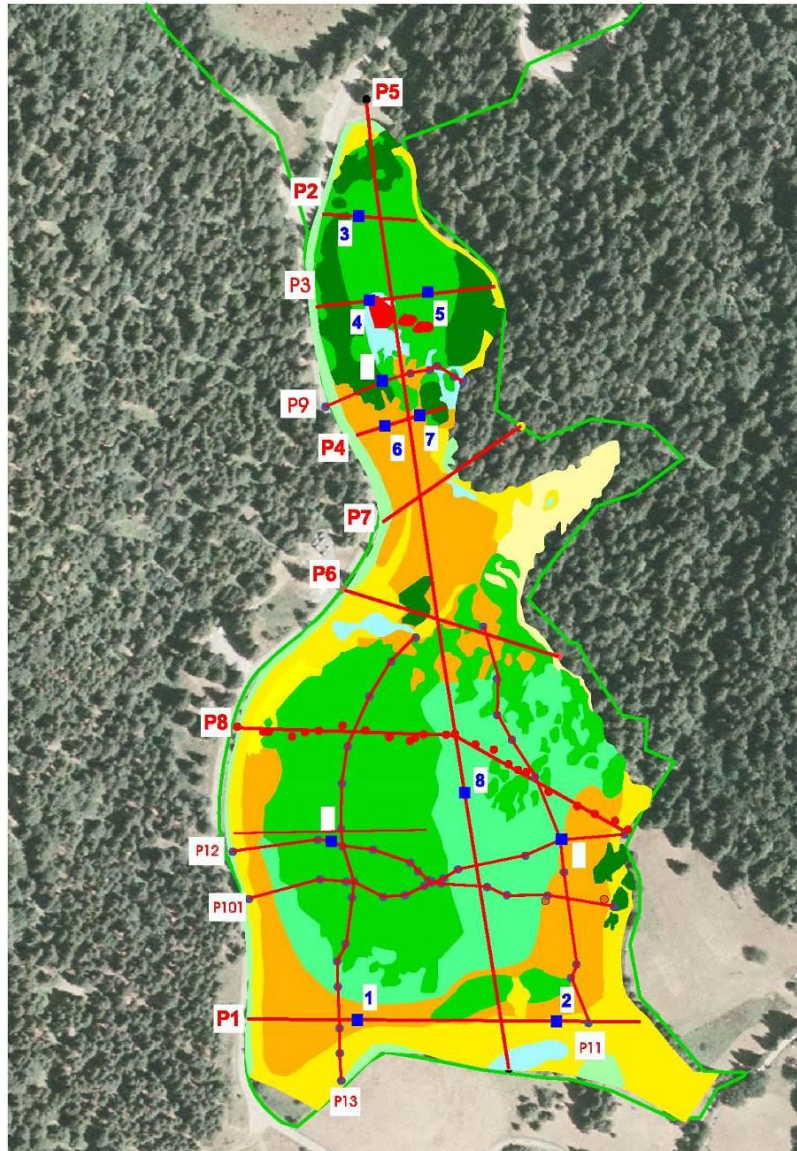


Figure 144 : Localisation de l'ensemble des profils radar et des points CMP effectués en complément (CMP 9 à 11)

Au final, comme pour le site de Frasne, c'est le radar géologique qui a été sélectionné, compte tenu : 1) des faibles conductivités, la tourbière est donc facilement pénétrable par les ondes radars ; 2) de sa facilité de mise en œuvre sur le site. Cette méthode a été jugée la plus apte à fournir une image de la paléostructure du substratum. L'acquisition de données s'est faite à l'aide d'une antenne de 100 MHz et deux dispositifs : 1) le premier en mode offset constant a permis d'obtenir une image du sous-sol ; et 2) le second en collection de points milieu (CMP) a permis de fabriquer un modèle de vitesse en fonction de la profondeur (Desplanque et Garambois, 2010).

Le plan d'échantillonnage a été établi en fonction des grands ensembles d'habitats (selon la base de données Corine Biotope). Au total, 13 profils géophysiques ont été réalisés entre 2005 et 2007 (Figure 144) :

- 10 transects transverses Ouest-Est (P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P101, P12, P14)
- 2 transects longitudinaux sur la partie sud de la tourbière du col orienté Nord-Sud (P11 et P13)
- 1 transect Nord-Sud qui traverse l'ensemble du site (P5).

Les principaux résultats acquis mettent en évidence l'interface substratum/tourbière ainsi que les principaux réflecteurs hydrologiques et pédologiques détectables à cette échelle de mesure. L'hypothèse d'une variabilité latérale et longitudinale de la topographie du substratum est vérifiée. Les profils géophysiques analysés dans Desplanque et Garambois (2010) donnent l'allure générale de la structure basale interne de la tourbière. Le profil P3, par exemple, atteint une profondeur de 10 mètres et met en évidence une cuvette relativement homogène du point de vue géomorphologique. Notons que ce secteur ombrotrophe constitue la zone la plus profonde de la tourbière du col et montre le stade de végétation le moins évolué du site (bas marais à *Scheuchzeria palustris*) par rapport à la dynamique écologique des écosystèmes tourbeux. Le profil P7 situé au niveau du secteur central (zone du col), au contraire, révèle des profondeurs inférieures à 1 mètre entre la surface topographique du sol et celle du socle. Les groupements végétaux associés sont affiliés à des faciès de dégradation des systèmes tourbeux (Manneville et al., 2010) tels que *Molinia caerulea* et *Avenella flexuosa*. Le secteur sud de la tourbière, révèle que la Pinède à sphaignes repose sur une ancienne cuvette lacustre profonde de 2 à 4 mètres. Le profil P1, quant à lui, est situé sur un secteur moins profond (1,5 mètres) avec une végétation de surface représentée majoritairement par la molinie bleue (*Molinia caerulea*) et la canche flexueuse (*Avenella flexuosa*).

En conclusion, cette étude paléotopographique au moyen du radar géologique a permis de définir une zone de contact entre les faciès tourbeux/lacustres et le substratum morainique, en précisant des profondeurs que les sondages palynologiques de Becker (1952) et Wegmuller (1977) n'avaient pu atteindre.

12.2. Matériel et méthode : couplage pédologie/géophysique

Le protocole mis en œuvre dans le cadre du projet ZHTB a su tirer profit des investigations pédologiques et géophysiques réalisées antérieurement. Ce protocole, en articulant méthodes pédologiques et géophysiques, a pour objectif de :

- déterminer la stratigraphie et les grands faciès lithologiques supérieurs qui correspondent à la zone hydrologiquement active de la tourbière. Cette zone de 2 à 4m de profondeur correspond vraisemblablement à l'acrotelme ;
- caractériser les propriétés hydro-pédologiques de ces faciès supérieurs ;
- définir la géométrie 3D des faciès pédologiques identifiés.

12.2.1. Radar géologique : géométrie et structure interne de la tourbière

12.2.1.1. Localisation des profils GPR

La localisation des profils GPR a tenu compte de la position des précédents transects réalisés par Garambois (2008). En réalisant les mêmes transects, nous assurons une continuité avec les travaux précédents et des facilités dans la validation des interprétations des images de subsurface par comparaison avec les profils précédents (altitude du socle morainique notamment). La Figure 145 représente le tracé des profils GPR de l'hiver 2018 superposé à ceux de 2006. Les 13 transects se sont vus attribué la lettre T ou L selon qu'ils sont Transversaux ou Longitudinaux. Le Tableau 18 récapitule les informations préalables principales liées à ces profils.

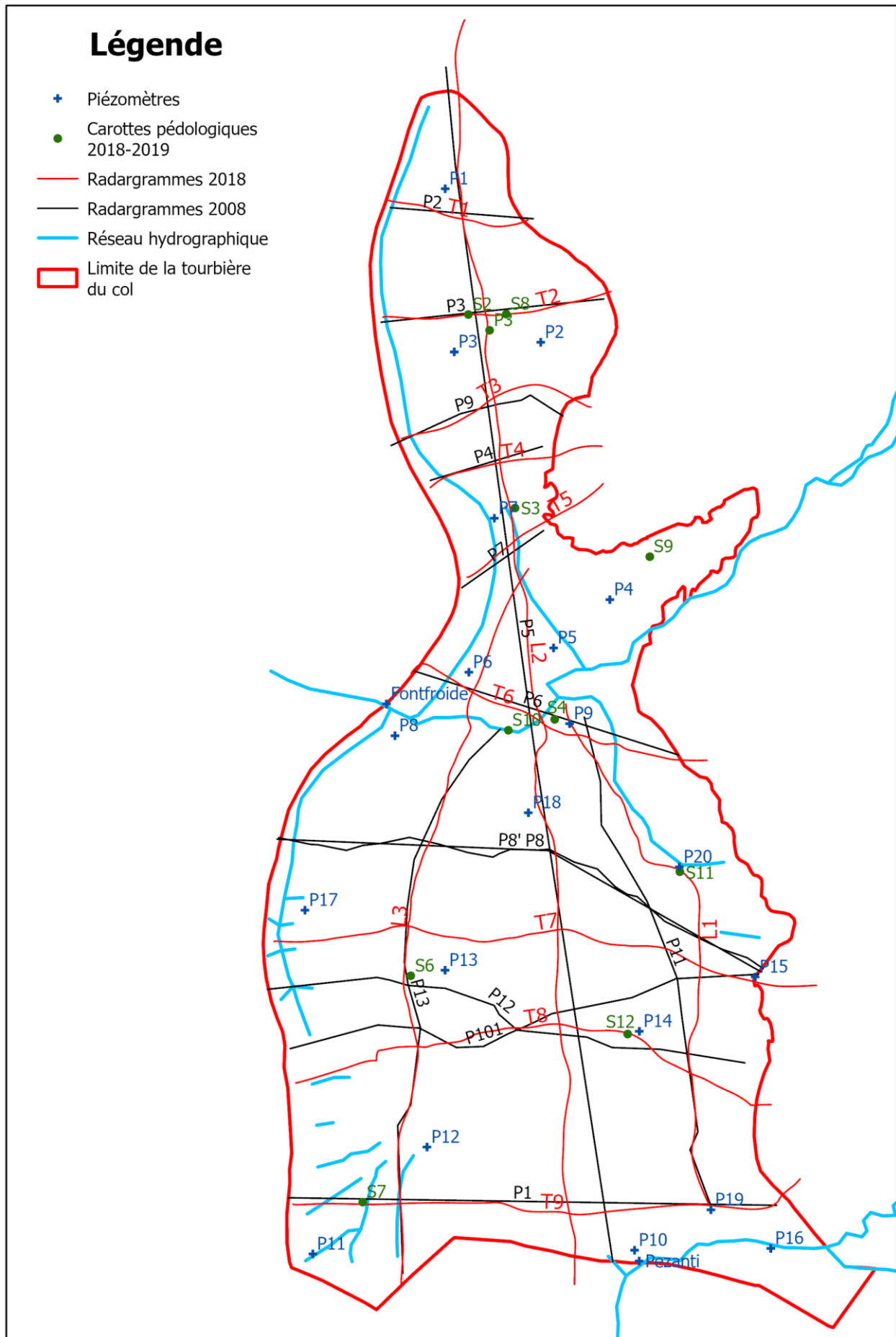


Figure 145 : Localisation des transects GPR (2008 et 2018)

| Secteurs | Nom du transect | Faciès phyto-socio traversés | Longueur (m) théorique | Intersections | Piézomètres et carottes |
|----------|-----------------|---|------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Nord | T1 | 0 à 7 m : <i>Carex rostrata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 7 à 80 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> | 80 | L2 | P1 |
| Nord | T2 | 0 à 10 m : <i>Carex rostrata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 10 à 29 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Rhododendrons ferrugineum</i> 29 m : <i>Schenckzeria palustris</i> , <i>Carex limosa</i> , <i>Chamaenerion angustifolium</i> 29 à 100 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Rhododendrons ferrugineum</i> | 100 | L2 | P2, P3 |
| Nord | T3 | 0 à 10 m <i>Carex rostrata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 10 à 100 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Rhododendrons ferrugineum</i> | 110 | L2 | - |
| Nord | T4 | 0 à 6 m : <i>Carex rostrata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 6 à 68 m : <i>Molinia caerulea</i> | 95 | L2 | S1 |
| Nord | T5 | 0 à 44 m : <i>Molinia caerulea</i> | 90 | L2 | S3-P7 |
| Sud | T6 | 0 à 40 : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 40 à 137 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 137 à 180 m : <i>Pinus uncinata</i> | 180 | L1, L2, L3 | S4-P6, P9 |
| Sud | T7 | 0 à 16 : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 16 à 260 : <i>Pinus Uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 300 | L1, L2, L3 | S6, P15, P13 et P17 |
| Sud | T8 | 0 à 55 m : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 55 à 27 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 270 | L1, L2, L3 | S6, P14 |
| Sud | T9 | 0 à 270 m : <i>Molinia Caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 270 | L1, L2, L3 | S7-P10, P11 et P7 |
| Sud | L1 | 0 à 153 : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 153 à 300 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 300 | T6, T7, T8, T9 | S4-P9 et P19 |
| Nord-Sud | L2 | 37 à 100 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> 100 à 229 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Rhododendrons ferrugineum</i> 229 à 291 m : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 291 à 635 : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 690 | T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9 | S3, S4, S2-P1, P3, P5, P7, P10 |
| Nord-Sud | L3 | 0 à 91 m : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 91 à 295 m : <i>Pinus uncinata</i> , <i>Sphagnum sp.</i> 295 à 390 m : <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum sp.</i> | 390 | L2, T6, T7, T8, T9 | S6-P13 |

Tableau 18 : Informations sur les transects GPR

12.2.1.2. Principes d'acquisition des informations géophysiques

La méthode au GPR s'appuie sur l'émission et la réflexion d'ondes électromagnétiques à partir desquelles on mesure le temps de retour de l'onde émise pour déterminer les structures du matériau traversé (Allègre, 2007 ; Carrick, 2017 ; Bristow et Jol, 2003). Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sol et le sous-sol à partir d'une antenne. L'impulsion électromagnétique produite par l'antenne va se propager sous celle-ci, en s'atténuant et en réfléchissant vers la surface une partie de l'énergie émise à chaque changement d'interface détectable dans le milieu étudié (Winiarski, 2014 et 2017). Les différents échos perçus au cours du déplacement de l'antenne in situ sont enregistrés sous forme de signaux temporels, permettant d'obtenir un radargramme du terrain ausculté (Garambois, 2006 ; Dallaire, 2010 ; Winiarski, 2014). Notons que la profondeur d'émission de l'onde est fonction de la puissance de l'antenne (ex : pour une antenne 400 Mhz il est possible d'ausculter 2,5 m sur tourbière peu résistive). Le choix de l'antenne sera donc effectué en fonction de la résolution et de la profondeur d'investigation souhaitées (cette dernière étant dépendante de la configuration géomorphologique du site d'étude). Cette technique s'avère donc particulièrement intéressante pour estimer la profondeur des réflecteurs dans le substrat tourbeux.

12.2.1.3. Choix du matériel

La méthode du radar géologique nous permet d'acquérir une image de la subsurface grâce à une impulsion électromagnétique envoyée dans le sous-sol à une fréquence déterminée.

- **Profondeur de pénétration et résolution de l'auscultation**

Le radar utilisé est de la marque GSSI (SIR-3300). Le choix de l'antenne a tenu compte de la profondeur d'investigation souhaitée. Ici, notre objectif est d'avoir une image des premières strates de substrat qui correspondent à la zone potentiellement la plus active du point de vue hydrologique. La

profondeur d'auscultation est liée à la profondeur de pénétration des ondes qui sont principalement fonction de :

- la conductivité du substrat encaissant responsable de l'atténuation des ondes. Plus un matériel est conducteur (ex : tourbière minérotrophe), plus la probabilité d'avoir des informations erronées est élevée ;
- la profondeur d'investigation qui décroît lorsque la fréquence de l'antenne augmente ;
- la section équivalente radar qui correspond à l'énergie réfléchiée dans une direction suivant la taille et la forme de l'élément détecté (ex : tronc) ;
- la constante électromagnétique liée à l'augmentation de l'énergie rétrodiffusée ;
- le niveau de bruit diffractant dû à la nature du sol (taille et forme, granulats ou éléments grossiers).

En tenant compte de l'ensemble de ces paramètres, la profondeur d'auscultation varie du zéro topographique à quelques dizaines de mètres dans des matériaux tels que la glace, le sable sec, un substratum sain (Winiarski, 2017).

Du point de vue de la résolution, la longueur d'onde émise (λ) lie directement la profondeur de pénétration de l'onde et la résolution. Cette résolution peut être définie comme « la distance minimale entre deux interfaces pour que ces dernières soient visibles sur le radargramme » (Winiarski, 2014). Du point de vue théorique elle est égale à $\lambda/4$ alors que la résolution réelle est comprise entre $\lambda/2$ et $\lambda/3$. La résolution étant proportionnelle à la longueur d'onde, celle-ci sera d'autant plus importante que la fréquence augmente. Ainsi, une grande longueur d'onde induit une faible atténuation, et plus une résolution est faible et moins l'onde sera affectée par les éléments de taille réduite.

• Sensibilité de la méthode radar

Comme exposé précédemment, les ondes radar sont sensibles aux interfaces air/eau/sédiment ainsi qu'à la qualité et à la quantité de la fraction aqueuse contenue dans les interstices sédimentaires. La connaissance de la capacité du matériau à retenir l'eau est primordiale, car la permittivité diélectrique des phases air/eau/sédiments est différente [1/air, 4-6/sédiments et 80 pour l'eau, Reynolds (2005) in Winiarski (2014)] et susceptible d'inférer l'interprétation des informations acquises. L'émission d'ondes étant la clef dans la détection des éléments du sol, il est primordial de limiter le bruit environnant (ex : onde téléphonique, talkie-walkie, antennes relais...) en conditions d'acquisition. Si des bruits sont visibles sur le radargramme, ceux-ci peuvent être annulés avec des filtres fréquentiels lors du traitement (Dallaire, 2010). En somme, le choix de l'antenne s'avère crucial pour obtenir un consensus entre profondeur auscultée et qualité de la résolution. La profondeur d'investigation étant difficile à estimer avec précision, le choix d'utiliser une antenne de 200 Mhz et/ou de 400 Mhz semble pertinent pour notre étude.



Figure 146 : Acquisition au GPR by night (Desplanque, 2018)



Figure 147 : Matériel utilisé pour l'acquisition géophysique au Luitel (Winiarski, 2014)

À l'arrière-plan de gauche à droite : antenne 100 Mhz, antenne 200 Mhz, antenne : 400 Mhz
 Au premier plan de gauche à droite : SIR 3000, câble de liaison antenne

12.2.1.4. Analyse et interprétation des informations géophysiques

Si les informations acquises sur le terrain permettent d'avoir une première estimation de la nature et de la morphologie des sols sur le site d'étude, des traitements géophysiques et des analyses stratigraphiques sont nécessaires pour définir une géométrie des faciès de la tourbière du col Luitel. L'objectif est de fournir une image interprétant les grandes interfaces à des fins d'interpolations 3D. Les traitements sont réalisés à l'aide du logiciel Radan.

- **Phase de prétraitement réalisée en amont**

Avant l'analyse de l'image radar produite, une série de traitements doit être réalisée afin d'accroître le rapport signal/bruit (Jol et Bristow, 2003 ; Dallaire, 2010). Dans la plupart des cas, les données doivent subir une série de traitements de base afin de rendre possible l'exploitation des radargrammes. Plusieurs séries de correctifs ont été appliqués (Dallaire, 2010) :

- l'annulation des bruits de basse fréquence grâce à l'application de filtres temporels ;
- l'annulation de l'onde aérienne du sol afin d'effectuer le repositionnement du temps zéro (0 ns) à la surface du sol ;
- le rehaussement des signaux les plus faibles en appliquant des fonctions de gain automatique ;
- la migration (notée FK) qui consiste à éliminer la majeure partie des artéfacts électroniques (ex : réflecteurs inexistantes, distorsions, diffractions, inclinaisons...) afin de rendre la représentation du sol plus authentique.

Cette série de manipulation n'est pas exhaustive, mais permet d'illustrer la quantité de travail géophysique nécessaire avant d'arriver à la mise en forme des radargrammes.

- **Normalisation en distance**

La première manipulation consiste à réaliser une normalisation en distance à partir des profils prétraités. Lorsque l'on compare la longueur des profils prétraités sous Radan et celle de la trace relevée au GPS sur le terrain, on observe une distorsion des distances. Pour le profil T8, par exemple, on observe une différence de 20 mètres entre la longueur totale du profil après migration sous Radan et la longueur relevée au GPS sur le terrain. Au final, il s'agit de corriger la longueur du profil prétraité.

- **Correction topographique**

Lors de l'acquisition sur le terrain, les variations topographiques ne sont pas prises en compte. Même si les tourbières ne présentent pas des variations topographiques importantes, il convient d'affecter les variations topographiques au profil GPR (Dallaire, 2010). Ici, ce sont les données lidar (MNT 25 cm) qui ont été utilisées. Même si ces corrections topographiques ne tiennent pas compte des micro-variations (ex : buttes de sphaignes, petites dépressions...) elles permettent néanmoins de dégager les grandes tendances topographiques du site et d'avoir une représentation plus proche du terrain.

- **Détermination des interfaces et des grandes structures internes**

Si des algorithmes sont utilisables pour déterminer les structures au sein des images radar (Dallaire, 2010), l'interprétation visuelle est également couramment employée. (Carrick, 2017, Winiarski, 2017). En effet, les changements de densité de tourbe ainsi que les grandes strates lithologiques constituent des réflecteurs très facilement identifiables. La continuité des réflecteurs permet alors de définir des grandes unités morphologiques. À partir de la bibliographie (Winiarski, 2017 ; Bristow et al, 2003 ; Carrick, 2017), des mesures géophysiques de 2006 et de l'expérience, il est possible d'identifier certains réflecteurs de manière fiable sans avoir recours aux sondages pédologiques. C'est le cas pour le contact tourbe/sédiment lacustre/substratum, le réseau hydrographique, ou encore les sols des secteurs périphériques au contact des remontées du substratum morainique. En revanche, déterminer le type de tourbe au sein de la matrice interne s'avère beaucoup plus complexe. La nature de ces unités sera alors précisée avec les informations pédologiques obtenues par carottages (voir : 12.2.2 Pédologie : validation des structures p169).

Afin d'illustrer la méthode utilisée, la Figure 149 présente une mosaïque d'image pour mettre en exergue les principales caractéristiques d'identification d'un profil brut (Figure 148).

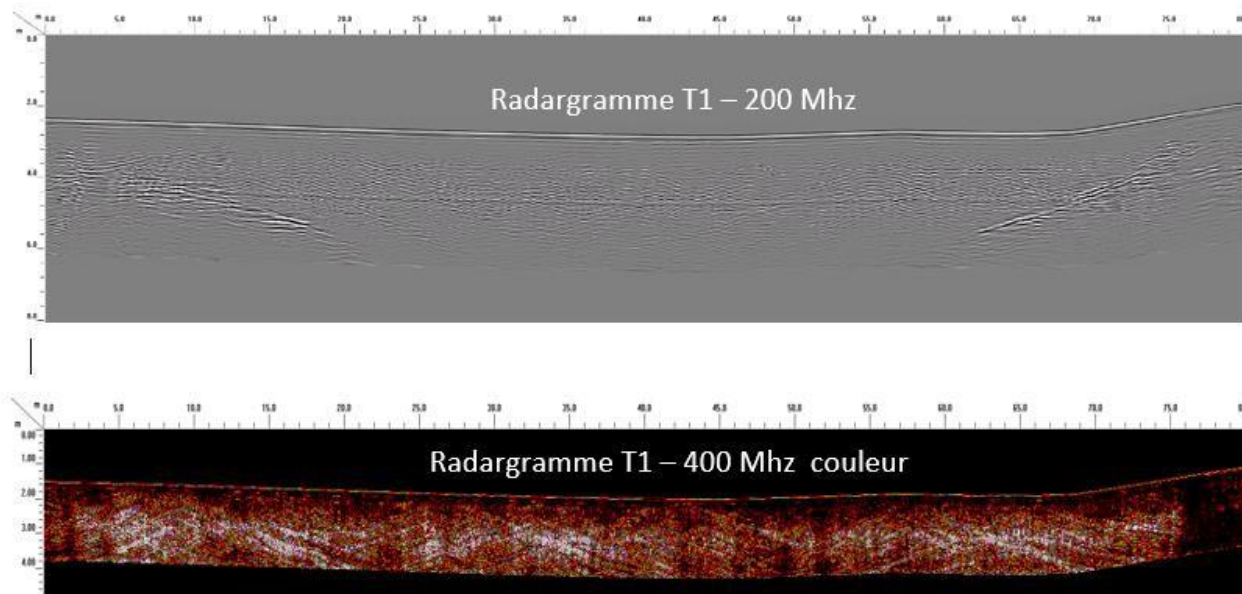


Figure 148 : Radargramme T1 de 200 et 400 Mhz sans interprétation.

Lors de la campagne géophysique de l'hiver 2018, deux antennes de 200 et 400 Mhz ont été utilisées. La profondeur d'auscultation est d'environ 4 mètres pour l'antenne de 200 Mhz contre 2,5 mètres pour l'antenne de 400 Mhz. Pour le traitement des données, nous avons privilégié l'utilisation des radargrammes acquis à 200 Mhz pour la détermination des réflecteurs. Même si la résolution est moins importante à 200 Mhz, ces radargrammes offrent une plus grande lisibilité de la structure interne et permettent un recalage plus aisé vis-à-vis des radargrammes de Garambois (2006). Les radargrammes acquis à 400 Mhz ont été utilisés comme aide à la confirmation d'interprétation et à la dissipation d'incertitudes sur des réflecteurs à caractère hydrologique et pédologique.

Les radargrammes permettent de repérer les différences dans les propriétés structurales de la tourbe. Ces structures doivent toutefois être validées par l'analyse hydro-pédologique des relevés de sédiments prélevés par carottage.

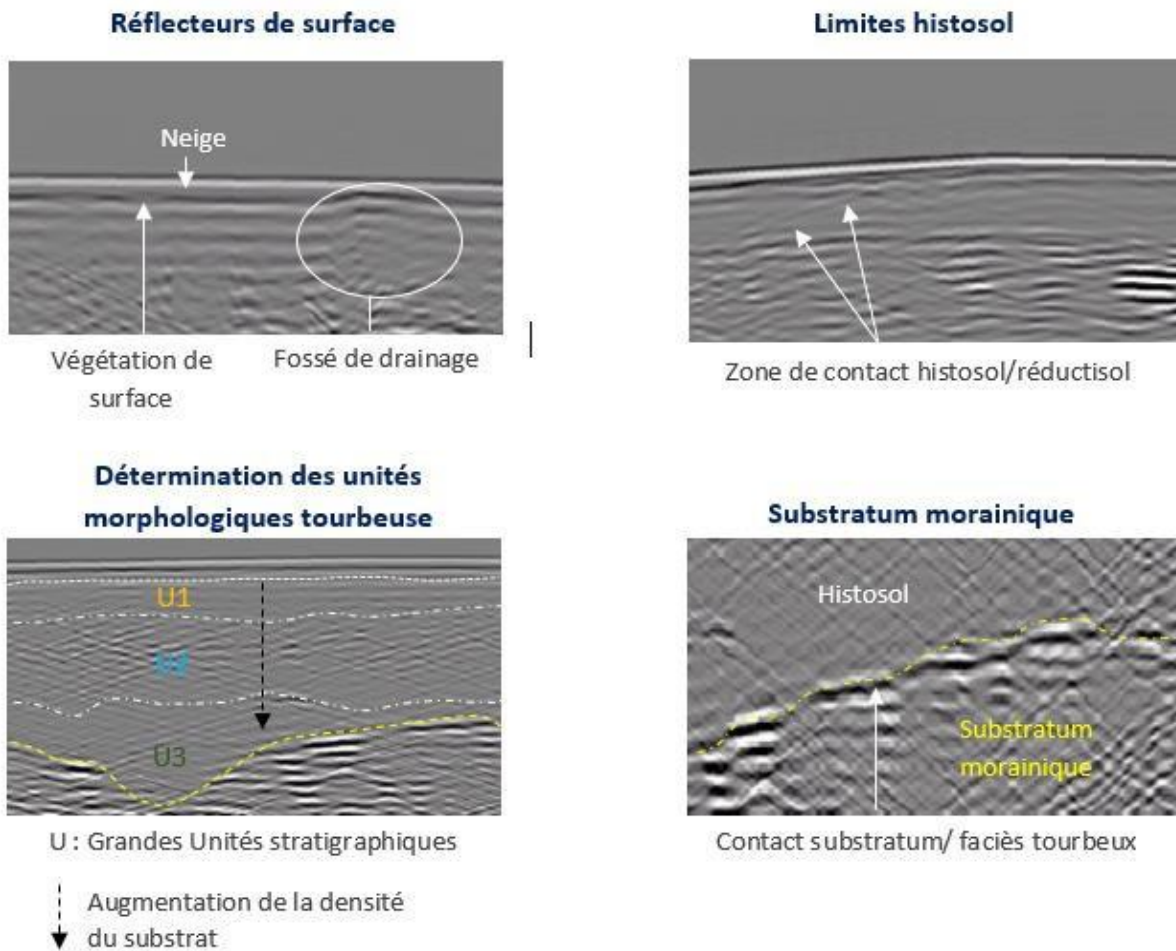


Figure 149 : Clé de détermination d'un radargramme en contexte tourbeux (Logiciel Radan)

12.2.2. Pédologie : validation des structures caractérisées par l'approche géophysique et détermination des propriétés hydrodynamiques

Les prélèvements sédimentaires par carottage sont une phase importante dans le protocole de détermination des faciès stratigraphiques. De la qualité des enregistrements sédimentaires dépendent les étapes ultérieures menées en laboratoire. Depuis 2018, plusieurs séries d'investigations ont été menées afin de mieux connaître le remplissage tourbeux et lacustre des 2 cuvettes du site.

12.2.2.1. Justification du plan d'échantillonnage

La campagne de carottage 2019 avait pour objectif de :

- compléter les prélèvements effectués en 2018 pour des secteurs non investigués ayant des caractéristiques supposées différentes (position, végétation) ;
- préciser la nature des interfaces détectées lors de l'interprétation des données géophysiques ;
- discriminer les secteurs à histosols et à sols paratourbeux pour redéfinir les contours des secteurs à macrotopes tourbeux.

Partie II – Luitel – Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne

La répartition des points de prélèvement tient donc compte de :

- la carte de végétation simplifiée pour effectuer une analyse spatialisée des faciès édaphiques ;
- la proximité du réseau hydrographique qui alimente et draine la tourbière ;
- des transects GPR 2018 afin de positionner les carottes sur les images radar ;
- de l'instrumentation du site comme les piézomètres.

| Année | Nom | Argument | | | | | | Mode de prélèvement | Analyse laboratoire | |
|-------|--------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | Faciès phyto-socio | Proximité d'un ruisseau | Proximité d'un fossé de drainage | Proximité d'un piézomètre | Proximité d'un transect géophysique | Position centre | | | Position périphérie |
| 2018 | T1 | | X | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T2 | | | X | X | | | X | Tarière | non |
| | T3 | | | X | X | | | X | Tarière | non |
| | T4 | | X | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T5 | X | | | | X | | X | Tarière | non |
| | T6 | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | P7-S1 | X | | X | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | P3-S2 | X | | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | P7-S3 | X | | X | X | X | X | | Carottier russe | non |
| | P6-S4 | | X | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | P6-S5 | X | | X | X | X | | X | Carottier russe | non |
| | P12-S6 | X | | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| P1-S7 | X | | X | | X | | X | Carottier russe | oui | |
| 2019 | P3-S8 (C1) | X | | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | S9 (C2) | X | | | X | | X | | Carottier russe | oui |
| | P6-S10 (C3) | | X | | | X | X | | Carottier russe | oui |
| | P11-S11 (C4) | X | X | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | P12-S12 (C5) | X | | | X | X | X | | Carottier russe | oui |
| | T1bis | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | T2bis | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | T3bis | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | T4bis | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | T5bis | X | | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T6bis | X | | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T7 | X | | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T8 | X | | X | X | | | X | Tarière | non |
| | T9 | X | | X | X | | | X | Tarière | non |
| | T10 | X | | X | | X | | X | Tarière | non |
| | T11 | X | | X | X | X | | X | Tarière | non |
| | T12 | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| | T13 | X | | | X | X | | X | Tarière | non |
| T14 | X | X | | X | | | X | Tarière | non | |
| T15 | X | X | | | | | X | Tarière | non | |
| T16 | X | | | | X | | X | Tarière | non | |

Tableau 19 : Justificatif du plan d'échantillonnage pédologique

Le Tableau 19 propose un récapitulatif des lieux de prélèvements. Concernant la nomenclature, les prélèvements ont été nommés une première fois sur le terrain puis renommés pour l'analyse en laboratoire. Par exemple, la carotte C3 devient la carotte S10, avec un P suivi d'un numéro en référence au profil géophysique de 2006 sur lesquels était initialement fondée cette notation. Les prélèvements à la tarière sont notés avec la lettre T pour tarière. La Figure 150 présente la localisation des différents points de prélèvements.

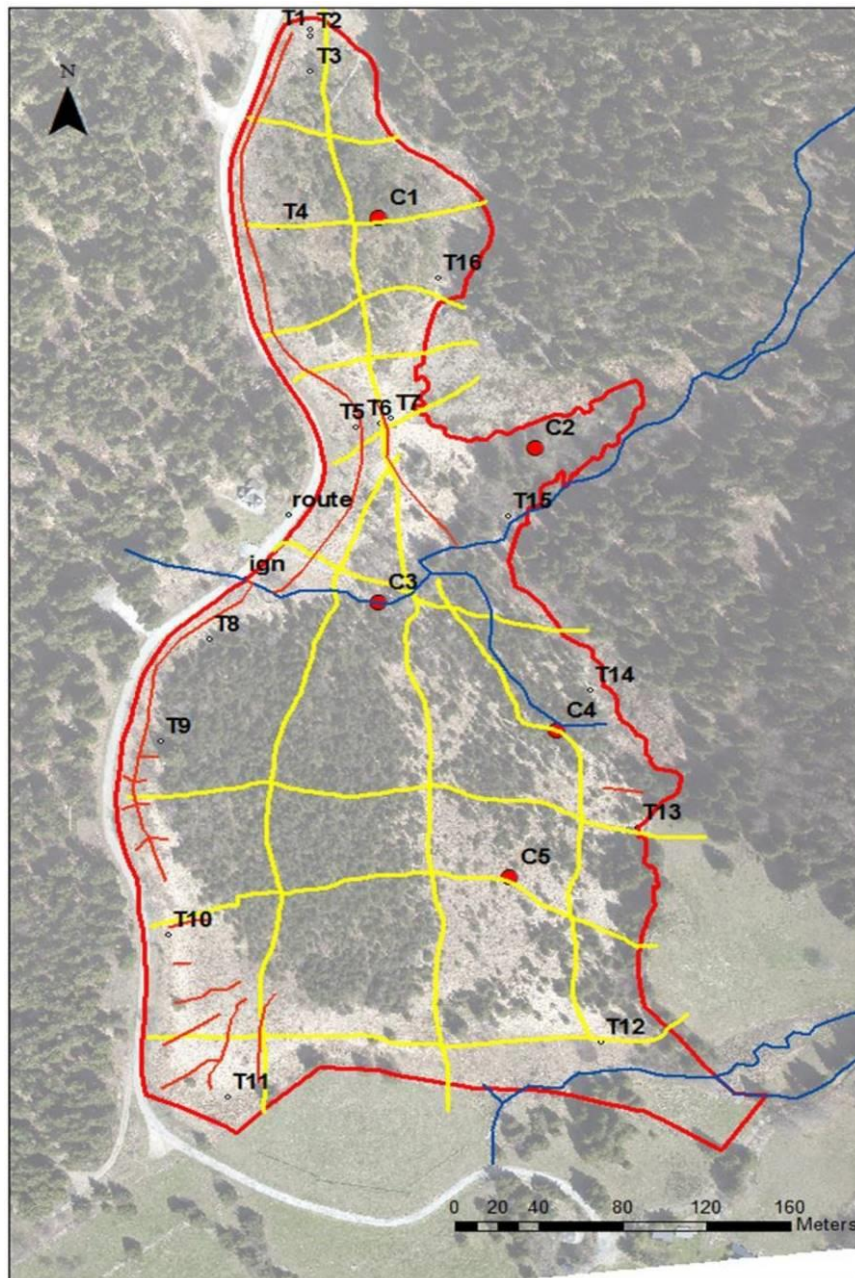


Figure 150 : Localisation des points d'échantillonnage pédologique

12.2.2.2. Prélèvement au carottier russe : validation des structures

Dans le cadre d'une étude à caractère hydro-pédologique, la nécessité d'acquérir des enregistrements sédimentaires de qualité est incontournable. L'outil pédologique éprouvé et le plus couramment utilisé en contexte tourbeux est le carottier russe (Porteret, 2008 ; Guiter et al., 2013 ; Duranel, 2015 ; Dendievel, 2017). Cet outil dispose d'un demi-cylindre fermable grâce à un clapet amovible, permettant de récolter des sédiments en limitant la pollution par les niveaux supérieurs et latéraux. Matériel manuel, il peut descendre sur plusieurs mètres suite à l'ajout successif de rallonges métalliques (Figure 151). Une fois le sédiment extrait (Figure 152), le clapet amovible est retourné pour procéder à l'interprétation in situ (code Munsel, grand faciès lithologique, test de Von Post le cas échéant). Une fois l'interprétation de terrain réalisée, la série sédimentaire est placée dans un demi-tube PVC et conservée en chambre froide au laboratoire. Au cours de cette campagne 2019, les carottages au carottier russe ont été réalisés pour préciser la nature de secteurs à histosols non déterminée en 2018. Lors de la campagne de prélèvement 2019, une fiche technique de terrain du programme RhoMeO a été utilisée. Cette grille permet de renseigner les caractéristiques du sédiment observable à l'œil nu et s'avère particulièrement utile lors des analyses en laboratoire.

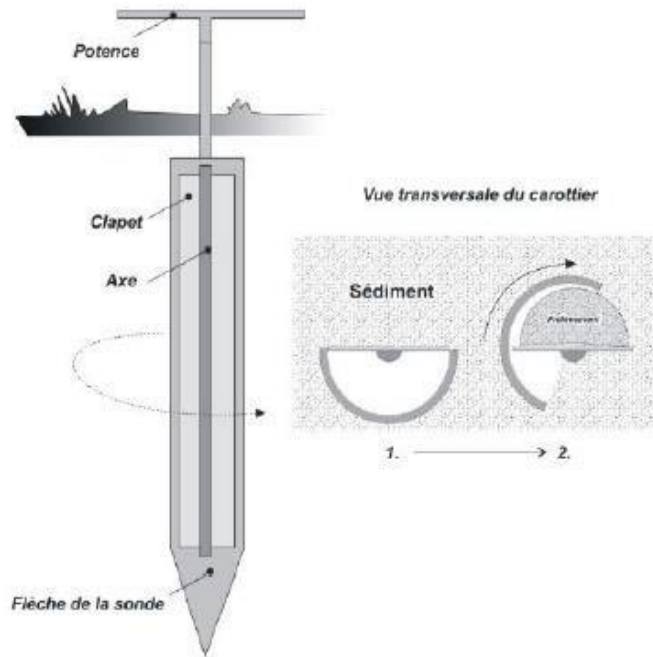


Figure 151 : Principe de fonctionnement du carottier russe (Guiter et al., 2013)



Figure 152 : Carotte S10 (0-60 cm) – ruisseau de Fontfroide

12.2.2.3. Prélèvements à la tarière : détermination des zones de contacts sols/histosols.

Cette technique d'extraction du sédiment plus simple et plus rapide est couramment utilisée en agronomie et pédologie. Privilégiée pour des interprétations in situ, elle se révèle peu propice à l'extraction d'échantillons à des fins d'analyse. Cette technique de carottage a été employée afin de déterminer les limites des histosols et des sols paratourbeux. La méthode retenue consistait à choisir 13 sites de prélèvements sur des groupements végétaux différents. Une fois sur le site, l'objectif visait à prélever régulièrement des échantillons sur un même transect depuis la périphérie vers le centre de la tourbière. À partir du moment où le sédiment relevé est identifié (visuellement) comme appartenant à la gamme des histosols, l'échantillonnage s'arrête et marque la zone de contact histosols/sols paratourbeux. Les informations obtenues ont par la suite été croisées sous SIG avec la carte des habitats Corine biotope, de la végétation de surface et les radargrammes (issus de la campagne géophysique) afin d'établir un périmètre distinguant la tourbière stricto sensu du reste des sols affiliés aux milieux tourbeux.

12.2.2.4. Protocole d'analyse en laboratoire : détermination des propriétés hydropédologiques

Afin de caractériser précisément la nature de la tourbe, il est nécessaire de mettre en place une série d'analyse et un protocole adapté¹⁶. 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 séries sédimentaires concernées par cette analyse concernent les carottes S7, S8, S9, S10, S11. L'ensemble des analyses sédimentaires a été réalisés à la plateforme Omeaa de l'UMR 5600.

12.2.2.4.1. Susceptibilité magnétique

Avant de procéder à l'ouverture de la carotte à des fins d'échantillonnage, une mesure de susceptibilité magnétique doit être réalisée. Non invasive, cette analyse doit être faite sur un sédiment intact (stocké en chambre froide) et non échantillonné afin de conserver l'organisation stratigraphique, structurale et les propriétés physico-chimiques de départ. Cette manipulation a pour objet d'estimer la concentration en minéraux magnétiques dans un échantillon donné (Naudin, 2012). La mesure de susceptibilité va apporter des informations relatives aux conditions environnementales et climatiques (Dearing et al., 2001 ; Naudin, 2012, Salomon, 2013) tels que :

- les conditions redox du milieu qui conditionnent la solubilité et la précipitation des minéraux par voie biologique ou chimique en raison de la forte réactivité du fer ;
- les processus de transports, d'érosions des milieux adjacents ou éloignés (éoliens, fluviaux, glaciaires, ...) et de dépôt.

S'il est admis qu'il est compliqué de déterminer le caractère authigène¹⁷ ou hérité des minéraux détectés (Naudin, 2012), leur présence donne cependant des indices pour discuter les circonstances de leur mise en place. Le caractère principalement organique de la tourbe (induisant une faible portion de minéraux magnétiques) est susceptible de diluer le signal magnétique dans la masse du sédiment, le poussant à la limite de détection (Naudin, 2012). De manière générale, la tourbe étant principalement composée de MO et d'eau généralement faiblement chargée en minéraux, les valeurs affichées à l'écran seront négatives pour les histosols n'ayant pas subi de dégradation.

Le matériel utilisé lors de cette mesure est un compteur MS2B relié à une sonde de susceptibilité calibrée au préalable. Afin d'obtenir des enregistrements exploitables, les mesures ont été réalisées trois fois à des intervalles d'un centimètre.

12.2.2.4.2. Type de tourbe : taux de fibre et teneur en MO

Il s'agit de l'étape préalable à la détermination des propriétés hydrophysiques. Les protocoles d'analyses sont les mêmes qu'en 2018.

- **Détermination du taux de fibre**

La première phase consiste à travailler sur la texture de la tourbe à l'aide la détermination du taux de fibres (fibrique, mésique, saprique). Le protocole mis en place est issu de Cubizolle (2019). Les instruments utilisés pour ce travail sont deux tamis de 50 et 200 microns, des creusets, des coupelles et une étuve.

Le protocole est le suivant :

- prélever un échantillon de tourbe extrait de la carotte sur une longueur de deux centimètres (soit deux centimètres d'épaisseur si l'on considère le mode de dépôt) ;
- diviser cet échantillon en deux parties de poids identiques de manière à obtenir deux échantillons aux mêmes caractéristiques ;
- placer un échantillon à l'étuve à 105°C pendant 24 heures de façon à éliminer l'eau.

16. Les méthodes d'analyse sédimentaire étant similaires à celles de 2018, ce rapport présente une version synthétique des protocoles. Pour obtenir davantage d'informations, vous pouvez vous reporter à Jolly (2018) qui intègre un développement plus détaillé des mesures effectuées.

17. Qualifie ce qui s'est formé sur place (contraire : allogène).

Ce premier échantillon constitue l'échantillon de référence. La suite du protocole se déroule comme suit :

- placer le second échantillon dans un tamis à 200 microns surmontant un tamis de 50 microns ;
- tamiser l'échantillon en le passant sous un faible courant d'eau de manière à entraîner les fibres et particules fines vers les étages granulométriques inférieurs. Il est possible de frotter doucement les fibres avec les doigts, on parle alors de « fibres frottées » (Cubizolle, 2019) ;
- récupérer les refus de tamis à 200 et 50 microns et les placer dans une étuve à 105°C de façon à éliminer l'eau ;
- peser les refus de tamis à 200 et 50 microns une fois les 24 heures de séchage écoulées. La pesée de l'échantillon de référence est également effectuée.

La part de chaque fraction (200 et 50 microns) est calculée en rapportant leur poids sec au poids sec total de l'autre échantillon. Nous pouvons obtenir par soustraction les éléments fins inférieurs à 50 microns perdus dans l'évier. L'expression des résultats se fait en pourcentage. L'échantillon de référence doit être conservé pour la suite des mesures.

Le pourcentage de fibres supérieur à 200 microns détermine le type de tourbe (Tableau 20). Les tourbes fibriques ont un taux de fibres à 200 microns supérieur à 40%, les tourbes mésiques entre 10 et 40 % et les tourbes sapriques très humifiées un taux inférieur à 10 % (Manneville, 2010 ; Cubizolle, 2019).

Les valeurs des fractions à 200, 50 et inférieur à 50 microns sont employées pour déterminer la texture grâce au triangle des textures des tourbes. Cet abaque permet d'obtenir une texture du sédiment plus précise que la méthode de détermination du taux de fibre à partir des refus de tamis à 200 microns. La Figure 153 donne un exemple de détermination de la texture en s'appuyant sur un échantillon présentant le type fibrique pur.

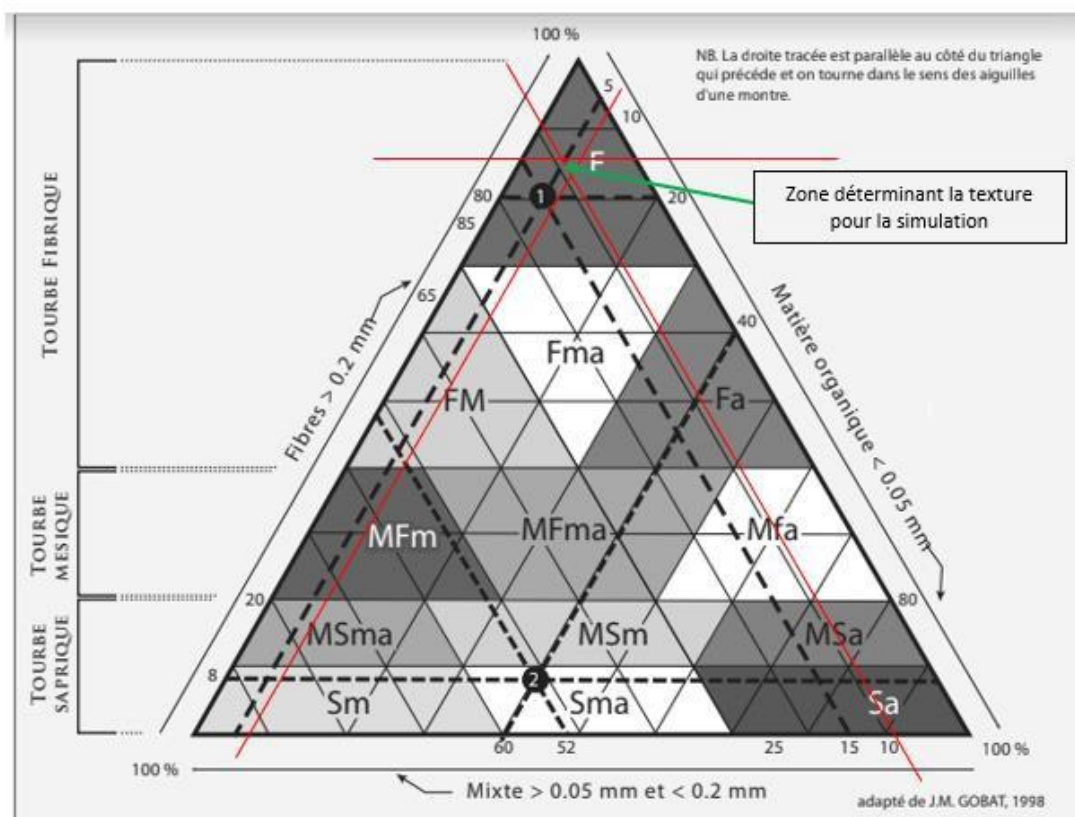


Figure 153 : Simulation d'utilisation du triangle des textures des tourbes

Taux à 200 µm : 84,4% ; Taux compris entre 200 et 50 µm : 8,1% ; Taux < à 50 µm : 9,5%

| Type de tourbe | Taux de fibre | Texture précise |
|----------------|---------------|--|
| Fibrique | > 40 % | F : fibrique pur |
| | | Fm : fibrique à mixte |
| | | Fma : Fibrique à mixte et MO amorphe |
| | | Fa : Fibrique à MO amorphe |
| Mésique | 10 à 40 % | Mfm : Mésique fibrique à mixte |
| | | Mfma : Mésique fibrique à mixte et MO amorphe |
| | | Mfa : Mésique fibrique à MO amorphe |
| | | Msm : Mésique saprique à mixte |
| | | Msma : Mésique saprique à mixte et MO amorphe |
| | | Msa : Mésique saprique à MO amorphe |
| Saprique | < 10 % | Sm : Saprique à mixte |
| | | Sma : Saprique à mixte et MO amorphe |
| | | Sa : Saprique à MO amorphe |

Tableau 20 : Classement des textures des tourbes (Cubizolle, 2019)

• Détermination du taux de MO

La détermination de la teneur en matière organique est effectuée selon la méthode par perte au feu (PAF) précisément décrite et discutée dans la littérature (Heiri et al, 2001 ; Cubizolle, 2019). Elle permet de comparer les poids de l'échantillon avant et après avoir été calciné au four, afin de déterminer le taux de MO (Cubizolle, 2019). Selon la littérature et les protocoles, la matière organique est éliminée lors du processus, ne laissant à la fin que la matière d'origine minérale. Pour ce travail, nous avons choisi une méthode de calcination (Cubizolle, 2019) qui brûlent les échantillons dans un four à 550°C pendant 4 heures.

Le protocole est le suivant :

- placer l'échantillon de référence issu de la première étape dans un creuset ;
- programmer le four pour une calcination du sédiment à 550°C pendant quatre heures (sans paliers) ;
- laisser le four redescendre en température avant de récupérer et de peser à nouveau les échantillons.

La valeur obtenue à la suite de la pesée sera rapportée au poids sec de l'échantillon initial (Équation 8). Les valeurs obtenues sont ensuite positionnées graphiquement pour tracer la courbe du taux de MO.

$$\text{PAF} = (\text{Poids sec initial} - \text{PAF arrivée}) * 100$$

$$\text{MO (\%)} = 100 - \text{PAF}$$

Équation 8 : Formule théorique pour le calcul du taux de matière organique

Les tourbes à sphaignes très fibriques sont caractérisées par des valeurs supérieures à 95 %. Au contraire, les échantillons présentant des valeurs inférieures à 30 % de MO s'ils sont encore considérés comme riches en MO ne sont plus considérés comme des histosols. Pour les tourbes présentant un taux de MO inférieur à 60 %, il est préconisé d'appliquer un facteur de correction (Howard, 1964 in Cubizolle, 2019) (Équation 9). Les expériences menées en 2018 démontrent que ce facteur de correction ajuste les valeurs à la marge et ne suffit généralement pas à déclasser un sédiment.

$$\text{MO (\%)} = \text{PF} - ((2.04 \times \text{\% de cendres}) / 100)$$

Équation 9 : Correction de la formule théorique de calcul du taux de matière organique

Si l'on cherche à apprécier de façon plus précise la variation du degré de MO au sein d'une série sédimentaire le calcul de la teneur en Carbone Organique est particulièrement intéressant (Équation 10).

$$CO = MO (\%) \times 0,58$$

Équation 10 : Formule théorique de calcul de la teneur en carbone organique

Si le taux de fibre, le taux de MO et les interprétations in situ mettent en évidence un horizon à forte fraction minérale dans la série sédimentaire, il convient de procéder à une analyse par granulométrie laser pour les faciès concernés. Les carottes de 2019 ne présentant pas de faciès organo-minéral, cette méthode d'analyse ne sera pas présentée dans ce document¹⁸.

• La détermination des propriétés hydrauliques et structurales

| Propriétés hydrauliques et structurales | Définition | Formule littérale | Plage de valeurs dans la littérature | | Sources bibliographiques |
|---|---|--|--------------------------------------|-------|--|
| Densité apparente MVA | Rapport de la masse d'un échantillon sec au volume de l'échantillon frais | $MVA = \frac{\text{Masse éch. sec}}{\text{Volume éch. frais}}$ | Tourbe fibrique | 0,048 | Manneville (2010) ; Payette et Rochefort (2011) ; Cubizolle (2019) |
| | | | Tourbe mésique à fibrique | 0,091 | |
| | | | Tourbe mésique à saprique | 0,018 | |
| Masse volumique réelle MVR | Étape intermédiaire pour établir la porosité totale. Rapport entre la masse et le volume occupé par les solides | $F = \frac{(PAF \times 2)}{(\text{masse départ éch. de réf. av. étuve} \times 2)}$ | - | | Cubizolle (2019) |
| | | $MVR \text{ (mg/l)} = \frac{1}{(1/F^*) / ((2.7 + 1 - F) / 1.5)}$ | | | |
| Porosité totale Pt | Fraction interstitielle d'un échantillon de sol. Plus sa part est grande plus il contient de l'eau | $Pt = \frac{(MVR - MVA)}{MVR} \times 100$ | Tourbe fibrique | > 95% | Cubizolle (2019) |
| | | | Tourbe humifiée | < 85% | |
| Taux d'humidité TH(%) | Les fractions interstitielles étant aussi occupées par des gaz, cette formule est plus précise | $Meau(g) = MH - MS \text{ où :}$ <p>Meau = Masse de l'eau MH = Masse échantillon Humide (avant étuve) MS = Masse échantillon Sec (après étuve)</p> | - | | Cubizolle (2019) |
| | | $TH(\%) = \frac{Meau}{MH} \times 100$ | | | |

Tableau 21 : Synthèse de détermination des propriétés hydrauliques et structurales

La caractérisation des propriétés hydrauliques et structurales (porosité totale, porosité efficace, conductivité hydraulique...) des sédiments est essentielle pour arriver à comprendre les mécanismes de transfert d'un signal hydrologique au sein d'une tourbière. Les éléments de discussion méthodologiques relatifs à la détermination des propriétés hydrophysiques ayant déjà été abordés dans l'étude de Jolly

¹⁸ Un protocole détaillé est documenté dans Jolly (2018).

(2018), nous proposons une synthèse des méthodes de détermination et de calcul dans le Tableau 21 et le Tableau 22.

| Typologie de milieux | Conductivité hydraulique (m/s) | Porosité efficace (%) |
|--|--------------------------------|-----------------------|
| Coussins de sphaignes/ Tourbe fibrique | 10^{-1} m/s | 30% |
| Tourbe mésique | 10^{-5} m/s | |
| Tourbe saprique | 10^{-9} m/s | 10 à 15% |

Tableau 22 : Valeurs de référence (Wastiaux, 2008)

12.2.3. Interprétation croisée des carottes et des profils géophysiques

Grâce aux différents prélèvements effectués entre 2018 et 2019, nous disposons d'un socle d'informations conséquent et solide pour déterminer l'organisation stratigraphique des différents microtopes du mésotope du col Luitel. Rappelons qu'au final, l'objectif est d'obtenir une représentation 3D de la géométrie et de la structure de la tourbière du col.

Afin d'atteindre cet objectif, une interprétation croisée des archives paléoenvironnementales (carottes) et des radargrammes a été effectuée. Si l'organisation stratigraphique est caractéristique de l'ensemble des faciès sédimentaires du microtope, cette méthodologie permet d'extrapoler les résultats des carottes aux structures identifiées grâce à la géophysique. De plus, les informations relatives à la végétation de surface, aux systèmes de perturbation, aux réseaux hydrographiques et aux limites histosols/réductisols ont également été utilisées pour tenter d'obtenir une représentation réaliste et intégrée de la structure interne du mésotope tourbeux du Luitel. La topographie du socle déterminée grâce aux profils de Garambois (2006) a, quant à elle, été recalée par rapport à la topographie de surface.

Les résultats préliminaires obtenus par Jolly (2019) avec le logiciel Rock ware ont été ajustés et validés. Les données validées ont été intégrées dans ArcGis Pro puis traitées grâce à ses outils d'interpolation et fonctions 3D (voir §.12.6, p202)

12.3. Résultats : pédologie

Les travaux conduits en pédologie visaient à caractériser l'organisation stratigraphique de la tourbière et à déterminer les paramètres hydrodynamiques des différentes structures identifiées.

12.3.1. Rappel des principaux résultats acquis en 2018

La majeure partie de la tourbière est composée de tourbe fibrique sur les premiers centimètres de l'acrotelme. Ce type de tourbe présente des propriétés hydrauliques intéressantes tant du point de vue du stockage que des écoulements. Cependant, des horizons assainis sont présents à l'affleurement notamment dans les secteurs centraux de la tourbière. Ces mêmes horizons sont également visibles à 15 centimètres de profondeur dans la zone centrale et dans la majeure partie de la moitié Sud-Ouest. À 30 centimètres de profondeur, les horizons assainis deviennent moins présents et restent circonscrits aux secteurs bordant la pinède Sud et au Nord de la zone centrale. À 50 centimètres de profondeur, l'intégralité de la tourbière révèle des sols histosols fibriques à sapriques selon les endroits. Les premiers résultats montrent une reprise quasiment généralisée de la turfigenèse. Par ailleurs, la tourbière du col du Luitel n'est pas uniquement composée de pédofaciès tourbeux, mais aussi de réductisols présents sur une majeure partie des secteurs périphériques.

Une grande carotte d'environ 5 m prélevée en 2018 (P6-S4 ou S4 sur la Figure 145) dans le secteur de Fontfroide amont proche du piézomètre P9 a fait l'objet d'investigations plus poussées (^{14}C , teneurs en azote et en carbone, pertes au feu). Ces analyses ont permis de réaliser une première reconstitution de l'histoire hydro-pédologique de la tourbière du col du Luitel (partie sud) durant les 9 500 dernières années.

12.3.2. Texture et stratigraphie

À partir de l'observation in situ des faciès et de l'analyse des échantillons en laboratoire, nous avons déterminé la stratigraphie complète, le type de tourbe et la texture précise pour chaque carottes (S8, S9, S10, S11 et S12). La Figure 154 présente la localisation des points de prélèvements.

12.3.2.1. Description des carottes

- **Carotte S8** : semble représentative du type de sol rencontré à l'Est de la dépression à Scheuchzérie et sphaignes situées sur la partie nord, dans la pinède à Sphaigne. La série sédimentaire prélevée (170 cm) se compose exclusivement de tourbe blonde fibrique. L'analyse de la texture révèle une alternance de passée fibrique à mixte entre 10 et 18, 60 et 105 et de 148 à 170 centimètres.

- **Carotte S9** : se situe dans un secteur boisé à l'extrémité Est de la tourbière. Pour rappel ce secteur n'a pas subi d'investigation géophysique du fait de l'impraticabilité du milieu. Sur ce profil marqué par un refus à 110 cm, nous relevons de la tourbe fibrique pour les 30 premiers centimètres, surmontant un horizon assaini de 25 cm. Une phase mésique est ensuite enregistrée pour les 15 cm suivants. Les derniers centimètres sont exclusivement composés de tourbe fibrique. La texture est fibrique pure pour les 30 premiers centimètres. Le triangle des textures n'intégrant pas la caractéristique texturale d'un horizon en cours de minéralisation, les phases liées à ces couches ne seront pas caractérisées. Sous les faciès de la strate assainie, nous relevons un faciès de tourbe mésique à fibrique surmontant un faciès de tourbe mésique à saprique. De la tourbe fibrique est présente entre 70 et 85 cm, avant de laisser place à un étage fibrique à mixte jusqu'à 110 cm de profondeur.

- **Carotte S10** : est localisée sous le ruisseau de Fontfroide. La profondeur d'investigation sédimentaire est de 120 cm à partir du fond du lit du cours d'eau, soit 180 cm si l'on considère la lame d'eau écoulée dans le ruisseau lors du prélèvement. Du point de vue stratigraphique, l'ensemble de la carotte est composé de tourbe fibrique. L'assemblage lithologique présente une alternance de tourbe fibrique et de tourbe fibrique à mixte. La tourbe fibrique pure est présente entre 28 et 72 cm, puis 75 à 118 cm.

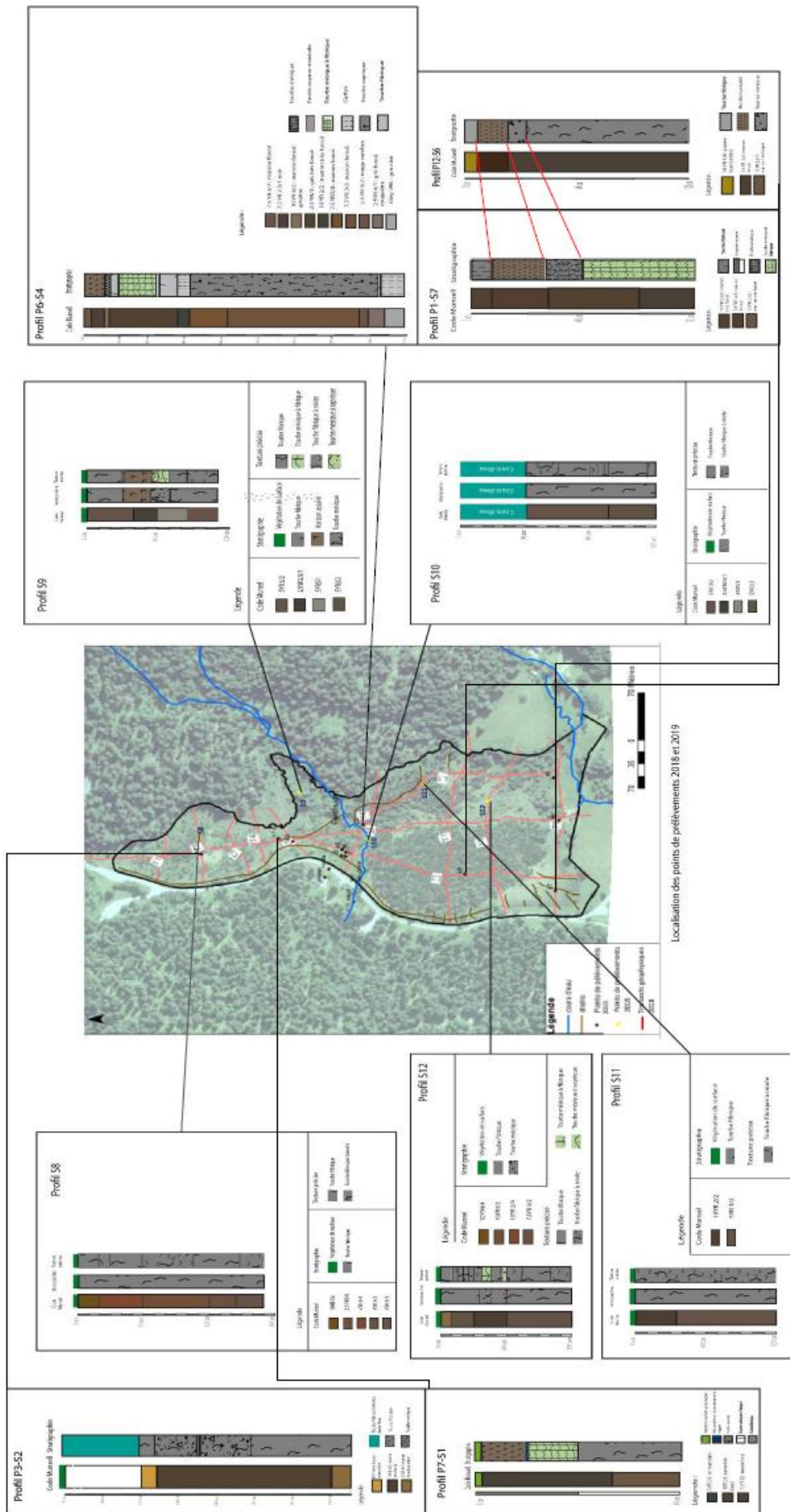


Figure 154 : Synthèse stratigraphique couplée des points de prélèvements au carottier russe 2018 et 2019

- **Carotte S11** : a été réalisée à proximité du « coude » du ruisseau sans nom au Sud-Est de la tourbière du col à proximité de P20. Du point de vue stratigraphique, le profil prélevé de 120 cm est exclusivement composé de tourbe fibrique blonde. Le triangle des textures associe l'ensemble de la section sédimentaire à de la tourbe fibrique à mixte.

- **Carotte S12** : est issu d'un prélèvement dans la partie sud est de la tourbière, dans un secteur de clairière à sphaigne proche de P14. Le profil prélevé (120 cm) est dominé par de la tourbe fibrique. Des passées de tourbe fibrique sont identifiées entre 35 et 45 cm ainsi qu'entre 58 et 60 cm. On observe une alternance de tourbe fibrique à mixte et fibrique pure sur les 38 premiers centimètres. Entre 38 et 45 cm, nous sommes en présence de faciès fibrique à mésique. Puis nous retrouvons une alternance de faciès fibrique et fibrique à mixte avant de laisser place à une passée de tourbe mésique à saprique. Les derniers 60 cm sont marqués par 15 cm de tourbe fibrique à mixte, puis 25 cm fibrique et encore 20 cm de tourbe fibrique à mixte.

12.3.2.2. Synthèses croisées 2018 et 2019

Si l'on totalise les prélèvements 2018 et 2019, nous n'avons pas moins de 10 carottes analysées sur une surface de 10 hectares. Ceci permet de dresser une observation assez précise de la répartition des pédofaciès par secteur.

- **Secteur Nord** : la carotte S2 montre une large fraction de sphaignes surnageant et surmontant un faciès fibrique. Une passée mésique est présente avant que l'on retrouve de la tourbe fibrique. La tourbe fibrique est l'élément caractéristique du deuxième prélèvement (S8) moins profond, soit 120 cm pour S8 contre 450 cm pour S2. Le reste de la pinède est caractérisé, dans sa partie la plus boisée par des horizons de subsurface de tourbe mésique à saprique.

- **Secteurs centraux** : les carottes de secteurs présentent une caractéristique commune dans leur organisation lithologique : la présence d'un horizon assaini en surface ou dans les faciès sous-jacents. La présence d'horizons mésiques à fibriques sous l'horizon assaini est également caractéristique de cet assemblage pédologique. Des horizons de gyttja sont également présents dans la carotte S4 prélevée à côté du cours d'eau de Fontfroide. La carotte S10 prélevée sous le cours d'eau est exclusivement composée de tourbe fibrique.

- **Secteur Sud** : il peut se découper en deux grands sous-ensembles avec un secteur marqué par des horizons perturbés à l'Ouest et des histosols fibriques en bon état à l'Est. À l'Est, nous retrouvons des organisations stratigraphiques identiques avec cependant des variations d'épaisseurs (S6 et S7). Les derniers étages affichent des différences avec de la tourbe fibrique pour S6 et de la tourbe mésique à fibrique pour S7. Notons que ces prélèvements sont réalisés dans des polygones de végétation différents. À l'Ouest, nous sommes en présence d'horizons marqués par une dominance de tourbe fibrique. Le prélèvement à proximité du ruisseau sans nom (à l'extrême Est du site) est composé exclusivement de tourbe mésique. L'autre prélèvement présente des passées fibriques à respectivement 35 et 58 cm de profondeur.

- **Secteurs périphériques** : ces secteurs périphériques ont été prospectés à partir d'une tarière pédologique. Nous sommes globalement sur des réductisols.

12.3.3. Chroniques sédimentaires

12.3.3.1. Chroniques sédimentaires S8

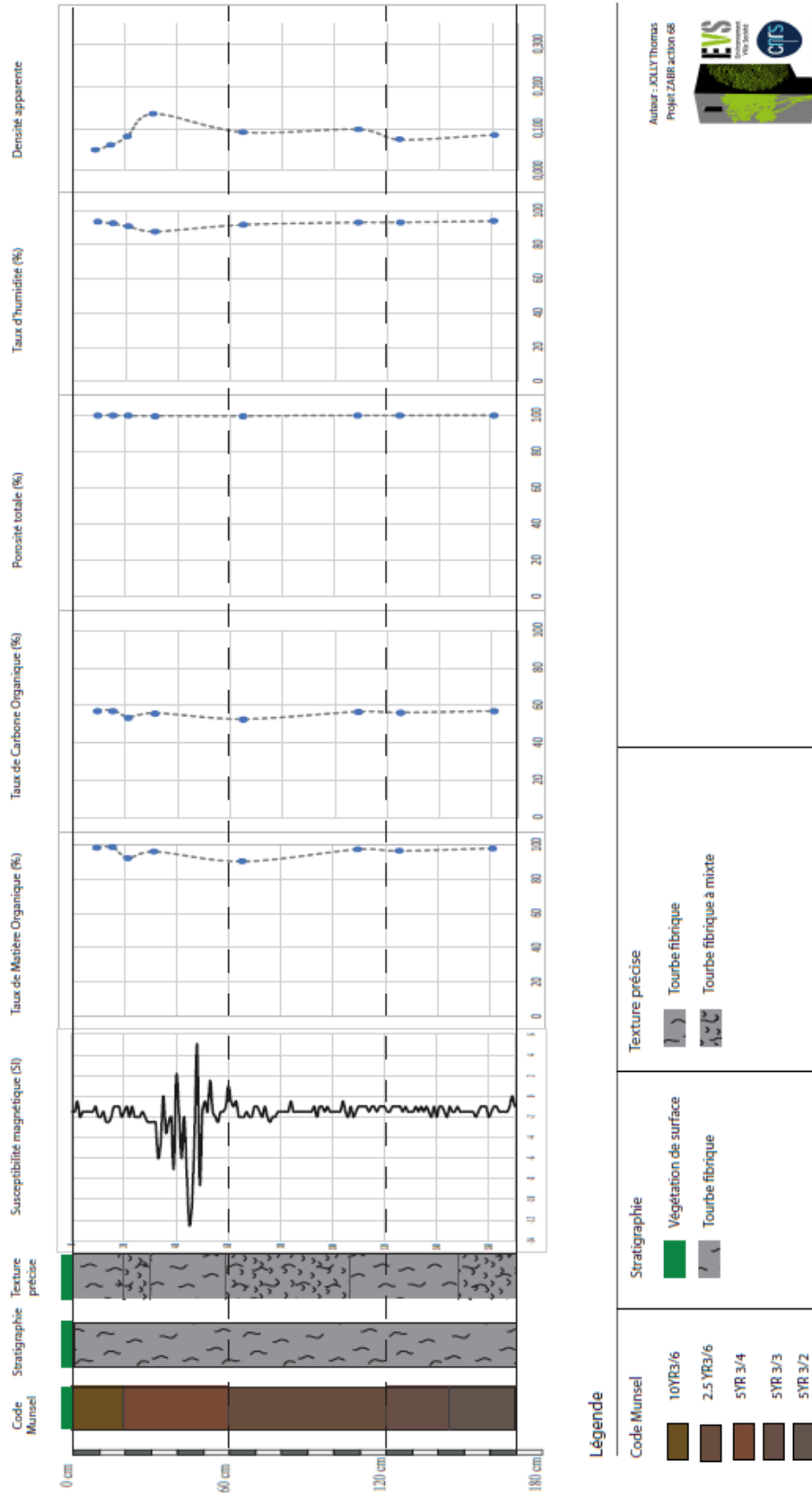


Figure 155 : Analyse de la chronique sédimentaire S8

- **Résultats d'analyse du prélèvement S8**

Susceptibilité magnétique - Nous observons des fluctuations de valeurs comprises en -13 et 5, soit un écart relativement faible. Les valeurs sont donc globalement négatives et correspondent à des matériaux diamagnétiques. Nous retrouvons cependant plusieurs pics sur l'intervalle 40 à 60 cm de profondeur qui ne correspondent à aucun changement lithologique remarquable.

Matière Organique et Carbone Organique - Les valeurs de MO oscillent entre 98,6 % à 15 cm pour le maximum et 90,4 % à 65 cm pour le minimum. Si l'on compare les taux de MO avec la texture précise, nous constatons une part plus importante de MO dans les strates de tourbe fibrique que dans les tourbes mésiques. Concernant le carbone organique, la courbe de carbone organique accompagne la forme de celle de la MO. Les valeurs oscillent entre 57,2 et 52,42% pour les mêmes niveaux de profondeur.

Porosité totale - La porosité totale du profil sédimentaire est très élevée, avec des valeurs comprises entre 100% et 99,8%. Les valeurs les plus élevées caractérisent les strates surfaciques et fibriques.

Taux d'humidité - Les taux d'humidité les plus importants sont rencontrés dans les zones de fluctuations des niveaux de nappe, soit la zone la plus intéressante du point de vue hydrologique. Nous constatons également des valeurs élevées en profondeur sur des faciès de tourbe fibrique.

Densité apparente - Les valeurs de densité fluctuent entre 0,13 et 0,05. Les valeurs les plus importantes sont présentes à 30 cm de profondeur après une passée de tourbe fibrique à mixte. Les valeurs de densité les plus faibles sont présentes dans les couches fibriques de surface ainsi qu'à 120 cm de profondeur.

De manière générale, les faciès fibriques présentant des taux élevés de MO, CO, taux d'humidité et porosité totale et une densité faible. Inversement les faciès présentant des caractères mixtes présenteront de plus faibles valeurs dans les premiers paramètres étudiés et une densité plus importante.

- **Interprétation des résultats d'analyse du prélèvement S8**

Cette carotte d'une longueur de 60 cm montre de la tourbe fibrique sur l'intégralité de son faciès. La localisation de ce point de prélèvement à proximité du dernier stade d'atterrissement du radeau tremblant, les sphaignes en surface et la faible profondeur de l'acrotelme conditionnent pour partie les résultats obtenus sur le plan textural et structural.

Du point de vue des valeurs hydrophysiques, nous constatons que les matériaux constituant le substrat sont diamagnétiques. Les valeurs de porosité et de taux d'humidité sont particulièrement élevées en surface (93,2 % pour le TH à 9 cm et 94 % à 161 cm). Ces valeurs élevées en surface et en profondeur viennent relativiser l'importance de l'acrotelme comme facteur explicatif des écoulements. Pour ce profil, il semblerait que les valeurs hydrophysiques intéressantes ne soient pas exclusivement liées à l'acrotelme, mais que des valeurs élevées sur le plan hydrologique soient possibles en profondeur. Ces résultats sont contradictoires avec le schéma d'un gradient diminuant sur le plan hydraulique et structural à mesure que l'on s'enfonce dans la tourbe. (Wastiaux, 2008 ; Porteret, 2008). La perturbation du secteur par la proximité de fossé de drainage au sud laisse suggérer un mécanisme de cause à effet pour ce phénomène.

En somme, ce secteur constitue un espace contributif d'importance sur le plan hydrologique. En effet, la liaison de ces milieux par un fossé de drainage reliant le cours d'eau de Fontfroide fait de cette zone un espace potentiellement important pour les fonctions de soutien d'étiage.

12.3.3.2. Chronique sédimentaire S9

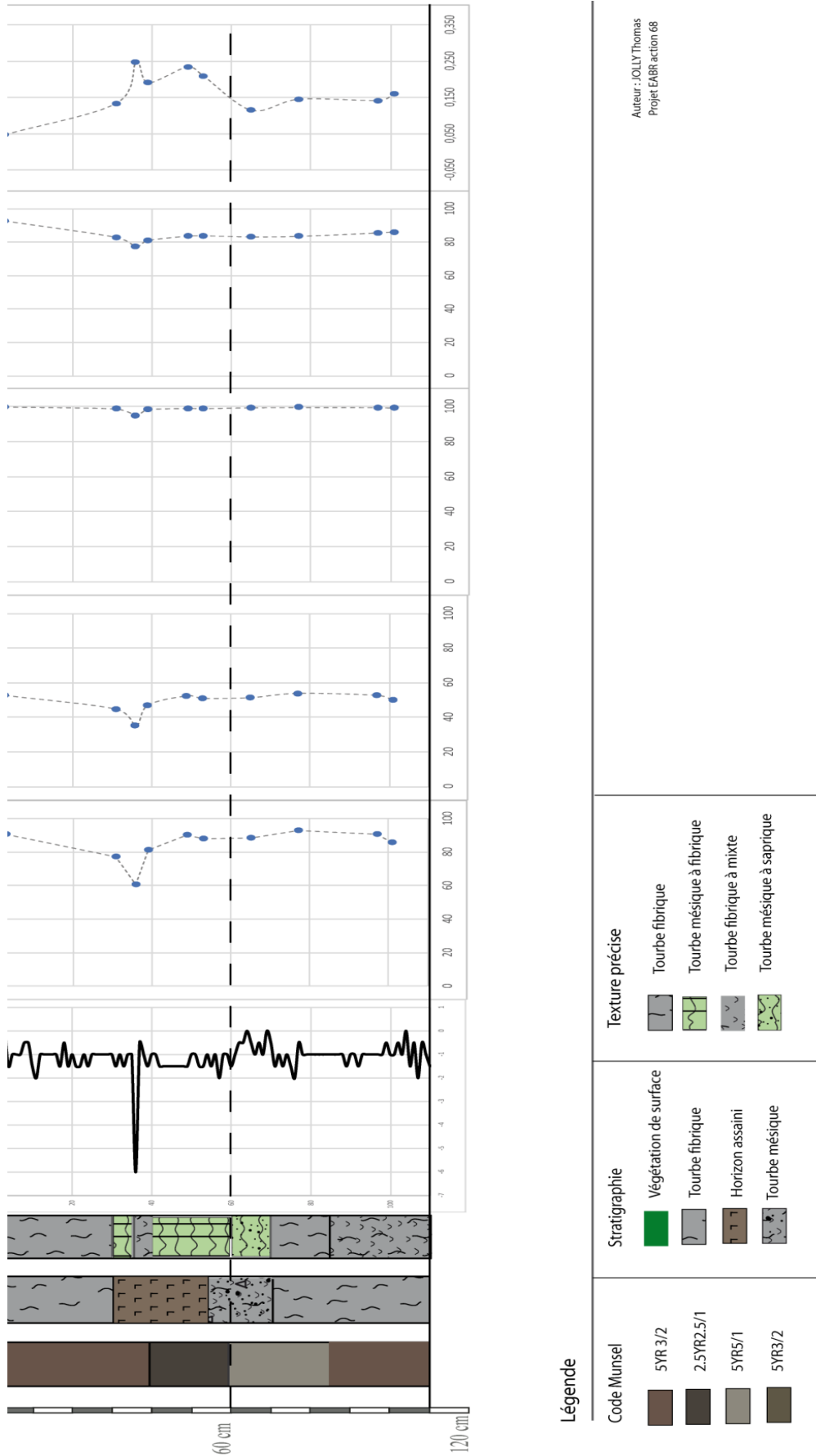


Figure 156 : Analyse de la chronique sédimentaire S9

- **Résultats d'analyse du prélèvement S9**

Susceptibilité magnétique - La courbe est entièrement négative sur ce profil sédimentaire. Les valeurs fluctuent entre 0 et -6 ce qui correspond à des matériaux diamagnétiques.

Matière Organique et Carbone Organique - Les teneurs en MO s'échelonnent de 92,8% à 77 cm à 60,8% à 31 cm de profondeur. Les valeurs les plus élevées sont associées aux faciès fibriques de surface et de profondeur. À l'inverse, nous retrouvons les valeurs les plus faibles sur la phase de tourbe en cours de minéralisation. Concernant le carbone organique celui-ci varie entre 53,6 % dans les faciès les plus fibriques et 35,3% dans la phase la plus minéralisée du sédiment.

Porosité totale - Les valeurs de porosité totale sont assez importantes (99,9% pour les faciès surfaciques) même sur la strate d'horizon assaini avec pour valeur minimale 94,8%.

Taux d'humidité - Le taux d'humidité de ce profil sédimentaire varie de 99,7% à 77,4%. La valeur maximale se rencontre dans les horizons de subsurface contrairement aux valeurs les plus faibles qui sont concentrées dans la fraction sédimentaire la plus dense et la plus minéralisée.

Densité apparente - Les valeurs de densité varient entre 0,05 pour le minimum et 0,25 pour le maximum. Le minimum est atteint dans la fraction fibrique de surface en opposition à la valeur maximale qui se retrouve dans une strate plus compacte et grumeleuse correspondant à l'horizon assaini.

- **Interprétation des résultats d'analyse du prélèvement S9**

Ce prélèvement provient d'un secteur qui n'avait encore jamais fait l'objet d'investigations scientifiques sur le plan géophysique, pédologique et hydrologique, les conditions d'enfrichement du milieu environnant le rendant peu propice à des interventions et à l'acheminement du matériel. La profondeur du prélèvement est de 110 cm, soit un profil incomplet du fait d'un refus de tarière. Sur le plan stratigraphique, cette carotte permet d'observer un assemblage de plusieurs strates. La présence d'un horizon assaini à 30 cm de profondeur est caractéristique des secteurs à *Molina caerulea*. Les causes de ce marqueur de dégradation de l'histosol renvoient au passé pastoral du site dans ce secteur. Le reste de la série est marqué par une passée mésique sous l'horizon assaini et pour finir de la tourbe fibrique sur les dernières couches prélevées. Du point de vue magnétique, l'ensemble des valeurs est négatif même sur la tourbe minéralisée. Les valeurs hydrophysiques sont plus importantes en surface sur les faciès fibriques. L'horizon assaini présente des valeurs de porosité de l'ordre de 94,8%, ce qui reste cohérent avec le degré de dégradation de l'histosol. Cependant la forte valeur des propriétés hydrophysiques de subsurface et la relance de la dynamique de turfigenèse sur les 30 premiers centimètres témoigne d'un système de gestion adaptée qui permet une résilience naturelle de ces pédocomplexes.

12.3.3.3. Chronique sédimentaire S10

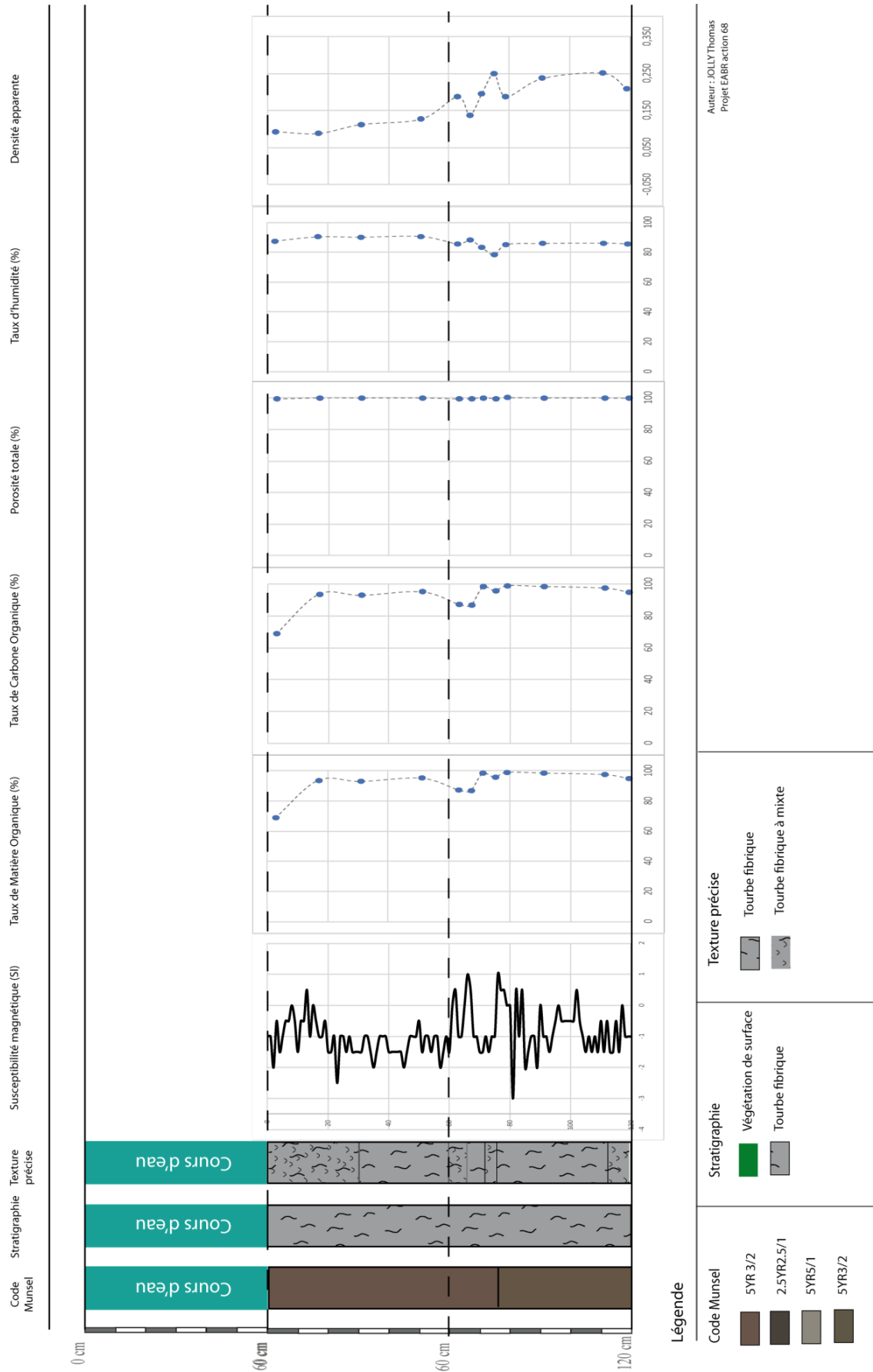


Figure 157 : Analyse de la chronique sédimentaire S10

- **Résultats d'analyse du prélèvement S10**

Susceptibilité magnétique - La courbe de susceptibilité magnétique affiche une plage de variation de valeur assez faible comprise entre 1 et -3. Les valeurs les plus extrêmes ne trouvent pas de correspondances du point de vue structurale et texturale. Cette plage de valeur correspond à des matériaux diamagnétiques.

Matière Organique et Carbone Organique - Les valeurs de taux de MO s'échelonnent de 99,1 % à 68,9% à respectivement 79 et 3 cm de profondeur (sous le fond du lit). La valeur la plus basse est présente dans la couche qui affleure avec le fond du lit du cours d'eau. La plus valeur la plus élevée est présente dans un faciès de tourbe fibrique. Concernant les taux de CO, les valeurs extrêmes (57,5 et 39,9%) sont également présentes sur les mêmes faciès que pour le paramètre décrit précédemment.

Porosité totale - Les valeurs de porosité sont assez élevées sur la continuité du profil sédimentaire. Les valeurs fluctuent entre 99,9% à 79 cm et 99,1 à 3 cm sous le fond du lit. Nous ne manquons pas d'observer que la valeur la plus faible est présente dans les faciès qui composent le fond du lit, soit les couches les plus proches de l'eau libre (du cours d'eau).

Taux d'humidité - Le taux d'humidité fluctue entre 90,2 à 51 cm sous le cours d'eau et 78,3% à 75 cm sous le cours d'eau. Globalement les valeurs d'humidité les plus élevées sont concentrées dans les faciès sous-jacents du fond du lit.

Densité apparente - Les valeurs de MVA varient entre 0,25 à 111 cm et 0,09 à 17 cm sous le fond du cours d'eau. Les valeurs les plus élevées sont présentes dans les fractions fibriques à mixtes.

À la lecture des graphes représentés sur la figure, nous constatons un léger décrochage de quelques centimètres lorsque l'on compare les taux de MO et CO avec les taux d'humidité et la MVA. Cette légère différence est notée car elle exprime une forme d'originalité si l'on se réfère aux courbes des mêmes paramètres des autres sections sédimentaires.

- **Interprétation des résultats d'analyse du prélèvement S10**

Cette série sédimentaire est issue d'un prélèvement dans le cours d'eau de Fontfroide. L'objectif de cette carotte est d'apporter des éléments d'information concernant la stratigraphie, les modes de dépôts et les marqueurs hydrologiques sur les faciès sous le lit, imputable à la circulation du cours d'eau. On observe des alluvions à caractère sableux sur le fond du lit du cours d'eau. La chronique sédimentaire est composée de tourbe fibrique. Le cours d'eau incise directement dans la tourbe. Les analyses en surface ne permettent pas détecter des alluvions à fraction minérale (elles ont probablement été mises en suspension et évacuées lors de l'application du carottier sur le point de prélèvement). La susceptibilité sur ces faciès sub-affleurant est négative. Du point de vue des propriétés hydrodynamiques, notons que celles-ci ne sont pas maximales à l'affleurement du lit avec des valeurs de densité élevée et des taux de MO, CO et d'humidité plus faibles. Ces valeurs peuvent suggérer un léger colmatage (plus forte compacité) dans les faciès fibriques sur les premiers centimètres. Les valeurs hydrophysiques les plus élevées sont présentes à 20 cm. En somme, les faciès sous le cours d'eau présente des propriétés hydrophysiques d'importance pour la bonne tenue du cours d'eau et des faciès attenants. Nous constatons que nous ne retrouvons pas les horizons organo-minéraux rencontrés sur le prélèvement S4 en amont à quelques mètres du ruisseau de Fontfroide.

Concernant l'absence de faciès de gyttja supposé présent à 160 cm, ceci peut être expliqué par le fait que le tracé du cours d'eau passait plus au sud ou plus au nord durant la phase de ces dépôts sédimentaires. Un débit plus important évacuant les alluvions transportées, la linéarité du tronçon dans ce secteur, le type de tourbe et la végétalisation du versant par enrésinement sont autant de paramètres à prendre en compte et pouvant expliquer les différences de relevés.

12.3.3.4. Chronique sédimentaire S11

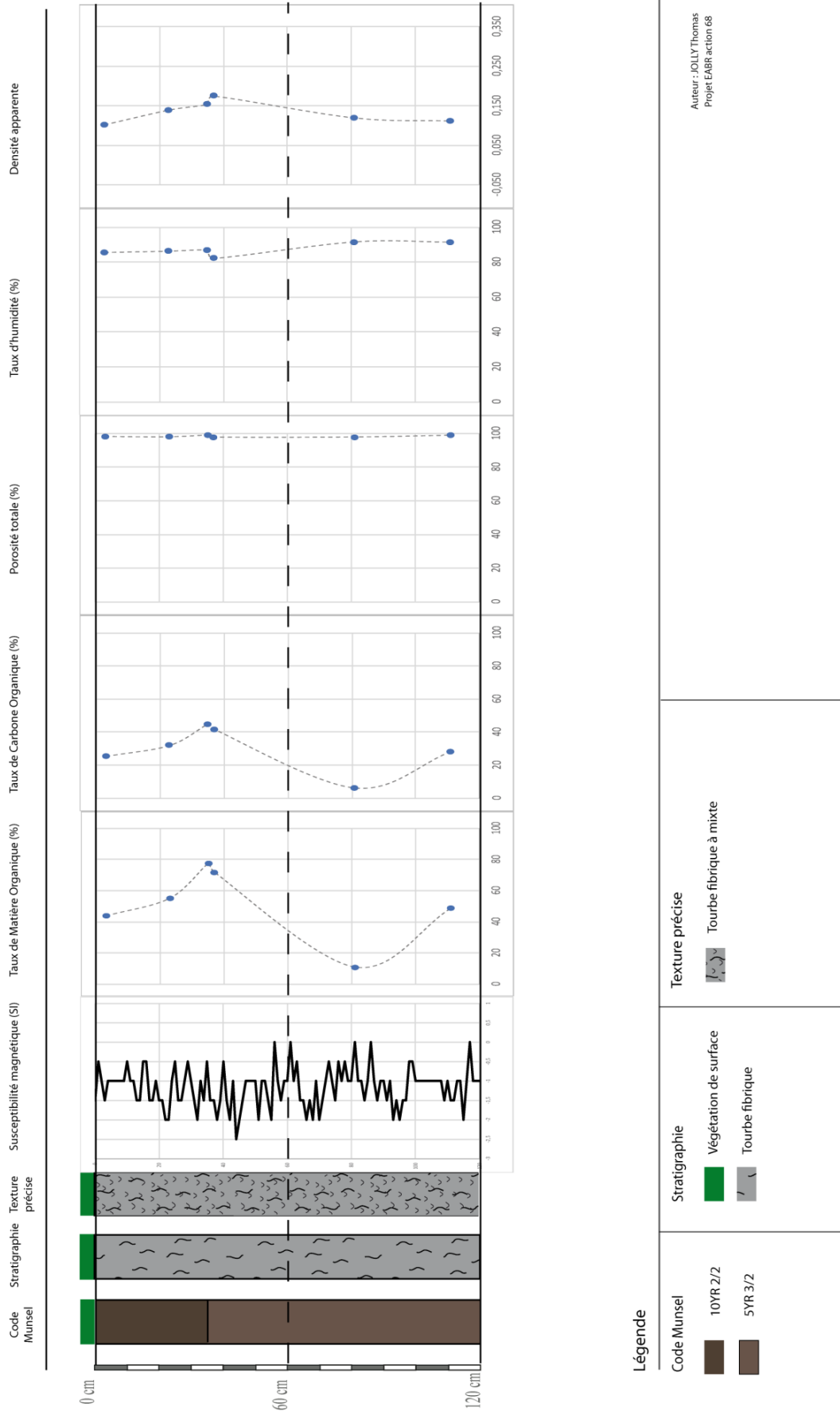


Figure 158 : Analyse de la chronique sédimentaire S11

- **Résultats d'analyse du prélèvement S11**

Susceptibilité magnétique - La courbe de susceptibilité magnétique varie dans le négatif avec des valeurs comprises entre 0 et -2,5. Ces valeurs sont reliées à un environnement diamagnétique.

Matière Organique et Carbone Organique - Les valeurs de MO sont plus faibles que sur les autres sections comportant des fractions fibriques. Les valeurs oscillent entre 77,3 et 10,7% à respectivement 35 et 81 cm de profondeur. Les valeurs de CO sont également plus faibles en comparaison, avec des taux qui fluctuent entre 44,8 et 6,2% pour les mêmes horizons. Face à des valeurs de MO si faibles pour des tourbes fibriques, la manipulation sur cette strate a été répétée deux fois et nous obtenons toujours la même gamme de valeur. Selon la littérature, nous ne sommes pas sur des histosols, cependant le taux de fibre correspond à un histosol pour l'horizon 81 cm. Nous observons donc une incohérence entre les résultats de MO face aux analyses de texture et de description in situ pour cet horizon.

Porosité totale - La porosité totale affiche des valeurs comprises entre 98,8 pour le maximum et 97,8% pour le minimum.

Taux d'humidité - La part du poids de l'eau dans la tourbe varie entre 91,4 et 82,2 % à respectivement 37 et 81 cm. Les valeurs les plus faibles sont associées à la strate présentant le plus faible taux de MO.

Densité apparente - Les valeurs de densité sont comprises entre 0,10 et 0,17. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les horizons subsurfaciques.

- **Interprétation des résultats d'analyse du prélèvement S11**

Ce prélèvement a été réalisé à proximité du ruisseau sans nom, reliant Fontfroide et drainant la partie Nord du Sud-Est de la tourbière du col à proximité de P20. Les informations issues de ce profil vont permettre de croiser la nature des faciès pédologiques avec les données hydrologiques locales issues de ce piézomètre. Pour rappel la chronique piézométrique du P20 affiche un fort battement de nappe soit 82,9 cm pour un acrotelme théorique situé à un mètre. La présence du cours d'eau et sa variabilité saisonnière expliquent ces battements importants.

Concernant les résultats pédologiques, l'analyse texturale et la description *in situ* révèlent de la tourbe fibrique sur l'ensemble du profil sédimentaire. Les valeurs hydrophysiques sont plus faibles que sur les autres secteurs à tourbe fibrique.

Nous noterons une incohérence dans les résultats. Ainsi les résultats par perte au feu indiquent des valeurs proches de 10% de MO à 81 cm de profondeur, or les taux de fibres sont affichés à 64% pour ces faciès. Les observations in situ et l'analyse texturale indiquant de la tourbe fibrique, nous ne tiendrons pas compte des valeurs incohérentes par perte au feu pour ces faciès.

La présence de faciès fibriques aussi proches d'un cours d'eau atteste de l'équilibre de l'écocomplexe dans ce secteur. Ainsi, nous constatons une différence de l'équilibre pédologique entre les rabattements de nappe induit par un cours d'eau naturel et ceux provoqués par les fossés de drainage, qui tendent à exacerber les pressions et forcer la dégradation des écocomplexes (ex : carotte S7).

12.3.3.5. chronique sédimentaire S12

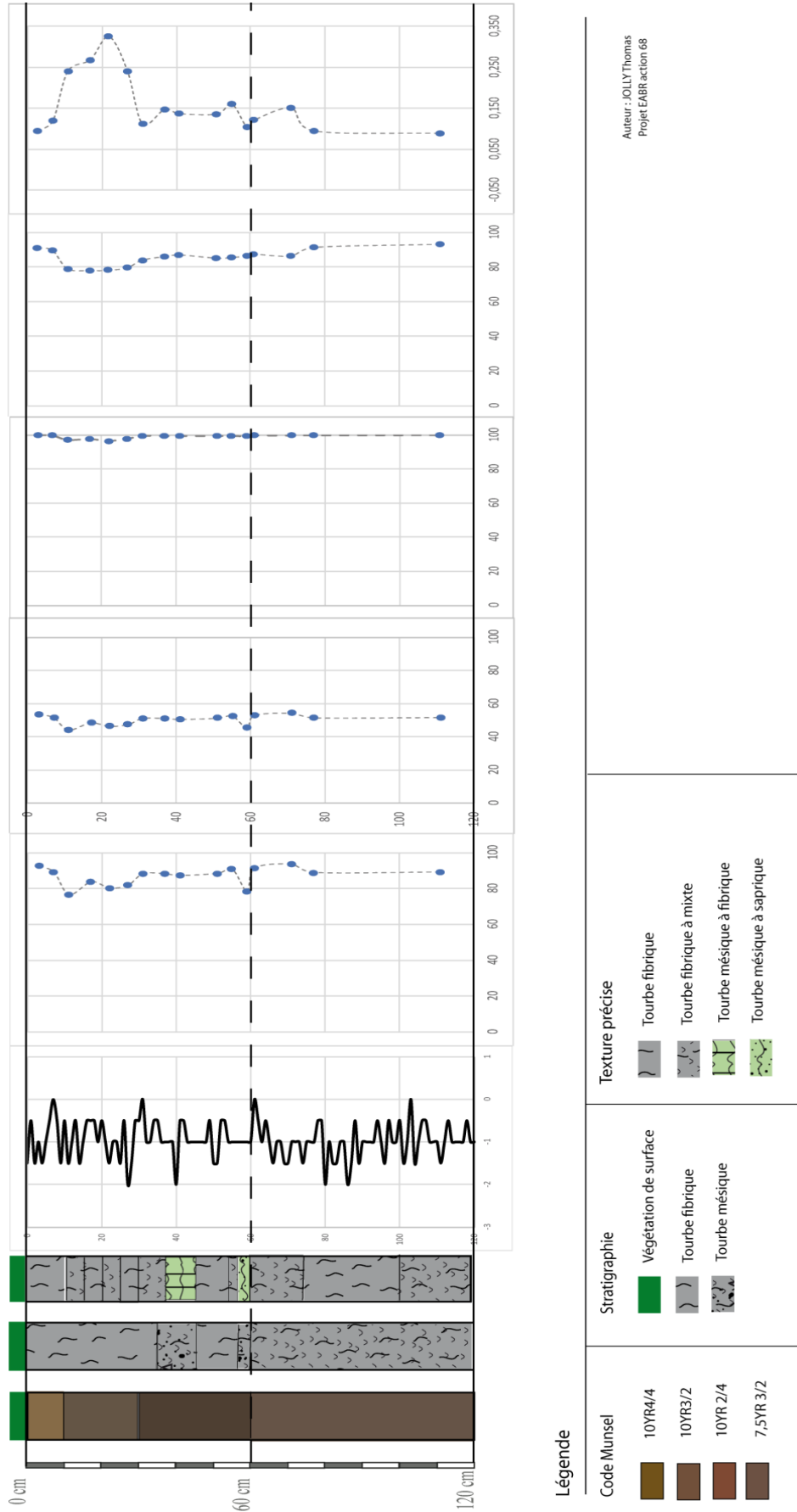


Figure 159 : Analyse de la chronique sédimentaire S12

- **Résultats d'analyse du prélèvement S12**

Susceptibilité magnétique - La susceptibilité magnétique de la carotte est comprise entre 0 et -2. Ces valeurs renvoient à un milieu diamagnétique.

Matière Organique et Carbone Organique - Les valeurs de MO fluctuent entre 92,5 et 77,4% à respectivement 3 cm et 11 cm de profondeur. Les valeurs de MO les plus faibles sont observées dans les faciès fibriques à mésiques à MO amorphe ainsi que sur les faciès mésiques. Concernant les taux de CO, ceux-ci varient entre 53,7 et 43,3% à respectivement 3 et 11 cm de profondeur.

Porosité totale - La porosité totale varie entre 99 et 97%. La plus forte valeur est enregistrée sous la surface et la plus faible à 11 cm de profondeur.

Taux d'humidité - Le taux d'humidité varie entre 93% pour les faciès les plus profonds de la série sédimentaire à 78,1% pour l'horizon à 17 cm. Nous observons une part du poids de l'eau plus importante en profondeur.

Densité apparente - Concernant la MVA, nous observons des fluctuations qui varient en opposition à la courbe du taux d'humidité. La valeur la plus élevée est présente à 22 cm de profondeur dans un faciès lithologique de tourbe fibrique à mixte. La valeur la plus faible est présente à 111 cm de profondeur sur un faciès fibrique.

- **Interprétation des résultats d'analyse du prélèvement S12**

Ce prélèvement a été réalisé dans le secteur Sud-Est dans la zone de prébois de pins à crochets sur sphaignes, le long du transect T8. Du point de vue stratigraphique, nous observons une dominance de tourbe fibrique avec des passées mésiques. En 2018, plusieurs carottages à la tarière (non référencés) avait permis d'établir que ces secteurs étaient concernés par de la tourbe fibrique. Cette carotte vient souligner l'hétérogénéité verticale de l'organisation des pédofaciès au sein d'un même polygone de végétation.

Du point des valeurs hydrophysiques, celles-ci sont maximales dans les faciès fibriques et plus faibles dans les passées mésiques. Notons que de faibles valeurs sont enregistrées sous la surface à 11 cm. À l'instar du prélèvement S9, de fortes valeurs hydrophysiques sont enregistrées dans les faciès en profondeur, relativisant encore une fois la place de l'acrotelme dans la représentation des écoulements.

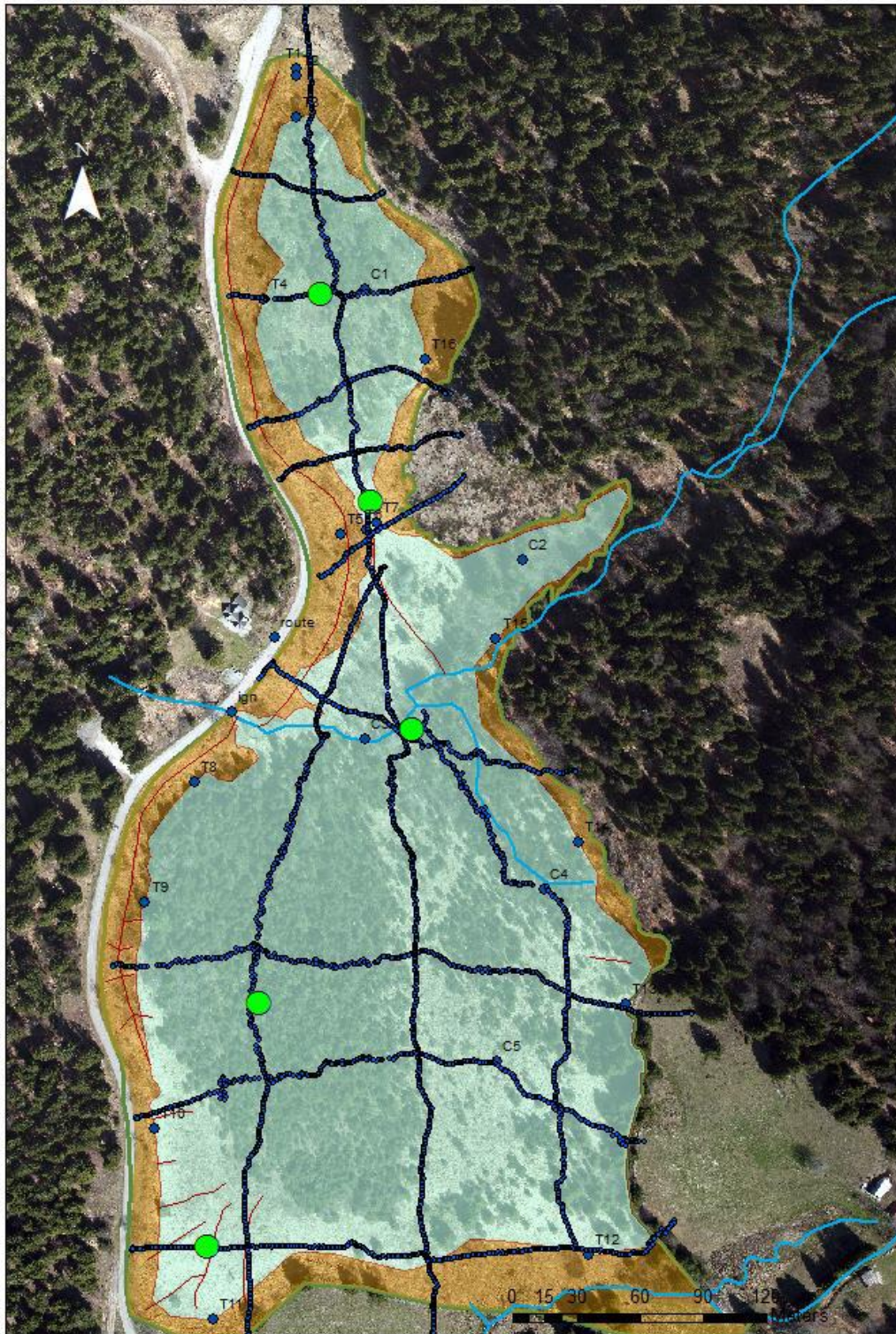
Globalement ce secteur offre des conditions hydroécologiques de première importance, tant les conditions sont réunies pour faire de cette zone un réservoir d'eau.

12.3.4. Limites de l'écocomplexe tourbeux

L'un des objectifs de départ visait à mieux caractériser les limites des histosols de la tourbière du col. Les fonctions et les variables hydrologiques associées à ces secteurs étant différents dans les sols paratourbeux ou pseudotourbeux (Porteret, 2008).

En croisant les informations de végétation et les carottages à la tarière, nous avons pu spatialiser les limites des sols à histosols et sols à réductisols (Figure 160). Le périmètre de la tourbière du col (9,4 ha) est largement dominé dans sa partie centrale Nord et Sud par des histosols. Les secteurs périphériques parcourus par les fossés de drainage avec des groupements végétaux dominants tels que les *Molinia caerulea* et *Carex nigra*, sont pour l'essentiel constitués de réductisols. Notons que la zone de resserrement qui correspond au col, drainée par deux fossés est largement paratourbeuse. L'observation in situ a permis de définir deux grandes classes de réductisols typiques. Les prélèvements à proximité des cours d'eau (2018) mettent en évidence des horizons réductiques totalement réduits de la surface jusqu'au substratum. Les autres prélèvements (2019) sont caractéristiques des réductisols à anmoor avec la présence systématique d'un épisolium humifère.

La carte de transition des sols et histosols démontre la complexité de la répartition des faciès édaphiques au sein d'une zone humide. Si cette zone humide présente au col Luitel est qualifiée globalement de tourbière, nous constatons qu'une part non négligeable de ses faciès n'est pas un histosol (25 %).



Répartition des secteurs à réductisol et histosol - tourbière du col

Source: Thomas JOLLY EVS ISTHME

Légende








- | | | | | | |
|---|--------------------------|---|--------------------|---|--|
|  | histosols |  | fossés de drainage |  | périmètre administratif tourbière du col |
|  | réductisols |  | ruisseaux |  | points de prélèvement |
|  | extension sol à histosol | | | | |

Figure 160 : Répartition des secteurs à réductisols et histosol

Sur l'ensemble de la frange Ouest, la présence de réductisols est directement liée à la remontée du substratum morainique. La faible profondeur va en effet favoriser la présence de sols paratourbeux enrichis en minéraux (Cubizolle, 2019). La proximité du substratum liée à l'héritage glaciaire va favoriser le développement de ce type de sol. Un autre facteur à prendre en considération est l'altération du contexte hydrologique local par la création de fossé induisant des rabattements de nappes. Ces fluctuations piézométriques créent des conditions d'aérobiose propice à la minéralisation (Manneville et al., 2010). Si la fraction organique de ces sols humides reste importante avec une végétation de surface capable de produire de la tourbe (*Molinia caerulea*), les conditions écologiques locales restent néanmoins défavorables avec ce contexte perturbé. Ceci est notamment observable sur la zone de col, où les histosols ne sont réduits qu'à quelques mètres de largeur (10 m sur les 58 m de resserrements) ; les fossés ayant créé les conditions d'altération des histosols.

Sur les franges, Nord, Sud et Est, l'absence de fossé met en première ligne la remontée du substratum comme facteur de mise en place de ces sols.

Lors des investigations, il est clairement apparu que la végétation de surface est un excellent indicateur du type de faciès édaphique associé. Sur les transects de prospection à la tarière, le changement de sol était très régulièrement associé à un changement de végétation de surface (ex : passage de *Molinia caerulea* à *Pinus uncinata* sur *Sphagnum sp.*). La présence de *Molinia caerulea* comme indicateur de dégradation et de minéralisation des sites tourbeux (Manneville et al., 2010) s'est largement vérifiée lors de ses prospections.

Si l'on axe notre réflexion sur ces zones peu profondes, elles semblent très intéressantes au regard de notre problématique de soutien d'étiage. À l'inverse des histosols, ces sols hydromorphes ont un taux d'absorption et une capacité à retenir l'eau plus faible que la tourbe. Cependant, ces faciès étant rarement à saturation (contrairement à la tourbe qui en contexte non perturbé est saturée en eau), ils sont capables de collecter et de relarguer des quantités d'eau plus importantes.

En somme, les zones à réductisols sont majoritairement représentées sur les secteurs périphériques de remontée du substratum et/ou à proximité des fossés de drainage. On qualifiera la tourbière du col de Luitel comme un « système tourbeux » plutôt qu'une tourbière stricto sensu.

12.4. Résultat : interprétation géophysique

L'analyse des radargrammes constitue une première étape avant de réaliser l'interprétation croisée avec les analyses pédologiques. Pour rappel, les conditions d'acquisition se sont faites en période hivernale sur manteau neigeux afin de faciliter les investigations in situ et de préserver la tourbière du piétinement. À la suite des traitements des radargrammes avec le logiciel Radan, de nombreux artefacts électroniques sont encore présents et susceptibles d'inhiber la perception de certains réflecteurs.

À titre d'exemple, dans cette partie, nous présenterons l'analyse d'un transect représentatif du Nord de la tourbière : le radargramme T2. Ce radargramme résulte d'une acquisition transverse orientée Est-Ouest sur une longueur d'environ 130 m pour une profondeur d'interprétation d'environ de 4 m.

Ce transect croise une mosaïque de milieux avec en premier lieu des secteurs à *Carex rostrata* et *Sphagnum sp.* (0 et 10 m), puis la pinède Nord à Sphaigne (10 et 110 m). Au cœur de cette pinède se trouve une dépression à *Scheuchzeria palustris* (29 et 50 m). L'extrémité Est du transect est caractérisée par une végétation non hygrophile, typique des milieux ouverts de montagne. Du point de vue de l'instrumentation, ce transect géophysique est proche des piézomètres P2 et P3. La profondeur estimée de l'acrotelme sur ce tronçon est de 37,5 et 32,5 cm respectivement pour P2 et P3. Un réflecteur caractéristique marque un changement de densité susceptible de correspondre à cette interface.

Ici, on s'intéresse surtout à la détermination des structures internes de l'écosystème. Il est possible de valider plusieurs réflecteurs avec le radargramme P3 (Figure 161) de Garambois (2006). Le substratum morainique et la zone de dépression à Scheuchzérie sont indifférenciables au même endroit sur les deux profils P3 et T2.

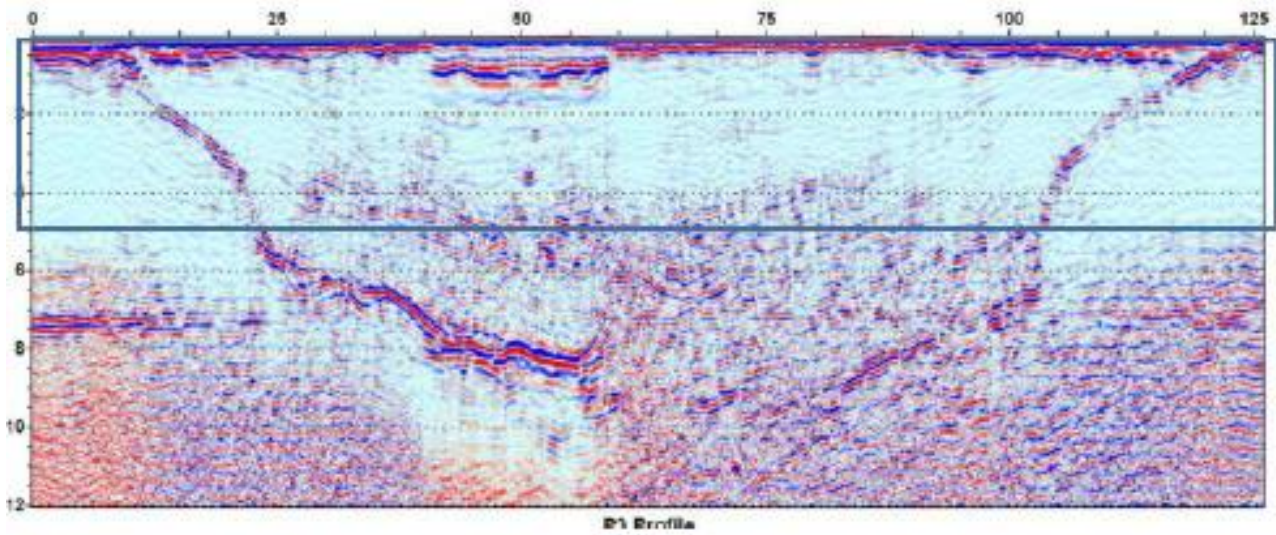


Figure 161 : Radargramme P3 (Garambois, 2006)

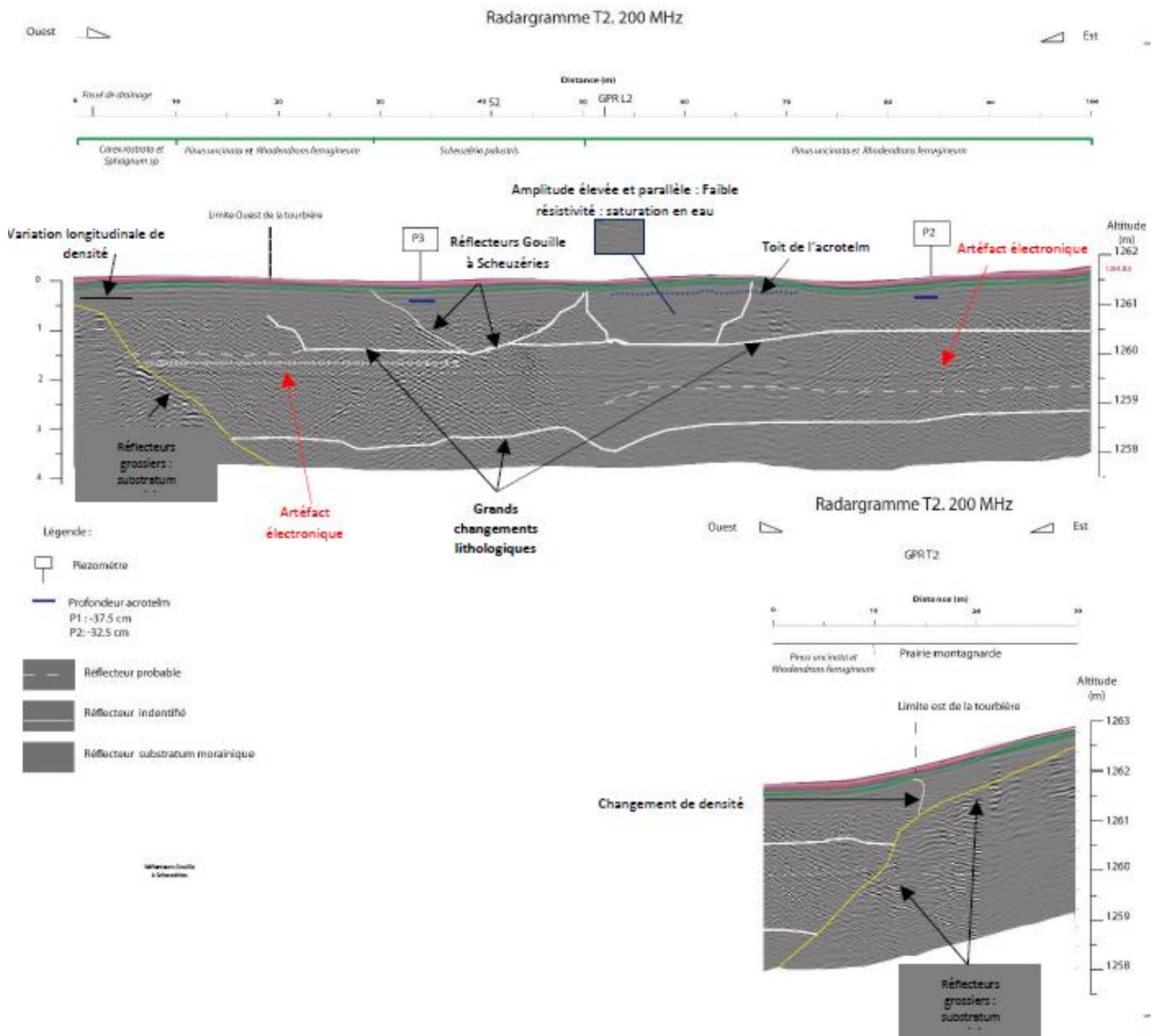


Figure 162 : Interprétation du radargramme T2

Le radargramme T2 révèle des variations longitudinales en surface sur les extrémités des transects. À l'est de la dépression à Scheuchzérie et du caillebotis, nous relevons un réflecteur continu en forme de cuvette. Nous pouvons y observer des réflecteurs internes avec une amplitude plus élevée ou légèrement inclinée, témoignant de la présence de pédofaciès saturé en eau.

Si l'on s'intéresse aux grandes tendances lithologiques sur l'ensemble du profil, nous pouvons distinguer plusieurs réflecteurs continus qui correspondent à des grandes unités lithologiques tels que :

- un premier réflecteur entre 1 et 1,40 m de profondeur. La présence d'artéfacts électroniques sur cette section du profil limite la distinction du réflecteur sur un large secteur à l'Ouest (entre 5 et 23 m).
- un second réflecteur qui fluctue entre 2,5 et 3,5 m de profondeur.

Ce travail d'analyse a été réalisé pour tous les radargramme. Une fois les structures identifiées, il reste à les valider à l'aide des investigations pédologiques.

12.5. Interprétation croisée pédologie géophysique

L'interprétation croisée entre les carottes et les profils radars a permis de créer une continuité dans les informations géophysiques et pédologiques. Les informations données par l'analyse des carottes vont permettre de préciser la nature des structures identifiées avec le radar géophysique.

12.5.1. Exemple : interprétation croisée des carottes S2 et S8 et du radargramme T2

La Figure 163 montre un exemple de résultat obtenu par interprétation croisée des données géophysiques et pédologiques pour le radargramme T2 : l'interprétation des données géophysiques de ce profil a permis de déterminer de grands faciès lithologiques au sein de la tourbière et les informations pédologiques (carottes S2 et S8) ont permis de préciser la nature de ces faciès.

Du point des limites de l'écocomplexe, l'Unité 0 (U0) permet de visualiser l'expansion des faciès lithologiques à réductisols. Si l'expansion longitudinale semble correctement estimée, la profondeur de ces derniers dans la partie Ouest reste complexe à préciser et repose sur une interprétation de la continuité d'un réflecteur sous-jacent. Les couches géologiques liées au substratum morainique sont clairement identifiées et permettent de visualiser les contacts socle/tourbe.

Si l'on s'intéresse à présent aux faciès tourbeux, nous relevons trois grandes unités et surfaces géophysiques qui trouvent des correspondances pédologiques. L'unité 1 (U1) correspond à une structure en eau dans laquelle « surnage » de la tourbe blonde fibrique non agglomérée. L'unité 2.1 (U2.1) est caractérisée par une alternance de tourbe fibrique blonde et de tourbe fibrique à mixte sur une profondeur qui varie entre 1 et 1,5 m selon les secteurs. L'unité 2.3 (U2.3) surmontée par l'unité 2.1 a une épaisseur qui fluctue entre 1 m à la périphérie Est de l'unité et 2,5 m au centre (sous le caillebotis). Cette même unité présente une succession de faciès fibrique surmontant des faciès mésiques. Une passée fibrique est identifiée sur le prélèvement S2. Concernant l'unité 2.4 (U2.4), celle-ci n'est pas complète et présente la surface d'une unité supposée beaucoup plus profonde (plus de 1,5 m) au regard de la carotte S2. La correspondance pédologique de l'unité renvoie à de la tourbe fibrique.

L'interprétation croisée a été réalisée pour tous les radargrammes. Une synthèse de l'interprétation est donnée dans les parties suivantes en distinguant : 1) la zone nord ; 2) la zone centrale ; 3) la zone sud. Ces premiers résultats donnent un premier éclairage sur le rôle de l'acrotelme et des différents secteurs de la tourbière pour le soutien d'étiage. Les codes des différentes structures préidentifiées par Jolly sont donnés Figure 164 et Figure 165.

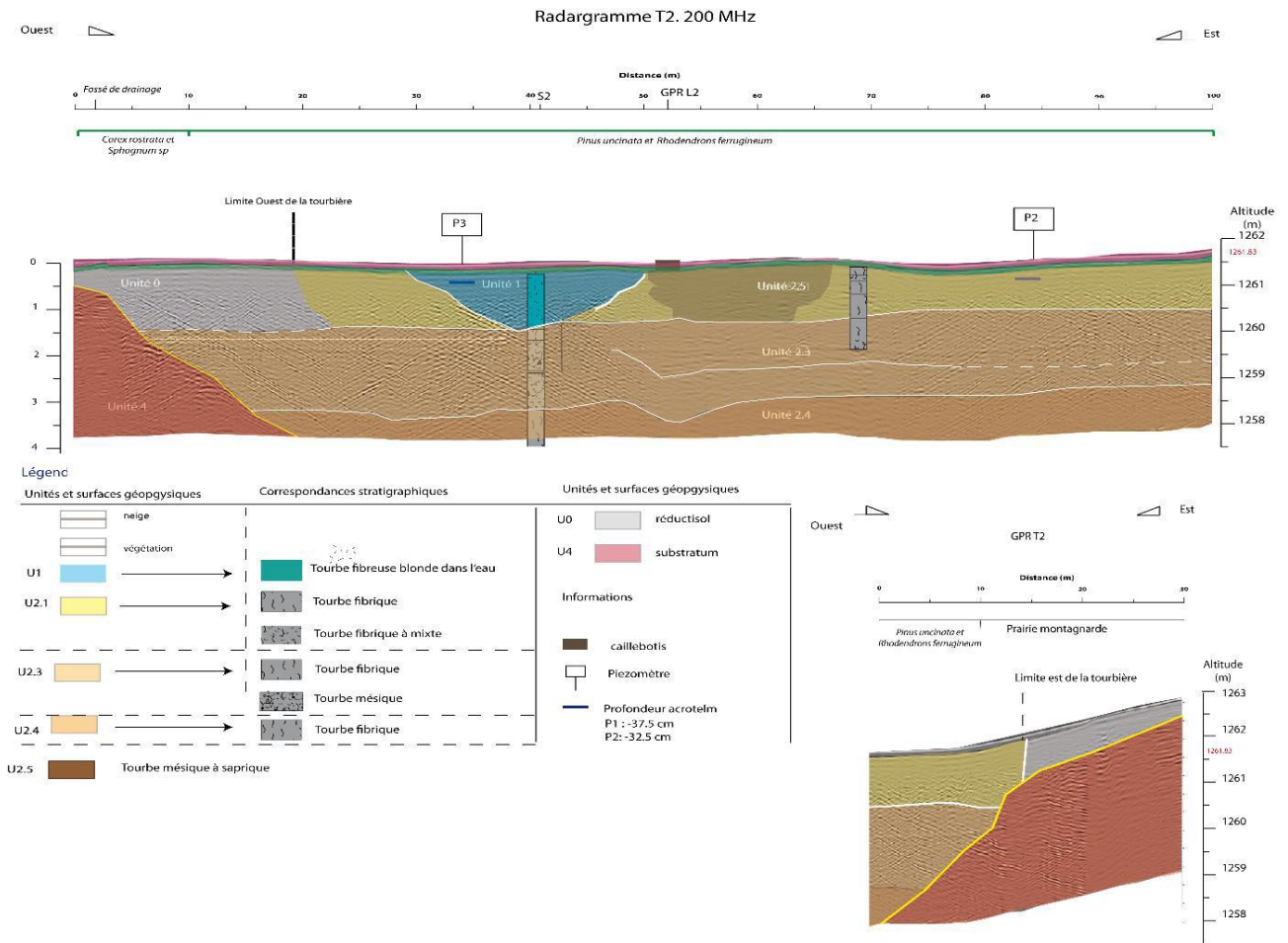


Figure 163 : Interprétation croisées des carottes S2, S8 et du radargramme T2

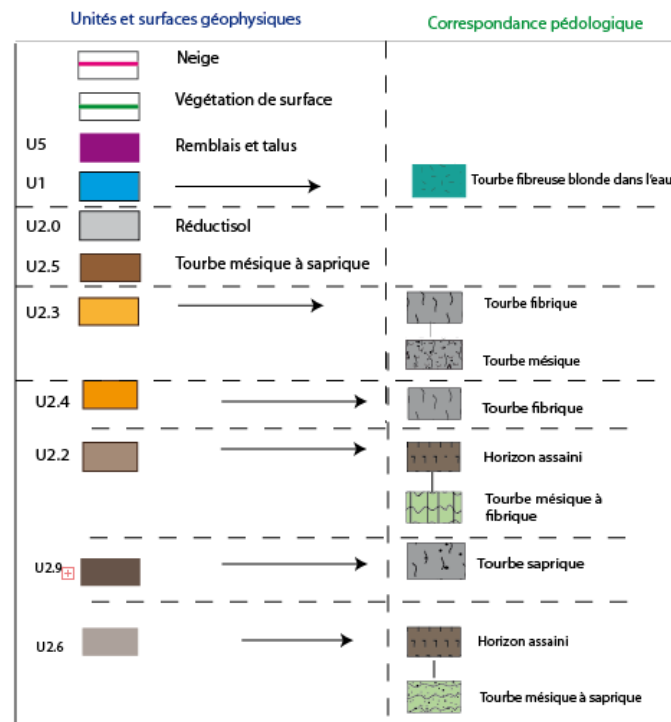


Figure 164 : Code des structures identifiées (secteur nord)

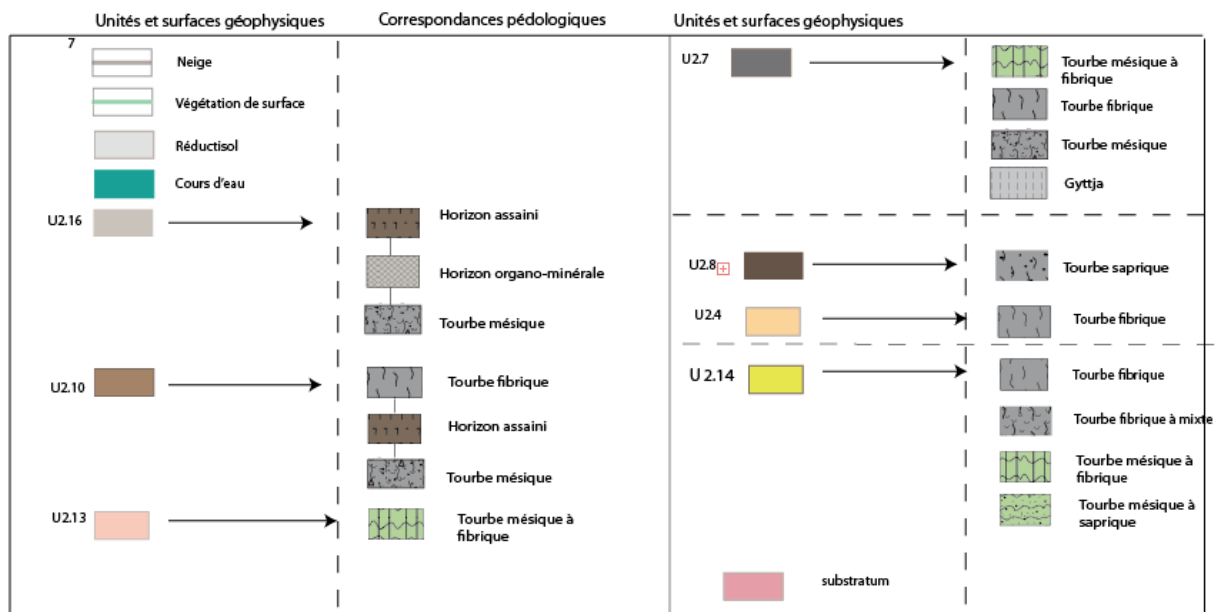


Figure 165 : Code des structures identifiées (secteurs sud)

12.5.2. Secteur nord : des faciès de tourbe mésique à saprique

L'extrême nord du profil L2 met en évidence une unité de sols non hydromorphes (U5). Cette unité fut probablement à l'origine un sol pseudoturbeux. L'anthropisation du site avec la construction de la route a généré un remblai, avec des blocs grossiers recouverts aujourd'hui par une végétation mésophile mais non endémique des sols tourbeux (Corine 37.2). À mesure que le substratum s'enfonce en profondeur, nous pouvons observer sur ce profil l'apparition de réductisols à anmoor et de sols pseudo tourbeux (U0) ; la canalisation des écoulements par le fossé de drainage sur le côté Ouest ayant permis la recrudescence des processus de minéralisation en surface.

Nous noterons que la continuité des réflecteurs discriminant les grandes strates laisse suggérer que ces faciès réduits surmontent les unités tourbeuses U2.3 et U2.4. Cette considération reste néanmoins à préciser. Le long du transect L2, on observe la présence d'un réflecteur continu oscillant entre 1 m et 50 cm de profondeur. Les carottages de juin 2018 dans ce secteur attestent de la présence d'une unité de tourbe brune mésique à saprique (U2.5). Cette strate de tourbe sous la pinède est recouverte selon les micro-buttes par un horizon H, induit par la dégradation lente des aiguilles de pins à crochets notamment. Elle couvre une large portion de l'étage subsurfacique de la pinède et se trouve être le faciès représentatif de l'acrotelme sur la majeure partie du secteur nord. Les étages sous-jacents, précisés par des carottages (S2 et S8) mettent en avant de la tourbe mésique avec des passées fibriques (U2.3) et de la tourbe fibrique (U2.4) à sphaignes. Ces considérations sont validées par l'intersection du profil T1. Une mosaïque de matrice de sols va ensuite se distinguer à l'intersection des transects T2 et L2. Les réflecteurs hydrologiques et lithologiques en forme de cuvettes correspondent à une zone non comblée, témoins du dernier stage d'atterrissement de l'ancien lac tourbière. Cette cuvette trouve sa limite à l'Ouest avec l'unité 1 (U1) et à l'Est avec l'unité 2.5. L'unité 1 (U1) est de nouveau apparente sur la section Est du profil T2. La composition botanique de cette unité de végétation se retrouve directement dans les states de tourbe sous-jacente.

Nous observons par la suite une rupture en bordure de pinède le long du L2 à hauteur du Transect T3. Si les faciès de profondeur restent les mêmes, nous remarquons un changement d'unités morphologiques de surface (carotte S3) sur le profil. La combinaison des fossés de drainage et l'ancienne activité pastorale a marqué la première unité de surface par un horizon assaini affleurant (U2.2). Les molinies bleues marquant la dégradation de l'histosol (Manneville et al., 2010), sont massivement représentées sur ce secteur. Ces faciès de tourbe en cours de minéralisation sont également présents le long des profils T4 et T5. Nous noterons une diminution horizontale des

histosols et une expansion latérale des zones à réductisols dans ces secteurs. Le compactage du sol par piétinement, les conditions aérobies fluctuantes et les faibles profondeurs du substratum conditionnent largement la présence de ces faciès pseudotourbeux. En profondeur, l'unité pédologique de tourbe fibrique (U2.4) accompagne la remontée du substratum jusque dans les secteurs centraux des systèmes tourbeux du Luitel. Nous noterons cependant les limites de cette caractérisation à proximité du substratum. Si les éléments de littérature indiquent des faciès plutôt sapriques au contact des arènes granitiques (Cubizolle, 2019), l'interpolation de la carotte S3 et du profil L2 et T5 montre un contact entre les faciès fibriques et le substratum. Si un faciès plus humifié est potentiellement présent sur le substratum, notre relevé pédologique ne permet pas de l'attester.

En somme, si l'on se place sous un angle pédologique, ce secteur témoigne d'une bonne dynamique dans le secteur de la pinède. En revanche lorsque l'on progresse vers le Sud du secteur, nous relevons des formes de dégradation des histosols avec une réduction de leur emprise spatiale en surface. Du point de vue hydrologique, les propriétés hydrodynamiques estimées dans ces secteurs laissent envisager une capacité de rétention en eau importante.

12.5.3. *Secteur central : affleurement du socle morainique et faciès de gytja*

L'analyse de ce secteur avec les transects T5, T6 et L2 révèle un contact avec un substratum affleurant. La proximité de la roche mère et des moraines associées au Nord du cours d'eau conditionne pour partie la nature des faciès. Comme exposée dans la discussion liée au secteur Nord, la réduction de la profondeur et les pressions exercées ont engendré la mise en place d'un horizon assaini surmontant de la tourbe fibrique.

Du point de vue hydromorphologique, le cours d'eau de Fontfroide (dont les réflecteurs de son paléo chenal sont visibles sur T6), s'étend entre cette remontée du socle au Nord et la partie bombée de la tourbière au sud. L'interpolation des radargrammes et de la carotte S4 révèle trois grandes unités stratigraphiques sur ce transect. Les unités 2.16 et 2.7 sont fortement marquées par la proximité du ruisseau. Sur le plan hydropédologique, cette carotte et les réflecteurs associés permettent d'extrapoler la nature probable de l'ensemble des milieux adjacents au ruisseau. Les faciès de gytja et organominéraux sont probablement liés aux dépôts lors d'épisodes de crues. Cependant, nous noterons que la carotte sous le cours d'eau présente exclusivement des faciès fibriques. Aucun élément à forte fraction minérale n'est identifié. Le passage du cours d'eau au sud de plusieurs mètres lors de ces dépôts sédimentaires peut expliquer le fait que nous ne retrouvons pas ces strates sous le cours d'eau. La linéarité des réflecteurs des unités 2.16, 2.7 et 2.8 sont présents jusqu'au pied du bombement de la pinède Sud. Le changement de végétation et les variations topographiques locales (bombement, buttes) sont responsables des limites de l'expansion de ce type de faciès.

12.5.4. *Secteur sud : secteur composite*

Pour le secteur sud, l'ensemble des radargrammes souligne un substratum peu profond à l'Est et plus profond à l'Ouest (approximativement 8 m). Le substratum plonge en profondeur au contact des faciès tourbeux. Concernant les unités morphologiques, nous pouvons distinguer 3 microtopes sur ce mésotope Sud. L'échantillonnage pédologique, l'analyse géophysique et les informations de végétation de surface permettent de distinguer 3 zones :

- **Zone de la pinède à sphaignes**

Sur cette zone, la première strate est composée d'un empilement de tourbe fibrique, d'un horizon assaini, de tourbe mésique et de tourbe fibrique sur une épaisseur d'un mètre (correspondant à l'acrotelme calculé). La présence d'un horizon assaini à 10 cm de profondeur témoigne du piétinement induit par l'ancienne activité pastorale sous les pins. La présence d'un fossé en limite ouest peut induire des effets topographiques facilitant le ruissellement et la circulation rapide des eaux précipitées en périphérie de bombement (Porteret, 2008). Cependant, la turfigenèse de surface atteste de la résilience du site. Nous noterons cependant que des réflecteurs latéraux indiquent la présence de faciès plus compacts (pseudotourbeux) entre la route et la pinède. L'emprise spatiale de ces sols s'inscrit dans un contexte de modifications des conditions hydromorphologiques de la périphérie du bombement ; cette

frange ayant très certainement connue une topographie plus élevée, avant qu'elle ne se tasse sous l'effet conjugué du drainage et du piétinement. En profondeur nous retrouvons de la tourbe blonde fibrique. Ceci constitue un bon indicateur pour le fonctionnement de ce secteur ombrotrophe bombé. Tandis que l'unité 2.10 (U2.1) se limite à la pinède, l'unité 2.14 (U2.4) s'étend dans le secteur Sud-Est.

- **Zone de prébois de pins à crochets sur sphaignes**

Il s'agit de la zone où l'abondance de ces faciès fibriques (conditions d'emmagasinement de l'eau favorables avec conductivité hydraulique proche des 10^{-1} m/s) est la plus importante. Nous relevons la présence d'un réflecteur continu à approximativement un mètre de profondeur. Cette interface scinde le profil radar en deux et correspond au toit de l'acrotelme (acrotelme calculé). L'unité de subsurface se compose de plusieurs types de tourbes : tourbe fibrique, tourbe fibrique à mixte, tourbe mésique à fibrique et tourbe mésique à saprique. Notons que ces considérations stratigraphiques établies à partir de l'analyse du point S11 et S12 sont sensiblement différentes d'un secteur à l'autre. Ainsi, il est possible d'avoir des variations verticales dans l'organisation stratigraphique au sein d'un même polygone de végétation. Les variations écologiques, topographiques et hydrologiques sont susceptibles de faire varier l'emboîtement stratigraphique sur de courtes distances (quelques mètres). Ce mécanisme de répartition des sédiments a été observé en 2018 sur ce secteur ; les interprétations in situ mettant en lumière des variations de taux de fibres dans le sédiment à partir de prélèvements distants de quelques mètres.

Si l'on s'intéresse à la deuxième unité géo stratigraphique, celle-ci semble composée de tourbe fibrique. La profondeur de cette unité se réduit à mesure que le substratum morainique remonte à l'Est et au Sud.

- **Zone sud**

Cette zone est caractérisée par un contact tourbe/substratum ou réductisol/substratum entre 40 cm de profondeur (près de l'exutoire du cours d'eau) et 2 m aux extrêmes Est et Ouest du transect T9. Ce secteur est marqué par *Molinia caerulea* et des *Carex rostrata* vers l'exutoire sud.

12.5.5. Bilan sur le travail préliminaire

- **Limite de l'acrotelme**

L'acrotelme et le catotelme sont deux couches théoriquement distinctes dans les faciès tourbeux des tourbières ombrotrophes. La limite est matérialisée par le niveau le plus bas que peut atteindre la nappe et oscille généralement entre 30 et 50 cm de profondeur (Porteret, 2008).

L'un des objectifs de cette étude est de déterminer la position de cette limite hydrologique en croisant les informations géophysique, piézométrique et pédologique. La position des valeurs d'acrotelme théorique le long des transects radar amène à discuter l'utilisation de ce modèle diplotelmique. Le Luitel étant un hydrosystème tourbeux perturbé sur les plans pédologique et hydrologique (fossés de drainage), les valeurs de l'acrotelme décrochent régulièrement en dessous des 50 cm pour le secteur sud. Les valeurs théoriques ne peuvent s'appliquer dans un tel contexte. Les profondeurs de l'acrotelme du Luitel sont donc plus importantes (jusqu'à moins un mètre) que le modèle théorique. Le modèle diplotelmique ne semble pas opérant sur un terrain présentant un patchwork de situations. L'application de ce modèle au cours de cette étude semble possible pour les secteurs relativement stables (Pinède Nord), en revanche il est préférable de ne pas tenir compte de ce modèle pour les secteurs Sud. Pour rappel, ce modèle n'est pas effectif en contexte pseudotourbeux.

- **Conséquences sur le rôle de soutien d'étiage**

S'il est admis que le mésotope du Luitel délivre un faible soutien d'étiage, la compréhension et la recherche de l'origine de ces apports d'eau est primordiale pour axer et prioriser les mesures de gestion sur le plan hydrologique.

Pour rappel, les écoulements sur la tourbière du col du Luitel sont répartis vers deux exutoires : Fontfroide et Pezanti. Des travaux issus de Wiart (1984) proposent une spatialisation des flux surfaciques et des secteurs de convergence (Figure 166).



Figure 166 : Ligne de partage des eaux et principaux réservoirs des systèmes tourbeux du col Luitel (Wiart, 1984)

Le Tableau 23 synthétise les paramètres hydrophysiques associés aux principaux microtopes et piézomètres sur des profondeurs correspondant à l'acrotelme. Bien que cette zone de fluctuation du toit de la nappe puisse être sujette à discussion dans ce contexte, elle constitue l'unité de référence dans la modélisation des écoulements dynamiques des tourbières.

Les résultats pédologiques de 2018, les compléments de 2019 et leur positionnement dans l'espace permettent d'apporter des éléments de réponse sur les propriétés hydrophysiques des sols sur l'ensemble de la tourbière stricto sensu. Si nous parlons ici de stockage, il est nécessaire de rappeler que ces valeurs sont intéressantes sur le plan hydrologique mais qu'elles sont susceptibles d'intervenir seulement lorsque les niveaux de nappe le permettent et que les précipitations ne sont pas trop intenses. Lorsque le système est à saturation, l'emmagasinement potentiel est impossible. De même, il ne faut pas confondre la capacité de stockage potentielle (qui s'exprime par la porosité totale) avec la capacité de stockage dynamique qui correspond à la circulation de l'eau dans la matrice.

| Secteurs microtopes | P | Piézométrie (cm) | | | | Prof. (cm) acrotelm | Carotte | Type sédiments | Unité structurale | Prof. (cm) | Stockage | | Propriétés hydrodynamiques Pe% K (m/s) |
|--|-------|------------------|--------|-------|-------|---------------------|---------------------|--|-------------------|------------------------------|---|--|--|
| | | Moyenne | Min. | Max. | Delta | | | | | | PT% | TH% | |
| Pinède Nord (Rhododendrons et myrtilles) | P1 | 24,7 | -40 | -7,4 | 32,6 | 40 | T | Mésique à saprique | U2.5 | 0 à 40 | - | 10 à 15 10 ⁻⁹ | |
| | P2 | -8,3 | -32,5 | 8,3 | 40,8 | 32,5 | S8 | Fibrique à mixte | U2.1 | 0 à 32,5 | 99,9 à 99,8 | 93,3 à 87,7 30 10 ⁻¹ | |
| | P3 | -19,9 | -37,2 | -5 | 32,2 | 37,2 | S2 | Tourbe en eau Fibrique | U1 | 0 à 37,2 0 à 30 | 100 99,9 | 96,1 30 10 ⁻¹ | |
| Molinies | P4 | -31,1 | -63,5 | 0 | 63,5 | 63,5 | S9 | Horizon assaini Mésique | ? | 30 à 55 55 à 63,5 | 99,2 à 77,4 83,2 | 99,2 à 94,8 99,4 10 à 15 10 ⁻⁵ | |
| | P5 | -29,6 | -60,5 | 0 | 60,5 | 60,5 | T | Horizon assaini Mésique | U2.2 | 0 à 15 15 à 50 | 83,6 à 77,4 83,2 | 99,2 à 94,8 99,4 10 à 15 10 ⁻⁵ | |
| | P6 | -35,2 | -60 | -19,6 | 40,4 | 60 | T | Réductisol à anmoor Argile Argile/arène/substratum Arène/substratum | U2.0 | 0 15 30 50 | - - - - | - 10 10 - | |
| Faciès proches de Fontfroide | P7 | -55,8 | -78 | -37,5 | 40,5 | 78 | S3 | Horizon assaini Mésique à saprique Fibrique | U2.2 U2.4 | 0 à 12 12 à 30 30 à 60 | 98,7 à 96,8 99,8 à 98,4 99,9 à 99,8 | 76,5 à 68,8 87,19 à 70,9 88,27 à 87,3 | - 10 à 15 10 ⁻⁵ 10 à 15 10 ⁻⁵ |
| | P9 | -13,8 | -52,7 | 0 | 52,7 | 100,5 | S4 | Horizon assaini Organo-minérale Mésique | U2.6 | 0 à 36 36 à 43 43 à 60 | 99,2 à 97,6 96,4 à 95 99,7 à 98,9 | 81,89 à 76,8 77,77 à 75,3 86,52 à 82,5 | - - 10 à 15 10 ⁻⁵ |
| | P17 | -54,6 | -100 | -17,1 | 82,9 | 85,2 | S7 | Mésique à fibrique Fibrique | U2.7 | 60 à 100,5 0 à 15 | 100 à 99,9 99,9 à 99,8 | 91 à 90,1 88,9 à 84,9 | 10 à 15 10 ⁻¹ 30 10 ⁻¹ |
| Pinède à Sphaignes | P13 | -43,0 | -76 | -20,2 | 55,8 | 76 | S6 | Horizon assaini Mésique | U2.10 | 15 à 30 30 à 50 | 99,4 à 97,3 99,4 à 99 | 82 à 75,4 82 à 81,8 | - 10 à 15 10 ⁻⁵ |
| | P12 | -38,4 | -62,2 | -20,4 | -41,8 | 62,2 | S6 | Mésique Fibrique | U2.10 U2.4 | 8 à 26 26 à 33 | 99,4 à 98 99,6 | 85,5 à 76,1 83,3 | 10 à 15 10 ⁻⁵ 10 à 15 10 ⁻⁵ |
| | P14 | -43,1 | -63,2 | -25 | 38,2 | 63,2 | S12 | Fibrique Mésique à fibrique Fibrique à mixte | U2.11 | 0 à 8 38 à 45 45 à 58 | 99,8 à 99,7 86,8 86,3 à 85 | 86,2 à 83,5 99,4 99,4 à 99,2 | 30 10 à 15 10 ⁻⁵ 10 à 15 10 ⁻⁵ |
| Périphérie (Molinies) | P18 | -15,7 | -45 | 3 | 48 | 45 | S12 | Fibrique Mésique à fibrique | U2.4 | 60 à 63,2 0 à 45 | 87,3 90,9 à 77,1 | 99,7 99,8 à 96 | 10 à 15 10 ⁻⁵ 30 10 ⁻¹ |
| | P20 | -41,8 | -63 | -25,4 | 37,6 | 63 | S11 | Fibrique | U2.11 | 0 à 38 | 90,9 à 77,1 | 99,6 à 96 | 30 10 ⁻¹ |
| | P8 | -52,3 | -66,8 | -20,4 | 46,4 | 66,8 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - |
| Périphérie (Molinies) | P10 | -48,5 | -100,5 | -30 | 70,5 | 100,5 | T | Réductisol à anmoor Arène/substratum | U2.0 | - | - | - | - |
| | P11 | -52,0 | -96 | -14 | 82 | 96 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - |
| | P15 | -54,7 | -123 | -23 | 100 | 123 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - |
| | P16 | -41,4 | -73 | -10 | 63 | 73 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - |
| | P17 | -54,6 | -100 | -17,1 | 82,9 | 100 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - |
| P19 | -48,3 | -85,2 | -32 | 53,2 | 85,2 | T | Réductisol à anmoor | U2.0 | - | - | - | - | |

Tableau 23 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques en fonction des faciès pédologique, des unités géophysiques et de la profondeur théorique de l'acrotelme (pt : porosité totale ; TH : Taux d'humidité ; Pe : porosité efficace ; K : conductivité hydraulique ou perméabilité)

Afin d'intégrer correctement les variables présentées dans le Tableau 23, nous discuterons ces paramètres selon une approche sectorielle :

- Le **secteur Nord** avec la dépression à Scheuchzérie offre une rétention maximale de l'eau (porosité totale proche des 100%, TH : 96,1%). Ce système est adossé à d'autres microtopes tels que la pinède, qui présente par ailleurs des propriétés hydro-pédologiques comparables (porosité totale : 100%, TH : 93,2%). Les valeurs de conductivité hydraulique sont assez fortes et illustrent une capacité de stockage dynamique accrue. Les secteurs présentant des faciès plus humifiés voient leurs propriétés hydro-structurales diminuées mais restent très intéressants sous un angle hydrologique. Le contexte du site avec des fossés collecteurs et la présence de réductisols et de sols moins profonds entre Fontfroide et ce secteur de pinède sont vus comme des indicateurs facilitant le déversement de l'eau vers l'exutoire.
- Les **secteurs centraux** (secteur à molinies et faciès à proximité de Fontfroide) avec une large part de sols dégradés et de sols pseudotourbeux jouent le rôle de transition entre le Nord et le Sud. Les propriétés hydrophysiques de ces sols sont globalement moins élevées que pour le secteur précédent. En revanche, les valeurs de conductivités hydrauliques ne sont pas à écarter et la moindre capacité de ces systèmes à retenir l'eau dans le temps (faible pouvoir d'absorption par les sphaignes) fait de lui un secteur propice pour le soutien d'étiage. Les possibilités de stockage sont plus faibles mais le stockage dynamique est plus important.
- Les **secteurs Sud-Ouest** de la Pinède à sphaignes offrent des possibilités de stockage importantes (Porosité maximale : 99,9% et TH : 86,4%). Si les valeurs théoriques de stockage dynamique sont très intéressantes sur le plan hydrologique, la présence d'un horizon assaini tend à perturber ces conditions optimales de circulation. En effet, le toit du haut de la nappe ne dépasse pas -20,2 cm. La présence de propriétés hydrodynamiques importantes sous l'acrotelme théorique et la considération que le mécanisme de circulation est important dans la profondeur du bombement permettent de relativiser et de faire de ce secteur une zone de premier intérêt dans le stockage de l'eau.
- Les **secteurs Sud-Est** qui ont fait l'objet d'investigations in situ et d'analyses en laboratoire pour l'année 2019. Les analyses font observer des valeurs maximales de PT à plus de 99,5% et de TH à 90%. Les valeurs de stockage sont importantes que ce soit en surface ou en profondeur. La présence d'anciens fossés dans ce microtope comblé naturellement est susceptible de favoriser les écoulements longitudinaux vers le ruisseau sud notamment.
- Les **secteurs sud** à molinies affichent des valeurs de stockage dynamique légèrement plus faibles. La proximité immédiate des zones périphériques dans ces secteurs, les sols peu profonds et les battements de nappe importants en font un secteur à faible capacité de stockage potentiel. Nous pouvons émettre l'hypothèse que le déphasage du signal hydrologique est rapide.
- Les **secteurs périphériques** qui se conduisent comme des sols de zones humides typiques des secteurs d'accompagnement de cours d'eau. Notons également que la position de ces secteurs entre deux versants, confère à ces espaces une position de premier plan dans la réception des eaux de ruissellements.

En somme, nous pouvons distinguer plusieurs secteurs susceptibles d'assurer des fonctions de relargages :

- les zones à capacité de rétention plus faible et à relargage plus rapide tels que les secteurs périphériques ou encore la zone centrale qui présentent des faciès altérés et une part importante de sols pseudotourbeux ;
- les zones à forte capacité de stockage potentiel lorsque la tourbe n'est pas à saturation. Le déphasage du signal hydrologique sera plus important et sa transmission facilitée par le réseau de fossés présents à proximité de ces secteurs. Les secteurs concernés sont les réservoirs Nord et Sud.

12.6. Construction d'une géométrie et d'une structure 3D de la tourbière du Col du Luitel

Les travaux et interprétation réalisés, ainsi que les données acquises ou traitées par Jolly (2018 et 2019) et Garambois (2008) ont été reprises sous SIG (ArcGIS pro) afin de construire une géométrie et une structure 3D de la tourbière du col du Luitel.

12.6.1. Codes structures de la tourbière du col

Dans un premier temps, les codes structures (Code_TJ, Tableau 24) établis par Jolly (2019) ont été repris, simplifiés et homogénéisés (Code_2).

| Type (zone nord) | Code_TJ | Code_2 |
|---|---------|--------|
| Neige | | N |
| Végétation | | Veget |
| Remblais et talus | U5 | R |
| Réductisol | U0 | R |
| Horizon assaini, tourbe mésique à fibrique | U2.2 | A |
| Horizon assaini, tourbe mésique à saprique | U2.6 | A |
| Tourbe fibreuse blonde dans l'eau | U1 | T0 |
| Tourbe fibrique, tourbe fibrique mixte | U2.1 | T1 |
| Tourbe fibrique | U2.4 | T1 |
| Tourbe fibrique, tourbe mésique | U2.3 | T2 |
| Tourbe mésique à fibrique, tourbe fibrique, tourbe mésique, Gytja | U2.7 | T3 |
| Tourbe mésique à saprique | U2.5 | T4 |
| Tourbe saprique | U2.8 | T5 |
| Substratum | | Sub |

| Type (zone sud) | Code_TJ | Code_2 |
|--|---------|--------|
| Neige | | N |
| Végétation | | Veget |
| Remblais et talus | U5 | |
| Réductisol | U0 | R |
| Horizon assaini, tourbe mésique à fibrique | U2.2 | |
| Horizon assaini, horizon organo-minéral, tourbe mésique (U2.16) | U2.6 | A |
| Tourbe fibrique, horizon assaini, tourbe mésique | U2.10 | TA |
| Tourbe fibreuse blonde dans l'eau | U1 | |
| Tourbe fibrique | U2.4 | T1 |
| Tourbe fibrique, tourbe mésique | U2.3 | |
| Tourbe mésique à fibrique, tourbe fibrique, tourbe mésique, Gytja | U2.7 | T3 |
| Tourbe fibrique, tourbe fibrique à mixte, tourbe mésique à fibrique, tourbe mésique à saprique | U2.14 | TB |
| Tourbe mésique à fibrique | U2.13 | T2 |
| Tourbe mésique à saprique | U2.5 | |
| Tourbe saprique | U2.8 | T5 |
| Substratum | | Sub |

Tableau 24 : Codes structure de la tourbière du col

Les parties suivantes présentent un bilan des données sources (Jolly, 2019 ; Garambois, 2008) et des modifications effectuées sur celles-ci afin d'obtenir une image homogène de la structure et de la géométrie de la tourbière du Col.

12.6.2. Structure interne : Zone nord de la tourbière du col

- **T1 – profil transversal 1 (le plus au nord de la zone nord)**

Orientation : ouest/est

Longueur : 0 à 74 m

Intersection : L2 (102 m) à 40 m

Entités à l'intersection L2/T1 : U2.3 ; U2.4 ; U2.5

Rmq : -

- **T2 – profil transversal 2**

Orientation : ouest/est

Longueur : 0 à 118 m

Intersection : L2 (153 m) à 53 m

Entités à l'intersection L2/T2 : U2.3 ; U2.4 ; U1

Rmq :

- suppression de l'entité U2.5 pour simplifier le profil
- intersection avec L2 problématique dans le recoupement des entités (à terme il faudra mieux déterminer l'emprise des entités U1 et U2.1 par rapport à L2)

- **T3 – profil transversal 3**

Orientation : ouest/est

Longueur : 0 à 105 m

Intersection : L2 (195 m) à 52 m

Entités à l'intersection L2/T3 : U2.3 ; U2.4 ; U2.5

Rmq :

- entité inconnue de 11 à 22 m
- suppression de l'entité inconnue et attribution code U2.3

- **T4 – profil transversal 4**

Orientation : ouest/est

Longueur : 0 à 91 m

Intersection : L2 (229 m) à 38 m

Entités à l'intersection L2/T4 : U2.2 ; U2.4 ; substratum

Rmq :

- incertitude sur le code U2.4 ; il s'agit potentiellement de U2.3

- **T5 – profil transversal 5 (le plus au sud de la zone nord)**

Orientation : ouest/est

Longueur : 0 à 85 m

Intersection : L2 (269 m) à 30 m

Entités à l'intersection L2/T5 : U2.6 ; substratum

Rmq :

- incertitude sur la zone la plus profonde (20 à 29 m), code U2.4 ou U2.3

- **L2 – profil longitudinal 2 (moitié nord)**

Orientation : nord/sud

Longueur : 0 à 276

Intersections : T1 (102 m), T2 (153 m), T3 (195 m), T4 (229 m), T5 (269 m)

Rmq :

- voir profils précédents
- correction U2.2 et U2.6 (simplification en U2.6)

12.6.3. *Structure interne : Zone sud de la tourbière du col*

• **T6 – profil transversal 6 (le plus au nord de la zone sud)**

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Orientation : ouest/est | Longueur : 0 à 164 m |
| Intersections : - L1 (267 m) à 96 m | Entités : U2.6 ; U2.7 ; U2.8 |
| - L2 (366 m) à 78 m | Entités : U2.6 ; U2.7 ; U2.8 |
| - L3 (70 m) à 37 m | Entités : U2.6 ; substratum |

Rmq : -

• **T7 – profil transversal 7**

| | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Orientation : ouest/est | Longueur : 0 à 283 m |
| Intersections : - L1 (123 m) à 223 m | Entités : U2.4 ; U2.14 ; substratum |
| - L2 (473 m) à 147 m | Entités : U2.4 ; U2.14 |
| - L3 (195 m) à 69 m | Entités : U2.10 ; U2.4 ; substratum ? |

Rmq :

- au niveau du croisement avec L3 le profil T7 devrait atteindre le substratum à -2,62 m, ce qui n'est pas le cas / le problème se règle en traitant le profil à l'envers l'est et l'ouest ayant vraisemblablement été inversés lors du premier traitement
- entité inconnue U3 (252 m à 283 m) / recodée en U0

• **T8 – profil transversal 8**

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Orientation : ouest/est | Longueur : 0 à 260 m |
| Intersections : - L1 (68 m) à 216 m | Entités : U2.4 ; U2.14 ; substratum |
| - L2 (521 m) à 142 m | Entités : U2.4 ; U2.14 ; substratum |
| - L3 (257 m) à 68 m | Entités : U2.10 ; U2.4 ; substratum |

Rmq :

- recodage de l'unité U2.11 en U.214

• **T9 – profil transversal 9 (le plus au sud de la zone nord)**

| | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Orientation : ouest/est | Longueur : 0 à 264 m |
| Intersections : - L1 (0 m) à 212 m | Entités : U2.4 ; U2.14 ; substratum |
| - L2 (619 m) à 142 m | Entités : U2.10 ; substratum |
| - L3 (357 m) à 55 m | Entités : U2.10 ; U2.13 ; substratum |

Rmq :

- T9 et L1 ne se croisent pas, ils sont très proches
- entité grise non codée, le choix a été fait de la coder en U0 (possible aussi en U2.6 ou U2.16)
- entité jaune non codée, le choix a été fait de coder la supérieure en U2.14 et l'inférieure en U2.4

12.6.5. *Topographie du substratum*

La topographie du substratum (ou de l'interface tourbière/substratum) a été réalisée à partir des profils acquis en 2019 et ceux acquis par Garambois (2008).

- **T1 (P2 Garambois)**

Profil T1 complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P2

Intersection T1/P2 – L2/P5 = -8,2 m

- **T2 (P3 Garambois)**

Profil T2 complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P3

Intersection T2/P3 – L2/P5 = -10,9 m

- **T3 (P9 Garambois)**

Profil T3 complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P9

Intersection T3/P9 – L2/P5 = -8 m

- **T4 (P4 Garambois)**

Profil entier / non complété avec le profil de Garambois P4.

On note que le profil de Garambois P4 est légèrement décalé et interprète des profondeurs de substratum plus importantes, jusqu'à 3,6 m contre 2,7m pour le profil T4

Intersection T4 – L2 = -1,4 m

- **T5 (P7 Garambois)**

Profil entier / non complété avec le profil de Garambois P7.

On note que le profil de Garambois P7 est légèrement décalé et interprète des profondeurs de substratum plus importantes, jusqu'à 2,6 m contre 1,7m pour le profil T4.

Intersection T5 – L2 = -1,2 m

- **L2 nord (P5 Garambois)**

Profil L2 nord complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P5

- **L2 sud (P5 Garambois)**

Profil L2 sud complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P5

- **L3 (P13 Garambois)**

Profil L3 complété sur la partie nord en 2 endroits, entre L3 et L2 (-5,9 à -3,4 m) et sur un petit trou dans L3 (-4,7 m) avec le profil de Garambois P13

Intersections : L3 – L2/P5 = -3,9 m

- **L1 (P11 Garambois)**

Profil L1 sud complété sur la partie nord avec le profil de Garambois P11

- **T6 (P6 Garambois)**

Profil T6 complété sur la partie centrale avec le profil de Garambois P8

Intersections :

- L3 – T6 = -0,4 m
- T6/P6 – L2/P5 = -5,2 m
- T6/P6 – L1/P11 = -6,6 m

- **T7 (pas de profil Garambois)**

Décalage de L1/P11 pour raccord

Intersection : L3 – T7 = -2,6 m

- **T8 (P12 et P101 Garambois)**

Profil entier / non complété avec les profils de Garambois P12 et 101.

Intersections :

- L3 – T8 = -2,4 m
- L2 – T8 = -3,2 m
- L1 – T8 = -1,9 m

Reprise du profil P12 par calage raccord au niveau des intersections partie ouest et un peu est :

- P12 – L3 = -2,6 m
- P12 – L1/11 = -2,2 m

Reprise du profil P101 par calage raccord au niveau des intersections partie ouest et un peu est :

- P101 – L3 = -2,5 m
- P101 – L2 = -3,5 m
- P101 – L1/P11 = -4,9 m

- **T9 (P1 Garambois)**

Profil entier / non complété avec le profil de Garambois P1.

Intersections :

- L3 – T9 = -1,3 m
- L2 – T9 = -0,4 m
- L1 – T9 = -0,9 et -0,7 m (pas de croisement réel)

On note des différences de profondeur entre T9 et P1 : -2,3 contre -3,7 (cuvette 1 ouest) ; -1,1 contre 3,7m (cuvette 2 centre) ; -2,4 contre -2,8 (cuvette 3 est)

- **P8 Garambois**

Reprise du profil par calage raccord au niveau des intersections :

- L3/P13 – P8 = -4,7 m
- L2/P5 – P8 = -7,7
- L1/P11 – P8 = -5,2 m

- **P14 Garambois**

Non utilisé

- **Piézomètres**

P1, P2, P3, P4, P5, P9, P18 : profondeurs > 4m

Non utilisables car n'atteignent pas le substratum

P6 = -0,54 m ; P7 = -1,17 ; P8 = -0,475 ; P10 = -0,68 ; P11 = -0,725 ; P12 = -3,185 ;

P13 = -2,255 ; P14 = -3,085 ; P15 = -1,405 ; P16 = -0,59 ; P17 = -1,27 ; P19 = -1,075 ; P20 = -1,14

Utilisables car atteignent le substratum / bonne cohérence des profondeurs

- **Carottes**

Seules les carottes P3 et S4 atteignent les Gytija :

- P3 : -6,07 à -6,63 ; -7,1 à -7,15 ; -7,41 à -8,24 ; -8,44 à -10,48 (argile) (carotte de Guiter et al., 2013)

Ici le substratum est à 10,5 m (10 à 11 m) ce qui laisse supposer que cette carotte atteint le substratum.

- S4 : -1,5 à -1,8 ; -5,1 à 5,4

Ici le substratum est à une profondeur d'environ 7 m (6 à 8 m) ce qui laisse supposer 0,6 à 2,6 m de gytija/argile

12.6.6. La tourbière du col du Luitel en images avec ArcGIS pro

12.6.6.1. Géométrie et structure

La Figure 167 et la Figure 168 proposent une reconstitution 3D du substratum de la tourbière du col par interpolation (méthode de l'inverse d'une puissance de la distance – ArcGIS pro, Geostatistical wizard) vue de dessus et de dessous. Cette reconstitution a été réalisée à l'aide des données acquises par Garambois (2008) et celles acquises dans le cadre du projet ZHTB. De plus, des sondages à la perche ont été effectués en juillet 2021 dans la combe de Fontfroide (amont P4 et P5) et sur la partie sud (à proximité P12 et P19) proche des limites de la réserve afin de limiter les incertitudes sur la géométrie de ces secteurs. Sur ces deux figures, les piézomètres et les carottes pédologiques ont été positionnés.

La Figure 169 propose une reconstitution 3D de la structure interne de la tourbière du col. Sur cette figure sont positionnés les piézomètres, les carottes pédologiques et la cote du substratum [pointillés noirs : données Garambois (2008) ; pointillés rouge : données projet ZHTB]. La légende des codes structures est donnée dans le Tableau 24.

12.6.6.2. Points et plans de références

Les données existantes et acquises sur la tourbière du col ont permis de déterminer la cote d'un certain nombre de plans ou de points de référence :

- Cote de l'exutoire Fontfroide : 1258,41 m (déterminé à partir du mnt 25 cm). Cette cote permet de déterminer le plan du niveau minimal de surverse de l'eau contenue dans la tourbière sur la partie sud (aire d'alimentation de Fontfroide). On note que cette cote se situe 0,36 m au-dessus du plan de gytija sud défini ci-après.

- Cote de l'exutoire Pezanti : 1260,25 m (déterminé à partir du mnt 25 cm). Cette cote permet de déterminer le plan du niveau minimal de surverse de l'eau contenue dans la tourbière sur la partie sud (aire d'alimentation de Pezanti).

- Cote de surverse nord/sud : 1259,97 m (déterminé à partir de la reconstitution du modelé du substratum). Cette cote permet de déterminer le plan du niveau minimal de surverse de l'eau contenue dans la tourbière nord en direction de la zone centrale.

- Cote des gytija nord (P3) : 1255,43 m (niveau supérieur) ; 1253,26 m (niveau intermédiaire) ; 1253,06 m (niveau inférieur). Ces cotes, déterminées à partir des carottes pédologiques, permettent de déterminer l'emprise des gytija, en plan par hypothèse, sur la zone nord de la tourbière du col du Luitel.

- Cote des gyttja sud (S4) : 1258,05 m (niveau supérieur) ; 1254,45 m (niveau inférieur). Ces cotes, déterminées à partir des carottes pédologiques, permettent de déterminer l'emprise des gyttja, en plan par hypothèse, sur la zone sud de la tourbière du col.

La Figure 170 propose une vue de dessus des niveaux des plan de surverse de Fontfroide et nord vers sud par rapport à la géométrie du substratum. On observe clairement que le plan de Fontfroide est plus bas que celui de la surverse nord vers sud. L'exutoire de la cuvette nord est donc perché (+ 1,5 m environ) par rapport à celui de Fontfroide. La cuvette nord est donc en « capacité » de conserver son eau.

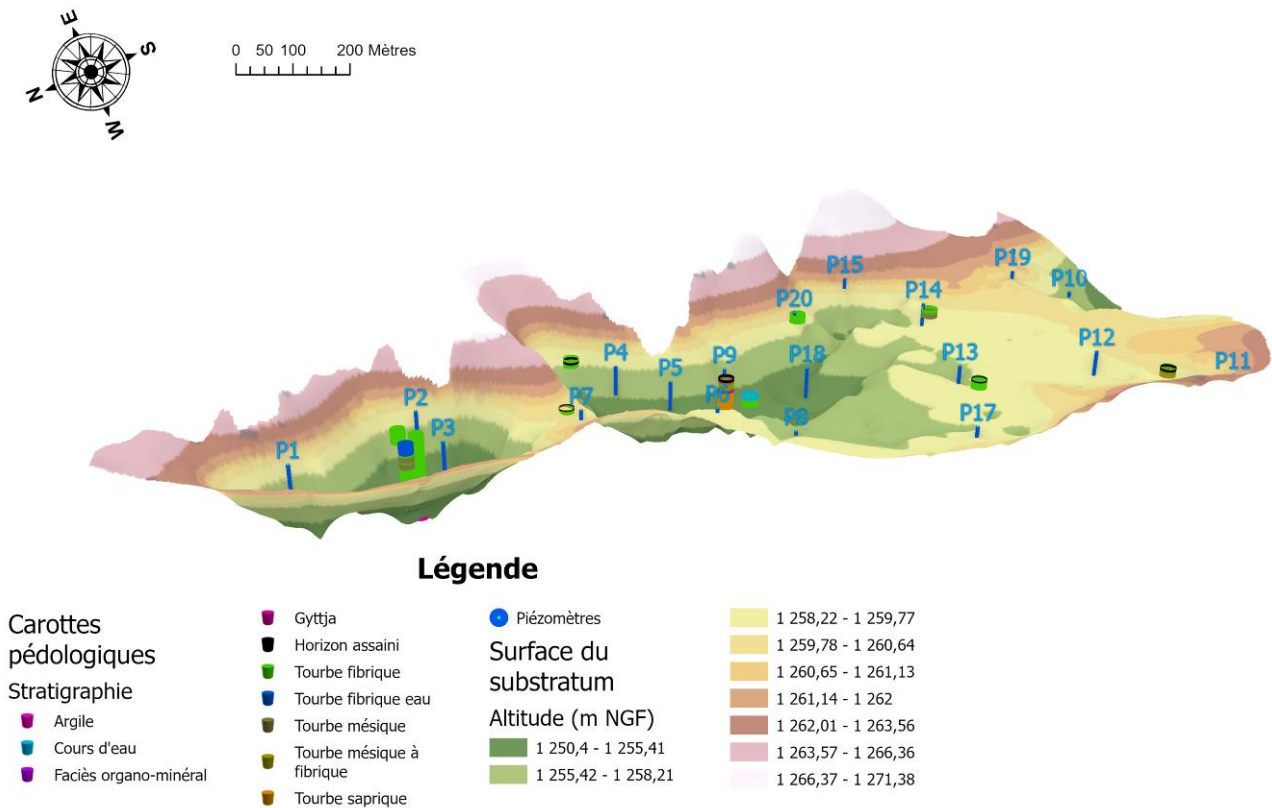


Figure 167 : Reconstitution 3D du substratum de la tourbière du col du Luitel par interpolation vue de dessus

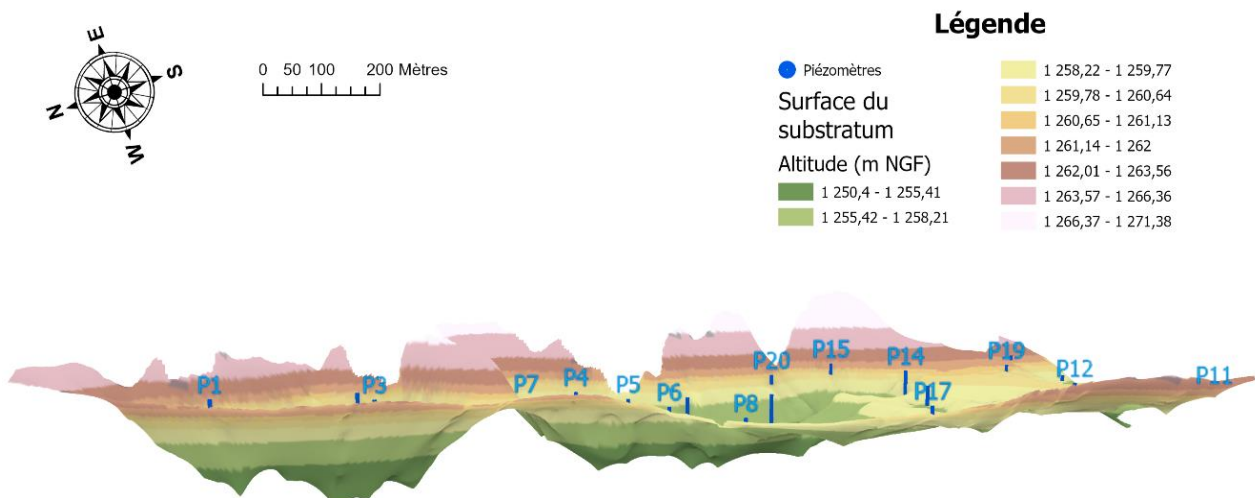


Figure 168 : Reconstitution 3D du substratum de la tourbière du col du Luitel par interpolation vue de dessous

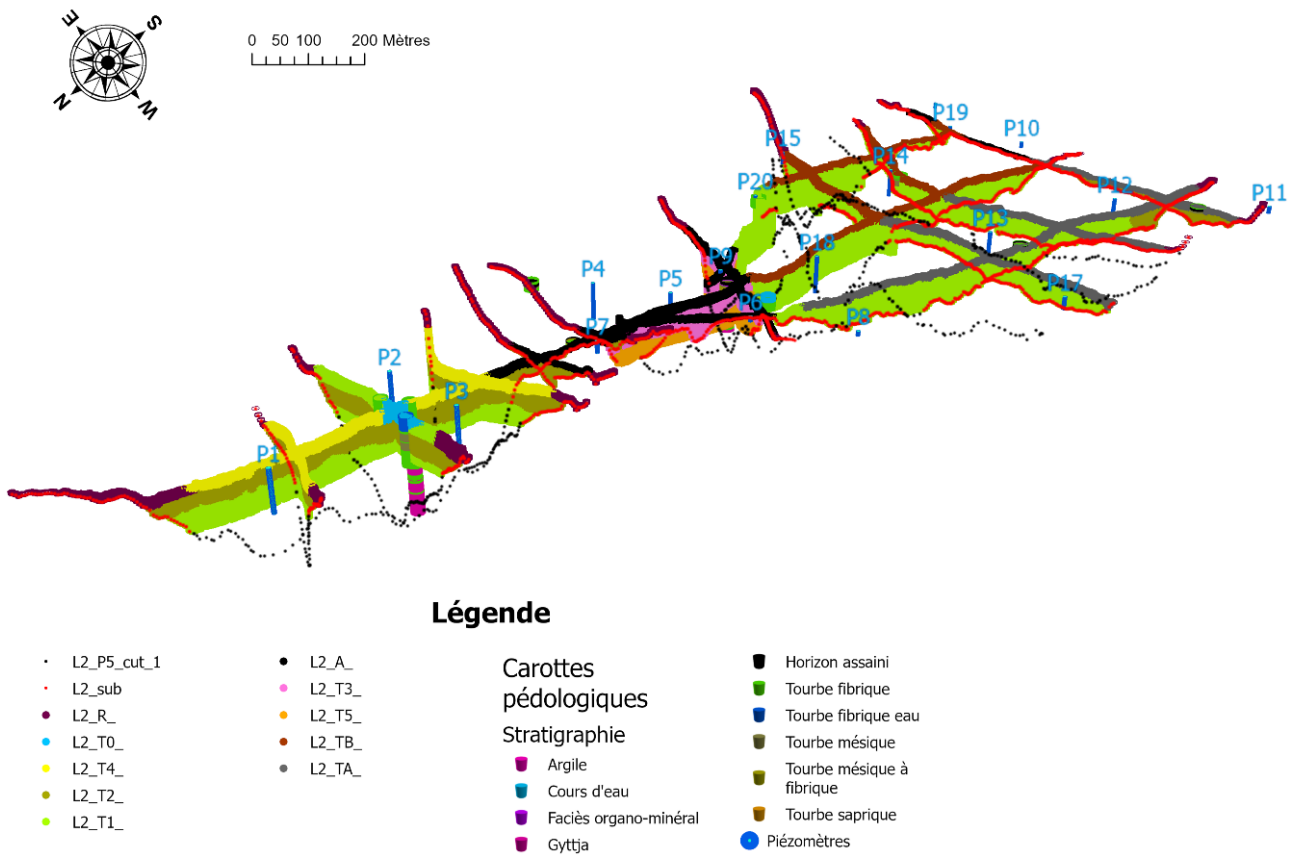


Figure 169 : Structure interne 3D uniformisée de la tourbière du col du Luitel

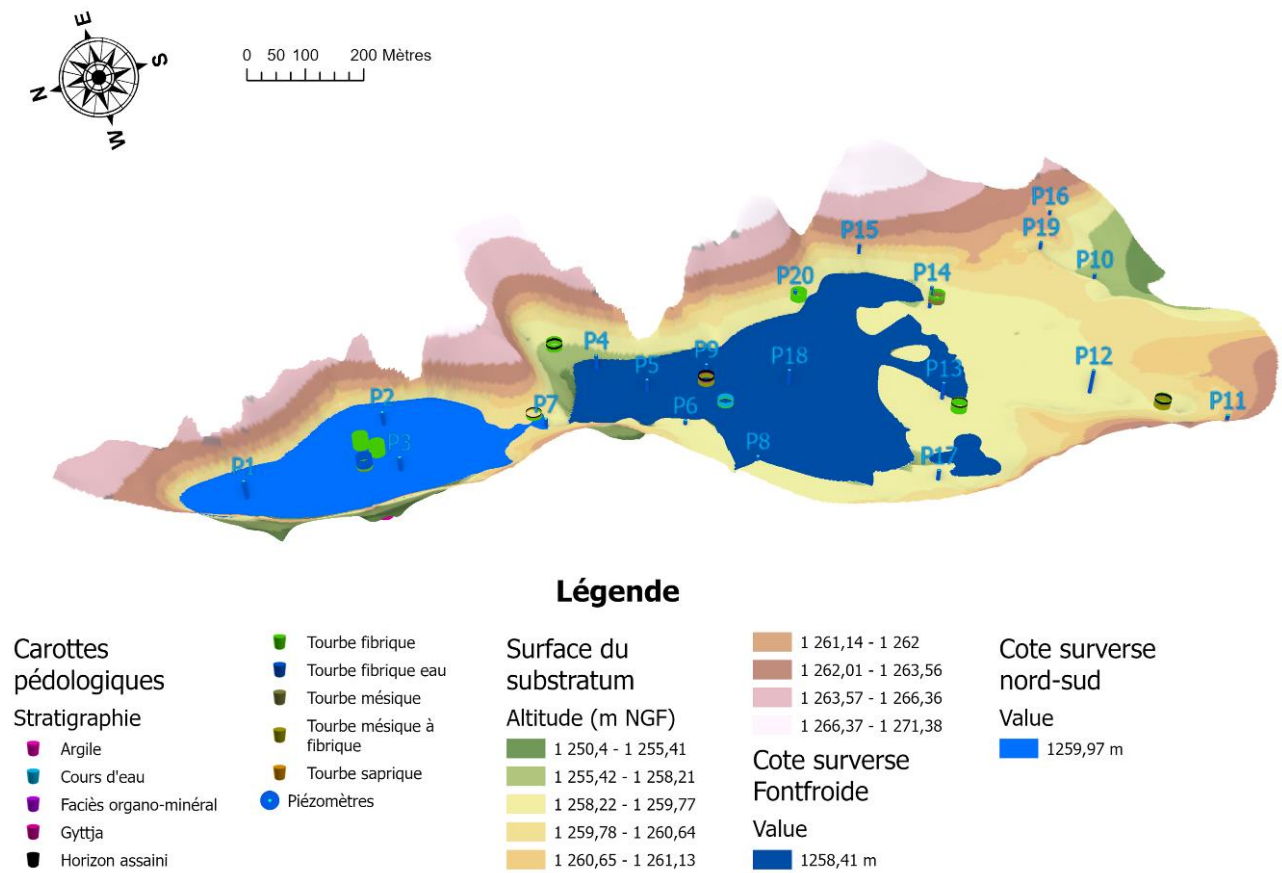


Figure 170 : Cote de surverse de Fontfroide (partie sud de la tourbière du col du Luitel) et cote de surverse nord vers sud par rapport à la géométrie du modelé du substratum

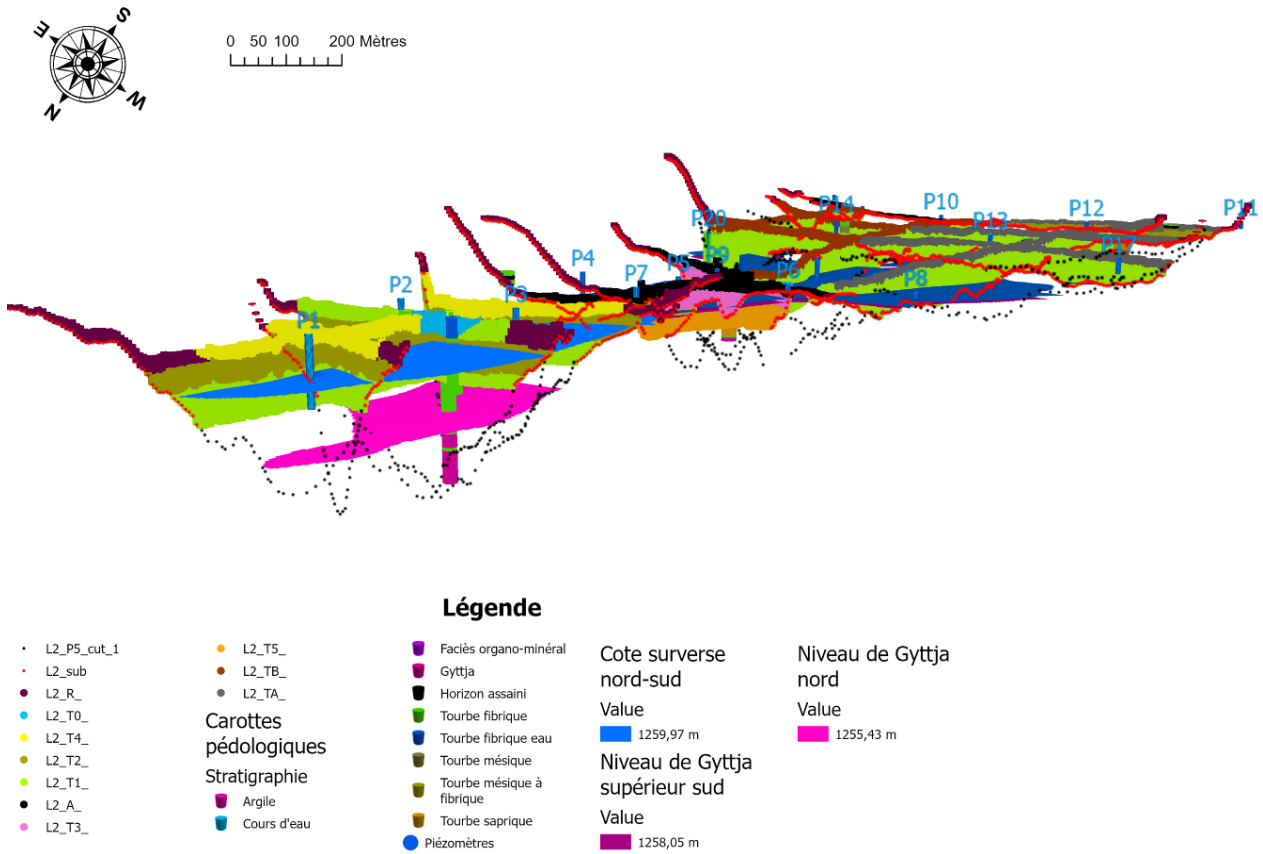


Figure 171 : Plans de surverses et de gytja supérieurs par rapport à la structure 3D de la tourbière du col du Luitel

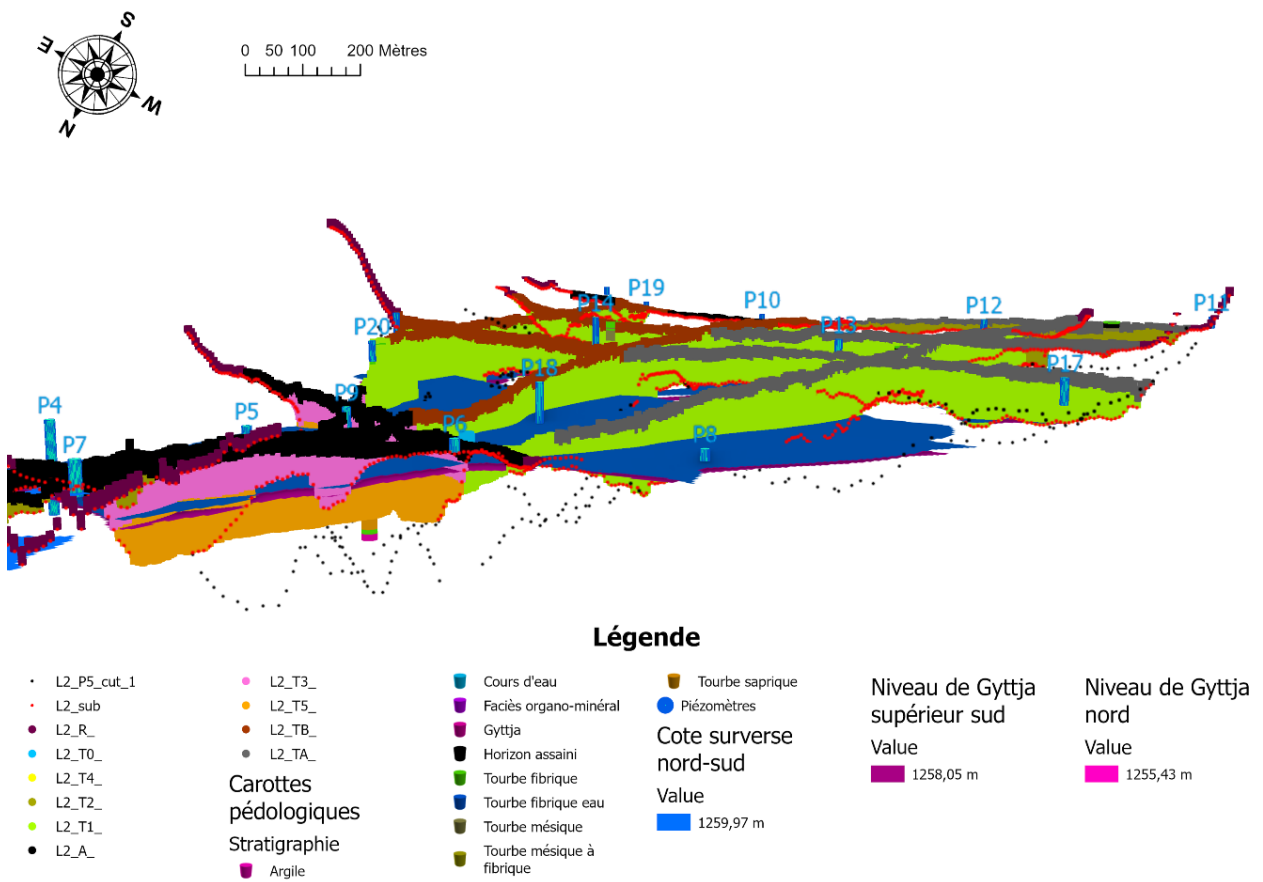


Figure 172 : Plans de surverses et de gytja supérieurs par rapport à la structure 3D de la tourbière du col du Luitel (partie sud).

Les Figure 171 et Figure 172 positionnent les plans de surverse (Fontfroide et nord vers sud) et les plans de gytija supérieurs dans la structure 3D de la tourbière du col. Sur la partie nord, l'épaisseur de tourbe entre les gytija et le niveau de surverse est relativement importante : l'eau contenue dans ces niveaux tourbeux n'est pas transférable de manière gravitaire vers la partie sud. Sur la partie sud, l'épaisseur de tourbe entre les gytija et le niveau de surverse est relativement faible.

12.6.6.3. Niveaux de nappe et estimation des volumes de tourbe saturée en eau et des volumes écoulés

Les données piézométriques enregistrées automatiquement (sondes) ou relevées manuellement (juin à août) sur la tourbière du Luitel permettent de construire des cartes piézométriques par interpolation (méthode de l'inverse du carré de la distance – ArcGIS pro, Geostatistical wizard).

La Figure 173 présente les niveaux piézométriques du 27 août 2020 (niveau le plus bas de l'été 2020) par rapport à la géométrie 3D du substratum. On observe que la partie nord et la partie sud de la tourbière sont déconnectées d'un point de vue hydraulique.

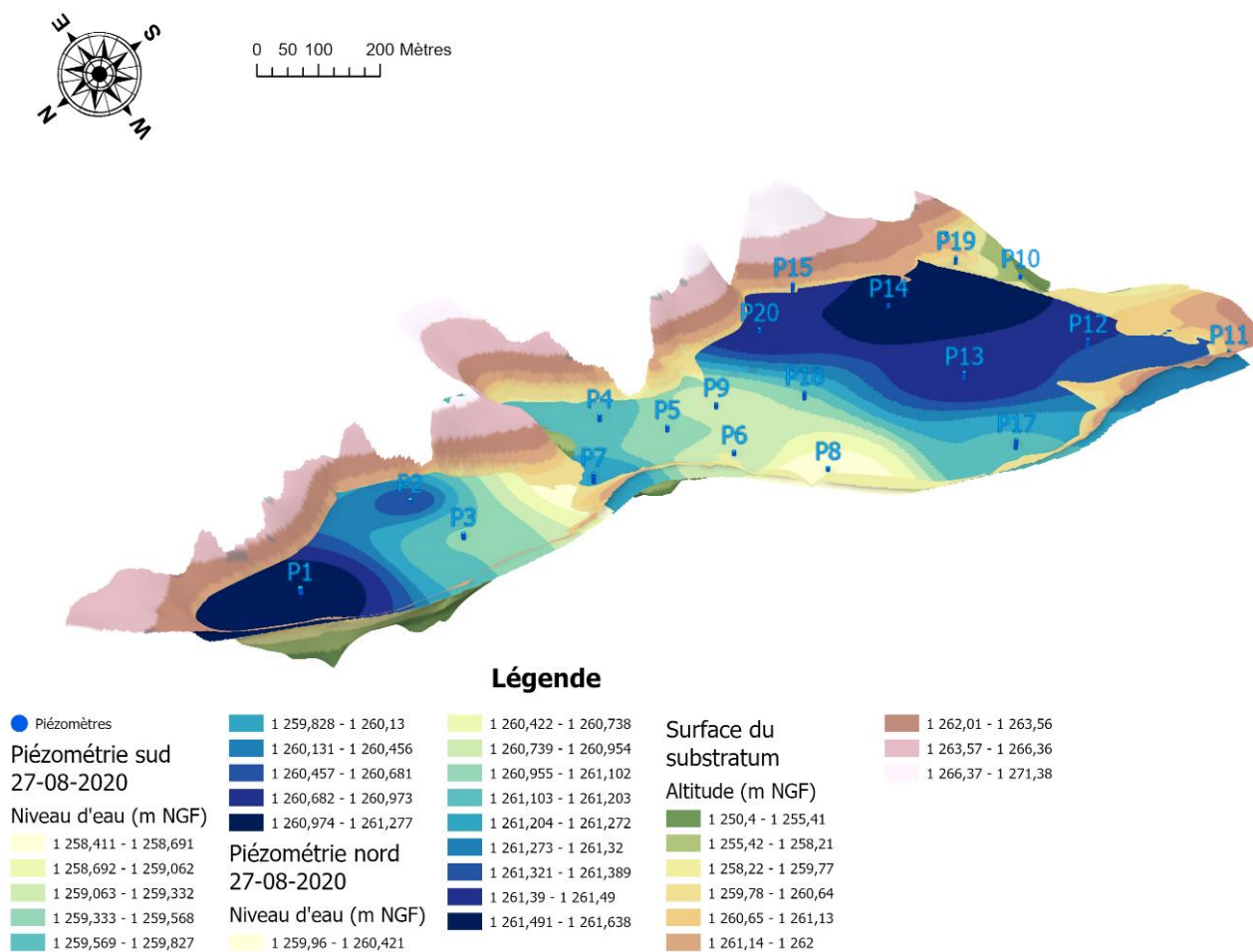


Figure 173 : Niveaux piézométriques du 27 août 2020 (niveau le plus bas de l'été 2020) par rapport à la géométrie 3D du substratum

La Figure 174 propose un zoom des niveaux piézométriques du tarissement de l'été 2020 : 1) le 14 juin 2020 présente le niveau haut et 2) et 27 août 2020 présente le niveau bas. Ces deux piézométries sont positionnées dans la structure 3D de la tourbière du Luitel et par rapport aux différents niveaux de référence. Si la baisse du niveau piézométrique de juin à août est suffisante pour déconnecter hydrauliquement la partie nord de la partie sud, on constate sur cette figure que cette baisse de niveau n'entame que de très peu les réserves d'eau contenues dans la tourbe de la partie nord. En effet, il reste encore une bonne tranche de tourbe saturée entre le niveau bas d'août 2020 et le niveau minimal de surverse au niveau des piézomètres P1, P2 et P3. La faible conductivité hydraulique (perméabilité) au niveau de ces piézomètres réduit l'écoulement gravitaire et la perte d'eau.

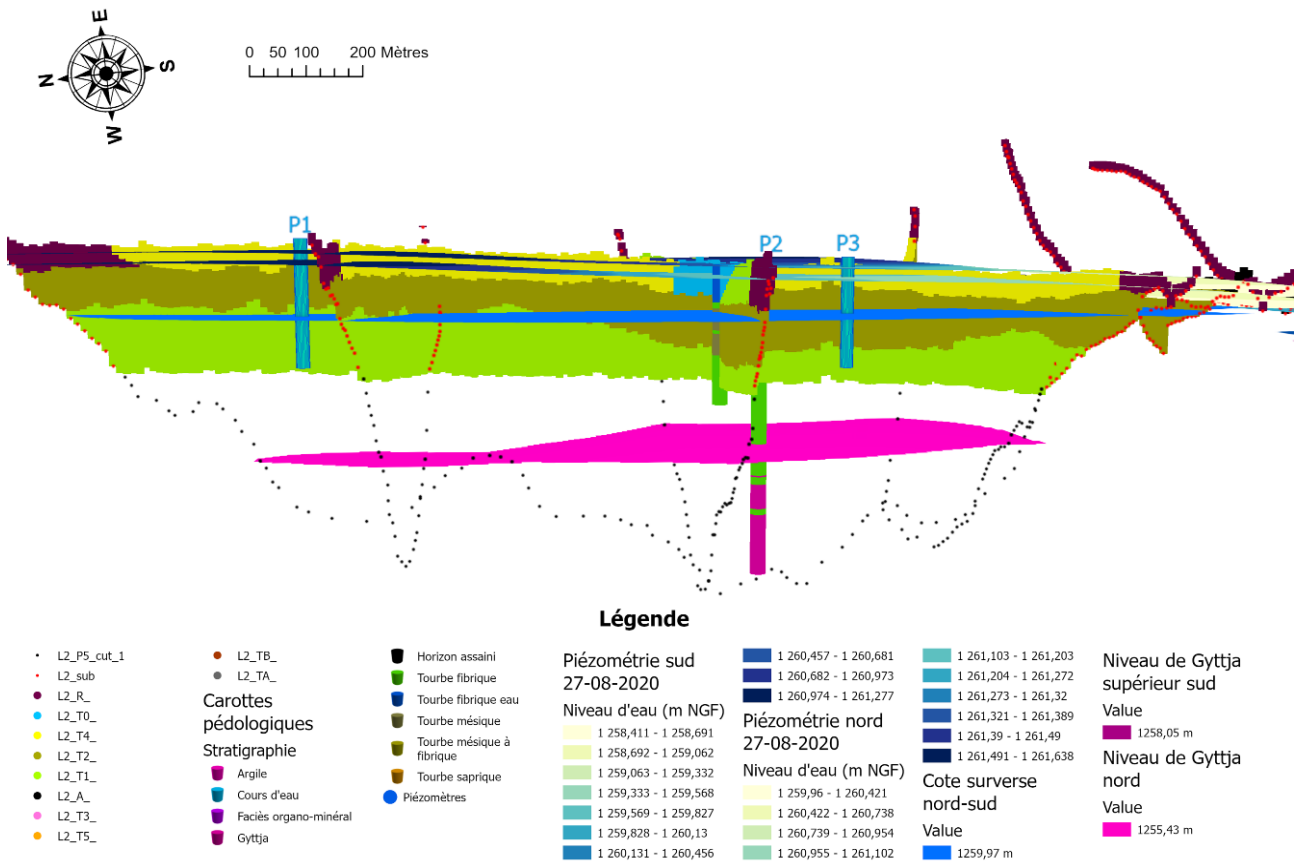


Figure 174 : Niveaux piézométriques du tarissement de l'étiage 2020 (14 juin et 27 août) dans la structure 3D de la tourbière du Luitel (cuvette nord)

Les données acquises et les traitements effectués permettent d'estimer des volumes à l'aide des outils proposés par ArcGIS pro. L'outil « Volume » permet de calculer le volume entre un plan de référence et un modelé de surface. Le Tableau 25 présent les estimations des volumes de tourbe saturée en eau et leur évolution durant l'étiage 2020. Les calculs ont été effectués pour la partie nord et la partie sud de la tourbière su col avec les données suivantes :

- les plans de référence de surverse : 1) nord vers sud (1259,97 m) et 2) de Fontfroide (1258,41 m) ;
- les modelés de surface des piézométries de juin et août 2020 ;
- le modelé de surface du substratum.

| Zone nord – Plan de référence : 1259,97 m | Volume de tourbe saturée en eau (m ³) |
|--|---|
| Volume sous le plan de référence (volume captif) | 43 847 |
| Volume entre le niveau piézométrique (juin 2020) et le plan de référence | 25 872 |
| Volume entre le niveau piézométrique (juin 2020) et le plan de référence | 20 304 |
| Volume entre les niveaux piézométriques (juin et août 2020) | 5 568 |
| Volume total sous le niveau piézométrique de juin 2020 | 69 719 |
| Zone sud – Plan de référence : 1258,41 m | |
| Volume sous le plan de référence (volume captif) | 65 618 |
| Volume entre le niveau piézométrique (juin 2020) et le plan de référence | 173 322 |
| Volume entre le niveau piézométrique (juin 2020) et le plan de référence | 136 471 |
| Volume entre les niveaux piézométriques (juin et août 2020) | 36 851 |
| Volume total sous le niveau piézométrique de juin 2020 | 238 940 |

Tableau 25 : Estimation des volumes de tourbe saturée en eau sur la tourbière du col du Luitel

Partie II – Luitel – Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne

L'outil « Remblais-déblais » proposé par ArcGIS pro permet de calculer plus précisément les volumes entre 2 modelés de surface. Ce volume a été calculé pour les parties nord et sud de la tourbière du col pour les piézométries de juin et août 2020, respectivement 5 624 m³ et 37 410 m³ ce qui est très proche des valeurs estimées dans le Tableau 25. Ce volume est estimé à 2 548 m³ pour la zone nord et 16 005 m³ pour la zone sud lors de l'étiage 2019 (27 juin au 21 juillet).

| Périodes | 14/06/20 au 17/07/20 | 17/07/20 au 27/08/20 | 14/06/20 au 27/08/20 | 27/06/19 au 21/07/19 |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Nombre de jours | 34 | 42 | 75 | 25 |
| Débit moyen de Fontfroide amont (l/s) | 5,3 | 0,2 | 2,5 | 1,1 |
| Débit moyen de Fontfroide aval (l/s) | 4,8 | 0,1 | 2,2 | 1,0 |
| Volume d'eau écoulée cumulé pour Fontfroide amont (m ³) | 15 596 | 841 | 16 437 | 2 472 |
| Volume d'eau écoulée cumulé pour Fontfroide aval (m ³) | 14 234 | 344 | 14 578 | 2 240 |
| Différence de volume d'eau écoulé aval-amont (m ³) | -1 362 | -497 | -1 859 | -232 |
| Volume de tourbe saturée (nord et sud) (m ³) | 14 908 | 7 689 | 22 287 | 18 553 |
| Cumul de l'ETP (mm ou l/m ²) | -119,5 | -188,5 | -308 | -126 |
| Cumul de Pluie (mm ou l/m ²) | 26,6 | 53 | 79,6 | 1,6 |

Tableau 26 : Bilan des écoulements pour Fontfroide sur l'étiage 2020 et 2019

| Secteur Nord - Période | 14/06/20 au 17/07/20 | 17/07/20 au 27/08/20 | 14/06/20 au 27/08/20 | 27/06/19 au 21/07/19 |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Volumes de tourbe saturée en eau (m ³) | 3591 | 2033 | 5624 | 2548 |
| Volumes de tourbe saturée en eau (l) | 3,59.10 ⁶ | 2,03.10 ⁶ | 5,62.10 ⁶ | 2,55.10 ⁶ |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour une porosité efficace (Pef) de 100% (l/s) | 1,22 | 0,56 | 0,87 | 1,18 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 45% (m ³) | 1 616 | 915 | 2 531 | 1 147 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=45%(l/s) | 0,55 | 0,25 | 0,39 | 0,53 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 35% (m ³) | 1 257 | 712 | 1 968 | 892 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=35%(l/s) | 0,43 | 0,20 | 0,30 | 0,41 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 15% (m ³) | 359 | 203 | 562 | 255 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=10%(l/s) | 0,12 | 0,06 | 0,09 | 0,12 |

| | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| Surface de tourbière en surface pour la zone nord (m ³) | 17 167 | | | |
| Cumul d'ETP (m ³) | -2 051 | -3 236 | -5 287 | -2 164 |
| Cumul de Pluie (m ³) | 457 | 910 | 1 366 | 27 |

| | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Bilan : Pluie-ETP (m ³) | -1 595 | -2 326 | -3 921 | -2 136 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=100%) + Pluie-ETP (m ³) | 1 996 | -293 | 1 703 | 412 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=100% (l/s) | 0,68 | | 0,26 | 0,19 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=45%) + Pluie-ETP (m ³) | 898 | -132 | 766 | 185 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=45% (l/s) | 0,31 | | 0,12 | 0,09 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=35%) + Pluie-ETP (m ³) | 699 | -103 | 596 | 144 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=35% (l/s) | 0,24 | | 0,09 | 0,07 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=10%) + Pluie-ETP (m ³) | 200 | -29 | 170 | 41 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=10% (l/s) | 0,07 | | 0,03 | 0,02 |

Tableau 27 : Bilan des volumes d'eau pour la zone nord de la tourbière du col du Luitel pour l'étiage 2020 et 2019

| Secteur Sud - Période | 14/06/20 | 17/07/20 | 14/06/20 | 27/06/20 |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | au 17/07/20 | au 27/08/20 | au 27/08/20 | au 21/07/20 |
| Volumes de tourbe saturée en eau (m ³) | 19 756 | 17 671 | 37 410 | 16 005 |
| Volumes de tourbe saturée en eau (l) | 1,98.10 ⁷ | 1,77.10 ⁷ | 3,74.10 ⁷ | 1,60.10 ⁷ |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=100% (l/s) | 6,73 | 4,87 | 5,77 | 7,41 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 45% (m ³) | 8 890 | 7 952 | 16 835 | 7 202 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=45%(l/s) | 3,03 | 2,19 | 2,60 | 3,33 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 35% (m ³) | 6 915 | 6 185 | 13 094 | 5 602 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=35%(l/s) | 2,35 | 1,70 | 2,02 | 2,59 |
| Volume d'eau contenu dans la tourbe pour une porosité efficace (Pef) de 10% (m ³) | 1 976 | 1 767 | 3 741 | 1 601 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=10%(l/s) | 0,67 | 0,49 | 0,58 | 0,74 |
| | | | | |
| Surface de tourbière en surface pour la zone nord (m ³) | 73 668 | | | |
| Cumul d'ETP (m ³) | -8 803 | -13 886 | -22 690 | -10 090 |
| Cumul de Pluie (m ³) | 1 960 | 3 904 | 5 864 | 128 |
| | | | | |
| Bilan : Pluie-ETP (m ³) | -6 844 | -9 982 | -16 826 | -9 962 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=100%) + Pluie-ETP (m ³) | 12 912 | 7 689 | 20 584 | 6 043 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=100% (l/s) | 4,40 | 2,12 | 3,18 | 2,80 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=45%) + Pluie-ETP (m ³) | 5 811 | 3 460 | 9 263 | 2 719 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=45% (l/s) | 1,98 | 0,95 | 1,43 | 1,26 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=35%) + Pluie-ETP (m ³) | 4 519 | 2 691 | 7 204 | 2 115 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=35% (l/s) | 1,54 | 0,74 | 1,11 | 0,98 |
| Bilan : Volume d'eau dans la tourbe (Pef=10%) + Pluie-ETP (m ³) | 1 291 | 769 | 2 058 | 604 |
| Débit de perte de volume moyen par jour pour Pef=10% (l/s) | 0,44 | 0,21 | 0,32 | 0,28 |

Tableau 28 : Bilan des volumes d'eau pour la zone sud de la tourbière du col du Luitel pour l'étiage 2020 et 2019

Les Tableau 26, Tableau 27 et Tableau 28 tentent de dresser un bilan hydrologique intégrant Fontfroide, la zone nord et la zone sud de la tourbière du col pour les étiages estivaux de 2019 (27 juin au 21 juillet) et 2020 (14 juin au 27 août).

Concernant Fontfroide (Tableau 26), on observe que les débits moyens journaliers sur ces périodes peuvent être très faibles (2,5 à 1 l/s, voire moins sur certaines périodes). On constate aussi que les débits aval sont toujours plus faibles que les débits amont. Il est toutefois difficile de dire que Fontfroide perd de l'eau en traversant la tourbière compte-tenu de la faiblesse des débits et des incertitudes : 1) soit donc la tourbière stocke de l'eau de Fontfroide ; 2) soit Fontfroide est déconnecté de la tourbière à l'étiage.

Concernant la zone nord (Tableau 27), le volume de tourbe dénoyé pendant l'étiage 2020 est de l'ordre de 5 624 m³ et 2 548 m³ de l'étiage 2019. Si l'on considère une porosité efficace de la tourbe assez forte (35%) le volume d'eau déstocké est respectivement de l'ordre de 1 968 m³ et de 892 m³. Pour 2020, cela correspond à une perte moyenne de 0,3 l/s (pour 75 jours d'étiage) et pour 2019 à 0,41 l/s (pour 25 jours d'étiage). Cette eau peut être perdue par : 1) ETP ; 2) transfert vers Fontfroide ; 3) pertes non identifiées vers le substratum.

Si l'on considère la tourbière comme un réservoir alimenté par la pluie et pour lequel l'ETP est égale à l'ETR, la perte moyenne en 2020 est estimée à 0,09 l/s et à 0,07 l/s en 2019 pour un débit moyen journalier de Fontfroide aval de l'ordre de 2,2 l/s (2020) et 1 l/s (2019).

Partie II – Luitel – Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne

Concernant la zone sud (Tableau 28), le volume de tourbe dénoyé pendant l'été 2020 est de l'ordre de 37 410 m³ et 16 005 m³ de l'été 2019. Si l'on considère une porosité efficace de la tourbe assez forte (35%) le volume d'eau déstocké est respectivement de l'ordre de 13 094 m³ et de 5 602 m³. Pour 2020, cela correspond à une perte moyenne de 2,02 l/s (pour 75 jours d'été) et pour 2019 à 2,59 l/s (pour 25 jours d'été). Comme précédemment, cette eau peut être perdue par : 1) ETP ; 2) transfert vers Fontfroide ; 3) pertes non identifiées vers le substratum.

Si l'on considère la tourbière comme un réservoir alimenté par la pluie et pour lequel l'ETP est égale à l'ETR, la perte moyenne en 2020 est estimée à 1,11 l/s et à 0,98 l/s en 2019 pour un débit moyen journalier de Fontfroide aval de l'ordre de 2,2 l/s (2020) et 1 l/s (2019).

Pour l'été 2019, en tenant compte des réservoirs nord et sud, la tourbière perd au total de 1,05 à 3,01 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 1,1 l/s.

Pour l'été 2020, en tenant compte des réservoirs nord et sud, la tourbière perd au total de 1,20 à 2,32 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 2,2 l/s.

Ces résultats montrent qu'il est difficile de réaliser un bilan hydrologique précis compte-tenu des incertitudes sur les volumes calculés et sur les transferts d'eau : 1) contribution de la tourbière à l'ETP ; 2) apports de la tourbière à Fontfroide ; 3) pertes de la tourbière vers le substratum. Le phénomène d'interception de la pluie par la végétation n'a pas non plus été pris en compte. De plus, ces mécanismes de transferts d'eau sont vraisemblablement variables dans l'espace (type de végétation, type de sol) et dans le temps (état hydrologique), même à l'échelle d'un été.

12.6.7. *Autres éléments et finalisation*

Pour terminer le travail de construction de la géométrie et de la structure 3D de la tourbière du Luitel, il serait intéressant d'améliorer l'emprise des zones superficielles avec : 1) la carte des réductisols/histosols et la carte de végétation de la tourbière du col. Une fois ce travail effectué, il sera possible d'envisager un krigeage 3D et la réalisation de blocs diagrammes 3D avec les couches de Voxel d'ArcGIS pro.

À terme, une fois la géométrie 3D et la structure interne définies, il serait intéressant :

- d'attribuer des propriétés hydrodynamiques aux structures identifiées (notamment K et S) ;
- de calculer les volumes de chaque entité ;
- de calculer le volume d'eau maximum stockable et le volume d'eau disponible en fonction de la piézométrie ;
- de réaliser une animation de la variation du niveau piézométrique.

Au final, ces données et ces connaissances pourraient permettre la mise en œuvre d'un travail de modélisation de la tourbière du Luitel (modèle à base physique ou modèle réservoir). Une fois le modèle validé, il serait possible de réaliser des simulations pour, par exemple, estimer l'impact des effets des changements climatiques à moyen ou à long terme sur le complexe tourbeux du Luitel.

12.7. Analyse de la grande carotte de la zone sud (secteur de Fontfroide) de la tourbière du col

L'objectif de ce volet des recherches sur la tourbière de Luitel était d'étudier la façon dont s'était accumulée la matière organique et donc le carbone au fil des millénaires. Une fois le carottage réalisé (voir §12. p155), le travail s'est appuyé sur des mesures de pertes au feu (UJM et MSE) qui permettent d'estimer la teneur en matière organique et sur des mesures de carbone et d'azote (UJM UMR CNRS Magma et Volcans). Des datations par le radiocarbone, au nombre de 12, ont été réalisées par le Centre de Datation par le Radiocarbone de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (Campus de la Doua, 69622 Villeurbanne).

La séquence a été extraite dans la partie centre-est de la tourbière (coordonnées : 45,086995° N / 5,849371° E ; altitude : 1261,5 m) (Figure 175). Nous sommes à une trentaine de mètres de la base du versant proche du piézomètre P9 et sur le secteur amont du ruisseau de Fontfroide. Le secteur est actuellement très humide et souvent inondé ce qui explique la présence de bouquets de saules (*Salix sp.*).



Figure 175 : Localisation du point de carottage au sein du système tourbeux de Luitel (Isère ; 1261,5 m) - Source : Géoportail.

12.7.1. Principaux résultats d'analyse de la carotte

La séquence extraite au carottier manuel russe par section de 60 cm est longue de 452 cm (fig. 2). Le substrat minéral a été atteint par la pointe du carottier mais nous n'avons pu le pénétrer de plus de quelques centimètres ce qui ne permet pas de le caractériser avec précision puisque la pointe du carottier mesure 11 cm de longueur. Il est donc vraisemblable qu'il manque 2 ou 3 cm de tourbe minérale à la base de cette séquence ce qui ne réduit en rien l'intérêt des résultats. On peut imaginer avoir perdu 200 ou 300 ans d'histoire de la tourbière ce qui, à l'échelle des 10 000 années de son existence, représente peu de chose (moins de 3%) même s'il s'agit d'une période importante qui est celle de la naissance de la tourbière, un processus qui, selon les conditions hydroécologiques locales peut s'étaler sur quelques décennies ou quelques siècles.

Partie II – Luitel – Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne

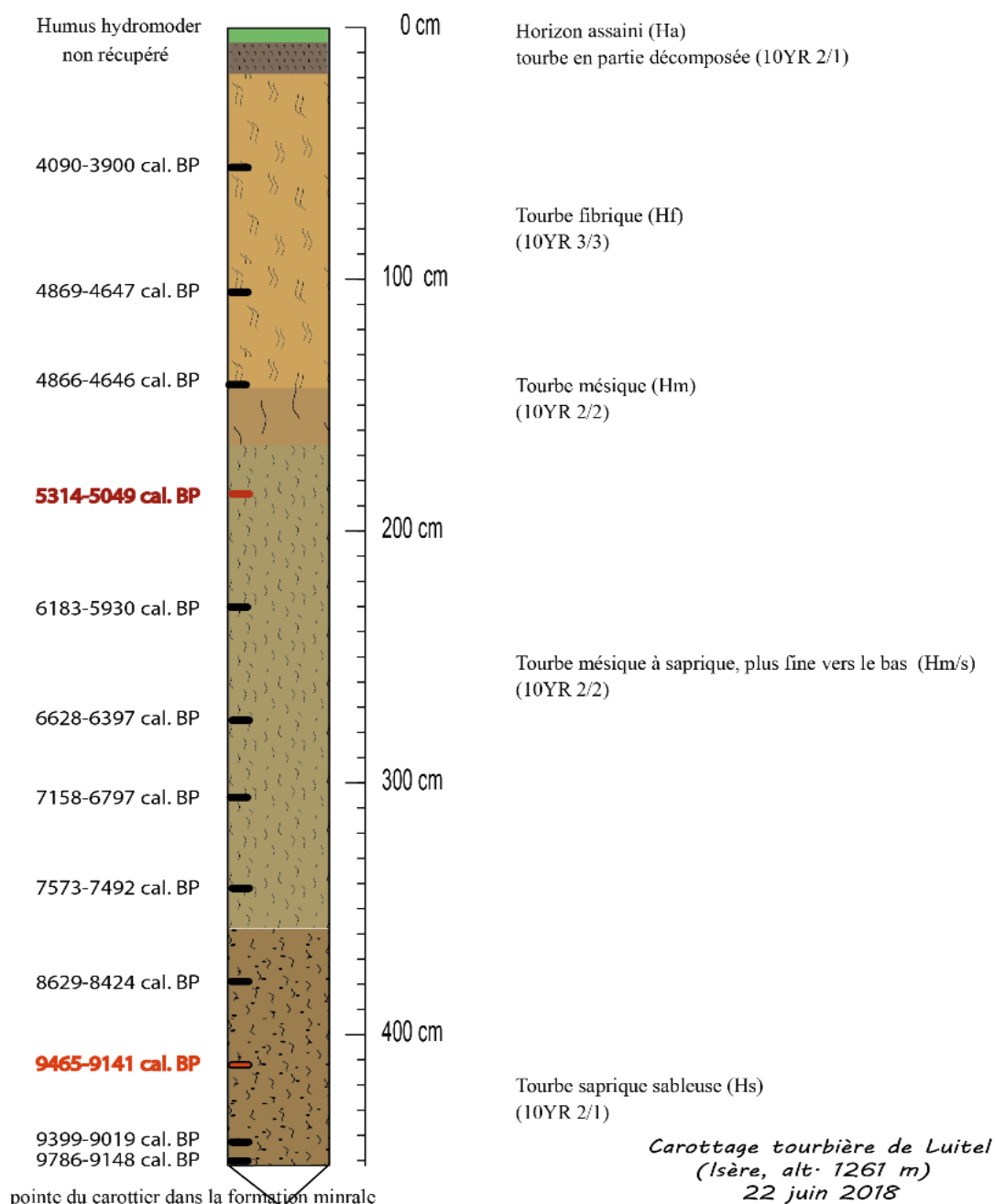


Figure 176 : Stratigraphie de la séquence tourbeuse extraite de la tourbière de Luitel le 22 juin 2018 (Isère ; 1261,5 m)

Le calage chronologique s'appuie sur les 12 datations par le radiocarbone, soit une datation tous les 37,5 cm en moyenne ce qui est tout à fait satisfaisant (Figure 176 et Figure 177). Le matériel daté est du sédiment *bulk* c'est-à-dire de la tourbe indifférenciée. Des travaux récents (Holmquist et al., 2016) ont montré que les datations sur du sédiment *bulk* n'étaient pas significativement différentes des datations sur une fraction de la matière organique (fragments de végétaux dûment identifiés, acides humiques, grains de pollen). L'avantage de la datation sur *bulk* est le gain de temps. En effet, l'identification des macrorestes composant la tourbe est chronophage, coûteuse et les spécialistes en France très rares et peu disponibles. Les dates ont été calibrées sur la base de la courbe de calibration IntCal20¹⁹ (Reimer et al., 2020). Un modèle âge/profondeur a pu ensuite être établi sous R à l'aide du package Clam (Blaauw, 2010) (Figure 178). Deux dates ont été rejetées lors de la construction du modèle (en rouge sur le schéma en Figure 178).

19. <https://hal.inrae.fr/hal-03217141/file/div-class-title-the-intcal20-northern-hemisphere-radiocarbon-age-calibration-curve-0-55-cal-kbp-div.pdf>

| Sample name | Laboratory code | Material | Depth (cm) | ¹⁴ C age BP | Calibrated age range yr. BP (2 δ) | bioclimatic Period | (Pollinic) chronozones | Cultural Period |
|-------------|-----------------|-------------|------------|------------------------|---|--------------------|------------------------|-------------------|
| LUITEL-1 | Lyon-19068(GrM) | peat (bulk) | 450 | 8355 +/- 45 | 9786-9148 | Greenlandian | Boreal | Middle Mesolithic |
| LUITEL-2 | Lyon-19069(GrM) | peat (bulk) | 443 | 8210 +/- 45 | 9399-9019 | Greenlandian | Boreal | Middle Mesolithic |
| LUITEL-3 | Lyon-19070(GrM) | peat (bulk) | 413 | 8320 +/- 45 | 9465-9141 | Greenlandian | Boreal | Middle Mesolithic |
| LUITEL-4 | Lyon-19071(GrM) | peat (bulk) | 380 | 7760 +/- 45 | 8629-8424 | Greenlandian | Early Atlantic | Middle Mesolithic |
| LUITEL-5 | Lyon-19072(GrM) | peat (bulk) | 343 | 6625 +/- 40 | 7573-7492 | Norddgrïppian | Early Atlantic | Late Mesolithic |
| LUITEL-6 | Lyon-19073(GrM) | peat (bulk) | 305 | 6085 +/- 40 | 7158-6797 | Northgrippian | Early Atlantic | Early Neolithic |
| LUITEL-7 | Lyon-19074(GrM) | peat (bulk) | 268 | 5695 +/- 40 | 6628-6397 | Northgrippian | Late Atlantic | Middle Neolithic |
| LUITEL-8 | Lyon-19075(GrM) | peat (bulk) | 230 | 5260 +/- 40 | 6183-5930 | Northgrippian | Late Atlantic | Middle Neolithic |
| LUITEL-9 | Lyon-19076(GrM) | peat (bulk) | 188 | 4525 +/- 35 | 5314-5049 | Northgrippian | Subboreal | Late Neolithic |
| LUITEL-10 | Lyon-19077(GrM) | peat (bulk) | 150 | 4240 +/- 35 | 4866-4646 | Northgrippian | Subboreal | Late Neolithic |
| LUITEL-11 | Lyon-19078(GrM) | peat (bulk) | 105 | 4245 +/- 35 | 4869-4647 | Northgrippian | Subboreal | Late Neolithic |
| LUITEL-12 | Lyon-19079(GrM) | peat (bulk) | 58 | 3665 +/- 30 | 4090-3900 | Meghalayan | Subboreal | Old Bronze Age |

Figure 177 : Datations réalisées sur la séquence extraite de la tourbière de Luitel (Isère ; 1261,5 m) le 22 juin 2018.

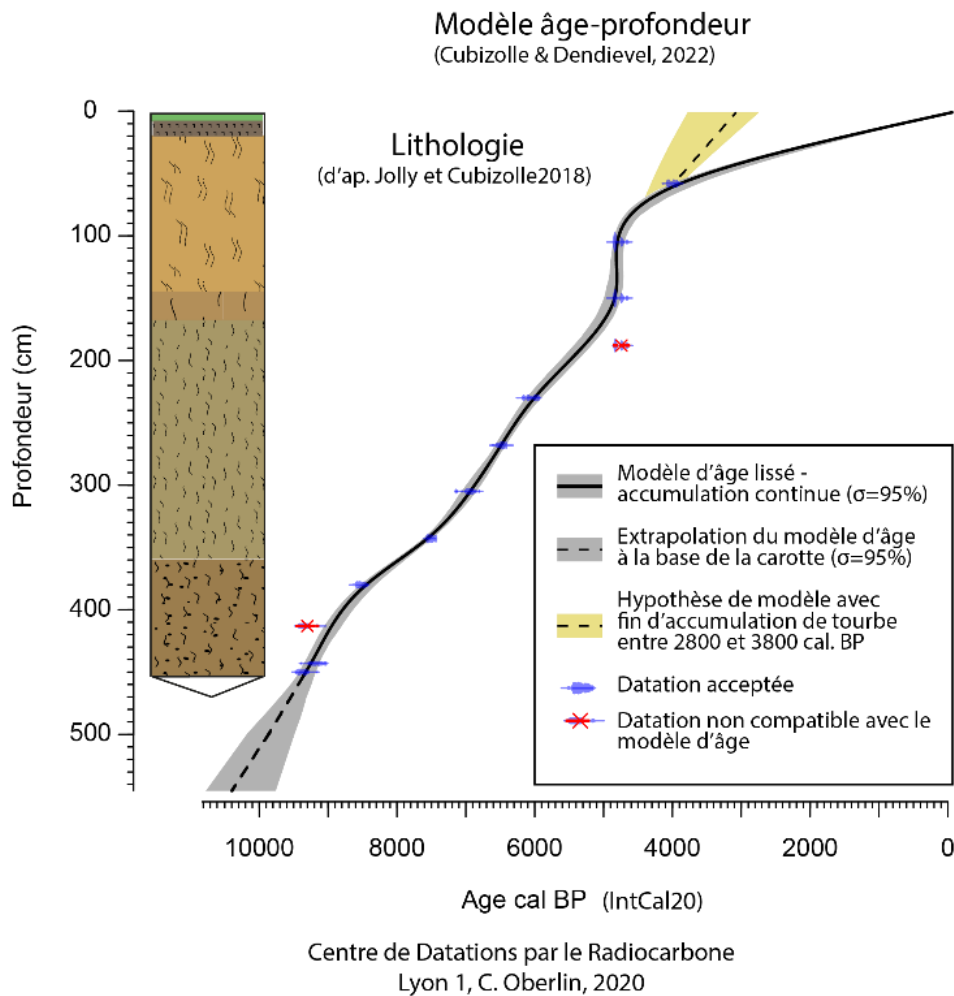


Figure 178 : Modèle âge/profondeur à partir des 12 datations obtenues sur la tourbe (Luitel, Isère ; alt. 1261,5 m)

Partie II – Luitel – Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne

Les mesures de perte au feu et de carbone et azote ont été réalisées tous les 5 cm (Figure 179 et Figure 180).

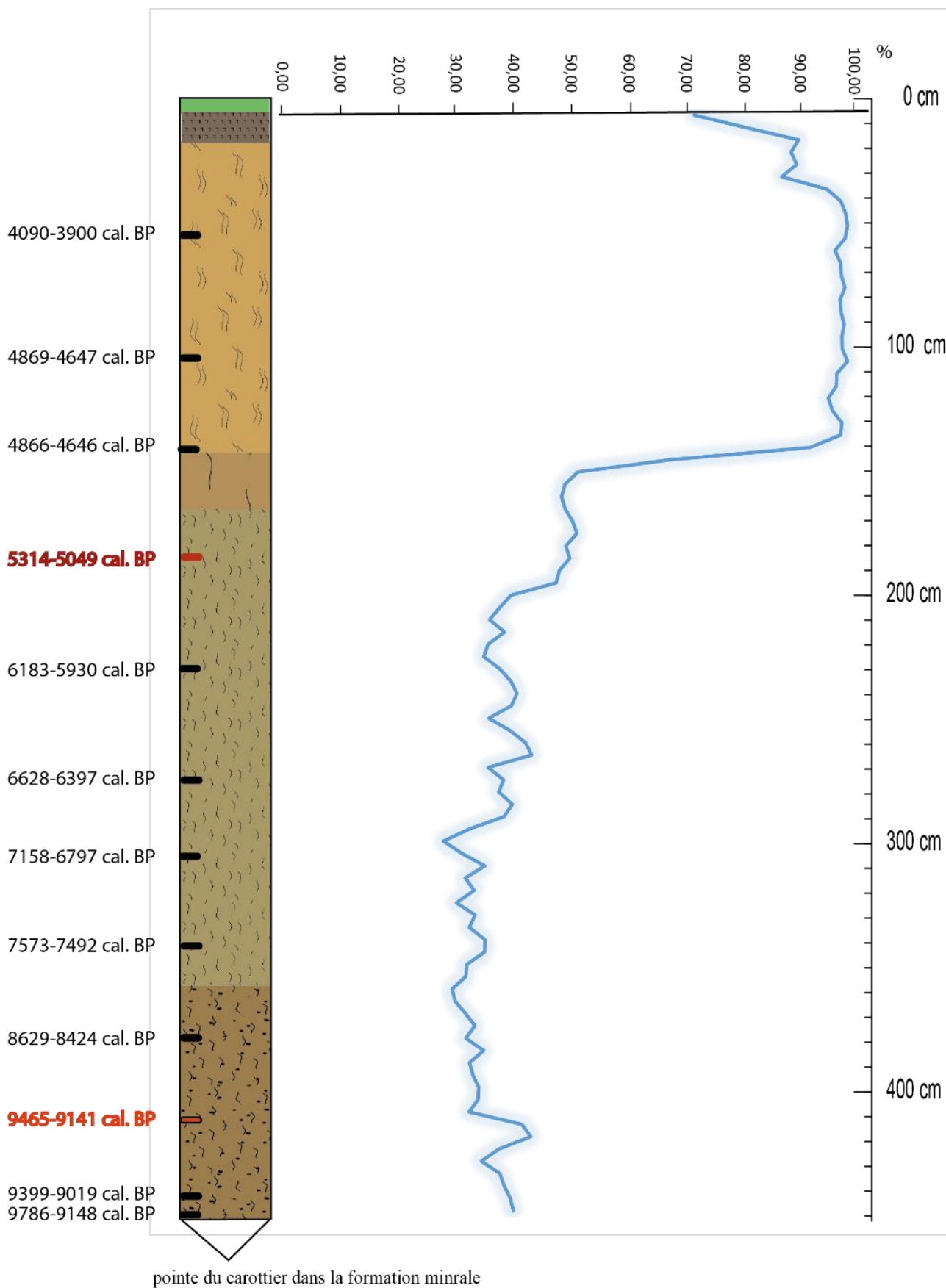


Figure 179 : Résultats des mesures de pertes au feu effectuées sur la séquence tourbeuse de Luitel (Isère ; 1261,5 m)

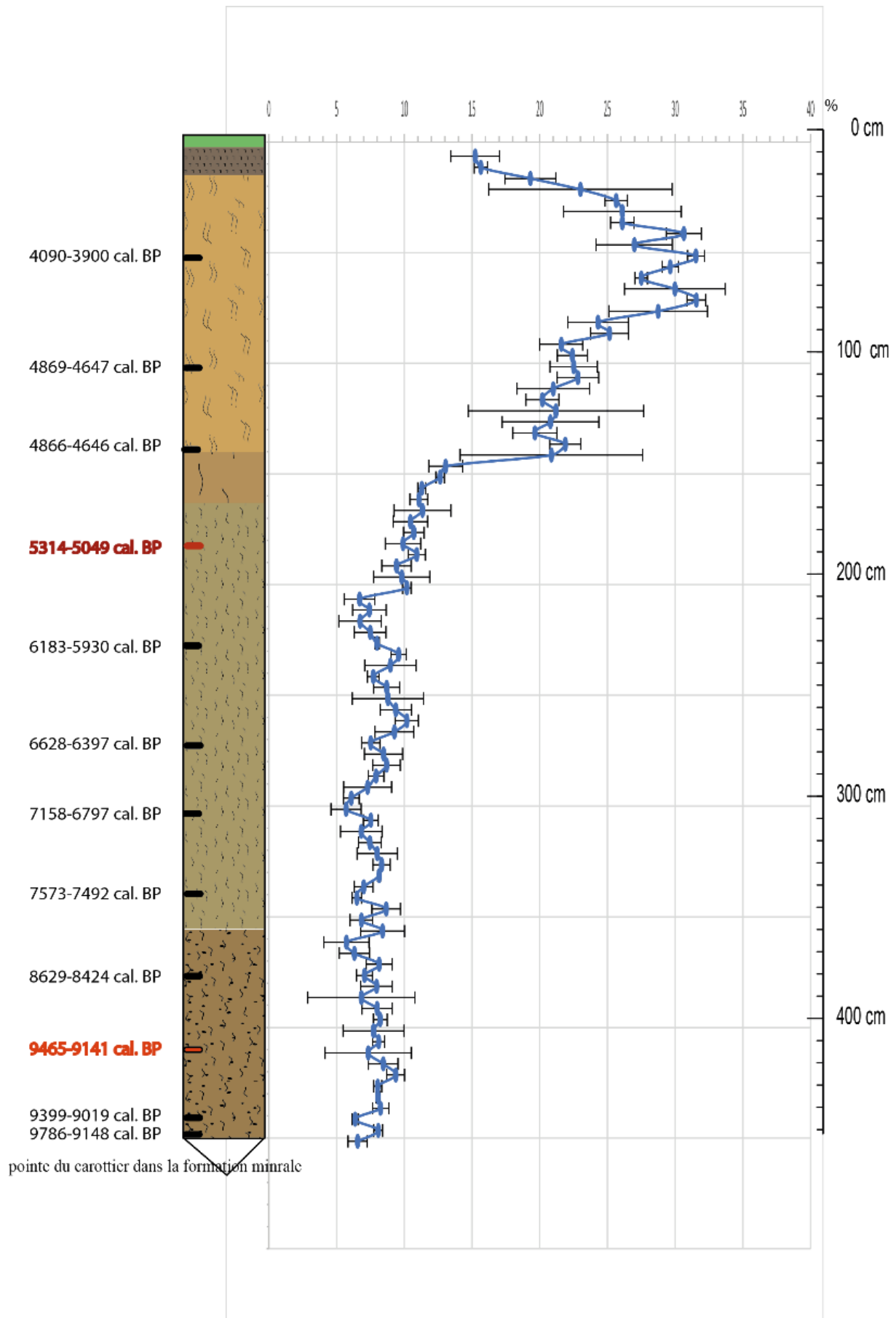


Figure 180 : Résultats des mesures du rapport C/N massique effectuées sur la séquence tourbeuse de Luitel (Isère ; 1261,5 m)

12.7.2. Synthèse, commentaire et interprétation des résultats

Les résultats du travail sur la carotte de la tourbière du col du Luitel montrent très clairement que cette accumulation de tourbe a connu trois temps forts :

❶ **Un premier temps fort** est situé entre **-452 et -146 cm** ce qui démarre donc avec la naissance de la tourbière autour de **9 500 ans avant aujourd'hui** et se termine autour de **5 000 avant aujourd'hui**.

- Entre -452 et -150 cm on observe un dépôt de tourbe saprique (horizon Hs). Il est enrichi en particules minérales fines jusqu'à -360 cm ce qui correspond au stade de la tourbière basse initiale vraisemblablement alimentée, lors des épisodes pluvieux abondants, par des eaux de ruissellement arrivant du versant et chargées en argile, limon et sable.
- Les teneurs en matière organique sont comprises entre 29% et 43% entre -452 et -201 cm puis passent de 40% à 67% entre -201 et -146 cm.
- Le rapport carbone sur azote fluctue lui entre 5,7 et 10,2% entre -452 et -201 cm puis fluctue entre 9,4% et 13% entre -201 et -146 cm.

❷ **Un second temps fort** se place entre **-146 et -16 cm**. On se place ici entre **5 000 avant aujourd'hui** et le **XVIII^{ème} ou XIX^{ème} siècle**.

- D'un point de vue sédimentologique et pédologique cela correspond tout d'abord à de la tourbe mésique (horizon Hm entre -165 cm/-145 cm) puis de la tourbe fibrique (horizon Hf entre -145 et -20 cm). Cette tourbe est peu décomposée.
- Entre -146 et -140 cm la teneur en matière organique grimpe brusquement de 67% à 91% et se maintient ensuite au-dessus de 89% jusqu'à la profondeur de -16 cm.
- Le rapport C/N connaît aussi une augmentation brutale passant de 13% à 21% entre les profondeurs -146 et -141 cm. Puis le C/N fluctue entre 20% et 31% jusqu'à -16 cm.

❸ **Le troisième et dernier temps fort** correspond à la fin de la séquence, soit les **16 derniers centimètres**. Chronologiquement on est là vraisemblablement dans le **dernier siècle**.

- D'un point de vue pédologique on est en présence d'un horizon assaini (Ha) dont l'existence implique un abaissement saisonnier durable de la nappe. Les teneurs en MO (matière organique) restent fortes mais s'abaissent tout de même à 70% à -5 cm/-6 cm. On reste clairement dans de la tourbe mais la présence dans les 5 derniers centimètres d'un horizon hydromoder indique un blocage récent de la turfigenèse.
- Le rapport carbone sur azote chute lui aussi entre -21 et -16 cm passant de 23% à 19%. On demeure toutefois au-dessus des valeurs de la première partie de la séquence.

On voit donc que le stockage de carbone sous forme de tourbe a été à son maximum au cours de la deuxième partie de l'Holocène, essentiellement au cours de la période dite du Meghalayan (Figure 181), soit pour notre séquence au-dessus de -146 cm. Il tend cependant à repartir à la baisse dans les derniers 16 cm de l'accumulation tourbeuse.

| | |
|--------------|----------------------|
| MEGHALAYAN | 4 200-0 cal. BP |
| NORDGRIPPIEN | 8 326-4 200 cal. BP |
| GREENLANDIEN | 11 700-8 326 cal. BP |

Figure 181 : Chronologie de l'Holocène

Dans la partie inférieure de la séquence, entre -452 cm, la base, et -146 cm, la vitesse d'accumulation de la tourbe est régulière ce qui laisse envisager une certaine stabilité des conditions hydroécologiques. Elle apparaît aussi comme plus modeste que plus haut dans la séquence et ce pour deux raisons :

- il est probable tout d'abord que l'on ait eu à faire à une tourbière à laïches et à joncs ce que seule une analyse des macrorestes végétaux pourrait nous confirmer ; Les laïches (ou carex) et les joncs sont les plantes les plus abondantes dans les tourbières basses et elles résistent beaucoup moins à la décomposition que les sphaignes ;
- on doit aussi tenir compte du fait que la décomposition se poursuit, au fil des millénaires dans le catotélme, au cœur de la masse de tourbe. Le processus est très lent, certes, mais continu et il explique la formation de tourbe saprique.

La section comprise entre -146 -16 cm est celle qui a connu la plus forte accumulation de tourbe et de carbone. L'analyse des macrorestes confirmerait vraisemblablement que cette tourbe est constituée essentiellement de sphaigne. Comment expliquer cette accélération du stockage de carbone à cette époque soit au cours des 5 000 dernières années ?

| Chronozones | |
|-------------------|---------------|
| Subatlantique | 2 835/0 |
| Subboréal | 5 450/2 835 |
| Atlantique récent | 6 850/5 450 |
| Atlantique ancien | 8 835/6 850 |
| Boréal | 10 085/8 835 |
| Préboréal | 11 490/10 085 |

Figure 182 : Chronologie fondée sur les chronozones définies par les palynologues

Ces 5 000 dernières années correspondent au Subboréal et Subatlantique. Ces périodes ont été caractérisées par deux événements majeurs :

- le développement de la hêtraie-sapinière qui marque un refroidissement du climat par rapport à l'optimum climatique holocène de l'Atlantique ;
- le développement des sociétés agro-pastorales qui impactent peu à peu les milieux.

Le changement hydropédologique et très certainement écologique (passage des laïches et joncs aux sphaignes – à confirmer par des analyses de macrorestes végétaux) est-il le fait de perturbations du milieu tourbeux engendrées par la pression agro-pastorale ou la conséquence de bilans hydriques plus favorables à cause d'un climat plus frais ? En l'absence de données archéologiques convaincantes nous pencherons en faveur de la seconde hypothèse.

L'évolution de la section proche de la surface est plus compliquée à dater. En effet, les abaissements durables de la nappe qui affectent cette section sont à l'origine de la dégradation de la tourbe dans les 20/30 derniers centimètres. La pénétration de l'oxygène et le travail des micro-organismes décomposeurs conduisent à une minéralisation d'une partie de la matière organique et, in fine, à un tassement de la tourbe. Les datations ¹⁴C sont impossibles dans ces niveaux, la pénétration des racines des plantes rajeunissant considérablement les âges. Nous ne pouvons donc fournir un modèle d'âge fiable pour ces derniers décimètres.

Le front de décomposition progressant en profondeur au gré des sécheresses et des abaissements de nappe qui en découlent explique la date déjà ancienne à 4 090-3 900 cal. BP à -58 cm. Cette configuration pédologique est de plus en plus fréquente dans nombre de tourbières affectées depuis une trentaine d'années par des sécheresses et des abaissements de nappes prolongés qui ne garantissent plus la saturation en eau permanente des histosols. L'accumulation de tourbe, et donc de carbone, est bloquée et dans les cas de figure comme celui de Luitel, la décomposition de la tourbe à partir de la surface amène des relargages de CO₂. Matériellement cela se traduit par la présence de l'horizon histique assaini minéralisé (Ha).

13. Synthèses – Luitel

13.1. Suivi hydrologique

Le suivi hydrologique du complexe tourbeux du Luitel est fondé sur une instrumentation préexistante au projet ZHTB et sur un dispositif complémentaire installé dans le cadre de ce projet :

- 1 station météorologique ;
- 3 seuils jaugés (1 à l'amont et 2 à l'aval) avec 1 sonde enregistreuse TD (aval) et 2 sondes CTD (amont et aval) ;
- 11 sondes enregistreuses TD et 1 CTD dans les piézomètres

Ce dispositif a permis d'acquies des chroniques de données depuis avril 2018 jusqu'à juin 2022. Les sondes enregistrent encore des données à l'heure actuelle. L'étude de l'étiage 2022 s'avérera sûrement très intéressante. Au total, nous disposons de chroniques synchrones, sauf pannes matériels, pour les étiages 2018 à 2022 incluant : pluie, ETP, amont et aval de Fontfroide (niveau d'eau, température, EC, débits), 11 piézomètres (température, niveau d'eau), 1 piézomètre (température, niveau d'eau, EC).

Concernant les données amont-aval de Fontfroide, il est difficile de dégager une tendance en période d'étiage. Les valeurs enregistrées hauteur (débits), EC et températures sont sensiblement les mêmes. Il ne semble donc pas que la traversée de la tourbière modifie de manière significative les paramètres du ruisseau de Fontfroide enregistrés par les sondes entre l'amont et l'aval.

Concernant les données de piézométrie, celles acquies permettent de suivre le tarissement à l'étiage pour les différents secteurs de la réserve.

- Pour la zone nord, on note que le piézomètre représentatif P3 perd plus d'eau que ne le prévoit le bilan hydrologique. Il existe un gradient hydraulique qui suggère une vidange de la zone nord dans la zone sud au moins en période de hautes-eaux. Les deux secteurs semblent déconnectés en basses-eaux.
- Pour la zone centrale, on observe un gradient hydraulique du versant est vers Fontfroide et l'exutoire. Si certains piézomètres perdent plus d'eau que ne le prévoit le bilan hydrologique d'autres suivent la tendance prévue.
- Pour la zone sud, l'analyse des données piézométriques suggère un gradient hydraulique du versant est vers l'exutoire à l'ouest. Le tarissement de tous ces piézomètres suit la même tendance et ils perdent plus d'eau que ne le prévoit le bilan hydrologique. P15, accroché au pied du versant est, semble montrer un tarissement plus rapide.

On note de plus que les faibles épisodes pluvieux ont peu d'incidence sur la piézométrie à l'étiage. Seules les grosses pluies (orages), provoquent une hausse rapide du niveau d'eau dans les piézomètres qui est rapidement évacuée avant reprise du tarissement. Généralement, l'étiage se termine par un gros orage suivi de pluies de plus faible intensité mais plus fréquentes.

Le suivi de l'EC dans le piézomètre P4 suggère un apport préférentiel d'une eau plus minéralisée quand le tarissement atteint un certain niveau. Il pourrait s'agir d'apport d'eau souterraine de versant. Par ailleurs, la conductivité électrique baisse fortement lors des épisodes de pluie.

Pour compléter le suivi hydrologique, des essais d'eau ont été effectués sur 14 piézomètres. Les résultats montrent de conductivités hydrauliques très faibles, comprises entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s.

13.2. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones

Cette partie complète l'analyse des données hydrologiques et les travaux de modélisation engagés en phase 2 en incluant environ 2 années de données supplémentaires (période 2009 à 2021). Les résultats présentés se concentrent sur : 1) le ruisseau du lac et le ruisseau de Fontfroide ; 2) le piézomètre P3 du secteur nord de la tourbière du col ; 3) les débits amont et aval du ruisseau de Fontfroide ; 4) les principaux résultats de la modélisation par réseau de neurones.

Le ruisseau de Fontfroide (tourbière du col du Luitel) et le ruisseau du Lac (lac du Luitel) sont caractérisés par un régime nivo-pluvial [hautes-eaux printanières (fonte de neige et fortes précipitations), automnales et hivernales)]. L'étiage est marqué notamment pour le Ruisseau du Lac qui présente des assecs fréquents. L'analyse des données de débits montre que les débits spécifiques du ruisseau de Fontfroide sont plus importants que ceux du Ruisseau du Lac, en particulier à l'étiage et en automne. Les corrélations débits/températures mettent en avant une influence de la température pendant 2 mois. La corrélation maximum pluie/débit est à 1 jour et l'effet mémoire d'environ 12 jours. L'analyse des coefficients d'écoulement montre une forte influence de l'évapotranspiration et des débits très faibles notamment pour le ruisseau du Lac. Ceci peut-être lié à la présence de pertes (comme à l'aval de Fontfroide à l'exutoire de la tourbière du col) ou d'erreurs de mesure.

L'analyse des débits du ruisseau de Fontfroide a permis de discriminer 4 fonctionnements différents du système hydrologique : 1) gros débits (débits supérieurs à Q5) ; 2) majorité des débits (2 comportements pour des débits entre Q5 et Q90) ; 3) faibles débits (débits inférieurs à Q90). Le Q90 est défini comme le débit d'étiage ($0,36 \text{ l.s}^{-1}$). Cette analyse met aussi en évidence une faible variation au cours de l'année du temps de réponse (1 jour) et une légère variation de l'effet mémoire (de 3 à 6 jours). Les précipitations printanières (les plus abondantes) sont plus rapidement assimilées que sur les autres périodes.

Le niveau d'eau dans le piézomètre P3 est soutenu par les précipitations durant l'automne et l'hiver, puis par la fonte des neiges au printemps. On observe un premier étiage en fin de période de fonte des neiges. Le signal est marqué par une longue phase de tarissement de juin à juillet avec peu, voire très peu, de précipitations. Les orages d'août limitent la plupart du temps le tarissement.

L'analyse des données montre un effet mémoire de 60 jours (autocorrélation), un temps de réponse à la pluie de 1 jour et un effet mémoire de quelques jours (corrélation pluie/hauteur d'eau), et un impact de la température maximale à 1 mois (corrélation température/niveau).

Comme les ruisseaux, ce piézomètre montre une forte sensibilité à la fonte de neige et aux températures. Il est plus sensible aux températures (évaporation et évapotranspiration) qu'aux pluies (effet intégrateur du système).

L'effet mémoire est variable selon les piézomètres étudiés (de 39 jours au P17 à 86 jours pour P20, 77 jours pour le P14). Les plus petits temps de mémoires sont calculés pour les piézomètres situés près des fossés de drainage. Pour la relation pluie-hauteur piézométrique, les temps de réponse sont quasi-immédiats (1 jour), les effets mémoires sont similaires (~13 jours).

L'étude des débits amont/aval de Fontfroide montre que globalement il y a plus d'eau à l'aval qu'à l'amont sauf à l'été 2018 et en hiver 2019. La contribution de l'aval semble relativement plus importante par rapport à l'amont en période de saturation, mais plus faible à l'étiage. L'analyse des données montre un effet mémoire de 7 jours (autocorrélation) et un impact de la température maximale à 25 à 40 jours (corrélation température/débit).

Pour terminer, des essais de modélisation par réseaux de neurones (RN) ont été conduits avec les données de la période 2012 à 2020. Les résultats des simulations sont très bons puisque le critère de Nash moyens des années étudiées est de l'ordre de 0,88.

L'analyse des résultats montre l'apparition de débits négatifs pour certaines périodes. Il s'agirait de périodes (en été ou au début de l'automne) où le fonctionnement hydrologique est différent et pour lesquels le modèle ne peut pas reproduire les débits avec ce qu'il a appris le reste du temps (non-stationnarité). Ces débits négatifs apparaissent en période sèches (cumul de moins de 150 mm de pluie sur 30 jours ou de moins de 250 mm sur 60 jours) mais sans lien fort avec les températures ou l'ETP. Cela indique que la sécheresse (déficit de pluie) est plus importante que la hausse des températures et de l'ETP pour expliquer le changement de fonctionnement hydrologique du système à l'étiage.

Les analyses conduites sur les données hydrologiques, n'ont pas permis de distinguer un rôle de soutien d'étiage de la tourbière du Luitel. Pour la période d'analyse (trop courte), la différence des débits entre amont et aval est faible. Globalement, le débit aval est légèrement plus important, mais lors de l'été 2018 de l'eau se perd pendant la traversée de l'hydrosystème. D'une manière générale, les comportements des différents éléments hydrologiques du système tourbeux ne semblent jamais vraiment s'écarter d'une certaine norme, à l'exception d'erreurs de mesures ou de pertes (ex : Ruisseau du Lac).

En revanche, les résultats de bonne qualité obtenus par modélisation statistique ont permis de détecter et de confirmer des résultats entrevus lors de la phase 2. En effet, l'apparition de débits négatifs et donc aberrants dans la modélisation suggère que, parfois, le comportement de l'hydrosystème dévie et ne correspond plus à ce que le modèle a appris sur la grande majorité de la base d'apprentissage. Ainsi, ces débits aberrants mettent en avant une non-stationnarité dont les conditions d'apparition ont été analysées. Il s'avère que les débits négatifs sont observés à peu près quelle que soit l'évapotranspiration sur les 30 à 60 derniers jours, pour des températures élevées mais pas extrêmes, et surtout pour des cumuls plutôt faibles. Le changement de comportement du système, qui pourrait s'apparenter à une « mise en défense » du système tourbeux, semblerait donc plus dépendant de la sécheresse que des températures ou de l'évapotranspiration (valeurs fortement corrélées du reste).

13.3. Traceurs géochimiques

Le volet traceurs géochimiques du Luitel est fondé sur : 1) une campagne de moyennes-eaux et deux de basses-eaux ; 2) la collecte d'eau des surfaces et souterraines de la tourbière et du bassin versant ; 3) la collecte d'eau de pluie. L'objectif est de mieux comprendre l'origine et le chemin des eaux et les échanges eaux de surface/eaux souterraines sur le site d'étude pour déterminer l'origine de l'eau sortant à l'exutoire de la tourbière à l'étiage. Pour ce faire, différents traceurs géochimiques fondés sur les interactions eau-atmosphère ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et dépendants des interactions eau-roche (éléments majeurs) ont été utilisés.

Les eaux collectées ont fait l'objet : 1) de mesures in situ de paramètres physico-chimiques ; 2) d'analyses pour la détermination de la concentration en espèces majeures et 3) d'analyses pour la détermination de la composition isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule d'eau. Les espèces majeures d'une eau dépendent de la nature chimique des roches et autres matériaux traversés et par le temps d'échange entre l'eau et ces derniers. Certaines espèces dissoutes peuvent également avoir une origine anthropique (activité industrielle, agricole, rejets domestiques, ...). Les isotopes de l'eau, quant à eux, permettent de comprendre l'origine des eaux (zone de recharge ; mélange, saisonnalité) dans des environnements variés (montagne, aquifères fracturés...). L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau sont considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps. Les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux de rivière et des eaux souterraines présentent les mêmes caractéristiques que les eaux de pluie qui les alimentent : variations saisonnières et effet d'altitude. Dans un contexte d'eaux circulantes, le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'origine spatiales et/ou temporelles différentes.

Les résultats obtenus pour les *eaux de surface* mettent en avant les éléments suivants :

- *Bassin versant de Fontfroide* : On observe une modification du rapport Cl/Na de l'amont vers l'aval du bassin versant de Fontfroide soit un enrichissement vers l'aval (apport des roches traversées par les eaux, du lessivage des sols et des sels routier). Les différences de typologie chimique entre l'amont et l'aval suggèrent un apport le long du cours d'eau à partir d'un réservoir souterrain enrichi en Na et Cl. Les variations isotopiques observées d'une campagne à l'autre reflètent des variations saisonnières et suggèrent ainsi des temps de transfert relativement réduits.
- *Bassin versant de Pezanti* : L'évolution entre l'amont et l'aval de la tourbière montre un enrichissement systématique de toutes les espèces dissoutes majeures. On observe aussi un enrichissement couplé en Na et Cl des eaux du bassin versant de Pezanti par rapport aux eaux de pluie mais qui reste faible en comparaison de celui observé pour les eaux du ruisseau de Fontfroide. L'évolution de la chimie des eaux et des $\delta^{18}\text{O}$ et δD de l'amont à l'aval du bassin versant suggèrent que les propriétés chimiques des eaux du ruisseau ne sont pas exclusivement contrôlées par les eaux des zones humides amont. Des processus d'interaction eau-roche sur le parcours et l'alimentation à partir d'un réservoir souterrain peuvent être envisagés.
- *Fossés* : Les analyses montrent que l'alimentation des fossés se fait à partir d'eau de pluie faiblement évoluées (minéralisées). Ils assurent donc bien un rôle de drainage de la tourbière lorsqu'elle est saturée voire sursaturée en eau.
- *Lac du Luitel* : La contribution de sel type NaCl est plus marquée que pour les eaux de Fontfroide et ainsi plus que l'influence des processus d'interaction eau-roche. Le bassin versant du ruisseau du lac montre donc des apports et une influence sur les eaux autres que celui de Fontfroide suggérant des aires d'alimentation différentes.

Au final, les masses d'eau alimentant les ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti appartiennent à des réseaux de circulation différents avec une influence probablement plus marquée de formations sédimentaires triasiques amont pour les eaux de Fontfroide. Les deux ruisseaux ont donc des zones d'alimentation d'altitude différentes et/ou des périodes d'alimentation différentes avec pour Fontfroide une alimentation réalisée à partir d'altitude plus élevée et/ou lors des saisons plus froides.

Ces observations et hypothèses permettent d'identifier deux masses d'eau contribuant à l'alimentation des eaux de surface :

- *Masse d'eau n°1* :
 - Eaux superficielles (pluies peu évoluées) à transfert rapide mobilisant les sels du sol et/ou influencées par les actions de salage des routes
 - Influence des processus d'interaction eau-roche négligeable ;
- *Masse d'eau n°2* :
 - Apport de versant (Fontfroide et Pezanti) mobilisant les sels du sol et/ou influencés par les actions de salage des routes
 - Faible influence des processus d'interactions eau-roche.

Les résultats obtenus pour les *eaux souterraines* mettent en avant les éléments suivants :

- *Amont (captage)* : l'analyse des eaux du ruisseau de Fontfroide suggère une même origine que les eaux souterraines amont (captage). Les eaux du captage et donc de Fontfroide sont donc à rattacher à la *masse d'eau n°2*.
- *Tourbière du col de Luitel* : plusieurs tendances peuvent être mises en avant ; 1) tendance définie pour les eaux superficielles (liée à la *masse d'eau n°1*) ; 2) tendance définie par les apports de versant (liée à la *masse d'eau n°2*) ; 3) tendance représentative d'une troisième masse d'eau contribuant à l'alimentation de la tourbière (*masse d'eau n°3*) ; 4) tendance intermédiaire aux trois précédentes.

L'enrichissement en Na des eaux du troisième groupe peut résulter de processus d'interaction eau-roche plus marqués lors d'un temps de transfert plus long dans le milieu souterrain.

Les résultats obtenus pour les eaux souterraines sont différents selon le contexte hydrologique :

- En contexte de moyennes-eaux :

- L'alimentation du réservoir nord (P1, P2, P3 et P7) apparaît influencée par les eaux superficielles (pluies peu évoluées) (*masse d'eau n°1*) ;
- L'alimentation du réservoir nord est indépendante du réservoir sud où l'on retrouve une influence des eaux de versants (*masse d'eau n°2* ; P8, P9, P20, P12, P19) et des eaux à transfert plus lent (*masse d'eau n°3* ; P11 et P15) ;
- Une influence mixte (mélange de 2 à 3 masses d'eau) pour les eaux de la zone centrale de la tourbière est observée (P13, P14, P18).

En contexte de basses-eaux (juillet 2019 et juillet 2020) :

- L'influence des eaux à transfert lent (*masse d'eau n°3*) se retrouve à la fois dans le réservoir nord (P3 et P2) et dans réservoir sud (P10, P12, P13, P14, P15, P16, P18, P19, P20) ;
- L'influence des apports de versants (*masse d'eau n°2*) est visible au niveau de P4 ;
- Les eaux de la partie centrale de la tourbière (P4, P6) sont à la fois influencées par les apports de versants (*masse d'eau n°2*) et les eaux à transfert lent (*masse d'eau n°3*).

Au final, l'analyse des propriétés chimiques des eaux de la tourbière et leur différenciation selon le rapport d'abondance Cl/Na permettent de distinguer trois masses d'eau qui contribuent à l'alimentation de la tourbière :

- Une masse d'eau non influencée par les processus d'interaction eau-roche (*masse d'eau n°1*) qui alimente le réservoir nord de la tourbière en *moyennes-eaux* ;
- Des apports de versant (*masse d'eau n°2*) qui influencent les cours des ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti. Ils sont directement identifiables en *moyennes-eaux* sur les bordures du réservoir sud ;
- Une masse d'eau influencée par les interactions eau-roche (*masse d'eau n°3*) qui est visible essentiellement en basses-eaux dans le réservoir sud et dans le réservoir nord.

L'influence du mélange de ces deux dernières masses d'eau est principalement visible en moyennes-eaux dans la zone centrale et le réservoir sud et en bases-eaux dans la zone centrale et le réservoir nord.

Les variations de $\delta^{18}\text{O}$ et δD observées d'un piézomètre à l'autre pour une même campagne suggèrent pour les périodes de moyennes-eaux (juillet 2018) et de basses-eaux (juillet 2019 et 2020) la contribution de deux masses d'eau principales :

- Des apports de versant représentés par les ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti (*masse d'eau n°2*) ;
- Des apports à partir d'une troisième masse d'eau (*masse d'eau n°3*) présentant une zone de recharge et/ou une période de recharge différente de la précédente.

Le croisement des observations effectuées permet d'identifier trois types masses d'eau principale contribuant à l'alimentation de la tourbière du col :

- **Masse d'eau n°1** - eaux de surface ou pluie peu évoluée
 - Pas d'influence significative des processus d'interaction eau-roche ;
 - Transfert superficiel rapide (notamment vers les fossés) ;
 - Significativement présentes dans la tourbière en moyennes-eaux dans le réservoir nord.

- **Masse d'eau n°2** - apports de versant (3 aires d'alimentation différenciées : ruisseau du lac, ruisseau de Fontfroide et ruisseau de Pezanti ; Écoulement souterrain à court/moyen terme pouvant être influencé par le réseau de fracture) → Pour le bassin versant de Fontfroide enrichissement relatif en Mg et SO₄ et δ¹⁸O et δD indicateurs d'une zone de recharge en altitude (formations triasiques ?) ;
 - Influence en moyennes-eaux visible au niveau de la tourbière principalement dans la zone centrale et en mélange avec la *masse d'eau n°3* dans le réservoir sud ;
 - Influence en basses-eaux visible en mélange avec la *masse d'eau n°3* dans le réservoir nord (écoulement hypodermique ? pas d'apport de ruisseau possible ici) et la partie centrale.
- **Masse d'eau n°3** - eaux souterraines caractérisées
 - Influence marquée des processus interaction eau-roche (écoulement souterrain sur le plus long terme) ;
 - Recharge à plus faible altitude que celle observée pour la *masse d'eau n°2* et/ou une période de recharge à partir des précipitations de saisons chaudes (pluie) qui contribueraient pour partie à l'alimentation du réservoir sud en basses-eaux et de la zone centrale en basses et moyennes-eaux ;
 - Principale source d'alimentation des réservoirs nord et sud en basses-eaux.

Les 3 masses d'eau identifiées influencent donc l'alimentation de la tourbière du col. Leur influence sur la tourbière semble variable selon la situation hydrologique. Il est possible de faire des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique de la tourbière pour 3 situations caractéristiques :

- **Hautes-eaux** : même si nous ne pas disposons pas de campagne de géochimie en hautes-eaux, nous pouvons supposer, au regard des chroniques piézométriques, qu'en période pluvieuse la tourbière est vite à saturation. Elle est alimentée par les eaux de surface : pluies, eaux drainées par concentration par les cours d'eau vers la tourbière (sauf pour la zone nord dépourvue de ruisseau). Les transferts d'eau de surface sont rapides notamment via les fossés pour l'évacuation de l'eau en surplus et les cours d'eau pour les apports à la tourbière. Cette eau est lentement évacuée et persiste dans la zone nord en moyennes-eaux
- **Moyennes-eaux** : les traceurs géochimiques montrent de fortes influences globales des eaux de versant avec 3 aires d'alimentation différenciées : ruisseau du lac, ruisseau de Fontfroide (marqué par une influence des interactions eau-roche – trias) et ruisseau de Pezanti. Il s'agit d'écoulements hypodermiques à court/moyen terme. Ces eaux sont lentement évacuées mais persistent dans la tourbière dans toutes les zones :
 - en moyennes-eaux dans la zone centrale et la partie sud (en mélange avec les eaux de la *masse d'eau n°2*) ;
 - en basses-eaux dans le réservoir nord (en mélange avec la *masse d'eau n°3*) et dans la zone centrale (en mélange avec la *masse d'eau n°3*).
- **Basses-eaux** : les traceurs géochimiques montrent des apports caractérisés d'eaux souterraines à la tourbière marqués par les interactions eaux-roche (*masse d'eau n°3*). De plus, l'existence d'une autre masse d'eau potentielle est possible. Elle serait liée à des apports différés (fonte des neiges) ou à une recharge à faible altitude (pour réservoir sud en basses-eaux et la zone centrale en basses- eaux et moyennes-eaux)

À travers ces résultats et leur interprétation, on voit donc bien que plusieurs sources d'alimentations en eau prennent le relais au fil de l'année pour garantir sinon la saturation au moins un apport d'eau

continu dans la tourbière. Les apports de versants semblent jouer un rôle important dans l'alimentation du ruisseau de Fontfroide même s'il n'est pas possible, compte-tenu des données disponibles, de déterminer précisément l'origine des apports et leur importance relative.

En revanche, les traceurs géochimiques ne montrent pas d'évolution significative de la composition chimique des eaux de Fontfroide lors de la traversée de la tourbière. Ceci tendrait à signifier que le ruisseau de Fontfroide est déconnecté de la tourbière et qu'il n'apporte pas d'eau à celle-ci à l'étiage.

13.4. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col

13.4.1. Articulation pédologie et géophysique

L'objectif de l'approche fondée sur des méthodes pédologiques et géophysiques, avait pour objectif de :

- déterminer la stratigraphie et les grands faciès lithologiques supérieurs qui correspondent à la zone hydrologiquement active de la tourbière. Cette zone de 2 à 4 m de profondeur correspond vraisemblablement à l'acrotelme ;
- caractériser les propriétés hydro-pédologiques de ces faciès supérieurs ;
- définir la géométrie 3D des faciès pédologiques identifiés.

Avant le projet ZHTB, les connaissances pédologiques reposaient principalement sur une grande carotte pédologique extraite dans la zone nord e la tourbière du col. Cette carotte constitue une archive pédologique de 15 000 ans BP sur 10,5 m de profondeur. On observe 4 500 an d'accumulation de tourbe fibrique jusqu'à 6 m de profondeur. Les dernière passées tourbeuses sont présentes à -8,24 m (8 200 ans BP), ensuite c'est le domaine des gyttja jusqu'à -10,48 m.

Afin de répondre aux objectifs de départ 9 profils transversaux (T1 à T9 du nord vers le sud) et 3 longitudinaux (L1 à L3 d'ouest en est) ont été réalisé à l'aide d'un radar géologique (antennes de 200 Mhz et 400 Mhz). Pour valider l'interprétation des profils, des campagnes de carottage ont été effectuées en 2019 avait pour objectif de :

- compléter les prélèvements effectués en 2018 sur des secteurs non investigués ayant des caractéristiques supposées différentes (position, végétation) ;
- préciser la nature des interfaces détectées lors de l'interprétation des données géophysiques ;
- discriminer les secteurs à histosols et à sols paratourbeux pour redéfinir les contours des secteurs à macrotopes tourbeux.

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. Si l'on totalise les prélèvements 2018 et 2019, nous n'avons pas moins de 10 carottes analysées sur une surface de 10 hectares. Ceci permet de dresser une observation assez précise de la répartition des pédofaciès par secteur

- **Secteur nord : des faciès de tourbe mésique à saprique**

L'extrême nord du profil L2 met en évidence une unité de sols non hydromorphe issu probablement de la transformation d'un sol pseudotourbeux. L'anthropisation du site avec la construction de la route a généré un remblai, avec des blocs grossiers recouverts aujourd'hui par une végétation mésophile mais non endémique des sols tourbeux. À mesure que le substratum s'enfonce en profondeur, on observe sur ce profil l'apparition de réductisols à anmoor et de sols pseudo tourbeux ; la canalisation des écoulements par le fossé sur le côté ouest ayant permis la recrudescence des processus de minéralisation en surface.

On note que la continuité des réflecteurs discriminant les grandes strates laisse suggérer que ces faciès réduits surmontent des unités tourbeuses. Le long du transect L2, on observe la présence d'un réflecteur continu oscillant entre 1 m et 50 cm de profondeur. Les carottages de juin 2018 dans ce

secteur attestent de la présence d'une unité de tourbe brune mésique à saprique. Cette strate de tourbe sous la pinède est recouverte selon les micro-buttes par un horizon H, induit par la dégradation lente des aiguilles de pins à crochets notamment. Elle couvre une large portion de l'étage subsurfacique de la pinède et se trouve être le faciès représentatif de l'acrotelme sur la majeure partie du secteur nord. Les étages sous-jacents, précisés par des carottages (S2 et S8) mettent en avant de la tourbe mésique avec des passées fibriques et de la tourbe fibrique à sphaignes. Ces considérations sont validées par l'intersection du profil T1. Une mosaïque de matrice de sols va ensuite se distinguer à l'intersection des transects T2 et L2. Les réflecteurs hydrologiques et lithologiques en forme de cuvettes correspondent à une zone non comblée, témoins du dernier stage d'atterrissement de l'ancien lac tourbier. La composition botanique de cette unité de végétation se retrouve directement dans les states de tourbe sous-jacente.

On constate ensuite une rupture en bordure de pinède le long du profil L2 à hauteur du transect T3. Si les faciès de profondeur restent les mêmes, on remarque un changement d'unités morphologiques de surface (carotte S3) sur le profil. La combinaison des fossés de drainage et l'ancienne activité pastorale a marqué la première unité de surface par un horizon assaini affleurant. Les molinies bleues marquant la dégradation de l'histosol, sont massivement représentées sur ce secteur. Ces faciès de tourbe en cours de minéralisation sont également présents le long des profils T4 et T5. On note une diminution horizontale des histosols et une expansion latérale des zones à réductisols dans ces secteurs. Le compactage du sol par piétinement, les conditions aérobies fluctuantes et les faibles profondeurs du substratum conditionnent largement la présence de ces faciès pseudotourbeux. En profondeur, l'unité pédologique de tourbe fibrique accompagne la remontée du substratum jusque dans les secteurs centraux des systèmes tourbeux du Luitel. On note cependant les limites de cette caractérisation à proximité du substratum. Si les éléments de littérature indiquent des faciès plutôt sapriques au contact du substratum, l'interpolation de la carotte S3 et du profil L2 et T5 montre un contact entre les faciès fibriques et le substratum. Si un faciès plus humifié est potentiellement présent sur le substratum, notre relevé pédologique ne permet pas de l'attester.

En somme, si l'on se place sous un angle pédologique, ce secteur témoigne d'une bonne dynamique dans le secteur de la pinède. En revanche lorsque l'on progresse vers le Sud du secteur, on relève des formes de dégradation des histosols avec une réduction de leur emprise spatiale en surface. Du point de vue hydrologique, les propriétés hydrodynamiques estimées dans ces secteurs laissent envisager une capacité de rétention en eau importante.

La dépression à Scheuzéries offre une rétention maximale de l'eau (porosité totale proche des 100%, TH : 96,1%). Ce système est adossé à d'autres microtopes tels que la pinède, qui présente par ailleurs des propriétés hydropédologiques comparables (porosité totale : 100%, TH : 93,2%). Les valeurs de conductivité hydraulique sont assez fortes et illustrent une capacité de stockage dynamique accrue. Les secteurs présentant des faciès plus humifiés voient leurs propriétés hydrostructurales diminuées mais restent très intéressants sous un angle hydrologique. Le contexte du site avec des fossés collecteurs et la présence de réductisols et de sols moins profonds entre Fontfroide et ce secteur de pinède sont vus comme des indicateurs facilitant le déversement de l'eau vers l'exutoire.

- **Secteur central : affleurement du socle morainique et faciès de gyttja**

L'analyse de ce secteur avec les transects T5, T6 et L2 révèle un contact avec un substratum affleurant. La proximité de la roche mère et des moraines associées au Nord du cours d'eau conditionne pour partie la nature des faciès. Comme exposée dans la discussion liée au secteur Nord, la réduction de la profondeur et les pressions exercées ont engendré la mise en place d'un horizon assaini surmontant de la tourbe fibrique.

Du point de vue hydromorphologique, le cours d'eau de Fontfroide (dont les réflecteurs de son paléo-chenal sont visibles sur T6), s'étend entre cette remontée du socle au Nord et la partie bombée de la tourbière au sud. L'interpolation des radargrammes et de la carotte S4 révèle trois grandes unités stratigraphiques sur ce transect dont certaines sont fortement marquées par la proximité du ruisseau. Sur le plan hydropédologique, cette carotte et les réflecteurs associés permettent d'extrapoler la nature

probable de l'ensemble des milieux adjacents au ruisseau. Les faciès de gyttja et organo-minéraux sont probablement liés aux dépôts lors d'épisodes de crues. Cependant, nous noterons que la carotte sous le cours d'eau présente exclusivement des faciès fibriques. Aucun élément à forte fraction minérale n'est identifié. Le passage du cours d'eau au sud de plusieurs mètres lors de ces dépôts sédimentaires peut expliquer le fait que nous ne retrouvons pas ces strates sous le cours d'eau. La linéarité des réflecteurs sont présents jusqu'au pied du bombement de la pinède Sud. Le changement de végétation et les variations topographiques locales (bombement, buttes) sont responsables des limites de l'expansion de ce type de faciès.

Les **secteurs centraux** (secteur à molinies et faciès à proximité de Fontfroide) avec une large part de sols dégradés et de sols pseudotourbeux jouent le rôle de transition entre le Nord et le Sud. Les propriétés hydrophysiques de ces sols sont globalement moins élevées que pour le secteur précédent. En revanche, les valeurs de conductivités hydrauliques ne sont pas à écarter et la moindre capacité de ces systèmes à retenir l'eau dans le temps (faible pouvoir d'absorption par les sphaignes) fait de lui un secteur propice pour le soutien d'étiage. Les possibilités de stockage sont plus faibles mais le stockage dynamique est potentiellement plus important.

- **Secteur sud : secteur composite**

Pour le secteur sud, l'ensemble des radargrammes souligne un substratum peu profond à l'Est et plus profond à l'Ouest (approximativement 8 m). Le substratum plonge en profondeur au contact des faciès tourbeux. Concernant les unités morphologiques, nous pouvons distinguer 3 microtopes sur ce mésotope Sud. L'échantillonnage pédologique, l'analyse géophysique et les informations de végétation de surface permettent de distinguer 3 zones :

→ *Zone de la pinède à sphaignes*

Sur cette zone, la première strate est composée d'un empilement de tourbe fibrique, d'un horizon assaini, de tourbe mésique et de tourbe fibrique sur une épaisseur d'un mètre (correspondant à l'acrotelme calculé). La présence d'un horizon assaini à 10 cm de profondeur témoigne du piétinement lié à l'ancienne activité pastorale sous les pins. La présence d'un fossé en limite Est peut induire des effets topographiques facilitant le ruissellement et la circulation rapide des eaux précipitées en périphérie de bombement. Cependant, la turfigenèse de surface atteste de la résilience du site. Nous noterons cependant que des réflecteurs latéraux indiquent la présence de faciès plus compacts (pseudotourbeux) entre la route et la pinède. L'emprise spatiale de ces sols s'inscrit dans un contexte de modifications des conditions hydromorphologiques de la périphérie du bombement ; cette frange ayant très certainement connue une topographie plus élevée, avant qu'elle ne se tasse sous l'effet conjugué du drainage et du piétinement. En profondeur nous retrouvons de la tourbe blonde fibrique. Ceci constitue un bon indicateur pour le fonctionnement de ce secteur ombrotrophe bombé.

Les secteurs Sud-Ouest de la Pinède à sphaignes offrent des possibilités de stockage importantes (Porosité maximale : 99,9% et TH : 86,4%). Si les valeurs théoriques de stockage dynamique sont très intéressantes sur le plan hydrologique, la présence d'un horizon assaini tend à perturber ces conditions optimales de circulation. En effet, le toit du haut de la nappe ne dépasse pas -20,2 cm. La présence de propriétés hydrodynamiques importantes sous l'acrotelme théorique et la considération que le mécanisme de circulation est important dans la profondeur du bombement permettent de relativiser et de faire de ce secteur une zone de premier intérêt dans le stockage de l'eau.

→ *Zone de prébois de pins à crochets sur sphaignes*

Il s'agit de la zone où l'abondance de ces faciès fibriques (conditions d'emmagasinements de l'eau favorable avec conductivité hydraulique proche des 10^{-1} m/s) est la plus importante. Nous relevons la présence d'un réflecteur continu à approximativement un mètre de profondeur. Cette interface scinde le profil radar en deux et correspond au toit de l'acrotelme (acrotelme calculé). L'unité de subsurface se compose de plusieurs types de tourbes : tourbe fibrique, tourbe fibrique à mixte, tourbe mésique à fibrique et tourbe mésique à saprique. Notons que ces considérations stratigraphiques établies à partir de l'analyse du point S11 et S12 sont sensiblement différentes d'un secteur à l'autre. Ainsi, il est possible

d'avoir des variations verticales dans l'organisation stratigraphique au sein d'un même polygone de végétation. Les variations écologiques, topographiques et hydrologiques sont susceptibles de faire varier l'emboîtement stratigraphique sur de courtes distances (quelques mètres). Ce mécanisme de répartition des sédiments a été observé en 2018 sur ce secteur ; les interprétations in situ mettant en lumière des variations de taux de fibres dans le sédiment à partir de prélèvements distants de quelques mètres.

Si l'on s'intéresse à la deuxième unité géo stratigraphique, celle-ci semble composée de tourbe fibrique. La profondeur de cette unité se réduit à mesure que le substratum morainique remonte à l'Est et au Sud.

Les secteurs Sud-Est qui ont fait l'objet d'investigations in situ et d'analyses en laboratoire sur la période 2019. Les analyses font observer des valeurs maximales de PT à plus de 99,5% et de TH à 90%. Les valeurs de stockage sont importantes que ce soit en surface ou en profondeur. La présence d'anciens fossés dans ce microtope comblé naturellement est susceptible de favoriser les écoulements longitudinaux vers le ruisseau sud notamment.

→ Zone sud

Cette zone est caractérisée par un contact tourbe/substratum ou réductisol/substratum entre 40 cm de profondeur (près de l'exutoire du cours d'eau) et 2 m aux extrêmes Est et Ouest du transect T9. Ce secteur est marqué par *Molinia caerulea* et des *Carex rostrata* vers l'exutoire sud :

- Les **secteurs sud** à molinies affichent des valeurs de stockage dynamique légèrement plus faibles. La proximité immédiate des zones périphériques dans ces secteurs, les sols peu profonds et les battements de nappes important en font à un secteur à faible capacité de stockage potentiel. Nous pouvons émettre l'hypothèse que le déphasage du signal hydrologique est rapide.
- Les **secteurs périphériques** qui se conduisent comme des sols de zones humides typiques des secteurs d'accompagnement de cours d'eau. Notons également que la position de ces secteurs entre deux versants, confère à ces espaces une position de premier plan dans la réception des eaux de ruissellements.

• Limite de l'acrotelme

L'acrotelme et le catotelme sont deux couches théoriquement distinctes dans les faciès tourbeux des tourbières ombrotrophes. La limite est matérialisée par le niveau le plus bas que peut atteindre la nappe et oscille généralement entre 30 et 50 cm de profondeur.

L'un des objectifs de cette étude est de déterminer la position de cette limite hydrologique en croisant les informations géophysique, piézométrique et pédologique. La position des valeurs d'acrotelme théorique le long des transects radar amène à discuter l'utilisation de ce modèle diplotelmique. Le Luitel étant un hydrosystème tourbeux perturbé sur les plans pédologique et hydrologique (fossés de drainages), les valeurs de l'acrotelme décrochent régulièrement en dessous des 50 cm pour le secteur sud. Les valeurs théoriques ne peuvent s'appliquer dans un tel contexte. Les profondeurs de l'acrotelme du Luitel sont donc plus importantes (jusqu'à moins un mètre) que le modèle théorique. Le modèle diplotelmique ne semble pas opérant pour un terrain présentant un patchwork de situations. L'application de ce modèle au cours de cette étude semble possible pour les secteurs relativement stables (Pinède Nord), en revanche il est préférable de ne pas tenir compte de ce modèle pour les secteurs Sud. Pour rappel, ce modèle n'est pas effectif en contexte pseudotourbeux.

13.4.2. Géométrie et structure 3D de la tourbière du col

Les résultats des travaux effectués en pédologie et en géophysique ont permis de construire la géométrie (interface substratum/tourbière) et la structure (faciès pédologique sur les 3 à 4 premiers mètres) 3D de la tourbière du Luitel sous ArcGIS Pro. Ceci a permis de mettre en image 3D, les résultats décrit synthétiquement précédemment. Le recoupement avec d'autres données a permis de déterminer les cotes de points et de plans de référence : 1) plan d'exutoire de Fontfroide ; 2) plan d'exutoire de Pezanti ; 3) plan d'exutoire de la surverse du nord vers le sud ; 4) plans de gytja nord et

sud. Par exemple, il a ainsi été possible de déterminer la cote à partir de laquelle on observe une déconnexion hydraulique entre les parties nord et sud de la tourbière du col.

Ce travail a aussi permis le calcul de volume d'eau stockée et déstockée durant l'étiage estival par la tourbière. Pour les étiages 2019 et 2020, en considérant une porosité efficace de 35% les volumes d'eau sont estimés respectivement à 6494 m³ et 15 062 m³. Le débit de perte journalière sur la durée de l'étiage est estimé :

- pour l'étiage 2019, en tenant compte des réservoirs nord et sud, la tourbière perd au total de 1,05 à 3,01 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 1,1 l/s.
- pour l'étiage 2020, en tenant compte des réservoirs nord et sud, la tourbière perd au total de 1,20 à 2,32 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 2,2 l/s.

Ces résultats montrent qu'il est difficile de réaliser un bilan hydrologique précis compte-tenu des incertitudes sur les volumes calculés et sur les transferts d'eau : 1) contribution de la tourbière à l'ETP ; 2) apports de la tourbière à Fontfroide ; 3) pertes de la tourbière vers le substratum. Le phénomène d'interception de la pluie par la végétation n'a pas non plus été pris en compte. De plus, ces mécanismes de transferts d'eau sont vraisemblablement variables dans l'espace (type de végétation, type de sol) et dans le temps (état hydrologique), même à l'échelle d'un étiage.

13.4.3. Analyse la grande carotte de la tourbière du col

L'analyse d'une carotte de tourbe prélevée sur la partie sud de la tourbière du col du Luitel (secteur de Fontfroide amont, proche du piézomètre P9) a permis de reconstituer en partie l'histoire paléohydrologique de ce secteur du complexe tourbeux. La carotte prélevée en juin 2018 au carottier russe présente une longueur de 452 cm entre la surface et le substratum minéral. Les analyses suivantes ont été effectuées : pertes au feu, teneurs en carbone et azote, datation ¹⁴C.

Cette carotte permet de retracer environ 9 500 ans BP d'histoire du complexe tourbeux. On distingue 3 grandes périodes :

- 9 500 à 5 000 BP (-452 à -146 cm) : l'histoire démarre avant la naissance de la tourbière par la présence de dépôts lacustres (et/ou gyttja ?) sur un substratum vraisemblablement glaciaire mais non déterminé faute de prélèvements. La majeure partie de ce tronçon est composé de tourbe saprique enrichie de particules minérales ce qui tend à supposer des apports fréquents d'eau de ruissellement dans la tourbière. On observe une accumulation de tourbe de régulière indiquant vraisemblablement la stabilité des conditions hydroécologiques. Cette tourbe bien décomposée aurait été formée par l'accumulation de carex et jonc.
- 5 000 au 18/19^{ième} siècle (-146 à -16 cm) : sur ce tronçon, on observe une forte et relativement rapide accumulation de tourbe (vraisemblablement de sphaignes). Il s'agit de tourbe moyennement (mésique) ou peu (fibrique) décomposée. Cette forte dynamique de la turfigenèse et le passage des carex/joncs aux sphaignes marquent des changements hydro-pédologique et écologique. Ces changements sont vraisemblablement liés à un refroidissement du climat pour cette période (apparition de la hêtraie-sapinière) permettant un bilan hydrologique plus favorable à la turfigenèse. Cette période est aussi marquée par des impacts anthropiques agro-pastoraux.
- 18/19^{ième} siècle à nos jours : -16 à 0 cm) : ce dernier tronçon est marqué par la présence d'un horizon assaini vraisemblablement liés à des impacts humains. Cet horizon est lié à la minéralisation de la tourbe et au tassement de la tourbière par manque d'eau. Les sécheresses et les abaissements de nappes prolongés observés depuis une trentaine d'années ne garantissent plus la saturation en eau permanente des histosols conduisant à une destruction de la tourbe accumulée (minéralisation et tassement) et au blocage de la turfigenèse ; ainsi il ne reste plus que 58 cm pour les 4 000 dernières années d'histoire de la tourbière du Luitel. Ce phénomène est par ailleurs observé sur de nombreuses tourbières. L'arrêt de l'accumulation de tourbe ne permet plus de stockage de carbone et sa minéralisation provoque le relargage de GES (gaz à effet de serre) comme le CO₂. Le bombement naturel des tourbières résulte de la dynamique naturelle du tapis végétal qui au final est de moins en moins dépendant des excès d'eau (comblement et assèchement). Une restauration hydrologique par comblement des fossés, par exemple, permettrait

Partie III – Luitel – Synthèses

une élévation du toit de la nappe et une reprise de la turfigenèse, donc de la séquestration de carbone.

Pour aller plus loin dans l'interprétation de l'histoire paléohydrologique de la tourbière du Luitel, il conviendrait de prélever une nouvelle carotte au niveau de la tourbière du col du Luitel afin d'effectuer des analyses des macrorestes et des pollens. Ainsi, les résultats pourraient être mis en perspective avec ceux de la grande carotte de la partie nord.

PARTIE III

–

Indicateurs de soutien d'étéage

| | |
|---|------|
| 14. Indicateurs du potentiel de soutien d'étéage à l'échelle d'un site tourbeux | p239 |
| 15. Indicateurs du potentiel de soutien d'étéage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux | p251 |
| 16. Synthèses – Indicateurs | p277 |

14. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux

Cette partie présente une synthèse des travaux de master 2 de Salma Sadkou²⁰ réalisés dans le cadre de la phase 3 du projet ZHTB. Lors de son stage, Salma Sadkou a réalisé une étude exploratoire sur l'utilisation de l'équation de Boussinesq et de ses paramètres pour la construction d'un indicateur et d'abaques visant à caractériser le potentiel de soutien d'étiage des zones humides tourbeuses à l'échelle du site. Pour plus d'information, notamment concernant les abaques, il est possible de consulter son mémoire de stage, ainsi que le rapport ZHTB phase 2²¹. Les indicateurs sur lesquels S. Sadkou a travaillé reflètent le comportement de déstockage (vidange) d'un réservoir tourbeux saturé.

14.1. Choix des paramètres à prendre en compte

Pour rappel, la tourbe est un sol résultant de la « fossilisation » de la matière organique en raison de présence quasi permanente d'eau. En moyenne, l'épaisseur des dépôts de tourbe se situe entre 50 cm et 5 à 10 m. En-dessous de 40 cm, on parle de milieux paratourbeux. On peut donc considérer une tourbière comme un réservoir. Il convient donc de prendre en compte des critères géométriques pour la construction d'un indicateur, par exemple, le volume.

Une tourbière est un réservoir rempli de tourbe : il s'agit donc d'un réservoir poreux déformable dans lequel le stockage et l'écoulement des eaux sont régis par des propriétés hydrodynamiques. Les principales sont la porosité efficace (ϕ – %) et la conductivité hydraulique ou perméabilité (K – m/s). Il est notable que les réservoirs tourbeux présentent une anisotropie verticale des paramètres hydrodynamiques : ceux-ci diminuent généralement avec la profondeur (Figure 183. Pour rappel, cette anisotropie est liée au degré d'humification qui augmente avec la profondeur qui peut être exprimé avec l'indice de Von Post (H1 - peu décomposé à H10 - très décomposé).

Quand l'humification est forte, la matière organique se tasse ce qui limite la circulation d'eau. Une tourbière est aussi caractérisée par une structuration verticale dite « diplotelmique » composée :

- d'une couche supérieure fine appelée l'acrotelme, présentant des propriétés hydrodynamiques favorables au stockage et à l'écoulement de l'eau ;
- d'une couche inférieure très épaisse (plusieurs mètres) appelée le catotelme, moins favorable à l'écoulement de l'eau (Wastiaux, 2008).

Face à l'hétérogénéité des réservoirs tourbeux, il convient donc de prendre en compte les propriétés hydrodynamiques (ex : porosité efficace, conductivité hydraulique) et hydrologiques (ex : niveau d'eau, lame d'eau) pour la construction d'indicateurs de soutiens d'étiage.

Quels que soient les paramètres sélectionnés (géométriques, hydrologiques, hydrodynamiques), la construction d'un indicateur simple et facile d'usage nécessite une simplification des valeurs spatialement hétérogènes de ces paramètres. Il convient donc de travailler avec des valeurs représentatives (ex : volume, hauteur d'eau...) ou équivalentes (ex : porosité efficace, conductivité hydraulique).

20. Sadkou S. (2020) Étude du fonctionnement hydrodynamique des tourbières et de leur potentiel de soutien d'étiage (Projet ZABR, action 67). Rapport de Master 2 parcours Géosphère (GEOgraphies – eSPaces – Homme/Environnement – Ressources). Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS, ZABR, AE-RMC, 83p.

21. Paran F., Pascoletti Y., Graillet D., Dujardin F., Artigue G., Pinel S, Caldarak H., Johannet A., Winiarski T., Cubizolle H., Jolly T., Mazagol P.M., Sacca C., Riquier J., Lavastre V., Chevet J., Cocula C., Ebrard E., Laroque B. (2019) Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau – Mise en œuvre sur les sites de Luitel et Frasné. Rapport phase 2. Zab, AE-RMC, 183p + annexes.

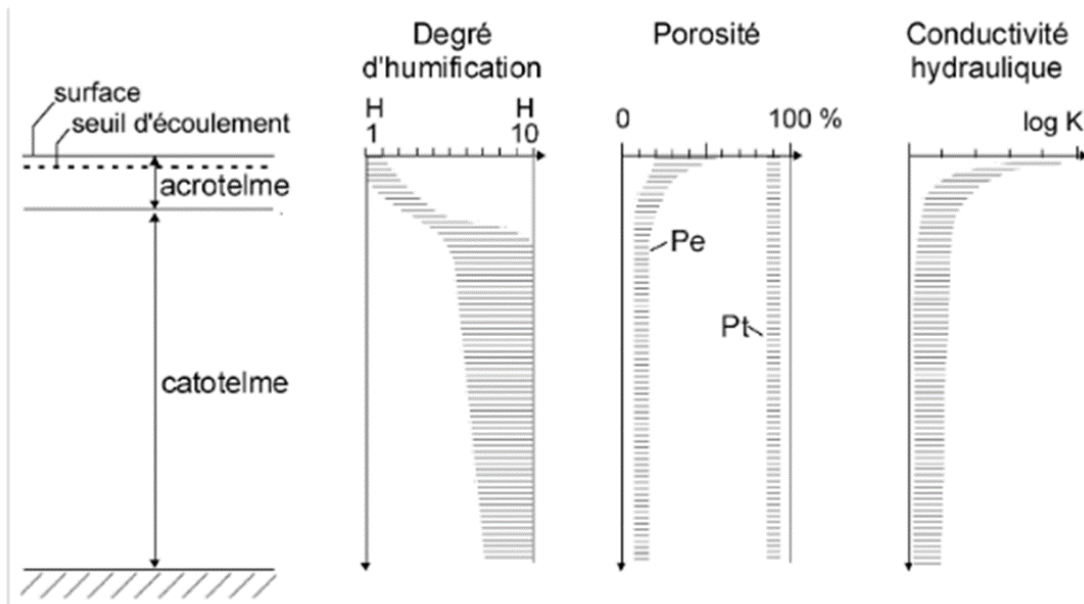


Figure 183 : Structure diploielmique des tourbières et variation des paramètres hydrodynamiques en relation avec la profondeur (Wastiaux, 2008)

14.2. Matériel et méthode

14.2.1. Équation de Boussinesq

L'équation retenue pour tester un indicateur de soutien d'étiage des zones humides tourbeuses est l'équation de Boussinesq de 1903. Il s'agit d'une équation quadratique pour laquelle plusieurs hypothèses simplificatrices sont émises : un aquifère poreux, libre, homogène sur une couche horizontale imperméable (le substratum), sans effet capillaire avec un exutoire fixe (Dewandel et al., 2003). Si tous les prérequis ne sont pas satisfaits dans le cas des tourbières, notamment les effets capillaires et le fait que nous nous trouvons dans un milieu déformable, cette équation est intéressante car elle intègre les paramètres physiques cités précédemment.

Elle permet de calculer la décroissance dans le temps du débit de vidange d'un réservoir poreux saturé en fonction de paramètres physiques (Figure 184) : longueur (L) et largeur (l) du réservoir, hauteur d'eau (h_m), conductivité hydraulique (K), porosité efficace (ϕ).

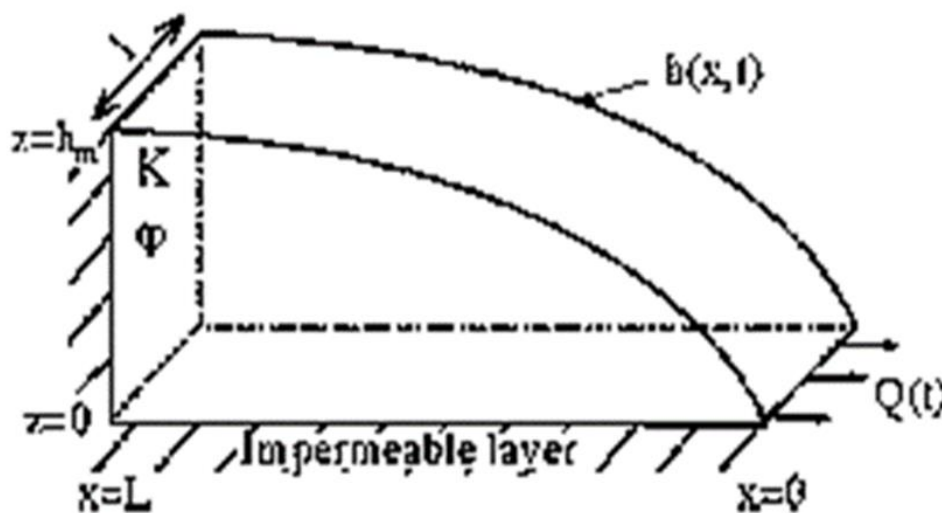


Figure 184 : Paramètres de l'équation de Boussinesq (1903 ; Dewandel et al., 2002)

Cette équation s'écrit comme suit :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$$

Q_t : débit au temps t [L^3/T]

Q_0 : débit initial [L^3/T]

α : coefficient de tarissement [T^{-1}]

t : temps [T]

Équation 11 : Équation de Boussinesq – Débit de vidange en fonction du temps

$$Q_0 = 0,862 Kl \frac{h_m^2}{L}$$

Avec :

K : conductivité hydraulique (perméabilité) [L/T]

l : largeur de l'aquifère [L]

h_m : charge hydraulique initiale à la distance L [L]

L : longueur de l'aquifère [L]

Équation 12 : Équation de Boussinesq – Débit de vidange initial

$$\alpha = \frac{1,115 Kh_m}{\phi L^2}$$

Avec :

K : conductivité hydraulique (perméabilité) [L/T]

h_m : charge hydraulique initiale à la distance L [L]

ϕ : porosité efficace [-]

L : longueur de l'aquifère [L]

Équation 13 : Équation de Boussinesq – Coefficient de tarissement

La longueur (L) désigne le segment parallèle au sens de l'écoulement. La largeur (l) désigne le segment perpendiculaire au sens de l'écoulement. La charge hydraulique (h_m), épaisseur ou épaisseur mouillée exprime la cote au-dessus de l'exutoire.

Cette équation a été retenue pour plusieurs raisons. D'abord, elle offre une solution analytique exacte alors que d'autres équations connues comme celle de Maillet offrent une solution approximative. Elle est adaptée aux aquifères peu profonds. Une tourbière se comporte comme tel grâce à son anisotropie favorisant les flux horizontaux ce qui revient à annuler l'impact de la profondeur et limite alors les lignes de flux en profondeur (Dewandel et al., 2003). Enfin, elle revêt une dimension physique ce qui est primordial pour faire correspondre les calculs aux réalités de terrain.

14.2.2. Protocole expérimental pour la production d'abaques

Il est possible d'appliquer l'équation de Boussinesq sur des cas réels en sélectionnant des valeurs représentatives ou équivalentes pour chacun des paramètres. Dans un premier temps, il semble plus intéressant de regarder comment l'équation se comporte quand on fait varier ses paramètres dans des gammes de valeurs cohérentes avec ce que l'on peut trouver sur des sites tourbeux réels. Un tel exercice permet de balayer le champ des possibles et de construire des abaques qui permettront de statuer sur le

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux

potentiel (théorique) de soutien d'étiage d'une tourbière. Le nombre de combinaisons de paramètres étant très élevé, il convient de construire un protocole expérimental.

À cette fin, des gammes de valeurs ainsi que les niveaux, qui désignent les valeurs que peuvent prendre les paramètres avec ou sans incrément, ont été définis (Tableau 29). Les gammes de valeurs des paramètres de porosité efficace et de conductivité hydraulique sont issues de la littérature. La cote au-dessus de l'exutoire (h_m) a été estimée à partir de cas français connus. Des configurations intéressantes et/ou compatibles avec des types de tourbières ont été retenues pour les rapports l/L. Enfin, les surfaces ont été sélectionnées pour représenter différents ordres de grandeur.

| Paramètres | Gammes/Configurations | Niveaux |
|--------------------------|--|--|
| K (m/s) | 10 ⁻⁶ à 10 ⁻² m/s (Porteret, 2005) | 10 ⁻⁶ ; 10 ⁻⁵ ; 10 ⁻⁴ ; 10 ⁻³ ; 10 ⁻² |
| l/L | 1/10 à 10 (3 configurations : l<L ; l=L ; l>L) | 1/10 ; 1/5 ; 1/2 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 |
| h_m (m) | 0,2 à 6 m | 0,2 ; 0,35 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 6 |
| Φ (-) | 0,1 à 0,5 soit 10 à 50% (Wastiaux, 2008) | 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 |
| Surface (ha) | 1 à 100 | 1 ; 10 ; 100 |

Tableau 29 : Gammes de valeurs et niveaux adoptés pour le protocole expérimental et la création d'abaques

Les travaux menés dans la phase 2 du projet ZHTB avaient permis de proposer les caractéristiques de la tourbière de tête de bassin versant idéale pour le potentiel soutien d'étiage. À partir de ces hypothèses de départ, il a été possible de préfigurer les configurations favorables et défavorables.

Ainsi, sont considérées comme hypothèses de configuration favorable les tourbières où :

- la conductivité hydraulique (**K**) est intermédiaire ;
- la porosité efficace (**φ**) est forte ;
- le rapport l/L et la largeur L sont grands ;
- un grand volume existe au-dessus de la cote de l'exutoire soit une épaisseur mouillée (h_m) forte.

Et comme hypothèses de configuration défavorable les tourbières où :

- la conductivité hydraulique est trop faible (colmatage) ou trop forte (vidange rapide) ;
- la porosité efficace (**φ**) est faible ;
- le rapport l/L est petit et la longueur (L) sont petits ;
- un faible volume existe au-dessus de l'exutoire se traduisant par une faible épaisseur mouillée (h_m).

À partir des gammes de valeurs et des niveaux sélectionnés, quatre types d'abaques ont été créés (Tableau 30) :

- 1) 1 abaque de débit initial (Q_0) ;
- 2) 42 abaques représentant le temps nécessaire pour atteindre une valeur de débit initial divisée par 2, 5, 10 et 50 ;
- 3) 62 abaques de temps de vidange ;
- 4) 63 abaques montrant le comportement de tarissement.

| Type d'abaque | Nombre | Description |
|---|--------|---|
| Débit initial (Q_0) | 1 | Les courbes représentent des combinaisons de perméabilité (K) et de rapport l/L avec le paramètre de l'épaisseur (h_m) en ordonnées. |
| Temps avant division de débit par 2, 5, 10 et 50 | 42 | Chaque courbe représente une combinaison de perméabilité (K) et de porosité efficace (ϕ) avec le paramètre de l'épaisseur (hm) en ordonnées. Deux abaques sont créés par rapport l/L et par surface. |
| Temps de vidange | 62 | Puisque la vidange ne peut pas être complète avec l'équation de Boussinesq de 1903, des seuils de vidange ont été déterminés : 1) 0,01 l/s (seuil faible) ; 2) 1 l/s qui est symbolique car il correspond aux besoins domestiques journaliers d'une petite commune de 630 personnes ; 3) 0,1 l/s (seuil est intermédiaire). Chaque courbe représente une combinaison de perméabilité (K) et de porosité efficace (ϕ). Les abaques s'organisent par rapport l/L et par surface. |
| Courbes de tarissement | 63 | Chaque courbe représente une combinaison de perméabilité (K) et d'épaisseur (h_m) en ordonnées. Un abaque est créé pour chaque rapport l/L, porosité efficace (ϕ) et surface. Trois valeurs de porosité efficace ont été retenues pour ce type d'abaque : 0,1 ; 0,25 ; 0,50. |

Tableau 30 : Description des différents abaques créés

14.3. Résultats

14.3.1. Débit initial (Q_0)

Durant la réalisation de l'abaque de débit initial, les combinaisons qui génèrent un débit initial trop faibles ($<0,01$ l/s) ont été identifiées et n'ont pas été reprises pour le restant des abaques (Tableau 31).

Cette liste de combinaisons est intéressante car elle permet de savoir quelles configurations ont un débit faible voire très faible à t_0 . Dans le Tableau 31, on constate que plus le rapport l/L est élevé et moins il y a de combinaisons qui ont un débit initial faible. Une perméabilité faible produit de faibles débits initiaux, mais elle peut être intermédiaire pour des petits rapports l/L. Une charge hydraulique faible produit aussi de faibles débits initiaux.

Sur la Figure 185, on observe une grande différence entre les plus grandes valeurs de débit initial et les faibles valeurs calculées en fonction des paramètres. L'axe du débit initial est limité à 500 l/s mais, en réalité, pour un rapport l/L de 10 et une perméabilité de 10^{-2} m/s, on atteint la valeur de 3 103 l/s alors que d'autres débits initiaux sont en-dessous de 1 l/s. Le débit augmente avec l'augmentation de l'épaisseur mouillée (h_m), du rapport l/L et de la conductivité hydraulique (K). Les quatre valeurs les plus élevées du débit initial concernent la même valeur de perméabilité (10^{-2} m/s).

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux








| Rapport l/L | | Conductivité hydraulique (K) en m/s | Charge hydraulique (h _m) en m |
|-------------|---|-------------------------------------|---|
| 0,1 |  | 10 ⁻³ | 0,2 |
| | | 10 ⁻⁴ | 0,2 à 1 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 3 |
| | | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 6 |
| 0,2 |  | 10 ⁻³ | 0,2 |
| | | 10 ⁻⁴ | 0,2 à 0,75 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 2 |
| | | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 6 |
| 0,5 |  | 10 ⁻⁴ | 0,2 à 0,35 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 1,5 |
| | | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 3 |
| 1 |  | 10 ⁻⁴ | 0,2 à 0,35 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 1 |
| | | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 3 |
| 2 |  | 10 ⁻⁴ | 0,2 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 0,75 |
| | | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 1 |
| 5 |  | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 1 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 à 0,35 |
| 10 |  | 10 ⁻⁶ | 0,2 à 1 |
| | | 10 ⁻⁵ | 0,2 |

Tableau 31 : Combinaisons de conductivité hydraulique (K) et de charge hydraulique (h_m) qui génèrent un débit initial (Q₀) inférieur à 0,01 l/s à t₀

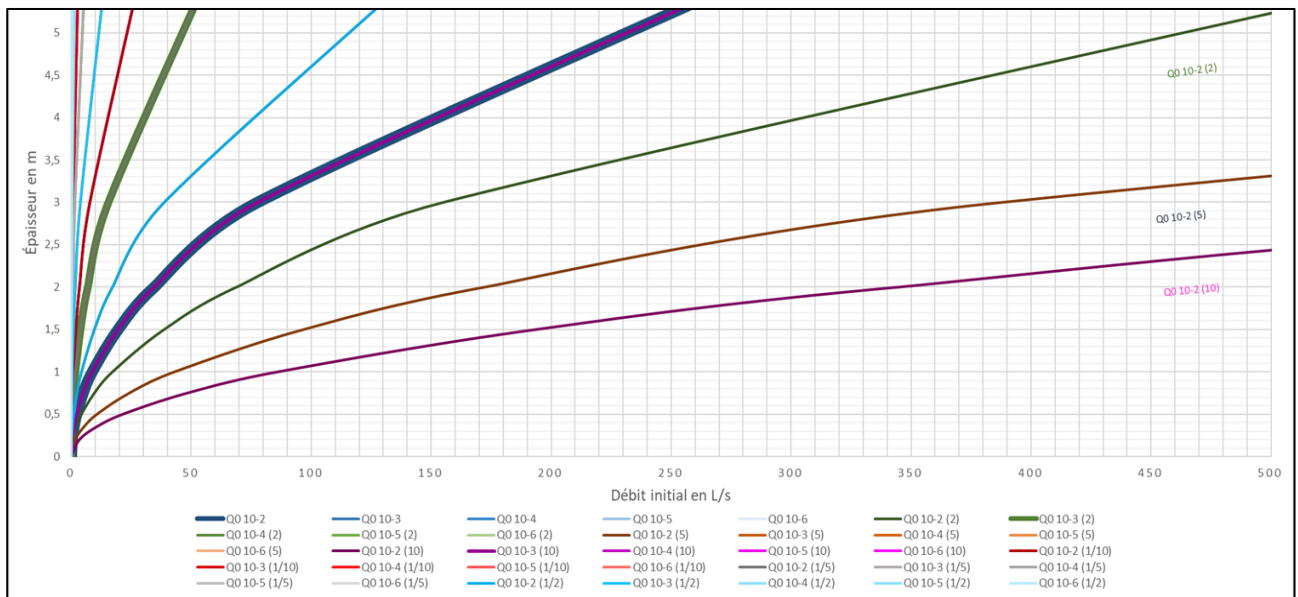


Figure 185 : Abaque illustrant les valeurs de débit initial (Q₀ en l/s) pour des combinaisons de conductivité hydraulique (K de 10⁻² à 10⁻⁶) et du rapport l/L (donné entre parenthèse 2, 5, 10, 1/2, 1/5, 1/10) ; sans indication le rapport vaut 1) en fonction de l'épaisseur mouillée (h_m de 0,2 à 6 m)

14.3.2. Autres abaques : exemples

D'autres abaques ont pu être construits.

La Figure 186 donne un exemple de l'abaque de temps de vidange réalisé pour un rapport l/L de 10, un seuil de débit de 1 l/s et une surface de 10 hectares.

On constate à nouveau une grande différence entre les grandes et les petites valeurs de temps de vidange. Pour une même porosité efficace de 0,5, le temps de vidange est aux alentours de 50 jours pour une perméabilité de 10^{-2} m/s et aux alentours de 660 jours pour une perméabilité de 10^{-5} m/s.

Plus la perméabilité augmente, moins le temps de vidange est élevé. Plus l'épaisseur augmente, plus le temps de vidange augmente. Pour une même valeur de perméabilité, plus la porosité efficace est élevée, plus le temps de vidange augmente.

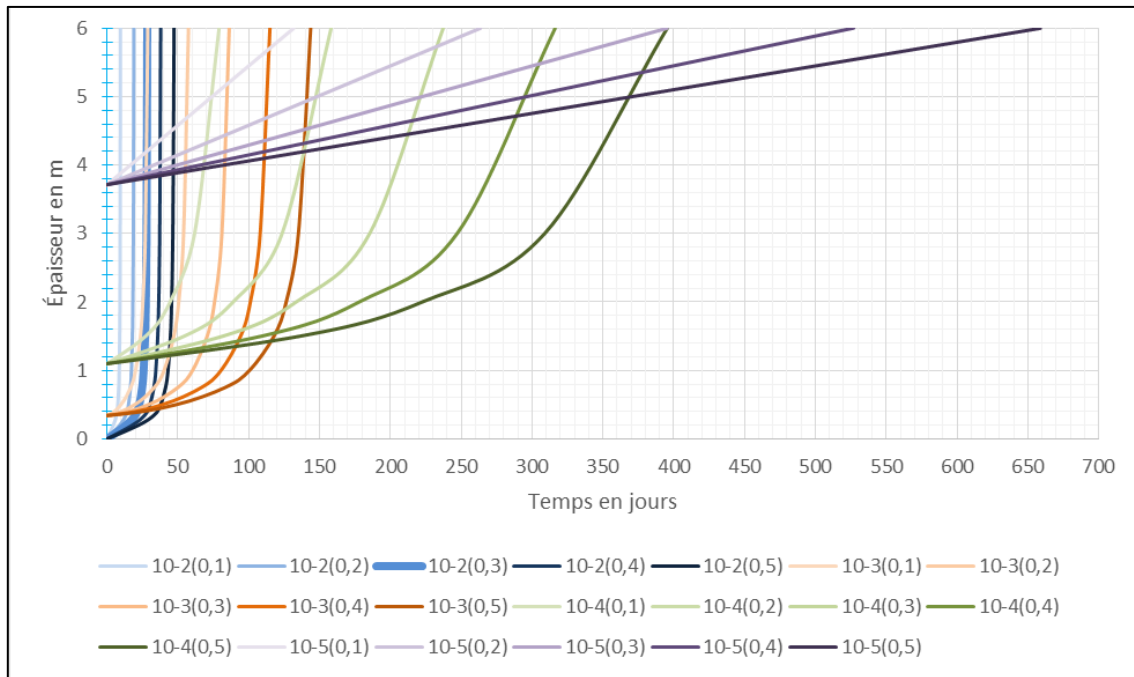


Figure 186 : Abaque des temps de vidange (en jours) pour des combinaisons de conductivité hydraulique (K de 10^{-2} à 10^{-5} m/s) et de porosité efficace (donnée entre parenthèse de 0,1 à 0,5 soit 10 à 50%) par rapport à l'épaisseur mouillée (hm de 0,2 à 6 m). Cet abaque est valide pour un rapport l/L de 10 ; un débit seuil de 1 l/s et une surface 10 hectares.

Enfin, la Figure 187, illustre un comportement de tarissement réalisé pour une porosité efficace de 0,1, un rapport l/L de 1 et une surface de 10 hectares.

Sur cette figure, on observe une augmentation de la vitesse de décroissance quand la perméabilité et l'épaisseur sont élevées. Les courbes des faibles perméabilités (10^{-5} et 10^{-6} m/s) constituent un faisceau en-dessous de 1 l/s. Les autres abaques réalisés montrent que la vitesse tarissement baisse avec l'augmentation de la surface, de la porosité efficace et du rapport l/L .

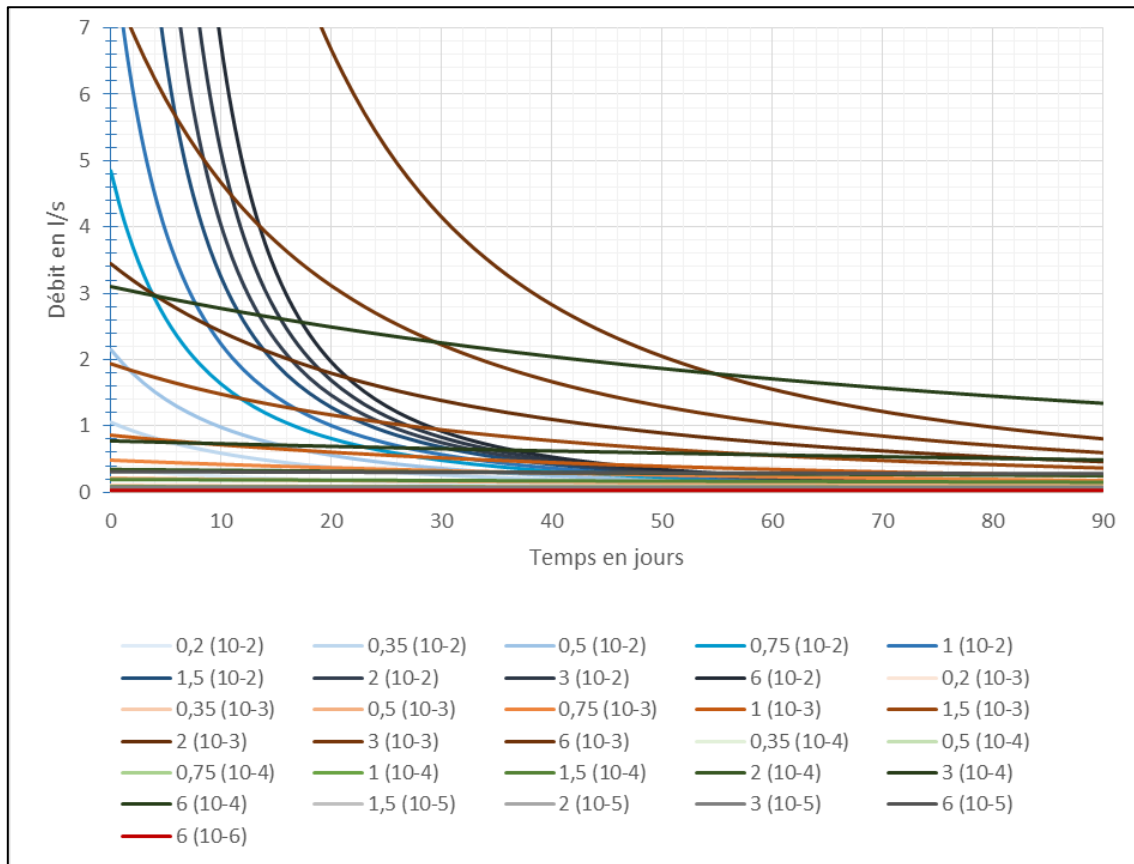


Figure 187 : Abaque illustrant les courbes de tarissement du débit de vidange (l/s) en fonction en temps pour des combinaisons de conductivité hydraulique (données entre parenthèse ; K de 10^{-2} à 10^{-6}) et de charges hydrauliques (h_m de 0,2 à 6 m). Cet abaque est valide pour une porosité efficace de 0,1 (10%), un rapport L/L de 1 et une surface de 10 hectares.

14.4. Discussion et conclusion

14.4.1. Limites méthodologiques

La méthode expérimentale a été privilégiée dans le plan d'expérience pour la création des abaques. Cette méthode ne permet pas de voir l'impact du changement de plusieurs facteurs simultanément, contrairement à un plan factoriel complet (Gillon, 2004). De plus, le nombre de configurations possibles était trop élevé (4050 configurations). Les configurations ont donc été sélectionnées en combinant des gammes et des niveaux de valeurs représentatifs de cas réels sans rechercher l'exhaustivité.

L'équation de Boussinesq de 1903 est peu utilisée car elle n'est mathématiquement pas commode (Dewandel et al., 2003). Cette équation émet aussi plusieurs hypothèses simplificatrices. Elle offre, une solution analytique exacte et les hypothèses émises sont alignées avec la méthodologie adoptée. Il faut toutefois garder à l'esprit que la modélisation est une simplification, une représentation incomplète de la réalité qui augmente l'incertitude sur les conclusions. Néanmoins, la modélisation permet de comprendre partiellement le système de la tourbière et d'étudier plusieurs configurations (Duranel, 2016). Les équations de la physique, quant à elles, augmentent la certitude même si elles restent des modèles conceptuels (Nordstrom, 2012).

14.4.2. Apports de la modélisation pour intégrer des paramètres météorologiques (pluie, ETP)

Le but de la modélisation est de déterminer le fonctionnement d'un modèle théorique auquel on attribue des paramètres et des données de tourbière réelle. L'approche systémique a été retenue en vue d'appréhender un système complexe tourbeux. La technique de la dynamique des systèmes qui permet

de mettre en lien un réservoir, un flux et un pas de temps a été appliquée en utilisant la version PLE (Plus Learning Edition) du logiciel Vensim.

On considère au départ qu'il n'y a pas de perte ou d'apport hormis l'écoulement à l'exutoire puis on inclut l'ETP et la pluie.

Le modèle créé est une représentation très simplifiée du système de la tourbière. Il se compose d'un réservoir correspondant à la tourbière, de deux flux sortants, le débit à l'exutoire (Q_t) et l'ETP, et d'un flux entrant, la pluie. Le débit à l'exutoire est exprimé avec l'équation de Boussinesq de 1903 puis transformé en hauteur dans le réservoir pour refléter le changement de niveau. Les données de la pluie et de l'ETP proviennent de la RNN du Luitel et de l'IGE de Grenoble.

Plusieurs configurations de paramètres ont été testées car les campagnes de carottages ont montré une anisotropie horizontale (Jolly, 2019). Une seule configuration a été retenue ($K = 4,5 \cdot 10^{-4}$ m/s ; $\phi = 0,4$; $l = 600$ m et $L = 150$ m) car les résultats étaient pertinents avec ceux d'autres travaux du projet ZHTB (Pascoletti, 2019). Des données d'ETP, puis celles de pluie pour la période entre début mai et fin octobre 2018, ont été incorporées pour évaluer la baisse de niveau de réservoir sous cette influence (Figure 188).

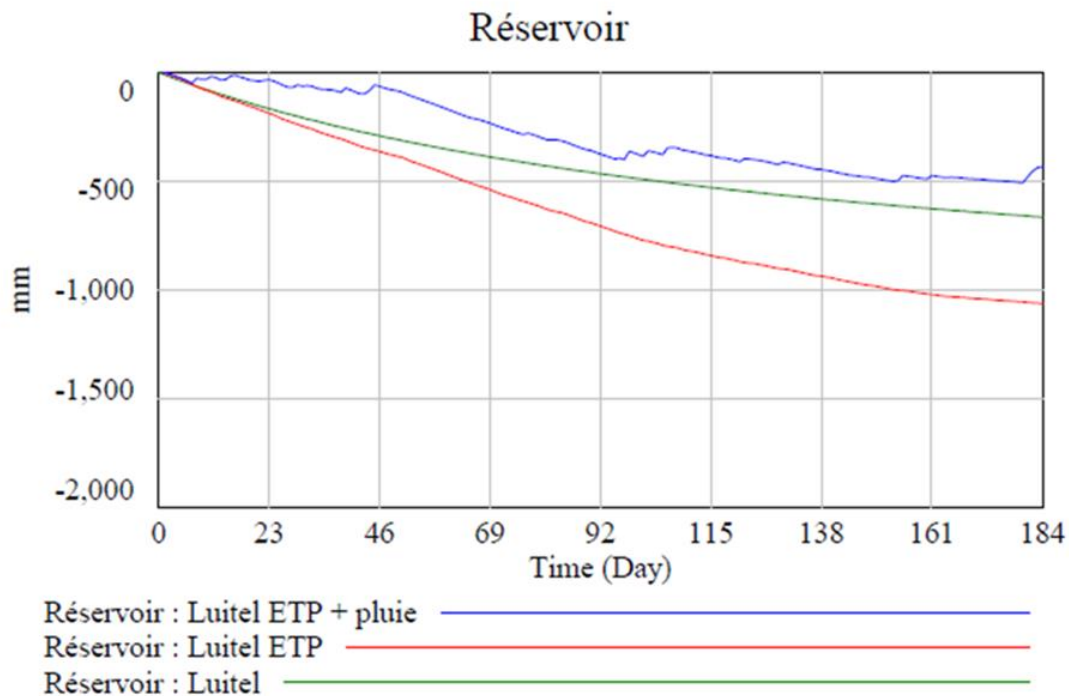


Figure 188 : Graphique montrant la baisse de niveau du réservoir au Luitel sans l'ETP et pluie, avec l'ETP et avec l'ETP et la pluie

Sans ETP et pluie, la baisse de niveau est d'environ 700 mm et est quasi-linéaire. Avec l'ETP, la baisse de niveau est aux alentours de 1000 mm. Avec l'ETP et la pluie, la baisse de niveaux est d'environ 450 mm avec des instants d'augmentation de niveau.

Ce type de modélisation montre bien que l'équation de Boussinesq nous informe sur le potentiel de vidange d'un réservoir tourbeux dont la géométrie et les propriétés hydrodynamiques ont été établies à partir de valeurs représentatives ou équivalentes. Ce potentiel peut être intéressant pour évaluer l'importance théorique relative du rôle de soutien d'étiage de différents sites tourbeux. Toutefois, ce potentiel doit être analysé au regard des conditions climatiques.

La Figure 189 permet de positionner le jeu de paramètres utilisés pour traiter le cas réel du Luitel, au regard du temps de vidange, par rapport aux gammes et niveaux retenus pour construire le jeu d'abaques :

- Jeu de paramètres retenus pour le Luitel (en bleu) :

→ $K = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$; $l/L = 4$; $\phi = 0,4$ (40%) ; $h_m = 2,2 \text{ m}$; Surface = 9 ha

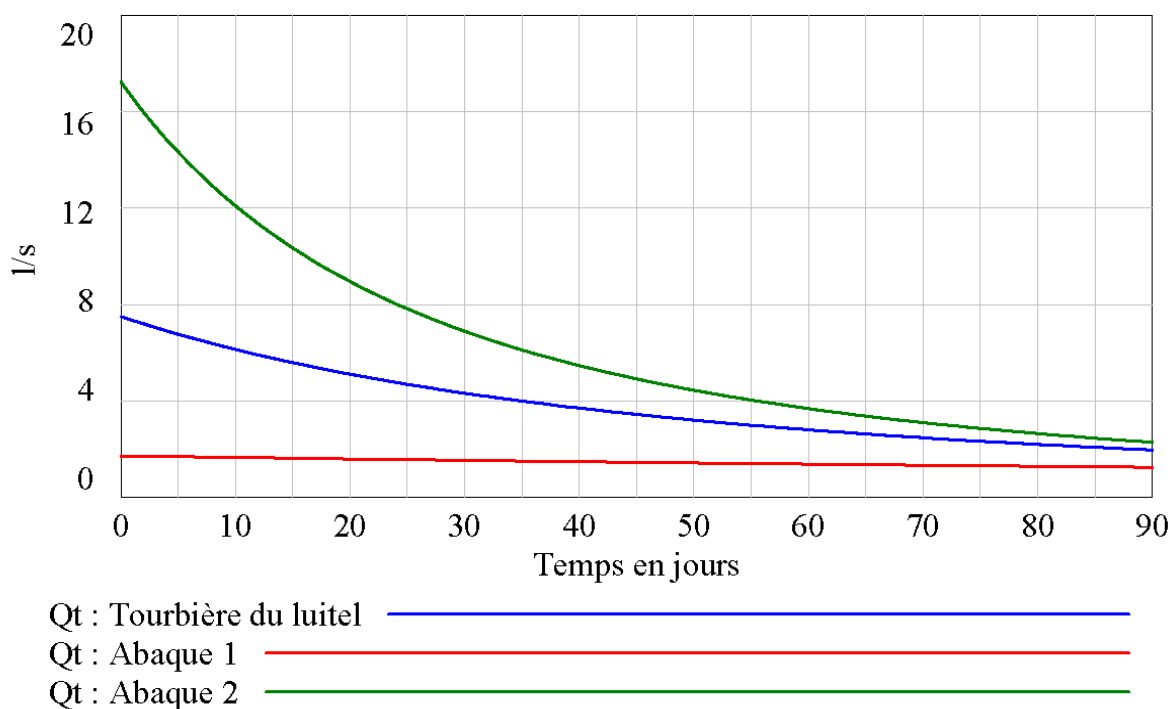
- Jeu de paramètres abaque 1 proche inférieur (en rouge) :

→ $K = 10^{-4} \text{ m/s}$; $l/L = 5$; $\phi = 0,5$ (50%) ; $h_m = 2 \text{ m}$; Surface = 10 ha

- Jeu de paramètres abaque supérieur (en vert) :

→ $K = 10^{-3} \text{ m/s}$; $l/L = 5$; $\phi = 0,5$ (50%) ; $h_m = 2 \text{ m}$; Surface = 10 ha

Positionnement du cas du Luitel par rapport aux abaques



Wed Aug 26, 2020 6:47PM

Figure 189 : Positionnement du cas du Luitel par rapports aux abaques

14.4.3. Analyse des résultats et comparaison avec les hypothèses de départ

Pour obtenir, un débit initial (Q_0) conséquent, il est nécessaire qu'un réservoir présente une conductivité hydraulique (K), une épaisseur mouillée (h_m) et un rapport l/L élevés.

Pour obtenir un temps de vidange idéal (aux alentours de 90 jours, soient 3 mois d'été), il est nécessaire que la conductivité hydraulique du réservoir soit modérée (une perméabilité trop forte diminue le temps de vidange), que l'épaisseur mouillée soit forte et que la porosité efficace soit élevée (pour une même perméabilité, l'augmentation de la porosité efficace augmente le temps de vidange). De plus, la perméabilité doit diminuer au fur et à mesure que le rapport l/L augmente.

Pour que le comportement de tarissement soit adéquat, des valeurs intermédiaires doivent être privilégiées. D'après ces constatations, la porosité efficace intervient peu dans le processus de tarissement et des valeurs de paramètres intermédiaires favorisent le soutien d'étiage. D'une manière générale, des perméabilités faibles sont défavorables.

Ces analyses montrent que l'hypothèse de configuration favorable de départ est valide avec K intermédiaire et h_m , l/L et ϕ grands. Cette hypothèse permet d'avoir une quantité d'eau importante

pour le soutien d'été. D'autres configurations permettent toutefois des apports constants. Ainsi, il existe plusieurs configurations favorables. Il ne faut donc pas se fier aux généralisations et c'est là que réside toute l'importance des abaques.

14.4.4. *Vers des abaques opérationnels*

Il reste encore du travail pour rendre les abaques opérationnels.

Il conviendrait en premier lieu de tester l'équation de Boussinesq sur des sites réels à partir d'une estimation des valeurs représentatives ou équivalentes des paramètres. Il serait ainsi possible d'établir une typologie des tourbières et zones humides fondée sur la valeur du débit initial ou du temps de vidange pour atteindre un débit de 1 l/s. Il serait alors possible de sélectionner des gammes et des niveaux de valeurs plus adaptés que ceux présélectionnés dans cette étude et construire un jeu d'abaque optimisé.

Une fois cela fait, la création d'un tutoriel et/ou d'un didacticiel sera indispensable pour que l'utilisateur maîtrise l'usage du jeu d'abaque. Des aménagements dans la représentation des abaques, des conseils et astuces pourront être prodigués :

- pour les faibles débits (ex : $Q_0 < 25$ l/s), l'abaque de débit initial pourrait être scindé selon des classes de débit afin de permettre une utilisation plus facile ;
- les temps de vidange nécessaire à l'atteinte d'une valeur de débit initial divisée par 2, 5, 10 et 50, peuvent être limités dans le temps à une durée d'été estimée à 3 mois (soient 90 jours d'été estival) afin de rendre les abaques plus opérationnels ;
- la comparaison analytique des temps ainsi que des calculs sur d'autres valeurs de surface ont montré l'existence d'une relation linéaire entre le temps et la surface. Les abaques peuvent donc être utilisés en dehors des surfaces spécifiées (1, 10 et 100 hectares).
- les comportements de tarissement pourront être décomposés afin de rendre les abaques plus lisibles.
- si un cas se rapproche suffisamment de l'abaque, il est possible d'apporter plus de précision en traçant la courbe d'une tourbière entre deux cas d'abaque s'en rapprochant.

14.4.5. *Les tourbières assurent-elles théoriquement un soutien d'été ?*

Les tourbières et réservoirs tourbeux disposent théoriquement d'un potentiel de soutien d'été si des sites présentant des combinaisons de critères favorables existent. Ce potentiel est différent suivant les paramètres.

Les tourbières à faible perméabilité représentent un signal faible mais constant. Cette caractéristique peut être bénéfique pour le soutien d'été dans le cas de tourbières ou des zones humides adjacentes entre elles. La capacité de soutien d'été doit être mise en perspective spatialement car les besoins de soutien d'été diffèrent d'une région à une autre suivant la densité de la population et le type d'activité.

Ce travail montre qu'il est préférable d'avoir des paramètres intermédiaires pour avoir un soutien d'été convenable. En revanche, il est possible de retrouver des configurations favorables avec d'autres combinaisons de paramètres, grâce aux abaques.

La perméabilité est le facteur ayant le plus d'impact. Si elle est faible, la quantité d'eau mobilisable et le débit sont faibles. L'hypothèse de configuration défavorable peut donc être émise en considérant que la situation est généralement défavorable si la perméabilité est faible. La porosité efficace joue aussi un rôle, moins flagrant, dans la stabilisation du processus.

La pluie a une répercussion positive sur la recharge de la tourbière. A contrario, l'ETP a un impact négatif sur la quantité d'eau mobilisable. Combinées, la pluie et l'ETP permettent de régulariser le niveau d'eau de la tourbière.

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux

En revanche, cette étude ne représente que le sommet de l'iceberg. Les efforts peuvent être poursuivis de plusieurs façons :

- en incorporant le paramètre d'évapotranspiration (ETP) pour déterminer son impact en ajoutant des termes de puits (sink term) à des équations qui présentent déjà adéquatement le comportement d'une tourbière ;
- en essayant de déterminer quand et comment réinitialiser le comportement de tarissement dans le cas d'un gain ou perte de niveau en relation avec une recharge ou perte hydrique ;
- en se servant de la modélisation par réservoirs, l'anisotropie pourrait être mieux représentée, permettant ainsi d'évaluer son impact sur le débit à l'exutoire.

15. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

Cette partie présente la synthèse des travaux réalisés dans le cadre du post-doc de Mélanie Bertrand²². Lors de ce post-doc Mélanie a réalisé une étude exploratoire concernant le développement d'indicateurs de potentiel de soutien d'étiage et d'écêtement de crue des zones humides tourbeuses à l'échelle de bassins versants. Son approche a été testée sur de petits bassins versants de la haute-vallée de l'Aude. Pour plus de détails, il est possible de se référer à son rapport de post-doc complet. Des éléments d'informations complémentaires sont aussi disponibles dans les rapports ZHTB phase 2²³ et ZH Aude phase 2²⁴.

15.1. Sites d'études

15.1.1. Sites principaux : bassins Pountarrou et Pinata (Massif du Madres, Haute-vallée de l'Aude)

Les principaux sites d'étude sont situés dans le massif du Madres. Ce massif montagneux, sous influence méditerranéenne, est situé dans la haute vallée de l'Aude (1 600 à 2 469 m). Son bassin versant est d'une superficie d'environ 1 000 ha. Il repose sur un socle granitique dit « pluton de Quérigut ». Sur ce massif, les zones humides, principalement de type soligène/minérotrophe, sont nombreuses. Ces tourbières de pente sont de taille restreinte (<3-4 ha), mais leur surface cumulée est importante. Le bassin du Madres présente une couverture végétale forestière importante qui fait l'objet d'une exploitation. On y retrouve majoritairement des conifères (sapins et épicéas, et l'espèce remarquable le pin à crochets). Les pelouses des crêtes ainsi que les nombreuses clairières, sont utilisées comme estives par des troupeaux d'ovins, de bovins et d'équins.

Pour rappel, la démarche retenue pour étudier les effets de la présence des zones humides sur le soutien d'étiage est de raisonner sur l'effet cumulé de chacune des petites zones humides sur des sous-bassins versants en comparant :

- 1) un sous-bassin instrumenté pourvu de nombreuses zones humides ;
- 2) un sous-bassin témoin où leur présence est plus marginale.

L'instrumentation (piézomètres, station météo, seuils jaugés) vise à caractériser le comportement hydrologique des bassins versants et de leurs zones humides, en termes de stockage et de retard de la transmission du signal de pluie, vers les réseaux hydrographiques et les exutoires tant à l'étiage que lors de forts épisodes pluvieux. Deux couples de petits bassins versants ont été instrumentés : les bassins du Pountarrou et du Pinata (Figure 190).

Les caractéristiques des couples de bassins Pountarrou et Pinata (instrumentés et témoins) sont résumées dans le Tableau 32. Ces sous-bassins versants sont tous de petite taille (surface < 2 km²) et fortement drainés (densité du réseau de drainage > 3 km/km²). Ils sont tous de forme allongée : leurs indices de Gravélius varient 1,92 à 2,82. Ce sont des bassins versants relativement pentus présentant

22. Bertrand M. (2020) Élaboration d'indicateurs synthétiques du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant. Rapport de Post-doc, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, Université de Saint-Etienne-Isthme, Mines Alès, ZABR, AE-RMC, ONF Aude, Département de l'Aude, 61p.

23. Paran F., Pascoletti Y., Graillet D., Dujardin F., Artigue G., Pinel S., Caldarak H., Johannet A., Winiarski T., Cubizolle H., Jolly T., Mazagol P.M., Sacca C., Riquier J., Lavastre V., Chevet J., Cocula C., Ebrard E., Laroque B. (2019) Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau – Mise en œuvre sur les sites de Luitel et Frasné. Rapport phase 2. Zabr, AE-RMC, 183p + annexes.

24. Cocula C., Parmain V., Ebrard E. (2019) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude. Rapport phase 2. ONF, AE-RMC, CD Aude, 91p.

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

des indices de Melton supérieurs à 0,2. Les sous-bassins versants témoins sont allongés et plus pentus que les sous-bassins versant instrumentés.

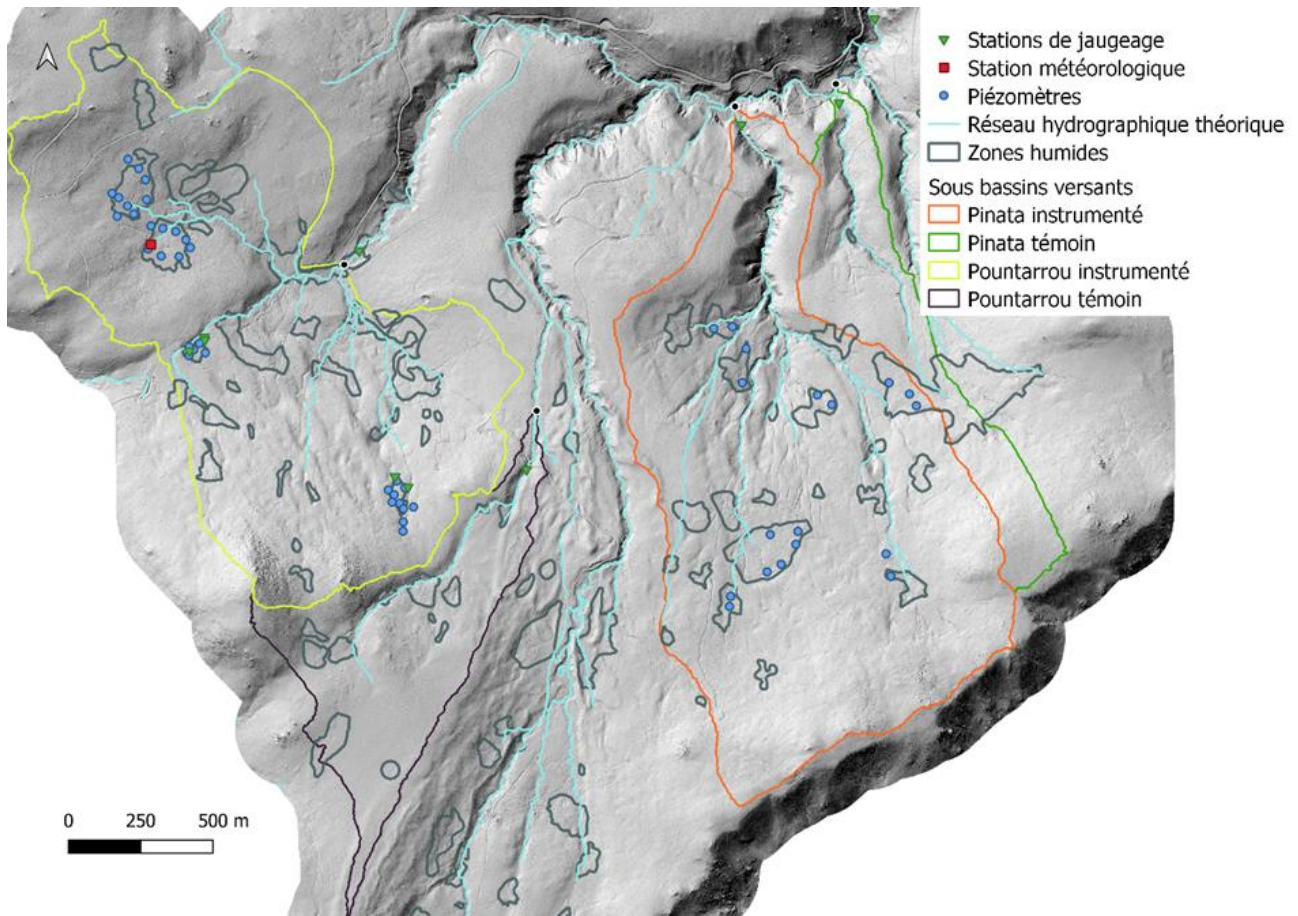


Figure 190 : Dispositif d'instrumentation dans les sous bassins versant du Madres

| | | Surface (km ²) | Densité de ZH (km ² /km ²) | Densité de drainage (km/km ²) | Indice de Gravélius ²⁵ | Indice de Melton ²⁶ |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|--|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Bassin du Pountarrou | Bassin instrumenté | 1,79 | 0,11 | 3,30 | 2,17 | 0,22 |
| | Bassin « témoin » | 0,53 | 0,09 | 3,26 | 2,77 | 0,29 |
| Bassin du Pinata | Bassin instrumenté | 1,82 | 0,13 | 3,87 | 1,92 | 0,33 |
| | Bassin « témoin » | 0,38 | 0,25 | 4,35 | 2,82 | 0,65 |

Tableau 32 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants

25. Indice de compacité de Gravelius (1914) est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. La formule de calcul de l'indice est la suivante (KG : l'indice de compacité de Gravelius ; A : surface du bassin versant [km²] ; P : périmètre du bassin [km] :

$$K_G = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A}}$$

26. Indice de Melton (1965) ou dénivelée spécifique est le ratio entre le dénivelé entre le point le plus haut du bassin versant et l'exutoire du bassin versant par la racine carrée de la surface drainée. Plus il est élevé et plus la « pente » du bassin est élevée.

Après mise à jour de la cartographie des zones humides et de la délimitation des bassins versants à partir des données LiDAR disponibles, les densités de zones humides dans les bassins versants ont été recalculées.

La densité de zones humides dans le bassin versant Pinata témoin s'avère plus élevée que dans le bassin instrumenté. En raison de la mise à jour de la délimitation de ce bassin par l'analyse hydrologique du LiDAR, une grande zone humide pentue est incluse dans la partie haute du bassin versant. Les caractéristiques de cette zone humide semblent être différentes de celles que l'on trouve dans le bassin Pinata instrumenté. Cette grande zone pentue est à cheval entre les sous-bassins versants Pinata instrumenté et témoin. Elle se trouve dans une partie moins pentue du bassin versant Pinata témoin mais sa pente est plus forte dans Pinata témoin que dans Pinata instrumenté. Elle se situe dans une formation à dominante de feuillus, contrairement à la plupart des zones humides de Pinata instrumenté. L'autre zone humide présente dans le bassin de Pinata témoin est de taille restreinte. La distribution relative des formations végétales au sein des sous-bassins versants montre que les proportions de forêts fermées de hêtre pur et de forêts ouvertes de conifère pur sont plus élevées dans le sous-bassin Pinata témoin. Cette caractéristique est à prendre en compte dans l'analyse du rôle hydrologique des sous-bassins versants Pinata instrumenté et témoin.

De la même manière, la densité de zones humides dans Pountarrou témoin semble relativement élevée comparativement à celle de Pountarrou instrumenté (respectivement 0,09 et 0,11). Dans ces sous-bassins versants, la variabilité intra-bassin et inter-bassin en termes de pente, de type de végétation et de taille de zones humides est importante. En effet, les proportions de formations herbacées, landes et forêts ouvertes de conifère pur sont beaucoup plus élevées dans le bassin Pountarrou témoin : respectivement 2% contre 23%, 9% contre 23% et 8% contre 12%. Les zones humides de Pountarrou instrumenté sont également relativement plus grandes que dans Pountarrou témoin.

Pour chaque couple de bassins versants, au-delà de la différence de taille entre le bassin instrumenté et le témoin, la proportion de zones humides dans les bassins témoins est relativement élevée. Les tailles des zones humides de Pinata instrumenté sont relativement plus importantes que dans Pountarrou instrumenté et Pountarrou témoin (et également que dans Pinata témoin si l'on exclut la grande zone humide pentue dans la partie haute de Pinata témoin).

Les bassins témoins diffèrent également de leurs bassins instrumentés d'un point de vue morphométrique. L'indice de Gravélius et de Melton ont été calculés avec la version mise à jour de la délimitation des bassins versants. Ils montrent tous deux que l'énergie gravitaire dans les bassins versants témoins est plus importante (un dénivelé plus important pour de plus petites surfaces de bassins versants et une forme plus allongée que les bassins instrumentés).

Les proportions de forêts ouvertes de conifère pur, de formations herbacées, et de landes sont également très variables entre les bassins instrumentés et témoins et entre les deux couples de bassins versants. Ces différents facteurs ayant un rôle majeur sur les fonctions hydrologiques que l'on cherche à caractériser dans ce projet, il convient donc de prendre en compte l'effet taille et, dans une certaine mesure, les caractéristiques intrinsèques des zones humides dans chaque bassin. À terme, il serait intéressant d'établir une typologie des zones humides du Madres pour différencier leurs effets sur les fonctions hydrologiques de leur bassin versant.

15.1.2. Sites complémentaires : Monts du Forez et Mont Lozère

Deux autres sites d'études instrumentés ont été inclus à cette étude pour comparer les distributions des indicateurs testés sur le bassin du Madres afin de dégager leur capacité à démontrer un potentiel soutien d'étiage ou un rôle sur l'écrêtement des crues. Il s'agit d'une part d'un couple de bassins versants situé dans le Forez : le bassin de Chanteraine qui présente de nombreuses zones humides et le bassin de la Mare où leur présence est plus marginale (Figure 191). Un descriptif détaillé de l'instrumentation mise en œuvre et du contexte géographique de ces bassins versants se trouve dans la thèse de Porteret (2008). Il indique que « le rôle régulateur des tourbières sur les débits, et particulièrement les débits d'étiages, semble validé » grâce au dispositif d'instrumentation et à la modélisation réalisée.

D'autre part, un couple de bassins versants situé sur le Mont Lozère (Figure 192) a également été étudié : le Peschio (grande tourbière des Sagnes en fond de dépression et beaucoup de zones humides)

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

et le Samouse (peu de zones humides). Leur description se trouve dans Martin et Didon-Lescot (2001 et 2007). « La présence de la tourbière des Sagnes produit les effets suivants :

- 1) les crues les plus fortes sont atténuées par laminage ;
- 2) les débits de crue journaliers sont accrus en période de basses eaux ;
- 3) les temps de réponse sont allongés ;
- 4) les écoulements en basses-eaux sont diminués, ce qui indique que la tourbière des Sagnes n'est pas un facteur favorable au soutien des débits d'étiage » (Martin et Didon-Lescot, 2007).

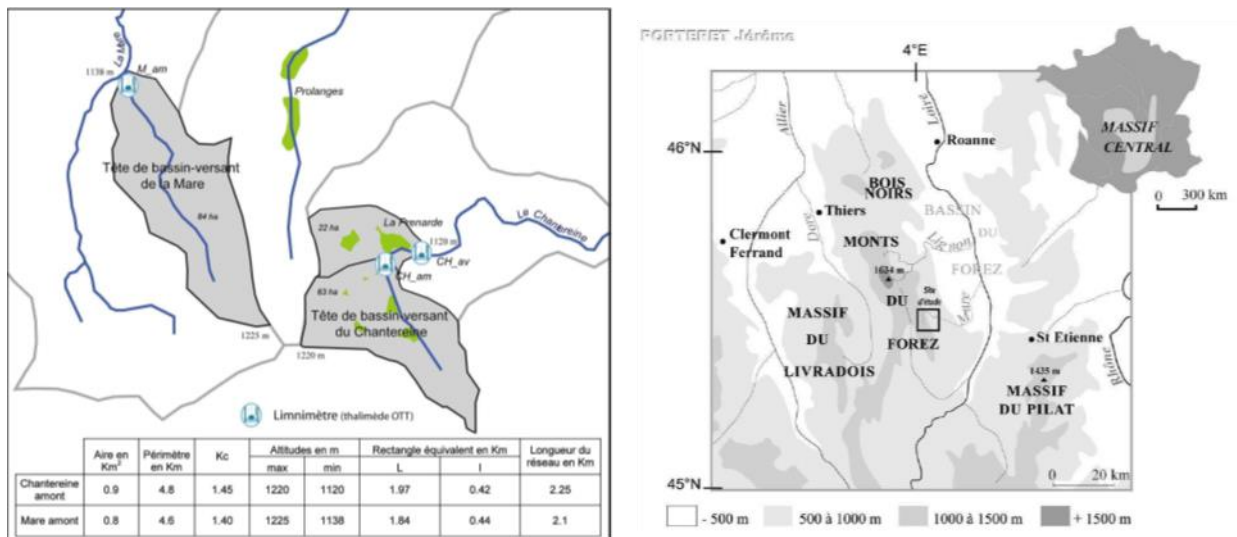


Figure 191 : Bassins versants du Chantereine (nombreuses zones humides) et de la Mare dans le massif du Forez (d'après Porteret 2008 et Porteret 2005)

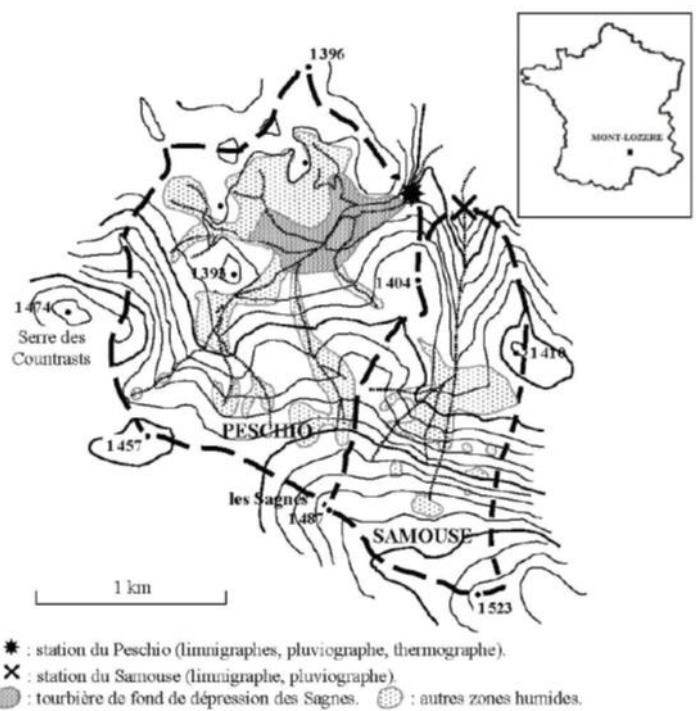


Figure 192 : Bassins versants du Peschio (nombreuses zones humides) et du Samouse sur le Mont Lozère (d'après Martin et Didon-Lescot, 2007)

15.2. Facteurs de contrôle et données disponibles

15.2.1. Facteurs de contrôle du potentiel soutien d'été

Une revue bibliographique a permis de lister les différentes fonctions hydrologiques des zones humides, en particulier celle de soutien lors des étés. Les différents facteurs de contrôle du potentiel de soutien d'été ont ensuite été mis en lien et organisés de manière à faire ressortir des thématiques. On peut partager en deux catégories principales les facteurs de contrôle du soutien d'été des zones humides (Figure 193) :

- 1) les apports au sein desquels se retrouvent tous les facteurs qui permettent de caractériser la disponibilité en eau dans le bassin versant en amont de la zone humide, et dans la zone humide, et les facteurs qui vont caractériser la capacité de stockage d'eau de la zone humide et qui dépendent plutôt des propriétés intrinsèques de la zone humide ;
- 2) les contributions ou capacité de transfert vers les réseaux hydrographiques ou les interactions avec les eaux souterraines dans la zone humide.

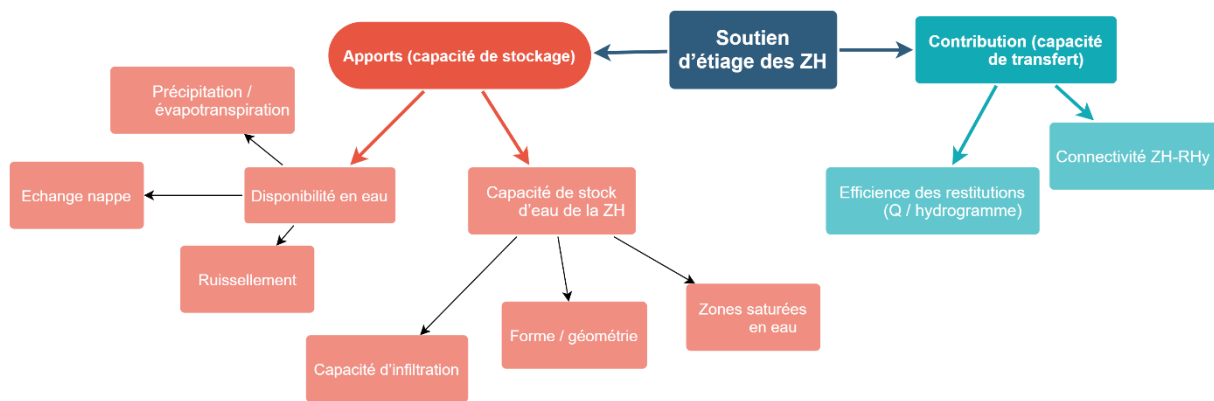


Figure 193 : Facteurs de contrôle du soutien d'été

La disponibilité en eau dans la zone humide dépend directement des apports qui peuvent être liés aux précipitations (directement ou indirectement dans le bassin versant), aux échanges avec une nappe d'eau souterraine, ou avec un cours d'eau (dans le cas des zones humides riveraines), et de l'intensité de l'évapotranspiration. La conjonction d'un volume de précipitations élevé (Larocque et al., 2016), d'une faible capacité d'infiltration du bassin versant (et de la zone humide) et d'une faible évapotranspiration, conduit à une concentration des écoulements en surface et à des apports plus importants.

La capacité d'infiltration dépend de la topographie - contributions du processus de ruissellement (Holden 2006) -, de la géologie, et de la nature et de la densité du couvert végétal (Gayet et al., 2016).

De nombreuses études se sont attachées à produire des cartographies prédictives des sols hydromorphes (Chaplot et al., 2000 ; Chaplot et al., 2003 ; Merot et al., 2003 ; Hjerdt et al., 2004 ; Chaplot et Walter, 2006 ; Curie et al., 2007 ; Hogg et Todd, 2007 ; Grabs et al., 2009 ; Bourget et Le Dû-Blayo, 2010 ; Lacoste et al., 2011 ; Lemerrier et al., 2013 ; Laroche et al., 2013, parmi d'autres).

L'extension potentielle des zones saturées en eau est établie à partir de l'analyse de :

- 1) la topographie ;
- 2) la pédologie, la nature du matériau parental, la géologie sous-jacente ;
- 3) des mesures géophysiques ;
- 4) l'hydrologie ;
- 5) des variables paysagères ou d'occupation du sol ;
- 6) des indices climatiques ;
- 7) la localisation des fonds de vallées (zones humides alluviales).

15.2.1.1. Indices topographiques

Parmi les indices topographiques, l'indice d'humidité des sols de Beven Kirkby (1979) a été l'un des plus couramment utilisés pour prédire l'occurrence spatiale de zones saturées en eau. Celui-ci est calculé à partir de la pente locale et de la surface drainée spécifique. Thompson et Moore (1996) ont démontré que l'utilisation de l'indice d'humidité des sols pour prédire le niveau local de la nappe est plus efficace qu'une analyse discriminante multiple intégrant la pente locale, l'aire drainée et la courbure de surface comme prédicteurs individuels.

Une comparaison de l'indice topographique avec des mesures d'humidité des sols a permis de montrer que la prédiction des sols saturés est améliorée par l'intégration de la pente le long du gradient hydraulique aval entre le point d'intérêt²⁷ et le cours d'eau (Hjerdt et al., 2004). Cependant, le patron local des sols saturés en eau n'est valable à l'échelle locale que lors de périodes humides. Crave et Gascuel-Odoux (1997), Ali et al., (2013) ainsi que Kirkby et al. (1995) ont intégré la pluie annuelle dans cet indicateur (*climato-topo index*) afin d'en améliorer les performances : en effet, l'indice *climato-topo index* est corrélé à la recharge de nappe (Barnaud et Fustec, 2007) et permet de mettre en évidence une saisonnalité de la recharge.

Infascelli et al. (2003) ont suggéré l'intégration du rang de Strahler du bassin versant considéré (*ordinated climato-topo index*), afin de calculer la probabilité d'occurrence de sols saturés, dépendante du volume des précipitations, de la connectivité et des interactions entre le cours d'eau et les zones humides riveraines. Pour le calcul de l'aire drainée amont, un algorithme approprié de calcul de l'accumulation des flux est essentiel pour améliorer les performances de la prédiction du patron des zones saturées en eau (Guntner et al., 2004). Une comparaison des algorithmes a été réalisée par Lang et al. (2013) pour prédire les zones humides forestières. O'Neil et al. (2019) discutent également de l'impact de la résolution des données pour la cartographie des zones humides à partir d'indices topographiques. Une des limites identifiées de l'usage des indices de type *Topo Wetness index* est de ne pas détecter les zones saturées en eau qui se forment en dehors des dépressions (Rampi et al., 2014).

Les indices topographiques renseignent sur l'occurrence spatiale, l'étendue des zones humides et la durée de la connectivité hydrologique de surface/subsurface entre les versants et les écoulements (Zuecco et al., 2019). En effet, la topographie joue un rôle direct sur la vitesse de circulation de l'eau en surface : la probabilité d'avoir un sol hydromorphe augmente avec l'augmentation de l'aire contributrice et diminue avec l'augmentation de la pente locale (Merot et al., 1995) car, dans la zone humide, une pente locale faible induit un drainage latéral plus limité (Merot et al., 1995).

Les caractéristiques topographiques de l'exutoire de la zone humide jouent également un rôle sur le stockage, pouvant agir comme facteur limitant du débit sortant (Gayet et al., 2016). Les facteurs topographiques permettent également de définir et caractériser le patron du réseau de drainage - par l'analyse des chemins d'écoulement de surface et souterrains - et la distribution spatiale des zones humides, permettant ainsi de caractériser la connectivité hydrologique entre les zones humides et les réseaux hydrographiques.

La position dans le bassin versant de la zone humide est un facteur important puis qu'elle peut influencer les sources (flux de surface, souterrains ou précipitations) et les quantités d'eau stockées (Branton et Robinson, 2020). Si le débit de base ne semble pas être influencé par la position des zones humides dans le bassin versant, Ameli et Creed (2019), Fossey et al. (2016) indiquent que plus les zones humides isolées sont situées en amont, plus les effets sur les étiages et les crues sont grands.

15.2.1.2. Couvert végétal et occupation des sols

La nature et la densité du couvert végétal jouent également un rôle majeur sur les écoulements : une rugosité élevée diminue la vitesse des écoulements dans la zone humide (Holden et al., 2008) et favorise l'infiltration et le stockage. Le mode d'occupation des sols dans le bassin versant (combiné aux facteurs topographiques de pente et d'orientation) a une influence sur l'évapotranspiration et donc directement sur les apports en eau. Porteret (2008) indique que la présence de tourbières tend à augmenter le

27. Le pixel qui prendra la valeur de l'indice qui intègre la pente aval à ce pixel, calculée entre le pixel et le cours d'eau.

processus d'évapotranspiration. La ripisylve joue également un rôle sur la connectivité de surface et de subsurface des zones humides riveraines. Zuecco et al. (2019) ont montré que les zones humides les plus proches des cours d'eau en zone riveraine ou pied de versant sont connectés plus longtemps : plus la distance au cours d'eau est importante, plus la fonction de soutien d'étiage sera efficace (Barnaud et Fustec, 2007). Zuecco et al. (2019) ont aussi démontré que pour les petits bassins versant (<1 ha) avec peu ou pas de ripisylve, l'indice d'humidité des sols et les caractéristiques topographiques de l'aire en amont sont les facteurs les plus importants affectant la connectivité de subsurface.

15.2.1.3. Géométrie et propriétés hydrodynamiques

La nature, l'épaisseur et la perméabilité des sols permettent de caractériser les capacités d'infiltration dans le bassin versant (Porteret, 2008). Ces caractéristiques jouent donc un rôle important pour déterminer les apports en eau à l'échelle du bassin versant : des sols perméables permettent l'infiltration dans les eaux souterraines alors que les sols imperméables conduisent à des écoulements de surface (Leibovitz et al., 2018). Les caractéristiques des sols permettent la mise en évidence de l'occurrence spatiale des zones humides (en lien avec les facteurs de topographie et d'occupation du sol) et renseignent sur leur capacité de stockage. Porteret (2008) souligne l'importance de la superficie et du volume de l'acrotelme.

La taille des zones humides est donc un facteur clé pour caractériser le rôle de soutien d'étiage. Leur nombre ou la superficie relative qu'elles occupent dans le bassin versant et leur connectivité sont également des facteurs importants à prendre en considération. McLaughlin et al. (2014) ont montré qu'à surface égale, des zones humides plus petites augmentent la capacité d'effet tampon de la nappe et du débit de base par rapport à des zones humides plus grandes et moins nombreuses. Une forte densité du maillage de zones humides favorise l'interception des écoulements permettant un stockage plus important.

En période d'étiage, les zones humides de tête de bassin versant alimentés par les nappes ne peuvent se connecter entre elles (comme lors d'événements de pluie de forte intensité). Elles ont la capacité de stocker l'eau localement et tendent à répondre sur une période plus longue lors de périodes humides et sèches (Acreman et Holden, 2013).

15.2.1.4. Autres facteurs

Une dimension importante à prendre en compte dans la caractérisation du soutien d'étiage par les zones humides est l'impact des activités humaines qui peut avoir un rôle majeur sur les écoulements au sein des zones humides. La présence de barrages, de digues, et de prélèvements (irrigation et transferts notamment), impacte directement le rôle de stockage des zones humides (Gayet et al., 2016). Il en va de même pour le drainage et l'incision des petits cours d'eau dans les zones humides (Cowley et al., 2018).

De nombreuses études ont utilisé la télédétection pour caractériser l'occurrence spatiale (étendue) et la persistance temporelle de zones humides dont l'eau est visible en surface (Weise et al., 2012 ; Guo et al., 2017 ; Kaplan et al., 2017 et 2018 et 2019 ; Whyte et al., 2018 ; Lefebvre et al., 2019, parmi d'autres). Ces études utilisent les images satellites de type *Sentinel* avec des indices topographiques de type indice d'humidité des sols pour prédire les superficies de zones humides et le taux de changement de leur proportion dans le bassin versant. Ce type de technique n'est cependant applicable qu'à des zones humides de tailles suffisantes pour être *télédéteectées*, et qui présentent de l'eau en surface.

Le rôle des zones humides en période d'étiage n'est pas clairement établi : 2/3 des études décortiquées dans Bullock et Acreman (2003) concluent que les zones humides sont associées à une réduction des écoulements (débits) pendant la saison sèche dans une large gamme de contextes physiographiques, mais également tout au long de l'année. En effet, dans un même bassin versant, les taux d'évapotranspiration sont plus élevés dans les zones humides qu'en dehors, ce qui impacte directement le stock d'eau disponible (Porteret 2008).

Vis-à-vis de l'effet sur les crues, 41% des études de la synthèse bibliographique sur les zones humides de tête de bassin versant de Bullock et Acreman (2003) montrent une augmentation des crues en lien avec la présence de zones humides. Cependant, Acreman et Holden (2013) indiquent que le type de zone humide pourrait avoir un effet d'atténuation des crues dans certains cas d'études. Ceci est confirmé dans Wood et VanHalsema (2008) et Böhme et al. (2016) qui indiquent que les zones humides

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

de fond de vallée présentent un effet tampon contre les événements de crue extrême ou d'étiage. Dès lors que les phénomènes de crues deviennent majeurs, le bassin versant se sature et la magnitude de la crue est alors davantage contrôlée par la pluie, qu'il y ait des zones humides ou non dans le bassin versant (Acreman et Holden, 2013).

L'utilisation de typologies de zones humides pour l'étude du potentiel de soutien d'étiage ou d'atténuation de crue, fondées sur les caractéristiques hydromorphologiques et les mécanismes d'apport en eau semble nécessaire pour répondre à ces questions sur le rôle hydrologique des zones humides, à l'échelle du site comme à l'échelle du bassin versant. La question de la taille de l'hydrosystème considéré pour évaluer le soutien d'étiage est aussi primordiale.

15.2.2. *Données disponibles*

Pour chacun des facteurs ayant une influence sur le soutien d'étiage à l'échelle du site ou du bassin versant, les données nécessaires au calcul des indicateurs correspondant ont été collectées. Celles-ci sont synthétisées et analysées selon un critère de faisabilité/pertinence qui renseigne sur la possibilité de mettre en œuvre l'indicateur dans le secteur d'étude (en lien avec la disponibilité des données) et identifie les points de vigilance sur les incertitudes de calcul (Annexe 8) :

- 1) indicateurs qu'il est possible de calculer sur le bassin du Madres ;
- 2) indicateurs pour lesquels, tels qu'ils sont utilisés dans la littérature, ne pourront pas être calculés sans modification, c'est-à-dire en utilisant des proxys, ou à des échelles spatiales plus grossières, ou encore pour lesquels la fiabilité de l'indicateur sera plus faible en raison d'une faible profondeur temporelle ;
- 3) indicateurs pour lesquels la donnée est disponible à des échelles spatiales trop grossières pour capturer la variabilité entre les sous-bassins étudiés, voire complètement manquante, ou encore dont la pertinence a été jugée insuffisante, après discussion entre les différents partenaires du projet.

15.3. **Méthode**

15.3.1. *Prétraitements des données*

Le zonage des zones humides a été modifié manuellement par photo-interprétation des orthophotos, à 20 cm en couleur et infrarouge, qui permettent de distinguer la végétation ayant une forte activité chlorophyllienne et la présence d'humidité en surface. Le MNT produit à partir des données LiDAR a été prétraité pour combler les absences de données et corriger hydrologiquement les écoulements.

15.3.2. *Indicateurs retenus*

La liste des indicateurs retenus sur les sous-bassins versants du Madres est présentée dans le Tableau 33, avec un descriptif de leur influence sur le potentiel de soutien d'étiage des zones humides.

En raison de la faible profondeur temporelle des données hydrologiques, et de la résolution grossière des cartes géologiques, pédologiques et d'occupation du sol, seuls des indicateurs topographiques ont été implémentés sur les sous-bassins versant du Pountarrou et du Pinata. L'étude de la signature spectrale des zones humides et de leur bassin versant est mise en œuvre en complément, pour caractériser les états de surface et de la végétation.

15.3.3. *Extraction des indicateurs*

La méthodologie mise en œuvre pour extraire les indicateurs sur l'ensemble du bassin du Madres s'appuie sur des références bibliographiques, pour le choix des algorithmes visant à définir les directions des écoulements et le réseau hydrographique. Ici les directions des écoulements ont été définies par l'algorithme « *Multiple Triangular Flow Direction* » (Seibert et McGlynn, 2007) et le réseau hydrographique théorique a été extrait par la fonction « *r.stream.extract* » du logiciel GRASS.

Le seuil de surface drainée au-delà duquel le réseau est initié a été choisi à 5 ha (surface drainée issue du calcul des accumulations des flux par l'algorithme *Multiple Triangular Flow Direction*) car celui-ci correspond empiriquement à ce qui est observable sur les orthophotographies.

| Indicateur | Influence sur le potentiel de soutien d'étiage des ZH |
|--|---|
| Zonage des ZH | Présence/absence de ZH dans les sous-BV du Madres. |
| Nombre de ZH dans le bassin versant | Présence/absence de ZH dans les sous-BV du Madres ; test de l'influence sur le potentiel de SE. |
| Densité de ZH : surface ZH / surface BV | La densité augmente avec le potentiel de SE. |
| Localisation des ZH sur le BV : Distance aux crêtes / distance à l'exutoire du BV | Plus distance aux crêtes faible et distance à l'exutoire du sous-BV grande, plus la capacité de SE est élevée. |
| Distance entre les ZH | Plus distance entre les ZH est faible, plus elles ont la capacité de se connecter entre elles lors des crues et de se déconnecter pour soutenir plus durablement les débits au moment de l'étiage. |
| Côte de l'exutoire (échelle de la ZH) | Influence les débits en sortie de la ZH, ralentissement des écoulements dans la ZH, permet un temps de séjour plus important. Cet indicateur ne peut être calculé pour toutes les ZH en raison du manque d'inventaire exhaustif. |
| Pente locale et pente aval | En amont ZH si pente (locale ou aval) forte, écoulements vont se concentrer, d'où alimentation en eau plus forte. Une pente locale faible dans le BV est un marqueur de la présence potentielle de ZH. La pente (locale ou aval) dans la ZH est utilisée comme un proxy du gradient hydraulique des eaux souterraines. Plus elle est faible, plus elle permet un temps de séjour important. À l'exutoire de la ZH, si la pente aval est très forte, la vidange de la zone humide sera plus importante donc son rôle de stockage et de SE différé lors de l'étiage moins important. |
| Distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | Plus elle est importante plus la fonction de SE sera efficace. |
| Distance verticale à l'écoulement aval le plus proche | Plus elle est importante plus la fonction de SE sera efficace. Pour les ZH riveraines, une faible distance verticale permet une plus grande connectivité donc une recharge plus importante lors des crues. |
| Distance verticale / distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | Plus la distance verticale augmente plus ce ratio augmente (présence de replat ou de terrasses alluviales). Plus la distance le long de la pente à l'écoulement aval diminue plus ce ratio augmente (zone riveraine ou pied de versant adjacent très pentu). Plus les deux indicateurs augmentent plus le ratio augmente (terrasses dans un fond de vallée très large ou replat dans la partie haute du BV) Plus les deux indicateurs diminuent plus le ratio augmente (fond de vallée peu large et très plat) |
| Indice de rugosité | S'il est élevé, les différences d'altitudes dans un voisinage proche sont plus fortes et peuvent être un marqueur de la présence d'un fossé, d'une tranchée de drainage, qui ont tendance à réduire l'efficacité du SE. |
| Courbures longitudinales / transversales | Les valeurs négatives montrent une convergence et une accélération des écoulements. |
| Indice de convergence topographique | Les valeurs négatives montrent une convergence des écoulements. |
| Indice d'humidité des sols et ses dérivés | Plus il est élevé, plus le potentiel de saturation est élevé. |
| Surface drainée spécifique | Donne une idée de la concentration des flux. Elle est utilisée pour calculer la saturation et l'excès de saturation des écoulements de surface. Plus elle est élevée plus la diffusion est importante. |
| Forme du bassin versant | Joue sur la rapidité de la réponse hydrologique. |
| Présence de végétation arborée | Rugosité de la végétation dans le sous BV et dans les ZH. Rôle sur la vitesse des écoulements. |
| Signature spectrale ZH (RVB, IR, NDVI) | Présence d'eau en surface/subsurface. |

Tableau 33 : Liste des indicateurs pour le calcul du potentiel de soutien d'étiage des zones humides (ZH : zone humide ; BV : bassin versant ; SE : soutien d'étiage) à tester à l'échelle du bassin versant

Le nuage de points LiDAR et les orthophotos (infrarouge et couleur) ont été traités par différents géotraitements, présentés sur le diagramme Figure 194, pour aboutir aux indicateurs topographiques et hydrologiques. La Figure 195 illustre le mode de calcul des différents indicateurs topographiques.

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

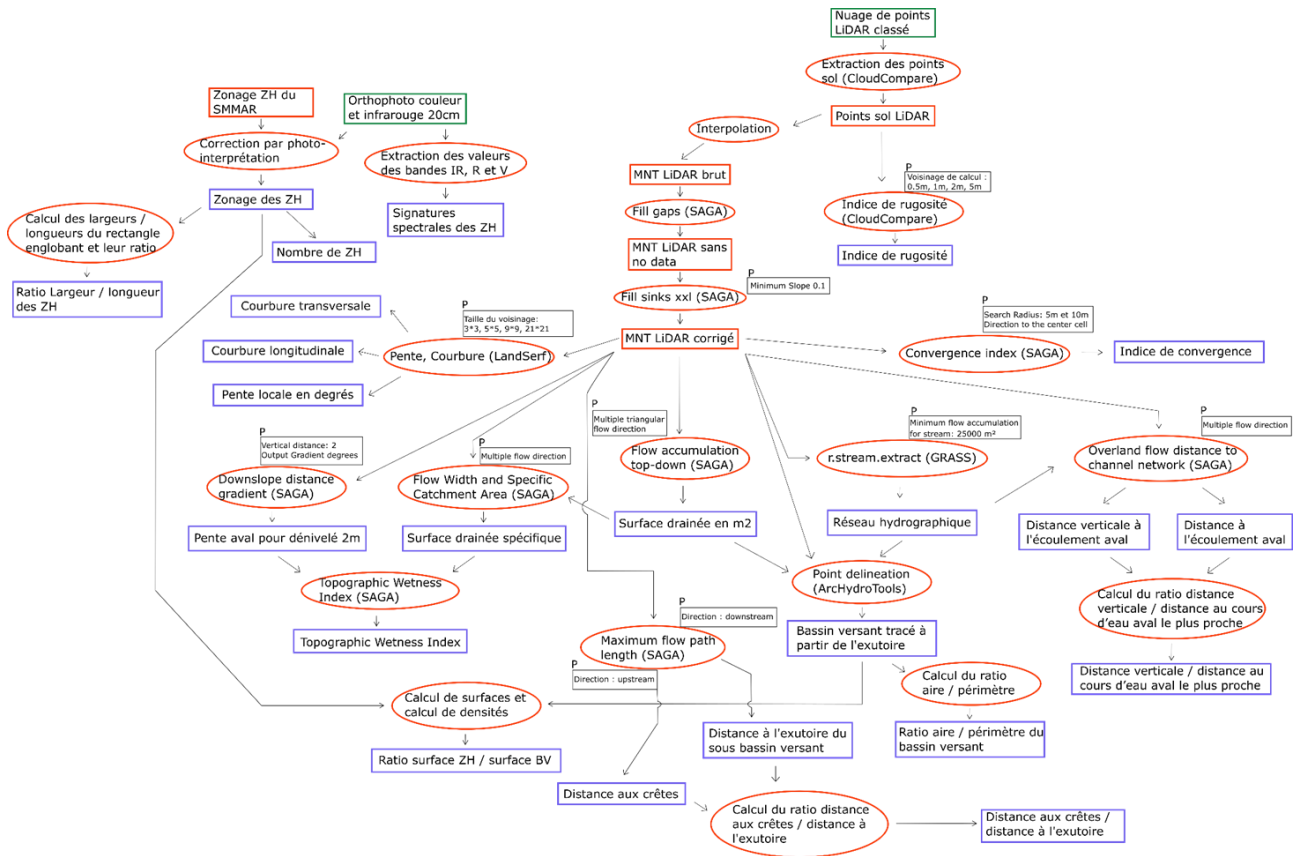


Figure 194 : Géotraitements appliqués pour la production des indicateurs

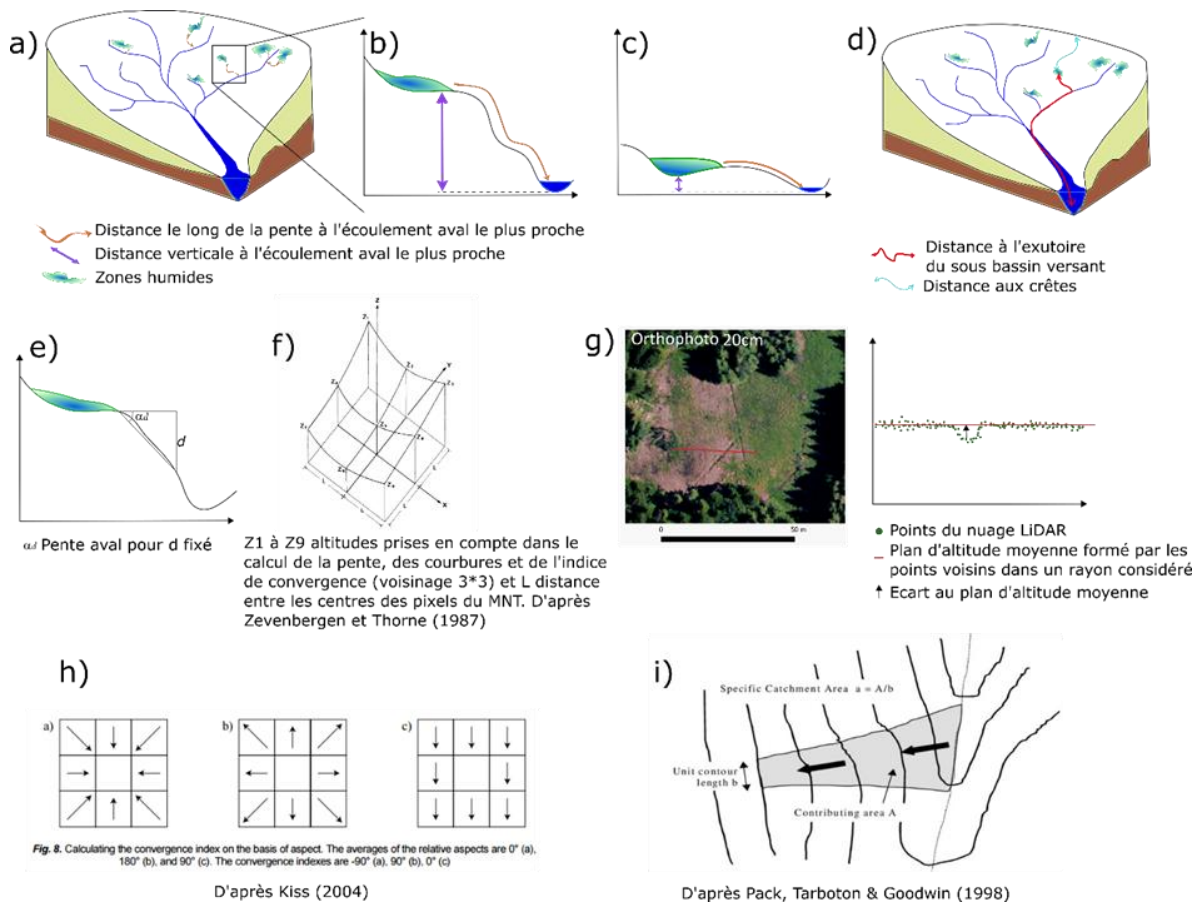


Figure 195 : Schéma d'illustration des indicateurs topographiques calculés

Calcul des indicateurs topographiques (Figure 195) :

- *pente locale et courbures* : plusieurs voisinages de calcul ont été testés (logiciel Landserf, intègre la variabilité du relief sur des fenêtres de taille variable). La Figure 195 f montre les altitudes prises en compte dans un voisinage 3*3 pixels pour le calcul de la pente locale, des courbures et de l'indice de convergence du pixel central de cette fenêtre 3*3 ;
- *pente aval* calculée pour un dénivelé de 2 m et de 10 m (Figure 195 e) ;
- *indice de rugosité* calculé à partir du nuage de points LiDAR (voisinage 0,5, 1 et 2 m (Figure 195 g) ;
- *distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche* (Figure 195 a, b, c) ; *distance verticale à l'écoulement aval le plus proche* (Figure 195 b, c) ; *ratio entre les deux* (distance verticale/distance le long de la pente) calculés en chaque point par rapport au réseau hydrographique théorique (initié à partir d'un seuil de surface drainée de 5 ha).
- *indices de courbure et de convergence* (Figure 195 h) : positifs si les écoulements divergent et négatifs s'ils convergent ;
- *position dans le bassin versant* : caractérisée par le ratio entre la distance le long de la pente aux lignes de crêtes sur la distance l'exutoire (Figure 195 d).
- *indice d'humidité des sols* : le ratio entre la surface drainée spécifique et la pente aval (Figure 195 i). Plus il est élevé, plus les sols sont potentiellement saturés en eau.

15.3.4. Analyses statistiques

Afin de pouvoir comparer, pour chaque indicateur, les signatures des bassins versants instrumentés et témoins, sans biais liés à leurs caractéristiques topographiques, hydrologiques, et d'occupation du sol (en lien avec la densité du couvert végétal arboré) et les signatures de ces indicateurs dans les zones humides et en dehors, un échantillonnage stratifié a été réalisé. Il prend en compte :

- 1) la présence/absence de zones humides (2 classes) ;
- 2) la pente locale en degrés dans un voisinage de 3*3 pixels reclassée selon les valeurs de quantiles (0,25, 0,5, 0,75 arrondies au degré supérieur) des pentes calculées dans les zones humides (3 classes dont les seuils sont : <8, 8-14, >=14) ;
- 3) la présence/absence de végétation arborée issues de classification du nuage de points LiDAR (2 classes). Pour chaque combinaison des 2*3*2 classes (=12 classes) 100 points ont été échantillonnés. Une comparaison avec l'ensemble des pixels du bassin versant est aussi réalisée.

Le choix a été fait dans un premier temps de travailler sur le couple de sous bassins-versants de Pountarrou pour lesquels des données hydrologiques sont disponibles.

Les premiers résultats de l'analyse hydrologique des stations de jaugeage, du pluviomètre et des piézomètres indiquent que le sous-bassin versant Pountarrou instrumenté (où la présence de zones humides est plus importante) pourrait jouer un rôle de stockage plus important que sur le sous-bassin versant Pountarrou témoin.

Il pourrait d'autre part exister pour le Pountarrou un effet d'écrêtage des crues plus important sur le bassin instrumenté que sur Pountarrou témoin. Les potentiels effets de soutien d'étiage n'ont à ce jour pas encore pu être démontrés en raison du faible recul sur les données de l'instrumentation (environ 1 an avec des dysfonctionnements et une année hydrologique particulière). L'étude de la signature des deux sous-bassins versants de Pountarrou sera effectuée par l'analyse des distributions des indicateurs dans l'échantillon stratifié et des tests statistiques de Wilcoxon afin de vérifier si les moyennes dans chaque sous-bassin sont significativement différentes. Dans ce cas, ceci pourrait indiquer que les deux sous-bassins ont bien une signature distincte qui pourrait témoigner d'un rôle hydrologique différent, lequel sera à approfondir à partir des données hydrologiques lorsque la profondeur temporelle des données le permettra.

Malgré l'absence d'analyse hydrologique à ce jour sur le couple de bassins du Pinata (dysfonctionnements de l'instrumentation), les visites de terrain réalisées lors des comités techniques ont permis de mettre en évidence un rôle de stockage potentiellement plus important dans le bassin instrumenté (présence de nombreuses zones humides fortement connectées entre elles). Dans l'éventualité que ce rôle de stockage soit confirmé par des analyses hydrologiques (lorsque les

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

chroniques de données issues de l'instrumentation le permettront) les mêmes analyses statistiques que sur Pountarrou ont été conduites sur ce couple de bassins. Un échantillonnage stratifié avec les mêmes valeurs seuils pour la pente a donc été mis en œuvre.

Les tests statistiques ont ensuite été appliqués sur les indicateurs extraits sur l'ensemble des pixels des sous bassins-versants. Ici, l'idée est de comparer les distributions des indicateurs issues de l'échantillonnage et celles issues de l'ensemble du bassin versant afin de vérifier qu'il n'existe pas de biais statistique.

L'extraction des indicateurs à partir d'autres sources de données, le RGE IGN © (à 1 m et à 5 m) a également été réalisée et les distributions ont été comparées entre les couples des sous bassins-versants de Pountarrou et de Pinata. L'objectif ici est de savoir si les indicateurs identifiés comme montrant une distribution significativement différente entre les sous-bassins instrumentés (avec un nombre de zones humides plus important) pourraient être également significatifs à une résolution plus grossière. En effet, les RGE IGN © sont aujourd'hui disponibles pratiquement sur la France entière, et une extraction sur d'autres secteurs d'études où des données LiDAR ne seraient pas disponibles pourrait ainsi être envisagée.

Une comparaison des moyennes a également été effectuée entre d'autres couples de sous bassins-versants (sur les indicateurs produits à partir des données du RGE IGN © à 5 m) afin de vérifier l'effet de la présence (plus importante) de zones humides sur le rôle hydrologique de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues.

Deux autres couples de bassins versants ont été étudiés : le Chantereine (présence importante de zones humides) et la Mare dans les Monts Forez, et le Peschio (présence d'une grande tourbière de fond de dépression) et le Samouse sur le Mont Lozère.

Enfin, les signatures spectrales des zones humides et en dehors des zones humides ont été comparées avec les mêmes indicateurs sur l'échantillonnage stratifié dans les deux couples de bassins Pountarrou et Pinata.

15.3.5. Prédiction du rôle hydrologique d'un bassin versant

Après avoir testé la significativité des différents indicateurs, une modélisation prédictive du rôle hydrologique des bassins versants a été développée. Pour chacun des pixels des sous-bassins versants des couples Pountarrou, Pinata, Mont du Forez et Mont Lozère (8 sous-bassins), les indicateurs ont été intégrés à un modèle de type « *random forest* » pour discriminer la réponse du bassin versant.

Les hypothèses testées sont les suivantes :

- h_1 : joue un rôle de soutien d'étiage/d'écrêtage de crues ;
- h_0 : non (ne joue aucun rôle de soutien d'étiage/d'écrêtage de crues).

L'apprentissage du modèle est réalisé simultanément sur plusieurs arbres de décision, construits aléatoirement (variables sélectionnées aléatoirement à chaque niveau de l'arbre, c'est-à-dire à chaque nœud) et sur des sous-ensembles d'individus tirés aléatoirement. Le modèle a été initialisé avec deux variables tirées aléatoirement à chaque nœud et 500 arbres ont été créés.

La classe prédite pour chaque pixel sera celle qui aura été identifiée le plus grand nombre de fois dans les arbres ou le pixel n'a pas été sélectionné pour entraîner le modèle (« out of bag »). Le taux d'erreur sur les pixels « out of bag » est exprimé pour l'ensemble des arbres. La capacité prédictive de ce modèle est évaluée à partir des indicateurs de sensibilité, de spécificité²⁸ et « *overall accuracy* »²⁹ à partir d'une

28. La sensibilité indique la capacité à prédire que le bassin versant présente un potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues lorsque celui-ci est avéré (notamment par les données hydrologiques de terrain) et la spécificité indique la capacité à prédire que le bassin versant ne présente pas de potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues pour des bassins versants pour lesquels ce potentiel n'est pas avéré.

29. Proportion de bassins bien classés dans la population totale (ceux pour lesquels on sait qu'il existe un potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues, et ceux dont on sait qu'ils ne présentent pas ce potentiel, sont bien prédits par le modèle).

matrice de confusion. L'importance relative des variables (i.e. des indicateurs topographiques) dans la classification est évaluée à partir de la diminution moyenne de l'impureté³⁰ qu'elles permettent.

« Pour chaque arbre, la diminution totale de l'impureté liée à une variable correspond à la diminution de l'impureté cumulée sur l'ensemble des nœuds qu'elle régit. Cette diminution est ensuite moyennée sur l'ensemble des arbres » (Vaudor, 2015) et est calculée par l'indice de Gini.

30. Mesure avec quelle fréquence un individu serait mal classé si sa classe était choisie aléatoirement selon la distribution des classes dans le sous-ensemble. L'indice de diversité de Gini peut être calculé en sommant la probabilité pour chaque élément d'être choisi, multipliée par la probabilité qu'il soit mal classé.

15.4. Résultats

Cette partie présente les résultats de manière synthétique notamment pour les sous-parties 15.4.1. *Analyse à l'échelle des bassins versants*, 15.4.2. *Analyse des indicateurs au regard de la présence/absence de zones humides dans les bassins versants* et 15.4.3. *Signatures spectrales des zones humides*.

Pour plus de détails, il est conseillé de se référer au rapport de Post-Doc de Mélanie Bertrand³¹.

15.4.1. Analyse à l'échelle des bassins versants

| Indicateurs | Source de données | Pountarrou (Instrumenté vs témoin) | | Pinata (instrumenté et témoin) | | Monts du Forez (Chantereine et Mare) | Mont Lozère (Peschio et Samouse) |
|--|-------------------|---------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|---|-------------------------------------|
| | | Éch. stratifié | Tout pixel | Éch. stratifié | Tout pixel | | |
| Distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | > | > | < | > | | |
| | RGE 1m | > | > | < | > | | |
| | RGE 5m | > | > | < | > | > | > |
| Distance verticale à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | < | < | > | > | | |
| | RGE 1m | > | > | < | > | | |
| | RGE 5m | > | > | < | > | > | < |
| Distance verticale / Distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | < | < | > | < | | |
| | RGE 1m | > | > | < | < | | |
| | RGE 5m | > | > | < | < | > | < |
| Indice d'humidité des sols | LiDAR | 0 | > | 0 | > | | |
| | RGE 1m | > | > | < | < | | |
| | RGE 5m | > | < | > | > | > | > |
| Distance aux crêtes / distance à l'exutoire du bassin versant | LiDAR | > | > | < | < | | |
| | RGE 1m | < | > | < | < | | |
| | RGE 5m | > | > | < | < | > | < |
| Indice de convergence 10m | LiDAR | > | < | < | < | | |
| | RGE 1m | > | < | 0 | < | | |
| | RGE 5m | > | < | 0 | > | < | < |
| Pente aval (d=2m) | LiDAR | > | > | < | < | | |
| | RGE 1m | > | > | < | < | | |
| | RGE 5m | > | > | < | < | > | < |

Tableau 34 : Synthèse des indicateurs significatifs entre les bassins présentant beaucoup de zones humides et ceux présentant peu de zones humides. Les cases bleues avec le signe > indiquent que la valeur médiane du bassin présentant beaucoup de zones humides est plus élevée que celle du bassin présentant peu de zones humides, et inversement dans les cases oranges avec le signe <. 0 indique que la différence n'est pas significative. Les cases en gris indiquent que les tests n'ont pas été réalisés en raison du manque de données disponibles.

Les indicateurs montrant des différences significatives (p -value $\ll 0,05$) de distribution, calculés sur l'échantillon stratifié (sur le couple de sous-bassins de Pountarrou et de Pinata) et sur l'ensemble des pixels (tous les couples de bassins), entre les bassins présentant beaucoup de zones humides et ceux présentant peu de zones humides, sont présentés dans le Tableau 34.

31. Bertrand M. (2020) Élaboration d'indicateurs synthétiques du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant. Rapport de Post-doc, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, Université de Saint-Etienne-Isthme, Mines Alès, ZABR, AE-RMC, ONF Aude, Département de l'Aude, 61p.

15.4.2. Analyse des indicateurs au regard de la présence/absence de zones humides dans les bassins versants

Les indicateurs ont également été comparés pour les couples de bassins Pountarrou et Pinata instrumentés et témoins dans les zones humides et en dehors des zones humides, sur les échantillons stratifiés (Tableau 35).

| Indicateurs | Source de données | Pountarrou instrumenté ZH vs hors ZH | Pountarrou témoin ZH vs hors ZH | Pinata instrumenté ZH vs hors ZH | Pinata témoin ZH vs hors ZH |
|--|-------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | < | < | < | > |
| | RGE 1m | < | < | < | > |
| | RGE 5m | < | < | < | > |
| Distance verticale à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | < | < | < | < |
| | RGE 1m | < | < | < | > |
| | RGE 5m | < | < | < | > |
| Distance verticale / Distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche | LiDAR | < | > | < | < |
| | RGE 1m | > | 0 | < | < |
| | RGE 5m | < | 0 | < | < |
| Indice d'humidité des sols | LiDAR | 0 | 0 | 0 | > |
| | RGE 1m | > | > | > | > |
| | RGE 5m | > | > | > | > |
| Distance aux crêtes / distance à l'exutoire du bassin versant | LiDAR | 0 | 0 | 0 | < |
| | RGE 1m | 0 | < | > | > |
| | RGE 5m | > | > | > | > |
| Indice de convergence 10m | LiDAR | 0 | < | 0 | 0 |
| | RGE 1m | < | < | < | < |
| | RGE 5m | < | < | < | < |
| Pente aval (d=2m) | LiDAR | < | < | < | 0 |
| | RGE 1m | < | < | < | 0 |
| | RGE 5m | < | < | < | 0 |

Tableau 35 : Synthèse des indicateurs significatifs entre les zones humides et en dehors des zones humides pour le couple de bassins versants du Pountarrou et du Pinata. Les cases bleues avec le signe > indiquent que la valeur médiane des zones humides est plus élevée que celle en dehors des zones humides, et inversement dans les cases oranges avec le signe <. 0 indique que la différence n'est pas significative.

15.4.3. Signatures spectrales des zones humides

Les signatures spectrales des zones humides ont été comparées sur les couples Pountarrou et Pinata à partir des orthophotos infrarouge à 20 cm de 2018. Les valeurs spectrales sont très corrélées entre elles. Les distributions montrent deux pics plus ou moins marqués selon les bassins versants : pour la bande infrarouge, un pic autour de 40 (moins marqué dans le Pountarrou témoin), pour la bande rouge un pic vers 20 et pour la bande verte autour de 30. Ce premier pic dans les valeurs les plus faibles est marqueur d'une végétation arborée peu chlorophyllienne, de surfaces en eau et d'ombres.

Un second pic est identifiable entre 120 et 160 (selon les bassins versants) pour la bande infrarouge, et 90 et 100 respectivement pour les bandes rouges et vertes, et est marqueur d'une végétation basse à l'activité chlorophyllienne intense et d'humidité importante en surface (voire de drains à sec bien visibles).

Les distributions de chacune des zones humides montrent plusieurs tendances.

D'abord, les zones humides où le premier pic est prédominant : elles sont majoritairement situées dans Pountarrou instrumenté et Pinata instrumenté. Les zones humides de Pinata témoin montrent que les deux pics sont présents. Cette tendance s'observe aussi pour un grand nombre de zones humides des bassins de Pountarrou et de Pinata instrumentés.

Enfin les zones humides qui montrent préférentiellement le deuxième pic que l'on retrouve surtout dans Pountarrou témoin et parfois dans Pountarrou instrumenté et Pinata instrumenté. Une analyse plus fine de ces pics permettrait de dissocier l'eau des ombres et la végétation chlorophyllienne de l'humidité visible en surface.

15.4.4. Analyse multivariée et modélisation prédictive

Une première analyse en composantes principales a été conduite pour visualiser les corrélations entre les variables (indicateurs topographiques calculés pour tous les pixels des 8 bassins versants) qui seront intégrées au modèle prédictif (

Figure 196).

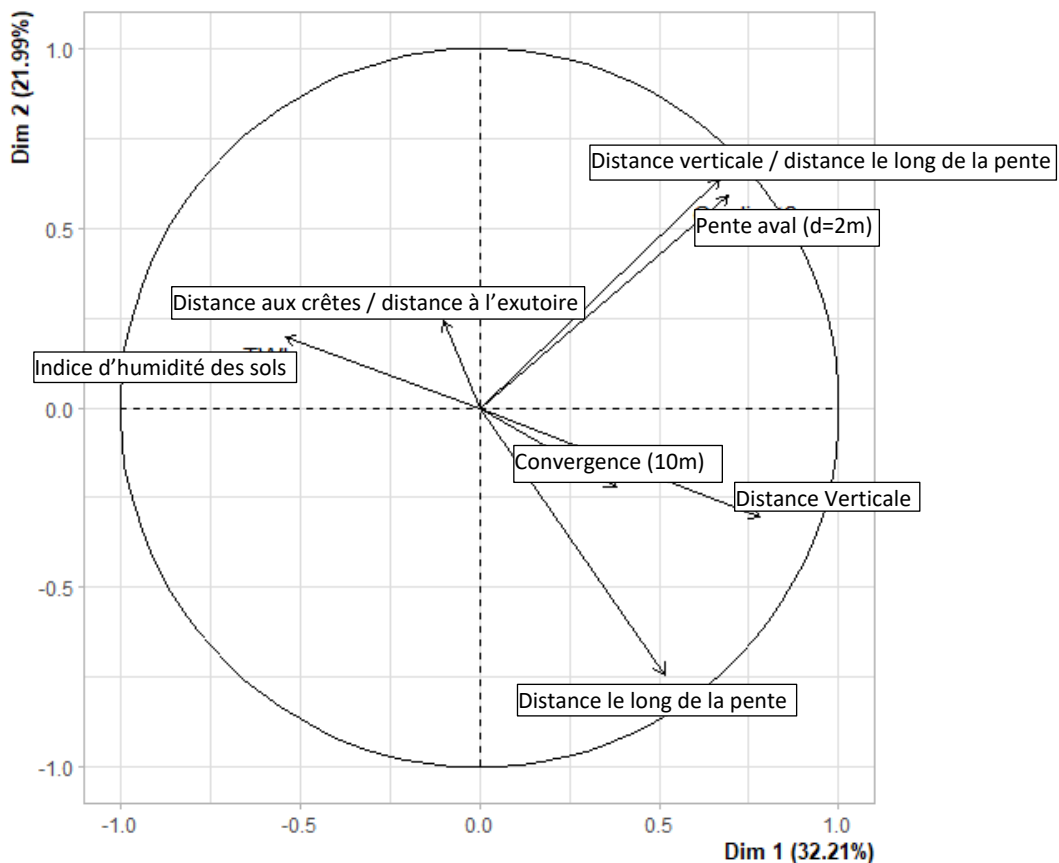


Figure 196 : Analyse en composantes principales : variables sur le plan factoriel formé des axes 1 et 2

Les variables pente aval et ratio distance verticale/distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche sont très corrélées. L'indice d'humidité des sols et la distance verticale à l'écoulement aval le plus proche contribuent à expliquer le plus de variance le long de l'axe 1.

Les variables distance verticale à l'écoulement aval le plus proche et l'indice de convergence sont bien corrélées entre elles.

Les variables de distances (le long de la pente et ratio des deux) contribuent autant à l'axe 1 qu'à l'axe 2.

Enfin la variable de localisation dans le bassin versant est corrélée avec l'axe 2, mais sa contribution est relativement plus faible que les autres variables.

La part de variance expliquée par les deux premiers axes est seulement d'environ 53%. Ceci est lié à la grande variabilité des systèmes naturels. Cela montre que les variables choisies se distribuent de manière relativement homogène sur les axes de l'ACP, et ne contribuent pas de manière marquée à l'un des axes en particulier.

On peut identifier l'axe 1 comme étant porteur de l'information présence/absence de zones humides, et l'axe 2 comme étant porteur de l'information de localisation des zones humides dans le bassin versant

même si, encore une fois, la variance expliquée par ces deux axes n'est que d'environ 53% et qu'il faudrait s'attacher à étudier la corrélation des variables avec les autres axes de l'ACP.

Sur la Figure 197, on voit que le modèle prédictif qui a été construit montre une stabilisation de l'erreur « out of bag » à partir de 200 arbres. Le modèle pourrait donc être construit à partir de 200 arbres sans souffrir d'une augmentation de cette erreur.

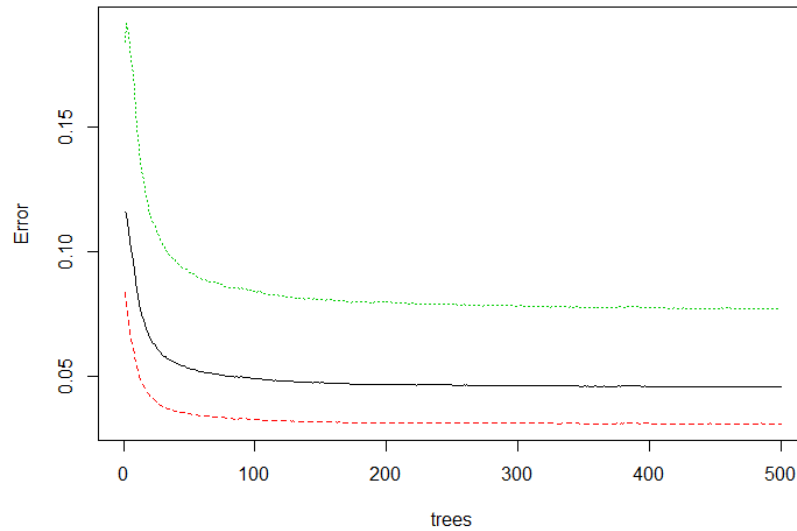


Figure 197 : Diminution de l'erreur « out of bag » avec le nombre d'arbres dans le modèle

La diminution moyenne de l'impureté³² pour l'ensemble des arbres montre que la variable qui prend le plus d'importance pour classer les pixels des bassins versants selon leur potentialité à soutenir les étiages, ou atténuer les crues, est le ratio entre la distance verticale et la distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche (Figure 198).

On retrouve ensuite les composantes de ce ratio (distance verticale puis distance le long de la pente), l'indice d'humidité des sols, la pente aval et enfin l'indice de localisation dans le bassin versant et l'indice de convergence.

32. Moyenne de l'impureté cumulée apportée par chaque variable pour chaque nœud

Partie III – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux

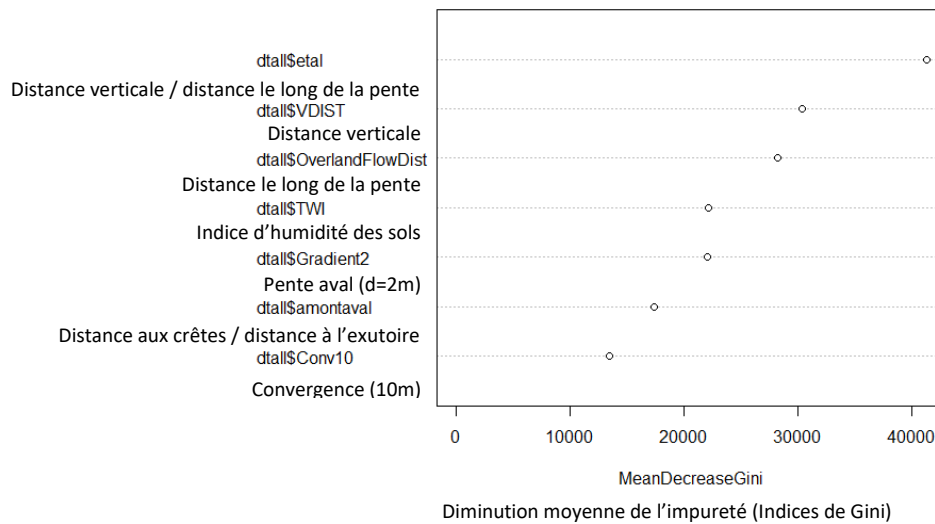


Figure 198 : Importance des variables dans le modèle random forest

À partir de la matrice de confusion du modèle (Tableau 36), la sensibilité du modèle a été évaluée à 0,96 et la spécificité à 0,93. L'*overall accuracy*, c'est-à-dire la part de pixels bien classés est de 0.95. Le modèle peut donc être considéré comme efficace pour classer les pixels des 8 bassins versants.

| Prédit \ Observé | Potentiel de soutien d'étiage Potentiel d'écrêtage de crue | Pas de potentiel |
|------------------|---|------------------|
| | Potentiel de soutien / écrêtage | 264775 |
| Pas de potentiel | 9993 | 118831 |

Tableau 36 : Matrice de confusion du modèle random forest

La spatialisation des résultats du modèle *random forest* est présentée sur la Figure 199 pour les couples du Pountarrou et du Pinata, Figure 200 sur les bassins des Monts du Forez, et Figure 201 sur les bassins du Mont Lozère.

Dans les couples du Pountarrou et du Pinata, les erreurs de classification semblent être liées aux valeurs prises par l'indice d'humidité des sols : dans le Pountarrou instrumenté et le Pinata instrumenté, les pixels mal classés correspondent à des valeurs plus faibles de l'indice d'humidité des sols et inversement dans le Pountarrou témoin et le Pinata témoin, à des valeurs plus fortes de l'indice d'humidité des sols.

Dans les bassins des Monts du Forez, les erreurs de classification semblent liées aux valeurs prises par la pente aval, l'indice de convergence et l'indice de localisation dans le bassin versant, ainsi qu'à de petits artéfacts dans le MNT RGE originel. Enfin dans les bassins du Mont Lozère, les erreurs semblent liées aux valeurs prises par l'indice d'humidité des sols et l'indice de convergence, ainsi qu'aux très nombreux artéfacts du MNT.

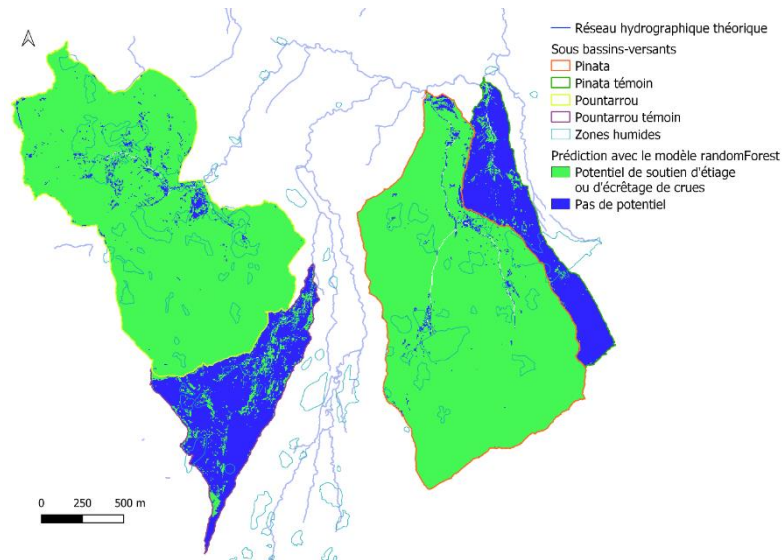


Figure 199 : Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les couples Pountarrou et Pinata

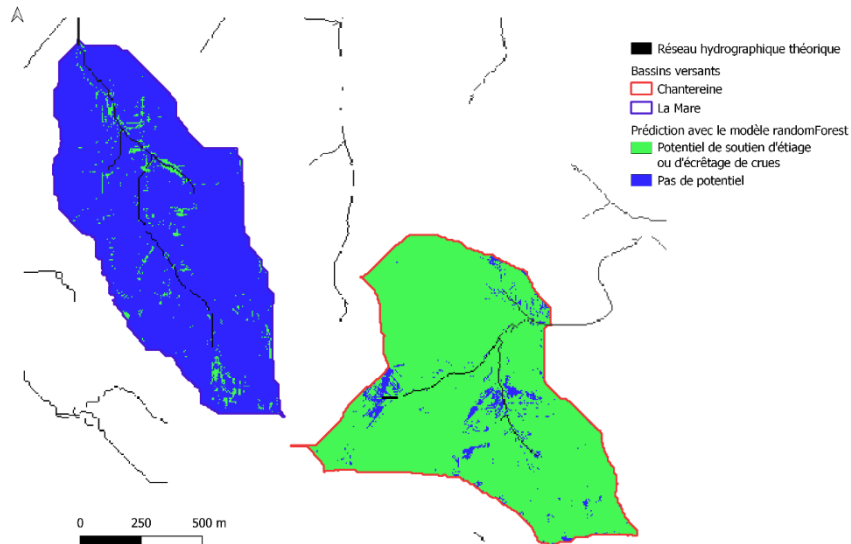


Figure 200 : Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les bassins des Monts du Forez

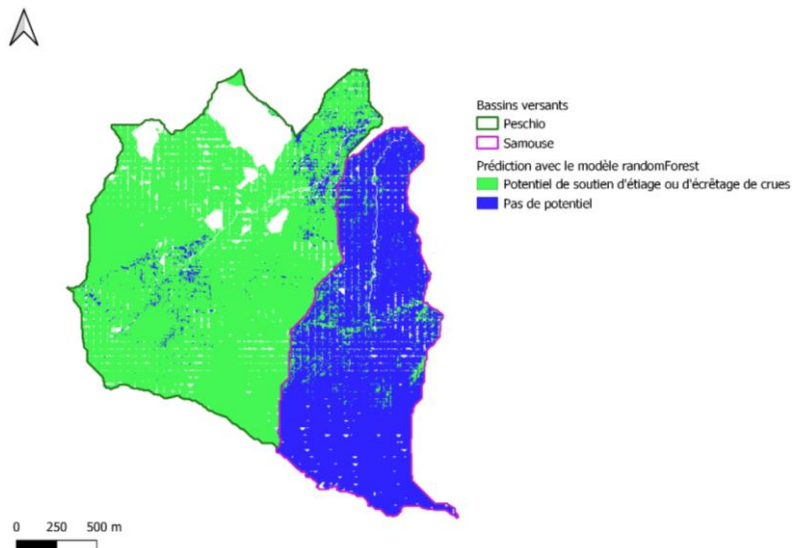


Figure 201 Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les bassins du Mont Lozère

15.5. Discussion et conclusion

15.5.1. Synthèse sur les indicateurs à l'échelle du bassin versant et au regard de la présence / absence de zones humides

À l'échelle du bassin versant, la **distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche** prend des valeurs médianes plus fortes dans les bassins versants pour lesquels un potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues est avéré (Monts du Forez et Mont Lozère) ou fortement suspecté (bassin du Madres). La variabilité de cet indicateur est plus faible dans les bassins versants présentant peu de zones humides pour les couples Pountarrou et Monts du Forez comparativement à une variabilité plus importante dans les bassins versants présentant peu de zones humides dans le couple Pinata et Mont Lozère.

La valeur absolue de cet indicateur dépend du relief du bassin versant, de la couverture végétale et des conditions météorologiques qui contrôlent la densité du réseau hydrographique (valeurs médianes presque deux fois plus faibles dans les Monts du Forez). Cette différence en termes de variabilité s'explique en partie par la forme plus allongée des bassins versants Pinata témoin et Samouse et par la ramification moins dense de leur réseau hydrographique.

À l'échelle des zones humides, dans le bassin Pountarrou instrumenté, la valeur médiane de cet indicateur est plus faible pour les zones humides qu'en dehors des zones humides et celui-ci montre une étendue importante comparativement aux valeurs prises par les zones humides dans les autres sous-bassins versants.

On pourrait donc dire que la répartition des zones humides, au regard de la distance au réseau hydrographique, semble plus homogène sur l'ensemble du bassin versant Pountarrou instrumenté que sur Pinata instrumenté et sur Pountarrou témoin. Dans ces deux sous-bassins, les zones humides sont relativement plus proches du réseau hydrographique, ce qui pourrait amoindrir le rôle potentiel de soutien d'étiage. La grande zone humide pentue située en amont du bassin Pinata témoin est quant à elle plutôt éloignée du réseau hydrographique.

Pour l'indicateur de **distance verticale à l'écoulement aval le plus proche**, les valeurs médianes sont plus fortes dans les sous-bassins présentant beaucoup de zones humides des couples Pountarrou, Pinata, et Monts du Forez. La variabilité est plus importante pour les sous-bassins présentant peu de zones humides des couples Pinata et Mont Lozère.

On peut voir ici encore l'influence de la forme du réseau hydrographique : les réseaux hydrographiques des sous-bassins présentant peu de zones humides des couples Pinata et Mont Lozère sont moins ramifiés. Ceci joue également un rôle sur les distributions des distances verticales au sein du sous-bassin Pinata témoin : la variabilité des distances est expliquée par les gammes de valeurs prises en dehors des zones humides, alors que les valeurs des zones humides sont peu variables et plus faibles. On observe donc dans le sous-bassin Pinata témoin la présence de zones humides uniquement très proches (verticalement) du réseau hydrographique, contrairement aux autres sous-bassins du Madres.

Cet indicateur met en évidence la connectivité avec les réseaux hydrographiques, que ce soit en période de crue ou d'étiage : il existe dans le bassin Pountarrou instrumenté, et dans une moindre mesure dans Pinata instrumenté, des zones humides très proches du réseau hydrographique, et d'autres plutôt « perchées », ou plus déconnectées du réseau hydrographique, (surtout dans le Pountarrou instrumenté) qui sont beaucoup moins connectées avec le réseau hydrographique et qui pourraient jouer un rôle favorable au soutien d'étiage.

À l'échelle du bassin versant, le **ratio entre la distance verticale et la distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche**, montre des valeurs médianes plus fortes dans les sous-bassins présentant beaucoup de zones humides pour les couples Pountarrou et Monts du Forez. En valeur absolue, on note comme pour les deux indicateurs précédents la gradation suivante : des valeurs du couple Monts du Forez, à celles du couple Mont Lozère, à celles du couple Pountarrou, et à celles du couple Pinata.

Les valeurs plus fortes s'expliquent par les caractéristiques morphométriques des bassins versants et de leur réseau hydrographique et peuvent résulter :

- d'une valeur de distance verticale à l'écoulement aval plus forte (présence de replat ou de terrasses alluviales) ;
- d'une valeur de distance le long de la pente à l'écoulement aval plus faible (zone riveraine ou pied de versant adjacent très pentu) ;
- d'une conjonction de valeurs fortes pour les deux indicateurs (terrasses dans un fond de vallée très large ou replat dans la partie haute du bassin versant) ;
- d'une conjonction de valeurs faibles pour les deux indicateurs (fond de vallée peu large et très plat).

Pour les bassins avec peu de zones humides des couples Pinata et Mont Lozère, les fortes valeurs peuvent être attribuées à une faible ramification du réseau hydrographique : les valeurs de distance verticale et de distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche peuvent être simultanément plus élevées (zones éloignées du réseau) ou plus faibles (zones très proches du réseau hydrographique, fond de vallée).

Avec l'analyse conduite à l'échelle des zones humides sur les données LiDAR on observe une plus grande variabilité de cet indicateur pour les couples Pountarrou témoin et Pinata témoin que pour les couples Pountarrou instrumenté et Pinata instrumenté. Dans le cas du Pountarrou témoin, la variabilité est identique dans les zones humides et en dehors des zones humides, avec une valeur médiane dans les zones humides plus élevée : on a des zones humides dans le fond de vallée, très proches du réseau hydrographique peu ramifié, et bien connectées.

Dans Pountarrou instrumenté et Pinata instrumenté, on peut avoir à la fois ce type de zones humides bien connectées, mais également des zones humides se développant dans des replats plus éloignés du réseau hydrographique (plus « haut » dans le bassin versant) et des zones humides se développant sur des terrasses (plus « perchées »).

Enfin dans le Pinata témoin, la variabilité des valeurs est due à une plus grande variabilité en dehors des zones humides, celles-ci prenant des valeurs plus faibles et peu variables (zone humide pentue en amont du bassin versant).

Les tests de Wilcoxon sur l'**indice d'humidité des sols** indiquent des différences de moyenne significatives pour chaque couple de bassin versant. Visuellement cependant, les distributions entre les bassins versants présentant peu de zones humides et beaucoup de zones humides sont très proches en termes de médiane et d'étendue. Cet indice d'humidité, souvent utilisé dans la littérature pour cartographier la potentialité de zones saturées en eau, montre donc de faibles différences de distribution que le bassin présente des zones humides ou non. Il reflète donc plutôt à l'échelle du bassin versant les zones de replat dans lesquelles pourraient se développer des zones humides. Ceci est confirmé à l'échelle des zones humides : les valeurs de l'indice sont toujours plus élevées dans les zones humides, mais toutes les valeurs élevées ne coïncident pas avec la présence de zones humides. Ceci démontre que l'indice d'humidité des sols utilisé seul ne suffit pas pour produire une cartographie des zones saturées en eau, et que sa distribution à l'échelle du bassin versant n'est pas un marqueur d'une différence de stockage dans le bassin versant (pour les couples de bassins étudiés).

Le **ratio entre la distance aux crêtes et distance aval à l'exutoire** est d'autant plus élevé que les pixels sont proches de l'exutoire et bien connectés aux réseaux hydrographiques. Cet indice est plus élevé dans les bassins qui présentent beaucoup de zones humides pour les couples Pountarrou et Monts du Forez, et dans les bassins qui présentent peu de zones humides pour les couples Pinata et Mont Lozère. Les valeurs médianes sont plus élevées et l'étendue plus variable dans les zones humides qu'en dehors des zones humides pour les bassins des couples Pountarrou et Pinata. L'indice montre que les zones humides des bassins présentant beaucoup de zones humides dans les couples Pountarrou et Pinata peuvent être à la fois proches de l'exutoire ou plus éloignées alors que dans le Pountarrou témoin celles-ci sont relativement proches de l'exutoire. Dans Pinata témoin, les valeurs élevées de l'indice illustrent la variabilité de localisation : une zone humide est située plutôt en aval du bassin versant, l'autre (la plus grande) est située dans la partie haute du bassin versant. La forme du bassin

versant et la ramification du réseau hydrographique, comme pour l'indicateur de distance le long de la pente à l'écoulement le plus proche, expliquent également les différences de gammes de valeurs.

L'**indice de convergence** montre une plus forte convergence des écoulements dans les zones humides, et présente donc une tendance à la convergence légèrement plus marquée dans les bassins versants présentant beaucoup de zones humides. Ces zones de convergences sont à la fois des zones de replat (zones humides isolées) et des fonds de vallées. La gamme de valeur prise à l'échelle du bassin versant dépend de la densité du réseau de drainage, et de la morphologie des fonds de vallées (plus il est dense, ou plus le fond de vallée est large, plus les valeurs montrant une convergence seront nombreuses). L'indice est presque centré sur zéro dans les quatre couples de bassins étudiés : à l'échelle du bassin versant, la tendance à la convergence ou divergence des écoulements est donc plutôt faible. Dans Pountarrou témoin, les zones humides montrent une tendance à la convergence beaucoup plus marquée : ses zones humides sont mieux connectées au réseau de drainage.

Enfin, les zones humides se développent dans les **zones de replat** (pente aval plus faible). Sur Pountarrou instrumenté et dans le bassin du Chantereine dans le Forez les médianes sont plus élevées que dans leur bassin témoin présentant peu de zones humides alors que dans Pinata instrumenté et le Peschio sur le Mont Lozère, c'est l'inverse. Dans Pinata témoin, les zones humides se développent dans la partie haute du bassin versant sur des pentes plus fortes que les zones humides de Pinata instrumenté. Dans le couple Pountarrou, les zones humides se sont développées dans de grandes zones de replat dans la partie Ouest du bassin instrumenté et dans la partie amont du bassin témoin, et sur des pentes plus fortes dans la partie Est du bassin témoin, ce qui peut expliquer la tendance à des pentes plus fortes dans le bassin instrumenté.

Tous les indicateurs testés ont tous montré leur significativité pour distinguer les bassins versants ayant des potentiels de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crue de ceux où ces potentiels sont absents. Les indicateurs de pente aval, d'humidité des sols et de convergence permettent de mettre en évidence les sites dans le bassin versant où le stockage pourrait être plus important. Les indicateurs de distances verticale et le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche (et le ratio des deux) et l'indicateur de localisation dans le bassin versant (ratio entre la distance aux crêtes et distance à l'exutoire du bassin versant) rendent compte de la connectivité avec les réseaux de drainage. C'est la variabilité de la coïncidence spatiale entre un stockage important et une connectivité plus ou moins forte qui permet de mettre en évidence les zones humides ayant un potentiel de soutien d'étiage ou un potentiel d'écrêtage de crues plus ou moins important. L'analyse de ces indicateurs à la fois aux échelles bassin versant et zone humide semble donc pertinente et permettent de catégoriser les zones humides

15.5.2. *Caractéristiques des zones humides*

Les zones humides du bassin du Madres présentent des caractéristiques variables. Certaines sont très proches des réseaux hydrographiques, très connectées et peuvent jouer un rôle de tampon lors des crues. Elles sont préférentiellement plus « proches » de l'exutoire du bassin versant et en cela leur rôle en termes de soutien d'étiage serait à approfondir avec les données piézométriques de l'instrumentation. Elles présentent des pentes aval faibles et une tendance à la convergence marquée. D'autres sont éloignées des réseaux hydrographiques, sur des terrasses ou des zones de replat hors fonds de vallées. Elles présentent des pentes aval et un indice de convergence plus variable. Elles sont moins connectées aux réseaux hydrographiques. La taille et la forme des zones humides sont des facteurs importants pour le rôle de stockage. La Figure 202 montre que les tailles des zones humides sont comparables entre les bassins Pinata instrumenté et le couple Pountarrou, alors qu'il existe dans Pinata témoin une zone humide beaucoup plus vaste.

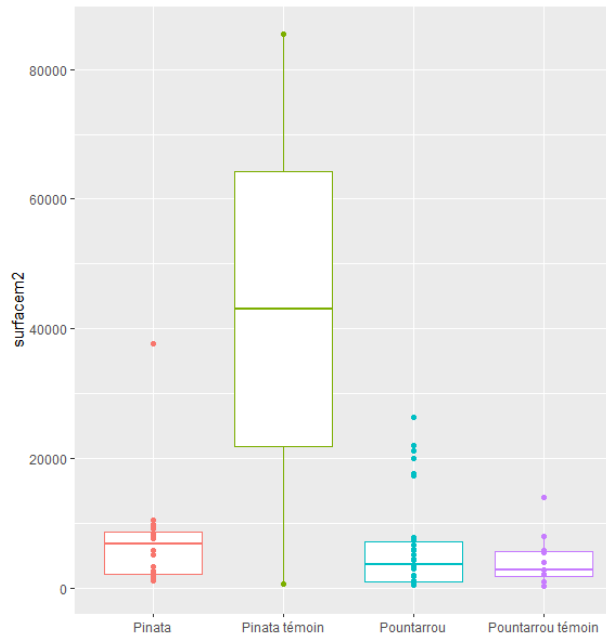


Figure 202 : Taille des zones humides des sous bassins des couples du Pountarrou et du Pinata

La morphologie des zones humides est très variable sur les quatre bassins étudiés (Figure 203) : le rapport longueur sur largeur est beaucoup plus variable sur les bassins du couple Pountarrou avec des longueurs d'environ 1,5 fois la largeur (médiane).

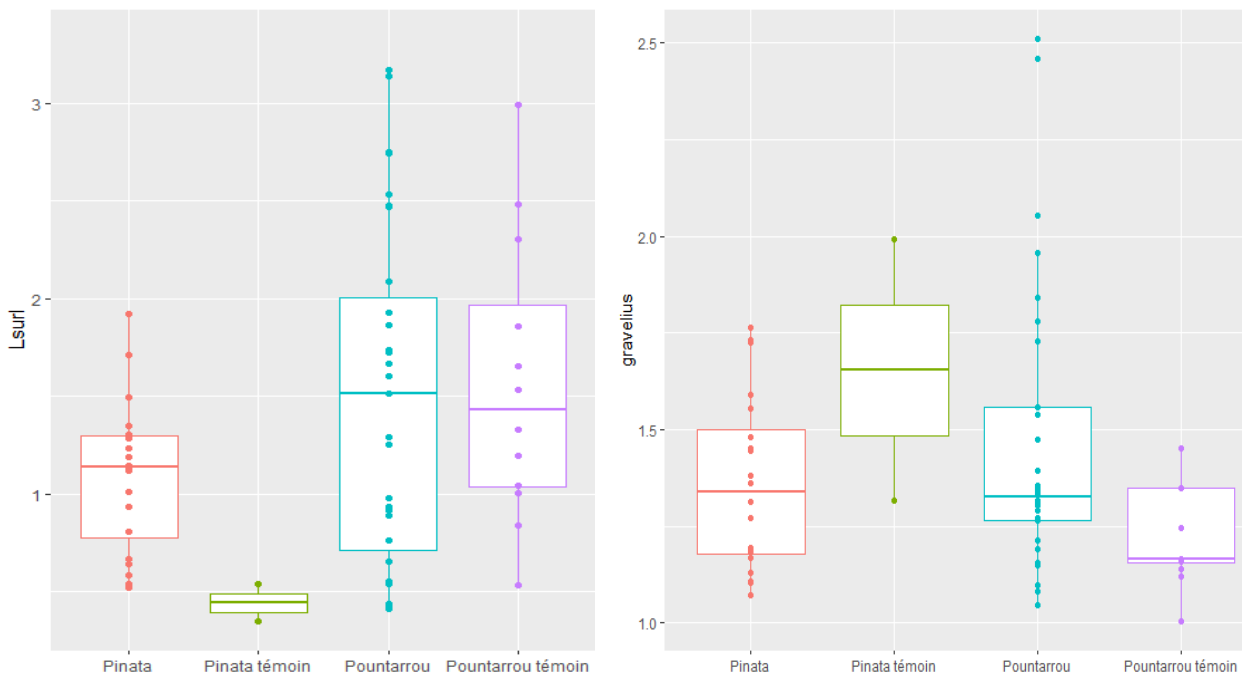


Figure 203 : Morphologie des zones humides : à gauche le rapport longueur (dans le sens de l'écoulement) / largeur et à droite l'indice de Gravéilius (plus il est proche de 1, plus les zones humides se rapprochent d'un cercle)

On retrouve sur Pinata instrumenté et Pountarrou instrumenté un grand nombre de zones humides plus larges que longues pour lesquelles il serait intéressant d'étudier leur rôle hydrologique avec les données de terrain. C'est également le cas des deux zones humides du bassin Pinata témoin. L'indice de Gravéilius montre que les zones humides de Pinata instrumenté et de Pountarrou témoin sont beaucoup plus « ramassées » (plus proche d'un cercle) alors qu'elles sont plus allongées dans le Pinata témoin et dans certains cas du Pountarrou instrumenté (plus grande variabilité dans ce bassin).

Il n'a pas été possible dans le cadre de cette étude de produire un indicateur de distance (le long de la pente) entre les zones humides. Dans le but d'améliorer les analyses prédictives du rôle hydrologique des bassins versants, il serait intéressant de pouvoir intégrer à l'échelle du bassin versant un indicateur qui synthétiserait l'ensemble de la diversité des zones humides en termes de formes, de surfaces et de distance inter zones humides.

15.5.3. Effets de la résolution des données et tendance des indicateurs et effets de l'échantillonnage stratifié

Dans l'ensemble, les indicateurs produits à partir des données LiDAR ont montré les mêmes tendances que ceux produits à partir des RGE à 1 m et à 5 m, avec toutefois des gammes de valeurs différentes. Au-delà des valeurs absolues prises par les indicateurs, c'est plutôt à la différence de distributions entre les bassins présentant beaucoup de zones humides et peu de zones humides à laquelle il faut s'attacher. Les artefacts présents dans les RGE à 1 m et 5 m entraînent parfois des tendances inverses à celles que l'on observe avec les données LiDAR. Sur le couple Pountarrou, c'est le cas pour l'indice de distance verticale à l'écoulement aval le plus proche, le ratio distance verticale/distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche, et le ratio distance aux crêtes/distance à l'exutoire du bassin versant. Ces différences de tendances sont donc à mettre en lien avec la capacité des algorithmes de calcul des directions des écoulements et de l'accumulation des flux à produire les mêmes résultats avec les différentes sources de données, parfois entachées d'artefacts : le LiDAR est parfois trop précis et les RGE entachés d'erreurs. Sur le couple Pinata, ce sont les indices d'humidités des sols et indices de convergence qui montrent également des tendances différentes : ici, c'est la ressemblance entre le bassin instrumenté et le bassin témoin qui peut aussi entraîner ces différences observées. La résolution du LiDAR permet dans certains cas de mieux appréhender les différences de morphologie entre les bassins instrumentés et témoins, mais on observe également que certains indicateurs, comme l'indice d'humidité des sols ne sont pas significatifs avec cette source de données. L'utilisation des RGE semblent donc être pertinentes pour l'extraction de tous les indicateurs présentés dans cette étude, sous réserve de corriger hydrologiquement les données au préalable.

Les différences observées entre les distributions des indicateurs dans l'échantillon stratifié et pour l'ensemble des pixels des bassins versants relèvent probablement pour le couple Pountarrou d'erreurs dans les RGE, se propageant avec les algorithmes de calcul des indicateurs.

Pour le couple Pinata, l'échantillonnage a été stratifié selon les mêmes classes de pentes que pour Pountarrou. La distribution des pentes étant différentes dans ce couple de bassin, il est possible que les différences de tendances observées entre les distributions dans l'échantillon et pour l'ensemble des pixels soient dues à un sur-échantillonnage et inversement sous-échantillonnage dans certaines classes de pentes. Le fait que certains indicateurs ne soient pas significatifs dans l'échantillon peut provenir des mêmes biais d'échantillonnage.

15.5.4. Analyse multivariée pour la prédiction du rôle hydrologique de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues

L'analyse conduite sur les quatre couples de bassins versants a permis de mettre en évidence le fait que tous les indicateurs proposés sont significatifs dans le modèle prédictif de la réponse du bassin versant (i.e. bassin présentant un potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues vs. pas de potentiels). La capacité prédictive de ce modèle montre de bons résultats : sensibilité de 0,96, spécificité 0,93, et « *overall accuracy* » de 0,95.

Toutefois la validité de ce type de modèle serait à conforter avec une analyse d'autres bassins versants. En effet, seuls 8 bassins ont été intégrés pour la construction du modèle (chaque pixel de chaque bassin étant en fait intégré comme un individu). Ce type de modèle complexe est très robuste dès lors que l'échantillon d'entraînement du modèle est de taille suffisante. La capacité prédictive de ce modèle sur d'autres bassins (dans d'autres contextes physiographiques) serait à vérifier (le modèle développé ici est probablement trop spécifique aux choix des bassins versants qui y ont été intégrés).

Enfin une analyse de sensibilité devrait être conduite sur les paramètres mêmes du modèle : sur le nombre de variables testées à chaque itération et le nombre d'arbres constituant ce modèle de type « *random forest* » (limiter le nombre d'arbres à 200 par exemple).

16. Synthèses – Indicateurs

Les travaux conduits conjointement dans le projet ZHTB phase 3 et le projet ZH Aude phase 3 sur la question de la caractérisation du potentiel de soutien d'étiage des zones humides tourbeuses ont permis de mener une double réflexion visant à la création d'indicateurs à l'échelle du site et du bassin versant :

- 1) à l'échelle du site, les indicateurs de potentiel de soutien d'étiage (vidange du réservoir tourbeux) sont fondés sur les termes de l'équation de Boussinesq et la construction d'abaques ;
- 2) à l'échelle du bassin versant, les indicateurs de potentiel de soutien d'étiage et/ou d'écrtage de crues sont fondés sur des indices topographiques et des essais de modélisation prédictive.

16.1. Indicateurs à l'échelle du site tourbeux

Le travail réalisé à partir de l'équation de Boussinesq a permis de mettre en avant plusieurs indicateurs ainsi que les paramètres les influençant :

- 1) Débit initial (Q_0) – il augmente quand :
 - l'épaisseur mouillée (h_m) augmente
 - le rapport largeur/longueur (l/L) augmente
 - la conductivité hydraulique (K) augmente
- 2) Temps de vidange (t en jours) :
 - diminue quand la conductivité hydraulique (K) augmente
 - augmente quand l'épaisseur mouillée (h_m) augmente
 - augmente quand la porosité efficace (ϕ) augmente (pour une même valeur K de conductivité hydraulique)
- 3) Tarrissement (vitesse de réponse) :
 - augmente quand la conductivité hydraulique (K) augmente
 - augmente quand l'épaisseur mouillée (h_m) augmente
 - diminue quand la surface augmente
 - augmente quand le rapport l/L augmente
 - diminue quand la porosité efficace (ϕ) augmente

Les travaux réalisés montrent que des configurations de paramètre existent pour garantir un bon potentiel de soutien d'étiage avec un débit de vidange supérieur à 1l/s pendant 90 jours. Certaines configurations permettent d'avoir des débits de vidange plus importants sur des temps courts, d'autres des débits faibles mais presque constant sur des temps plus longs.

À titre d'exemple, on constate que :

- 1) pour une même perméabilité, l'augmentation de la porosité efficace augmente le temps de vidange ;
- 2) la perméabilité doit diminuer au fur et à mesure que le rapport l/L augmente pour conserver un temps de vidange identique.

Il existe plusieurs configurations théoriques favorables ce qui renforce l'intérêt du jeu d'abaque. Reste à savoir si ces configurations de tourbière existent réellement.

On constate que les jeux de paramètres expriment des potentiels variables dont l'interprétation doit être mise en relation avec le contexte territorial (ex : population, activités...). L'interprétation doit aussi prendre en compte le type de zones humides et leur interconnexion.

Partie III – Synthèses - Indicateurs

À titre d'exemple :

- 1) une grande tourbière présentant des perméabilités faibles pourrait fournir un faible débit sur un temps long ce qui constituerait un signal de fond intéressant pour le soutien d'étiage d'un petit cours d'eau ;
- 2) de petites tourbières ou zones humides interconnectées pourraient assurer un rôle de soutien d'étiage en augmentant le délai de restitution à un cours par des vidanges en cascade.

Au final, les meilleures configurations potentielles pour le soutien d'étiage sont conformes aux hypothèses faites au départ, soit avec :

- des valeurs intermédiaires pour la conductivité hydraulique (K). La perméabilité a un impact très significatif sur le potentiel, des valeurs faibles ou trop forte sont globalement défavorables.
- des valeurs fortes pour les autres paramètres (h_m , ϕ , l/L et surface).

En parallèle du travail sur les indicateurs de soutien d'étiage fondé sur l'équation de Boussinesq, un petit travail de modélisation a été réalisé à l'aide du logiciel Vensim PLE. Même si ce travail résulte d'une simplification du bilan hydrologique d'un site tourbeux, forcément incomplet et entaché d'incertitudes, il a permis de tester l'équation de Boussinesq à partir d'un jeu de paramètres et de données issues du cas du site de Luitel. Il en résulte que :

- les débits de vidanges sont conformes aux ordres de grandeur attendus au Luitel ;
- les résultats se positionnent de façon intermédiaire entre 2 abaques.

Ce type de modélisation permet aussi de montrer :

- l'impact négatif de l'ETP sur la quantité d'eau mobilisable ;
- l'effet de recharge de la pluie ;
- l'effet régulateur des niveaux de la pluie et de l'ETP.

Le travail réalisé sur la mise au point d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage d'un site tourbeux a permis de tester un nombre important de combinaisons de paramètres dans l'équation de Boussinesq parmi les 4 050 possibles uniquement pour la combinaison des gammes et niveaux de valeur sélectionnés. Il conviendrait à terme de revisiter ces gammes et niveaux de valeurs en s'assurant qu'ils sont représentatifs de la diversité des sites tourbeux existants et de la distribution des valeurs des paramètres de ces sites.

Afin de poursuivre ce travail il conviendrait donc :

- d'essayer des méthodes permettant de tester les changements de valeurs de plusieurs paramètres simultanément ;
- de confronter les abaques des jeux de paramètres représentatifs ou équivalents issus de cas réels afin de faire la part des choses entre des cas purement théoriques et des cas concrets ;
- d'intégrer la pluie (en tant que source) et l'ETP (en tant que puits) pour affiner le calcul du temps de vidange ;
- proposer un tutoriel et/ou didacticiel pour l'utilisation du jeu d'abaques.

16.2. À l'échelle du bassin versant

16.2.1. Indicateurs à l'échelle du bassin versant

Le travail réalisé a permis de caractériser à l'échelle de bassins versants des indicateurs topographiques. Les différences de distributions de ces indicateurs entre les bassins versants présentant beaucoup de zones humides, ou peu de zones humides, montrent que ces distributions d'indicateurs pourraient être en lien avec le potentiel de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crues. Les indicateurs testés montrant des différences significatives sont les suivants :

- 1) potentiel de présence de zones humides et donc de stockage d'eau :
 - indice d'humidité des sols
 - pente
 - indice de convergence
- 2) potentiel de connectivité des zones humides avec les réseaux hydrographiques et donc d'écrêtage de crue et/ou de soutien d'étiage :
 - distance verticale à l'écoulement aval le plus proche
 - distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche
 - ratio distance verticale / distance le long de la pente à l'écoulement aval le plus proche
 - indice de localisation : distance aux crêtes / distance à l'exutoire du bassin versant

Une modélisation prédictive conduite sur les quatre sous-bassins du Madres, sur des couples de bassins dans les Monts du Forez et sur le Mont Lozère a permis de montrer qu'il était possible de prédire la réponse hydrologique de ces bassins, c'est-à-dire les potentiels de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crue ou l'absence de potentiel. Cette modélisation serait à renforcer par l'intégration d'autres bassins versants et une analyse de sensibilité des paramètres du modèle devrait être conduite à l'avenir pour le rendre plus robuste. L'intégration de variables hydrologiques permettrait de prédire une réponse hydrologique quantitative (par exemple un débit à l'exutoire).

Les distributions des indicateurs topographiques seraient à mettre en lien avec les variables hydrologiques au sein des zones humides, afin d'étudier particulièrement leur rôle respectif pour le soutien d'étiage ou l'écrêtage de crues.

Le travail réalisé sur les indicateurs topographiques de potentiel de soutien d'étiage permet de mettre en avant quelques préconisations pour choisir des bassins versants à instrumenter en vue d'étudier le soutien d'étiage :

- Les limites des comparaisons possibles entre les bassins versants du couple Pountarrou et du couple Pinata ont été identifiées. Les différences observées dans les distributions des indicateurs entre les bassins présentant beaucoup de zones humides et ceux dans lesquels leur présence est plus marginale relèvent pour certaines de la forme et de la taille du bassin versant, ainsi que de la densité et du degré de ramification du réseau hydrographique. Le fait d'utiliser des bassins versants de forme et de taille comparable permettrait de s'affranchir des biais en termes de capacité de stockage à l'échelle du bassin versant. La pente dans le bassin versant est également un facteur clé : on a vu sur Pountarrou instrumenté et sur Pinata témoin que certaines zones humides se développent sur des pentes plus fortes et ne jouent donc pas le même rôle hydrologique.
- La proportion des zones humides dans le bassin versant et plus particulièrement la proportion de celles ayant un rôle dans le soutien d'étiage ou dans l'écrêtage de crues (à distinguer en fonction de leurs caractéristiques en termes de pente, de surface drainée amont, de distances aux réseaux hydrographiques) est un autre critère particulièrement important. On a vu sur le couple Pountarrou que la présence de nombreuses zones humides dans le bassin témoin rendait plus difficile l'interprétation de la distribution des indicateurs.
- Il existe des différences en termes d'occupation du sol entre les bassins instrumentés et bassins témoins. L'analyse à l'échelle des zones humides a montré des différences en termes de distribution des valeurs spectrales, qui rendent compte de la variabilité des états de surface au sein des zones humides.

Une des premières perspectives de ce travail est de confronter les résultats de l'étude avec les indicateurs hydrologiques issus de l'analyse des données de l'instrumentation mise en place dans le cadre du projet ZH Aude.

Ceci permettrait de valider que l'on observe bien une différence, dans le stockage par les zones humides, pour l'ensemble des sous-bassins du Madres. L'analyse multivariée conduite dans cette étude vise à prédire le rôle hydrologique de soutien d'étiage ou d'écrêtement de crues en lien par les zones humides présentes dans les bassins versants. Un préalable serait de pouvoir affirmer que ce rôle existe bien, grâce à l'interprétation des données de l'instrumentation.

La production d'indicateurs hydrologiques à l'échelle du bassin versant permettra d'alimenter le modèle prédictif et de produire une variable de réponse quantitative (tel que le débit à l'exutoire, connaissant les conditions hydrométéorologiques antécédentes). La seconde perspective est d'intégrer, à la modélisation, une typologie des zones humides qui permettrait de prendre en compte leur taille, leur forme et leur connectivité, entre elles et avec les réseaux hydrographiques, par le biais d'indicateurs synthétiques à l'échelle du bassin versant. Ceci permettrait de prendre en compte la diversité des rôles joués par chaque type de zones humides pour le stockage et la restitution.

16.2.2. Analyses statistiques des données météorologiques et hydrologiques de la Haute-Vallée de l'Aude (ONF ZH Aude)

Dans le cadre de l'étude menée sur les zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude, la synthèse des travaux³³ a permis de dégager quelques éléments pour une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants et des zones humides étudiées. Rappelons, que l'objectif de départ était de mettre en œuvre un dispositif de suivi permettant de tester l'hypothèse d'une différence de réponse hydrologique entre des bassins versants présentant une forte densité de zones humides et des bassins versants témoins présentant au contraire une faible densité de zones humides.

À l'échelle du bassin versant, des données hydrologiques et météorologiques ont été acquises sur les couples de sous-bassins du Pountarrou et Pinata. L'analyse de ces données sur sous-bassin de Pountarrou a permis de mettre en avant les éléments suivants :

- sur la série de données étudiées, on ne constate pas de différence de fonctionnement hydrologique majeure entre les différents bassins versants (pas de comportements particuliers sur les débits classés, autocorrélations similaires, temps de réponse immédiat du débit aux précipitations, ...) ;
- les bassins versant présentant une forte densité de zones humides semblent soumis à une évapotranspiration plus importante, mais ils ne soutiennent pas plus les étiages que les bassins témoins. La plus forte densité de zones humides favoriserait donc l'ETP.
- pour certaines crues en période estivale, on constate même un phénomène d'écrêtement assez net dans les bassins présentant une plus forte densité de zones humides. Cela suggère que l'évapotranspiration a été supérieure et a conduit le bassin à absorber d'abord le déficit de l'évapotranspiration avant de contribuer aux écoulements. Ce comportement n'est pas systématique et aucune cause précise n'a pu lui être trouvée.

Ces premières analyses nécessitent d'être complétées à l'avenir, en travaillant sur des chroniques plus longues. À l'heure actuelle, la courte période de données disponibles comporte des lacunes. En conséquence la portée des conclusions est limitée car : 1) les données acquises ne couvrent pas encore la variabilité climatique locale ; 2) la calibration du modèle reste médiocre et amputée d'une période de validation, ce qui limite fortement la portée de toute conclusion. Pour obtenir des résultats plus solides, il est nécessaire de travailler à minima sur 5 cycles hydrologiques.

33. Thomassin K., Vion M., Parmain V., Ebrard E., Turlesque C. (2022) Étude du fonctionnement hydrologique de tête de bassin versant de l'Aude – Massif du Madres. Rapport de synthèse du projet (2017-2022), ONF11, CD11, Région Occitanie.

Des essais de modélisation par réseau de neurones ont été mis en œuvre sur un site de zone humide locale. Ces essais n'ont pas permis de construire une relation pluie/débit solide. Toutefois, les premiers résultats suggèrent que :

- la vidange des tourbières de pente génère des débits à l'échelle locale en limite de zone humide mais également à l'échelle du bassin versant. En l'état, ceux-ci ne constituent pas un soutien d'étiage à proprement parler.
- l'effet potentiellement « écrêteur de crues » de la zone humide semble envisageable en été lorsque les niveaux d'eau dans les piézomètres sont faibles. À saturation, lorsque les piézomètres sont pleins, cet effet est faible ou nul.

Au final, suite à l'analyse des premières chroniques de données et aux premiers travaux de modélisation, il apparaît donc que sur les bassins versants étudiés, le soutien d'étiage des zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude serait faible voire nul. En revanche, certaines tourbières, fonctionnant comme des tourbières de pentes semblent alimentées par des eaux souterraines de versants ou des écoulements hypodermiques qui pourraient contribuer au soutien d'étiage.

Sur les zones humides étudiées, il existe un signal faible d'effet « écrêteur de crues ». Cet effet, semble plus important en été lorsque les niveaux d'eau dans les zones humides sont bas.

L'étude des données météorologiques permet de faire l'hypothèse que l'humidité de l'air que les zones humides entretiennent en tête de bassin, n'est certainement pas étrangère à la fréquence des orages qui frappent le massif montagneux en saison estivale, contribuant ainsi à une composante courte du cycle de l'eau sur la zone. En effet les tourbières de pente comme celles du Madres, peu épaisses, sont vraisemblablement alimentées principalement par la pluie et par un sous-écoulement qui a lieu dans les parties altérées du socle rocheux. Les orages alimentent le système par endroits, en contribuant ainsi au soutien d'étiage plus bas dans la vallée et contribuent à la baisse des températures en basse altitude. Toutefois, cela est constaté mais difficilement quantifiable actuellement compte tenu du manque de données à cette échelle.

Il est possible de tirer deux enseignements principaux de ces travaux préliminaires :

- que ce soit à l'échelle d'un site ou plus largement d'un bassin versant, il est encore trop tôt pour pouvoir prédire et quantifier le potentiel de soutien d'étiage et d'écrêtement des crues des zones humides. La complexité des paramètres et le cumul des facteurs d'influence sur ces rôles étant très imbriqués, ils n'ont pas pu être testés dans leur totalité.
- les deux échelles de travail sélectionnées au départ pour cette expérimentation (sous-bassins versants et sites de zones humides) ne permettent pas de tenir compte des spécificités climatiques locales. En effet, des phénomènes intéressants se déroulent potentiellement à une échelle supérieure à celle du sous-bassin versant : l'échelle de la montagne ou du massif.

CONCLUSION

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

- le bilan du travail effectué en phase 3 du projet ZHTB
- la synthèse globale des travaux réalisés lors du projet ZHTB ;
- les perspectives.

17. Bilan du travail de la phase 3

17.1. Avancement et taux de réalisation

| Tâches | Taux de réalisation | Remarques |
|---|---------------------|---|
| Objectif 1 : suite de l'acquisition d'information et de données (hydrologiques, géochimiques, pédologiques, géophysiques) pour couvrir au moins 1 cycle hydrologique complet supplémentaire. | 100% | Malgré les problèmes techniques et les dysfonctionnements des sondes Solinst, l'acquisition des données s'est poursuivie en 2019, 2020, 2021 et continue en 2022 au moins jusqu'en 2023. |
| Objectif 2 : analyse et synthèse des données acquises en phases 2 et 3 | 100% | - |
| Objectifs 3 : poursuite des travaux de modélisation / modèles réservoirs (commencés en phase 2) et réseaux de neurones | 100% | Sur le site de Frasne, les chroniques de données existantes n'ont pas permis d'obtenir une modélisation par réseau de neurones satisfaisante. La partie indicateurs est plus fondée sur des approches de modélisation (équation de Boussinesq, analyse spatiale). |
| Objectif 4 : 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 | 100% | La complexité de l'approche, même si elle a été conduite aux 2 échelles prévues, n'a pas permis d'aboutir à des indicateurs synthétiques. Toutefois, des indicateurs potentiels ont été mis en avant. |
| Objectif 5 : 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). | 100% | Le travail sur les zones humides de l'Aude avec l'ONF s'est déroulé comme prévu. Toutefois, faute d'indicateurs synthétiques finalisés concernant le potentiel de soutien d'étiage des zones humides il est difficile de les tester sur d'autres sites. Dans la synthèse globale, il est envisageable de déterminer des conditions de transférabilité. De plus, des indicateurs de fonctionnement hydrologique semblent plus pertinents que des indicateurs de soutien d'étiage. |
| Objectif 6 : 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. | 100% | Plusieurs communications orales ont été effectuées Des publications sont prévues (ex : édition Quae) Un Comité de restitution est prévu en fin 2023/début 2024 |
| → sur le plan opérationnel (en fin de projet) : fiches techniques indicateurs de soutien d'étiage | 100% | Fiches techniques ONF Aude + Film |
| Fiche de synthèse Zab | 100% | - |
| Mettre à jour MetaZabr | 100% | - |

Tableau 37 : Taux de réalisation des tâches de la phase 3

La plupart des tâches prévues pour la phase 3 ont été réalisées (Tableau 37). En l'état ce rapport présente un état complet des travaux réalisés dans le projet ZHTB pour chacun des grands volets (suivi hydrologique, analyses hydrostatistiques, modélisation par réseau de neurones, géochimie, pédologie/géophysique, indicateurs à l'échelle du site tourbeux, indicateurs à l'échelle du bassin versant)

Partie III – Conclusion

sur chacun des sites (Luitel, Frasné, Haute-vallée de l'Aude) assorti d'une synthèse spécifique pour chacun des volets.

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

- EuroKarst, juillet 2018
- Journée eau et connaissance – Des savoirs et des outils nouveaux pour mieux gérer les eaux souterraines, AE-RMC, Lyon, décembre 2018.
- Semaine REV – Connaissance des ressources en eaux souterraines, EPL, Orléans, septembre 2019.
- Journée technique – Zones humides et changements globaux, Réseau des 'acteurs de l'eau en montagne, Asters, novembre 2019.
- Journée technique MNRE – La Défense, OIEau, février 2020.
- Solutions fondées sur la nature, nature des services : du concept aux applications, CEN, Saint-Etienne, Octobre 2020.
- Journée scientifique tourbière de Frasné, Besançon – UFC, décembre 2020.
- Forum UBFC, mai 2021.
- Webinaire #2, Eaux souterraines et ruissellement, Semaine de l'eau – H2O'Lyon, mars 2022.
- Commission milieu naturel, département de la Drôme, avril 2022.
- EuroKarst, juin 2022
- Commission milieu naturel, département de la Drôme, décembre 2022.
- Journée d'échange OFB, Modalités d'engorgement et de fonctionnement des zones humides, janvier 2023.
- Webinaire ARRA, Gestion stratégique de la ressource en eau, janvier 2023
- Séminaire Forêt méditerranéenne, Forêt, sol et eau, des alliés naturels, Marseille, avril 203
- GDE workshop, Plan d'action national pour la recherche et la protection des écosystèmes dépendants des eaux souterraines, Niamey (Niger), avril 2023

- Comité de restitution ZHTB phase 1 : juin 2017
- Comité de restitution ZHTB phase 2 : février 2019
- Comité de restitution ZHTB phase 3 : fin 2023 / début 2024

- Comité de restitution ONF Aude : janvier 2023

Le Tableau 38 présente les tâches effectuées au Luitel lors des phases 2 et 3 du projet ZHTB.

Lors de la phase 3, au Luitel, les suivis ont continué (relevés des sondes et entretien des seuils). Concernant les différents volets de l'étude, les tâches suivantes ont été réalisées :

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

| |
|---|
| 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) |
| Installation de 1 sonde CTD : compléments du suivi en piézomètre existant (10/2019) |
| |
| Suivis hydrologiques : |
| Relevé des sondes : 11/2018, 04/2019, 07/2019, 10/2019, 05/2020, 07/2020, 10/2020, 04/2021, 07/2021, 10/2021, 07/2022 |
| Prochain relevé : 07/2023 |
| Nivellement des piézomètres / suivi volume tourbière (06/2018) |
| Nivellement des piézomètres / suivi volume tourbière (04/2019) |
| Essais d'eau : 07/2021 |
| |
| 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 |
| Géochimie : ions majeurs, isotopes de l'eau (07/2020) – basses-eaux |
| |
| Stages de master et post-doc |
| Caractérisation pédologique : stage master 1 EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2018) |
| Essai de modélisation soutien d'étiage : stage master EVS-EMSE, Y. Pascoletti (09/2018) |
| Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation pour réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019) |
| Articulation pédologie/géophysique : stage master 2 EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2019) |

Tableau 38 : Bilan des tâches effectuées au Luitel en phases 2 et 3 du projet ZHTB

Partie III – Conclusion

Le Tableau 39 présente les tâches effectuées à Frasne en phases 2 et 3 du projet ZHTB.

Lors de la phase 3, au Frasne, les suivis ont continué (relevés des sondes et entretien des seuils). Concernant les différents volets de l'étude, les tâches suivantes ont été effectuées :

- volet hydrologie : poursuite des travaux de modélisation et d'analyse statistique
- volet géophysique : analyse des données géophysiques
- volet géochimie : analyse des eaux de pluie, prélèvements pour analyse ions majeurs, isotopes de l'eau.

| |
|---|
| Autorisation d'étude : |
| Intégration au plan de gestion |
| Partage de données : |
| Bibliographiques, météorologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, géophysiques, pédologiques, écologiques |
| Instrumentation : |
| Installation de 2 sondes CTD : complément du réseau de suivi existant / cours d'eau tributaires de l'exutoire (06/2018) |
| Installation de 1 sondes CTD : complément du réseau de suivi existant / la doline du Creux au Lard (06/2018) |
| Installation de 1 sonde barométrique (06/2018) |
| Installation de 1 CTD : complément du réseau de suivi existant / exutoire (06/2019) |
| Suivis hydrologiques : |
| Relevé des sondes : 11/2018, 05/2019, 10/2019, 06/2020, 04/2021, 07/2021, 10/2021, 07/2022 |
| Prochain relevé : 07/2023 |
| 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 |
| Géochimie : ions majeurs, isotopes de l'eau (11/2020) – moyennes-eaux |
| Stages de master et post-doc |
| Analyse statistiques des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel et Stage de master EMA, H. Caldírak (06/2019) |

Tableau 39 : Bilan des tâches effectuées à Frasne en phases 2 et 3 du projet ZHTB

17.2. Bilan des stages et post-doc

| |
|--|
| Élaboration et démarrage du projet (phase 1) |
| Post-doc EMSE, J. Ré-Bahuaud |
| |
| Luitel : |
| Caractérisation pédologique : stage master EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2018) |
| Essai de modélisation soutien d'étiage : stage master EVS-EMSE, Y. Pascoletti (09/2018) |
| Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019) |
| Articulation volets géophysique/pédologie – Géométrie et structure 3D de la tourbière du Luitel, T. Jolly (09/2019) |
| Indicateur à l'échelle du site tourbeux : stage de master EMSE, S. Sadkou (09/2020) |
| Transferts hydrologiques : stage de master ONF-38, J. Charmot (09/2020) |
| |
| Frasne : |
| Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Stage de master EMA, H. Caldirak (06/2019) |
| |
| Autres stages : |
| Indicateurs à l'échelle du bassin versant, Post-doc EVS-ISTHME-EMSE-ONF Aude, M. Bertrand (11/2020) |

Tableau 40 : Stages et post-doc du projet ZHTB

18. Synthèse générale du projet ZHTB et perspectives

18.1. Synthèse du fonctionnement hydrologique du Luitel

Comme l'a montrée l'analyse bibliographique réalisée en phase 1 du projet ZHTB, le fonctionnement hydrologique des tourbières doit être appréhendé comme celui d'un complexe tourbeux (en mosaïque d'habitats) intégré dans son hydrosystème. Les eaux stockées (temporairement) et transitant dans un tel complexe ont des origines différentes dans l'espace et dans le temps. Le Luitel n'échappe pas à ce comportement. Les études réalisées dans les phases 2 et 3 du projet ZHTB permettent de mettre en avant les éléments suivants.

18.1.1. Sectorisation pédo-écologique

L'analyse croisée fondée sur la pédologie et la géophysique a permis de caractériser la tourbière du col en 3 grands secteurs pédo-écologiques ou « réservoirs » potentiels :

- Secteur / réservoir nord

Ce secteur inclut les piézomètres P1, P2, P3 et P7. Il correspond à la cuvette nord de la tourbière du Luitel. Au nord de cette cuvette, on observe des sols non-hydromorphes correspondant au remblai de la route. À l'ouest, on note la présence d'un fossé de drainage dont l'action de drainage de la tourbière a conduit à la minéralisation des horizons de surface (horizons assainis, faciès réduits au-dessus des unités tourbeuses). On constate une bonne dynamique tourbeuse dans le secteur de la pinède (moitié nord), mais vers le sud, il y a une extension latérale des réductisols et une dégradation de plus en plus marquée des histosols. La profondeur de l'acrotelme, constitué de tourbe mésique à saprique, est estimée à 1,5 m. Au-dessous, on trouve de la tourbe mésique à fibrique jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 8 m au niveau de la zone de fermeture de l'ancien lac tourbier (10,5 m pour le substratum). L'analyse de la tourbe montre une bonne capacité de stockage d'eau.

- Secteur central / réservoir central

Il s'agit de la zone sous-influence du ruisseau de Fontfroide incluant les piézomètres P4, P5, P6, P8 et P9. Ce secteur est marqué par la présence d'un horizon assaini (réduction de la profondeur ; pressions anthropiques : pâturage, drainage...) sur de la tourbe fibrique. Si la partie superficielle est dégradée et modifiée par la dynamique du cours d'eau de Fontfroide (faciès gyttja et organo-minéraux liés aux dépôts de Fontfroide ; sols dégradés et pseudotourbeux) les horizons fibriques sous-jacents peuvent assurer un stockage d'eau intéressant. L'analyse de la grande carotte de tourbe prélevée sur ce secteur (proche de P9) montre la disparition des horizons supérieurs liée à une dégradation relativement rapide de la tourbe (minéralisation et tassement).

- Secteur sud : 3 réservoirs

Ce secteur dont la profondeur peut atteindre 8 m inclut les piézomètres P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19 et P20. L'analyse pédo-géophysique distingue 3 réservoirs dans ce secteur.

Au nord-ouest, la pinède à sphaignes (zone bombée boisée) est caractérisée par une profondeur d'acrotelme estimée à 1 m (tourbe fibrique à mésique) et la présence d'un horizon assaini à 10 cm sous la surface avec reprise de la turfigenèse au-dessus. Cette limite potentiellement imperméable peut contraindre les écoulements dans cette zone et favoriser la rétention d'eau et expliquer la reprise de la turfigenèse en surface. En dessous de cette limite, on retrouve de la tourbe fibrique. La limite ouest est marquée par un fossé de drainage proche duquel (entre la route et la pinède et en périphérie du bombement) on observe des faciès paratourbeux plus compacts. L'analyse des fibres montre que ce secteur est intéressant pour le stockage d'eau.

Au nord-est, la zone de prébois est caractérisée par une profondeur d'acrotelme d'environ 1 m. On trouve en surface de la tourbe fibrique à saprique et de la tourbe fibrique en profondeur.

Enfin, *la partie sud* est marquée par de faibles profondeurs et des zones paratourbeuses. Les variations de niveau d'eau sont fortes et produisent potentiellement un léger déphasage du signal hydrologique. Les secteurs périphériques de la partie sud sont constitués de petites zones de marais réceptacles potentiels des eaux de pluie.

18.1.2. Comportement hydrologique

Globalement, l'analyse des données hydrologiques montre que le fonctionnement de la tourbière de Luitel est structuré par des cycles annuels.

L'analyse des débits du *Ruisseau de Fontfroide* et du *Ruisseau du Lac* montrent qu'ils sont caractérisés par un régime nivo-pluvial. Les étiages sont fortement marqués avec des périodes d'assec pour le Ruisseau du Lac, mais pas pour Fontfroide. Les débits spécifiques sont plus forts pour Fontfroide. L'étude des corrélations montre que : 1) l'influence de la température perdure pendant 2 mois ; 2) la corrélation pluie/débit est maximum à 1 jour avec un effet mémoire de 12 jours. On note que les pluies printanières plus abondantes sont plus vite assimilées par le système (ou plus vite évacuées ?).

L'analyse des coefficients d'écoulement montre soit une forte influence de l'ETP soit la présence de pertes dans le système. L'analyse statistique des débits montre 3 fonctionnements différents du ruisseau de Fontfroide (gros débit > Q5 ; majorité des débits de Q5 à Q90 ; faibles débits < Q90). Le débit d'étiage (Q90) est de l'ordre de 0,36 l/s.

Concernant la relation amont/aval du ruisseau de Fontfroide, on observe globalement plus d'eau à l'aval qu'à l'amont (sauf en été 2018 et en hiver 2019). Il y a globalement plus d'eau à l'aval quand le système est à saturation, mais moins lors de l'étiage. L'analyse des corrélations montre un effet mémoire de 7 jours et un impact de la température sur 25 à 40 jours.

Globalement, l'analyse des données des sondes ne montre pas de variations amont-aval réellement significatives sur Fontfroide (EC, T, Débit). Autrement dit, le ruisseau de Fontfroide ne semble pas modifié lors de la traversée de la tourbière. Ces analyses ne montrent pas de rôle de soutien d'étiage avéré de la tourbière vers le ruisseau de Fontfroide.

Concernant les *eaux souterraines*, l'analyse du *piézomètre P3* (zone nord) montre une période de basses-eaux en fin de période de fonte des neiges et une longue phase de tarissement (étiage) de juin à juillet/aout avec peu de précipitations. L'autocorrélation montre un effet mémoire 6 jours, le temps de réponse à la pluie est de 1 jour avec un effet mémoire d'une dizaine de jours ; la corrélation température/niveau est de 1 mois. Le piézomètre P3 montre donc une forte sensibilité à la fonte des neiges, à la pluie, à la température et à l'ETP.

Pour les *autres piézomètres*, le temps de mémoire (autocorrélations) est plus faible pour les piézomètres proches des fossés de drainage (39 à 86 jours selon les piézomètres). Globalement, le temps de réponse est de 1 jour et l'effet mémoire de 13 jours pour la relation pluie/niveau piézométrique.

À l'étiage, les petits épisodes pluvieux ont peu d'impact sur la piézométrie. Seules les grosses pluies d'été provoquent une réponse rapide des piézomètres et une forte hausse du niveau d'eau. Ce surplus d'eau est par ailleurs évacué rapidement avant la reprise du tarissement. La fin de l'étiage est souvent marquée par un gros orage suivi de petites pluies fréquentes.

L'analyse en 3 dimensions de la tourbière du col permet de préciser les volumes de tourbes et d'eau en jeu et de préciser le bilan hydrologique. Lors des étiages 2020 et 2019, le volume de tourbe concerné par la baisse du niveau piézométrique est, respectivement : 1) pour la zone nord, 5 624 et 2 576 m³ ; 2) pour la zone sud, 37 410 et 16 005 m³. Le calcul des volumes d'eau potentiellement déstockés par gravité à l'étiage pour une porosité totale de 100% et une porosité efficace de 35% donne les résultats suivants :

- *pour le secteur nord*, les volumes d'eau en jeu sont de 1 968 m³ à l'étiage 2020 et 892 m³ à l'étiage 2019. En 2020, sur la durée de l'étiage, la perte d'eau totale est de 0,3 l/s, elle tombe à 0,09 l/s si on intègre au calcul les pertes par ETP et les apports liés à la pluie (P). En 2019, la perte totale est de 0,41 l/s et celle intégrant l'ETP de l'ordre de 0,07 l/s (ETP + P).
- *pour le secteur sud*, les volumes d'eau en jeu sont de 13 094 m³ (étiage 2020) et de 6 602 m³ (étiage 2019). Pour l'étiage 2020 les pertes varient de 2,02 l/s (pertes totales) à 1,11/S (pertes intégrant ETP et P). En 2019, les pertes varient de 2,59 l/S (pertes totale) à 0,98 l/s (pertes intégrant ETP et P).

Pour l'étiage 2020, la perte d'eau de la tourbière sur la durée de l'étiage est comprise entre 1,2 et 2,32 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 2,2 l/s

Pour l'étiage 2019, la perte d'eau de la tourbière sur la durée de l'étiage est comprise entre 1,05 et 2,52 l/s pour un débit moyen de Fontfroide de l'ordre de 1,1 l/s.

Ces résultats montrent qu'il existe un potentiel de déstockage gravitaire d'eau de la tourbière vers Fontfroide. Toutefois, ce bilan ne doit pas occulter les incertitudes concernant l'ETP, les mesures de débits, les propriétés hydrodynamiques et les inconnus comme les apports et fuites diffuses. Concernant les propriétés hydrodynamiques, la porosité efficace est estimée uniquement à partir de l'analyse de la tourbe et est comprise entre 10 et 35%. Les valeurs de conductivité hydraulique quant à elle sont très différentes selon que l'on se réfère aux essais d'eau avec des valeurs comprises entre 10^{-6} et 10^{-7} m/s à l'étiage ou à l'analyse de la tourbe avec des valeurs globalement plus fortes et comprises entre 10^{-1} et 10^{-5} m/s.

Des essais de modélisation par réseaux de neurones produisent de débits de Fontfroide négatifs sur certaines périodes d'étiage. Cela montre un fonctionnement hydrologique différent pour ces périodes. Ce comportement apparaît en période sèche (stress hydrique) lorsque l'on a moins de 150 mm de pluie sur 30 jours ou moins de 250 mm sur 60 jours sans lien avec la température et l'ETP. L'effet sécheresse est donc plus important. Ce phénomène peut être expliqué d'au moins deux façons :

- la tourbière et les sphaignes se mettent en mode « défense » en limitant ou en annulant la perte d'eau par ETP (blanchiment des sphaignes) ce qui permet de soutenir les débits plus longtemps que prévu par le modèle ;
- il existe des apports d'eau souterraine de l'encaissant vers la tourbière et/ou le Ruisseau de Fontfroide qui permettent le soutien des débits.

18.1.3. Points clefs de la sectorisation pédo-écologique et l'analyse du comportement hydrologique

On retiendra de la caractérisation de la sectorisation pédo-écologique et de l'analyse du comportement hydrologique que :

- 3 réservoirs principaux sont identifiés dans la tourbière : 1) nord-œil de la tourbière ; 2) sud-ouest-tourbière bombée-boisée ; 3) sud-est-prébois ;
- 3 types d'écoulement sont envisagés compte-tenu de la structure de la tourbière : 1) ruissellement-très rapide ; 2) circulation dans la tourbière assez rapide ; 3) circulation dans la tourbière lente. Il existe des horizons superficiels (30 cm) très fibriques avec des propriétés hydrodynamiques estimées (fortes conductivités hydrauliques et porosités efficaces estimées) permettant une circulation potentiellement rapide de l'eau. Sous ces horizons la conductivité décroît laissant supposer des circulations d'eau plus lentes.
- sans surprise, les réserves d'eau potentielles se font dans le compartiment souterrain du complexe tourbeux, la plupart des secteurs ayant un potentiel de réserve/stock plus ou moins important. Ce potentiel reste à relativiser en fonction : 1) de la porosité efficace qui peut être faible si l'eau est fortement liée à la tourbe ; 2) de l'épaisseur et la structure des sols et histosols. Ceci induit une variation spatiale de la capacité de stockage ;
- les zones périphériques paratourbeuses peuvent potentiellement/temporairement jouer un rôle important dans le stockage d'eau, le transfert d'eau et la réception des eaux de versant ;
- le temps de réponse à la pluie rapide (1 jour) dans la tourbière et à l'exutoire (Fontfroide).
- l'effet d'une pluie est court sur les niveaux d'eau dans la tourbière et les débits à l'exutoire (Fontfroide) : 12 à 13 jours (effet mémoire) ;
- l'effet mémoire des piézomètres proches des fossés de drainage est plus faible, ces secteurs ont donc un potentiel de stockage dans le temps plus faible et vraisemblablement de déstockage plus fort en raison des conditions drainantes induites par les fossés ;
- les pluies de printemps semblent plus rapidement assimilées par le système au regard d'autres périodes ; les petites pluies d'été ont peu d'impact sur le niveau piézométrique ;
- il existe des périodes de forts stress hydrique liées à l'absence de précipitations où la tourbière peut limiter l'ETP et/ou compter (ainsi que Fontfroide) sur des apports d'eau souterraine de

l'encaissant. Ce changement dans le fonctionnement hydrologique lors de sécheresse prolongée apparaît lorsque l'on a moins de 150 mm de pluie sur 30 jours ou moins de 250 mm sur 60 jours ;

- le débit d'étiage (Q90) est de l'ordre de 0,36 l/s. Si le bilan hydrologique montre que quantitativement un soutien d'étiage de la tourbière à Fontfroide est possible, l'analyse amont-aval des données de Fontfroide ne permettent pas de mettre en avant un soutien d'étiage avéré. Toutefois, les débits de Fontfroide sont légèrement plus importants à l'aval qu'à l'amont à saturation (période humide) ; c'est l'inverse en période sèche.

18.1.4. Cheminement de l'eau et sectorisation hydrologique par approche géochimique

En phase 2, les premières investigations réalisées au Luitel ont montré qu'il est nécessaire de considérer la tourbière comme un complexe tourbeux en interaction avec l'hydrosystème local. Ce premier travail avait permis de mettre en évidence plusieurs « réservoirs » en interaction dans le temps et dans l'espace et des comportements hydrologiques différents. En effet, les eaux contenues dans le complexe tourbeux ont des origines temporelles et spatiales différentes impliquant potentiellement des influences différentes, des délais dans les transferts et des mélanges potentiels. Les travaux réalisés en phase 3 ont permis de compléter la sectorisation hydrologique et le cheminement des eaux.

L'analyse des cartes piézométriques du Luitel montre que :

- il existe un gradient hydraulique nord-sud dans le réservoir nord qui communique avec la zone centrale vraisemblablement dans le mètre supérieure de tourbe. La connexion hydraulique est active principalement en hautes-eaux. En basses-eaux, le flux devient faible voire nul ;
- dans la zone centrale le gradient hydraulique est orienté du versant est vers Fontfroide et l'exutoire. Le ruisseau de Pezanti quant à lui possède son propre exutoire au nord de la tourbière du col de Luitel. Son fonctionnement influe peu sur le complexe tourbeux ;
- dans la zone sud le gradient hydraulique est orienté du versant est vers l'exutoire de Fontfroide.

Des transferts d'eau sont donc possibles des zones nord et sud vers le compartiment central de la tourbière. Ces transferts d'eau sont à relativiser compte-tenu des faibles conductivités hydrauliques estimées par essais d'eau à l'étiage et des faibles gradients hydrauliques. Globalement, on observe dans tous les piézomètres de ces réservoirs une baisse du niveau plus rapide que celle prévue par le bilan hydrologique ce qui peut signifier que l'ETP est sous-estimée ou qu'il existe des fuites diffuses.

De plus, le comportement de certains piézomètres laisse présager des interactions hydrauliques avec l'hydrosystème local. Le tarissement plus rapide du piézomètre P15 pourrait signifier la diminution ou l'arrêt des apports de versants et/ou de l'encaissant durant l'étiage. La hausse de l'EC au cœur de l'étiage dans le piézomètre P4 pourrait souligner un apport d'eau souterraine de l'encaissant.

Pour aller plus loin dans l'interprétation du cheminement de l'eau et dans l'établissement d'une sectorisation hydrologique, il était nécessaire de mettre en œuvre une approche géochimique. Cette approche s'appuie a priori sur la sectorisation suivante incluant un certain nombre de piézomètres : 1) Zone nord : P1, P2, P3, P7 ; 2) Zone centrale : P4, P5, P6, P8, P9, P18 ; 3) Zone sud : P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P19, P20.

Les prélèvements dans le ruisseau de Fontfroide montrent une variation du rapport Cl/Na de l'amont vers l'aval. Lorsqu'il arrive à la tourbière de Luitel, et compte-tenu des apports constatés, ce ruisseau est potentiellement alimenté : 1) par un réservoir souterrain (influence des interactions eau-roche dans un réservoir triasique ?) et/ou 2) des eaux de lessivage des sols ou enrichies par des sels routiers. Le Ruisseau de Pezanti montre quant à lui un enrichissement global de toutes les espèces dissoutes de l'amont vers l'aval. Il est donc aussi potentiellement alimenté à l'amont de la tourbière par des eaux issues d'un réservoir souterrain (influence des interactions eaux-roche). Les apports en Na/Cl sont moins marqués que pour Fontfroide contrairement au Ruisseau du lac où ils ont plus marqués.

Les 3 ruisseaux semblent donc avoir des aires d'alimentation différentes notamment Pezanti et Fontfroide pour lesquels la différence est bien marquée. La recharge se fait vraisemblablement à plus haute altitude pour Fontfroide ou à une saison plus froide. On note que les eaux du captage du Luitel ont la même origine que celles de Fontfroide. Les fossés de drainage quant à eux drainent des eaux de pluie dont la qualité est peu modifiée quand la tourbière est saturée en eau.

Partie III – Conclusion

En l'état, les eaux du ruisseau de Fontfroide ne sont pas modifiées chimiquement lorsqu'il traverse la tourbière du Luitel notamment à l'étiage. Il ne semble donc pas y avoir d'effet drainant du ruisseau sur la tourbière. De ce point de vue, la tourbière ne semble donc pas avoir de rôle de soutien d'étiage envers Fontfroide. Inversement, les eaux du ruisseau de Fontfroide ou de son bassin versant modifient un peu la signature chimique des eaux de la tourbière.

L'analyse et l'interprétation des rapports isotopiques de l'eau et des concentrations en espèces dissoutes dans les eaux du complexe tourbeux et de l'hydrosystème local permettent de distinguer 3 masses d'eau principales (M1, M2, M3) qui influencent la tourbière du col et des tendances intermédiaires reflétant vraisemblablement des mélanges d'eau. L'influence de ces 3 masses d'eau est différente selon l'état hydrologique :

- en moyennes-eaux :

- . le secteur nord (P1, P2, P3, P7) est principalement alimenté par la masse d'eau 1 (M1), c'est-à-dire des eaux superficielles (pluie) ;
- . le secteur sud est géochimiquement indépendant du secteur nord. On distingue un apport d'eau de versant (masse d'eau 2 : M2) pour les piézomètres P8, P9, P20, P12 et P19) et des transferts plus lents liés à des interactions eaux-roche (masse d'eau 3 : M3) pour les piézomètres P11 et P15 ;
- . en zone centrale, dans le secteur sud et dans les fossés de drainage, on fait l'hypothèse d'une alimentation mixte (2 masses d'eau : M2 et M3) pour les piézomètres P4, P6, P13, P14, P18. P17 se distingue par une alimentation mixte de M1 et M2.

- en basses-eaux :

- . l'influence des eaux à transfert lent (M3) est prépondérante : au nord (P3 et P2) et au sud (P10, P12, P13, P14, P15, P16, P18, P19, P20) ;
- . alimentation à partir des apports de versants (M2) persiste pour P4. On note que pour ce piézomètre la hausse rapide de l'EC qui intervient quelques jours après le prélèvement, marquant potentiellement un changement d'influence pour M3 ;
- . la partie centrale (P5, P6, P9) est alimentée par un mélange d'eau de versant (M2) et d'eaux à transferts lents (M3). P1 et P7 sont aussi dans ce cas dans la partie nord.

Au final, les trois masses d'eau et leur influence peuvent être décrites de la façon suivante :

- M1 : eau de pluie peu évoluée / pas d'interaction eau roche

- . transfert rapide vers les fossés de drainage ;
- . en moyennes-eaux dans le réservoir nord et au sud dans P17. Ce mélange est potentiellement contraint par la présence d'un horizon assaini proche de la surface dans la zone bombée.

- M2 : apport versants (interaction eau-roche faible)

- . 3 aires d'alimentation potentielle : ruisseaux du lac, de Fontfroide, de Pezanti / sous-écoulement ou écoulement souterrain à court/moyen terme ;
- . aire de recharge en altitude (formations triasiques ?) ou en saison plus froide pour Fontfroide ;
- . en moyennes-eaux, principale alimentation des zones centrale et sud, complétée par des apports de M3 dans la zone sud ;
- . en basses-eaux, alimentation principale complétée par des apports de M3 dans le réservoir nord (écoulement hypodermique) et dans la partie centrale.

- M3 : eau souterraine (interactions eau-roche modérés à plus long terme)

- . recharge à plus faible altitude que M2 ou recharge avec des pluies lors de saisons plus chaudes qui alimentent le réservoir sud en basses-eaux et la zone centrale (en mélange avec M2) en moyennes-eaux ;
- . source principale pour l'alimentation du réservoir nord en basses-eaux.

La Figure 205 présente la sectorisation pédo-écologique des réservoirs, les aires d'alimentation et les flux hydrologiques pour la tourbière du col (Luitel).

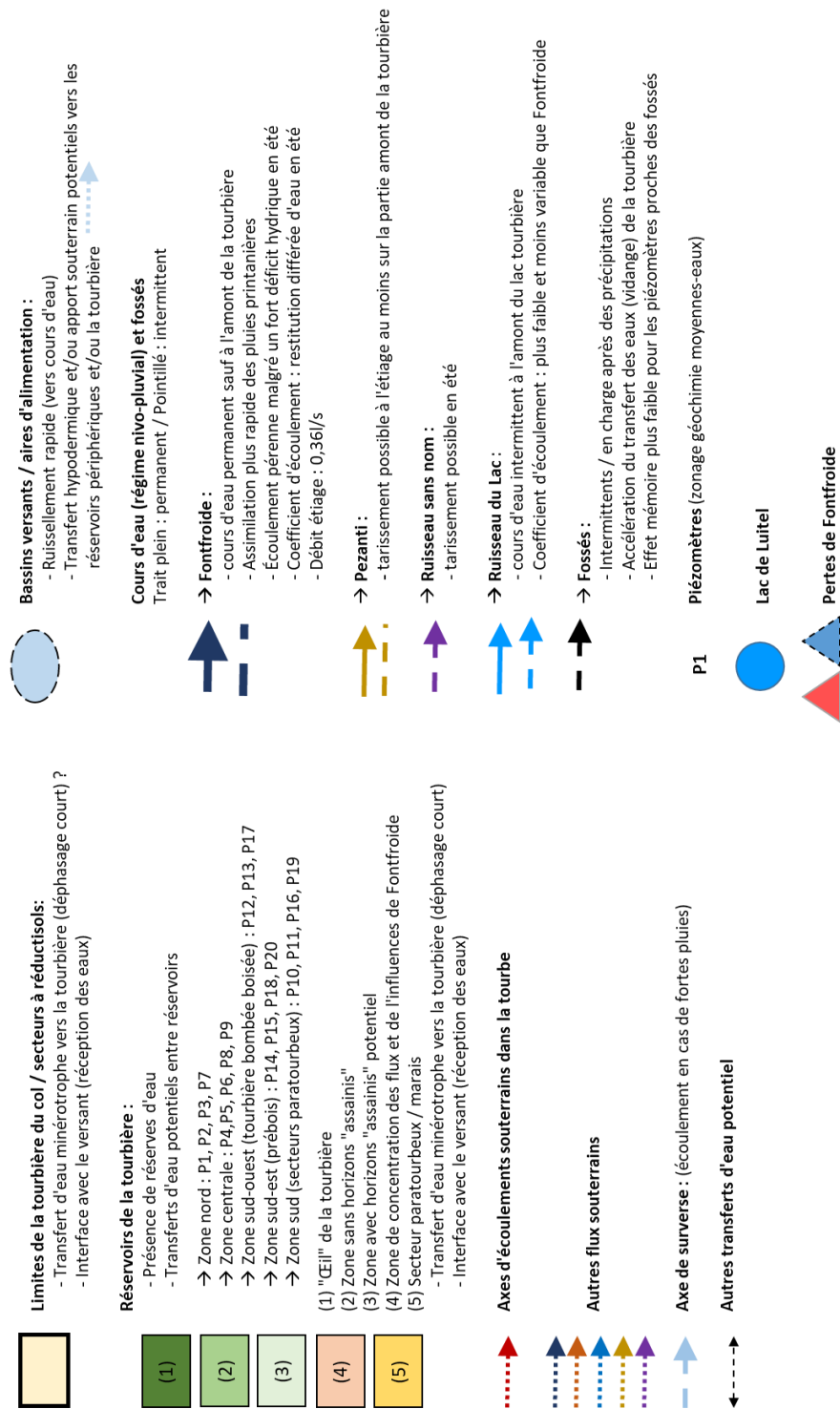


Figure 204 : Légende de la Figure 205

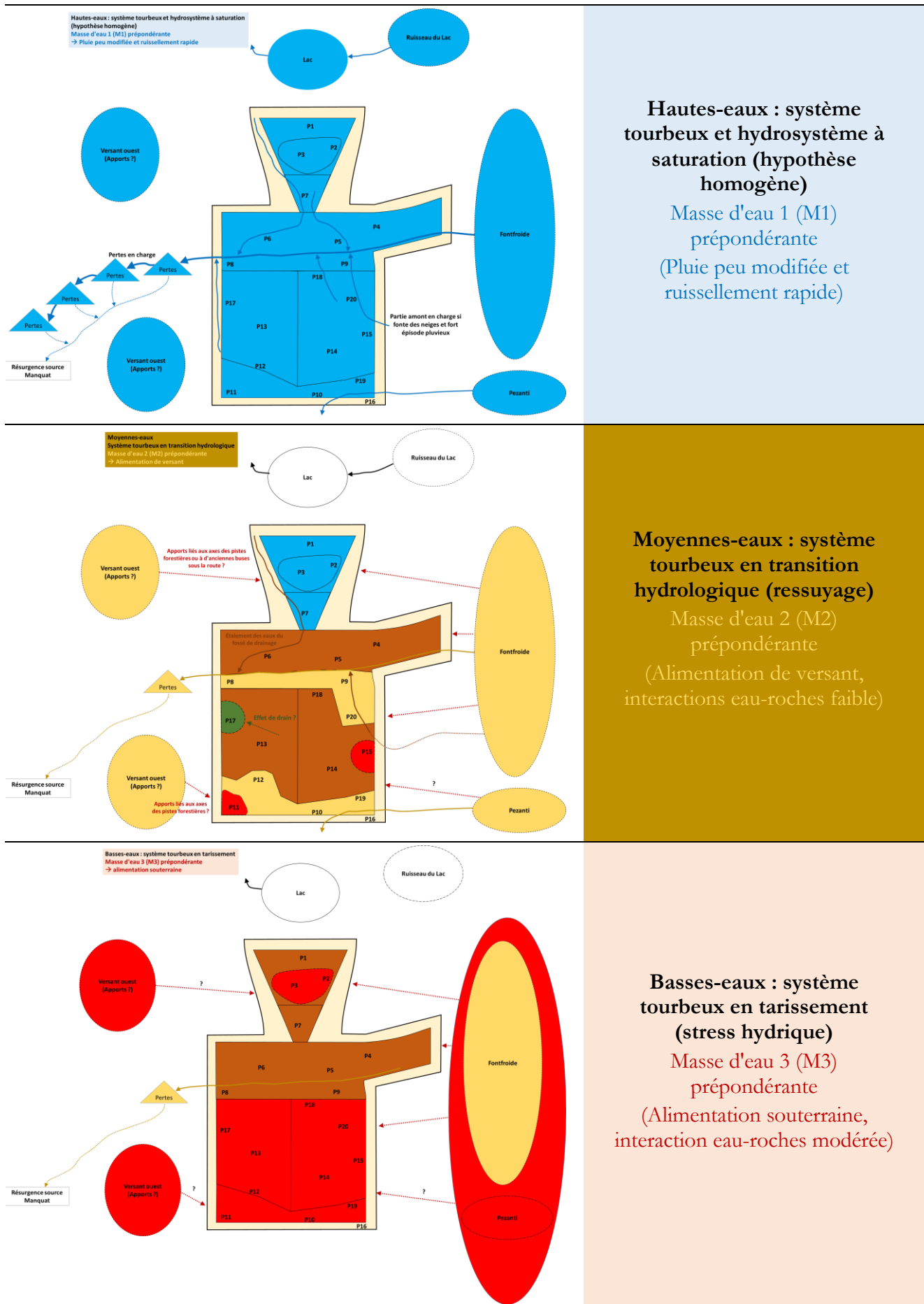


Figure 206 : Variations saisonnières du comportement hydrologique de la tourbière du col (Luitel)

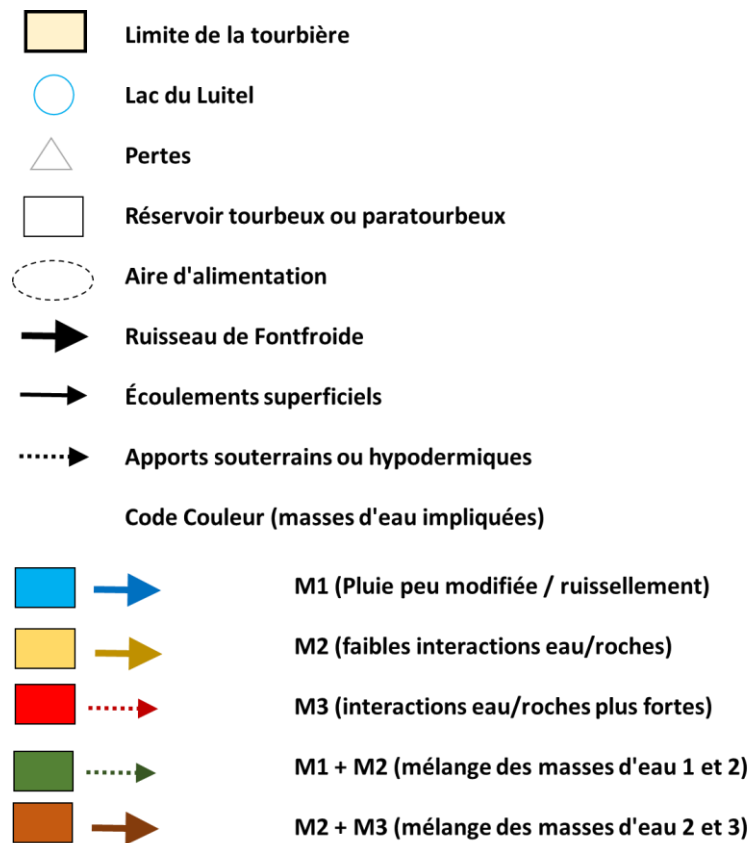


Figure 207 : Légende la Figure 206

18.1.5. Interprétations des variations saisonnières du comportement hydrologique

Les travaux réalisés sur la tourbière du Luitel permettent d'interpréter son fonctionnement hydrologique et ses variations saisonnières, ou tout au moins de faire des hypothèses sur le fonctionnement hydrologique de la tourbière pour 3 situations caractéristiques (Figure 206).

Hautes-eaux

Même si nous ne disposons pas de campagne de géochimie en hautes-eaux, nous pouvons supposer, au regard des chroniques piézométriques, qu'en période pluvieuse la tourbière est rapidement en état de saturation hydrologique. Après les périodes de basses-eaux (hivernales, post fonte des neiges au printemps, étiage estival), les pluies printanières et automnales sont en mesure de saturer la tourbière en eau. Les secteurs proches de fossés de drainage et les zones périphériques paratourbeuses sont gorgés d'eau. La tourbière est alimentée majoritairement par des eaux de surface (masse d'eau M1) : eaux météoriques « directes » et eaux de pluies transportées par les cours d'eau (Fontfroide, Pezanti, Ruisseau du Lac) vers la tourbière (sauf pour la zone nord dépourvue de ruisseau l'alimentant). On peut supposer que les apports par les autres masses d'eau (M2 et M3) coexistent mais ne sont pas prépondérants car dilués par les pluies et/ou la fonte des neiges.

À cette période, la zone centrale et Fontfroide est connectée aux zones nord et sud par un écoulement superficiel significatif. Les transferts d'eau de surface sont très rapides : 1) via les fossés de drainage, pour l'évacuation de l'eau en surplus ; 2) via les cours d'eau, pour les apports à la tourbière ; 3) par ruissellement de surface sur la tourbière. On note de plus qu'à saturation la partie amont du ruisseau sans nom (tronçon à proximité de P20 et P15) se met en charge au printemps si l'on a simultanément un fort épisode pluvieux couplé à la fonte des neiges. Lors de ce type d'évènement, le système de pertes est en charge, le trop-plein s'écoulant dans quatre cuvettes successives. Les eaux s'infiltrent depuis les pertes vers une résurgence aval à plus faible altitude : la source Manquat.

À saturation, les eaux de pluie et/ou de fonte sont évacuées assez rapidement mais persistent dans la zone nord en moyennes-eaux et dans le piézomètre P17 en mélange avec M2. Pour ce dernier, il s'agit potentiellement du transfert différé d'eau de pluie stockée dans la zone bombée. Ce transfert est potentiellement contraint (faible conductivité hydraulique) par la présence d'un horizon assaini à faible profondeur dans la zone bombée et d'un fossé de drainage.

Moyennes-eaux

Les traceurs géochimiques montrent une forte influence globale des eaux de versant (M2) et des ruisseaux sur la tourbière avec 3 aires d'alimentation différenciées : Ruisseau du lac, Ruisseau de Fontfroide et Ruisseau de Pezanti. Pour le ruisseau de Fontfroide, les eaux sont marquées par une influence des interactions eau-roches faible et une recharge en altitude ou lors de la saison froide (eau de fonte des neiges). Il s'agit d'écoulements hypodermiques à court/moyen terme. Une partie des eaux pourrait provenir des formations triasiques de La Balme ou du secteur de la tourbière de l'Arselle (eau d'altitude ou de fonte des neiges) dans les deux cas via le réseau de failles.

Les fossés ne montrent plus d'écoulement ou écoulement très faible. Les eaux du fossé nord s'étalent dans la zone humide à proximité de P6. Le ruisseau sans nom s'écoule lentement vers Fontfroide, mais la partie amont n'est plus en charge.

Cette période est marquée par des écoulements assez rapides, vraisemblablement dans l'acrotelme. Les dernières eaux de pluie stockées dans la tourbière bombée sont vraisemblablement évacuées en bordure ouest de la zone sud (P17). Les eaux de versants sont prépondérantes dans la partie centrale et dans la partie sud de la tourbière, seules ou en mélange avec de eaux souterraines (M3). On peut supposer que l'origine de ces eaux (M2) est située sur le versant est. Toutefois, leur présence dans le piézomètre P12 ou dans le fossé de drainage Fo3 (zone nord de la tourbière) pourrait laisser supposer une alimentation par le versant ouest, voire une alimentation en eau souterraine (M3) par le versant ouest au niveau de P11. Ces apports pourraient être liés aux axes d'écoulement dessinés par les pistes forestières voire à la présence d'anciennes buses sous la route dans le secteur nord. On note des apports de la masse d'eau M3 sur le versant est dans le secteur de P15.

La zone nord où il n'y a pas ou peu d'écoulement reste fortement influencée par les eaux de pluie (M1). Les transferts sont vraisemblablement limités en fin de drainage par le fossé ouest et par les propriétés hydrodynamiques de la tourbe et le faible gradient hydraulique. De plus, les apports de versant sont ralentis par l'absence de cours d'eau.

Basses-eaux

Les traceurs géochimiques montrent des apports caractérisés d'eaux souterraines (M3) à la tourbière marqués par les interactions eaux-roches. De plus, l'existence d'une autre masse d'eau potentielle est possible. Elle serait liée à des apports différés (fonte des neiges) ou à une recharge à faible altitude (pour le réservoir sud et la zone centrale).

À cette période, la zone sud et la zone nord (sauf P1 qui montre une influence mixte de M1 et M2) sont donc marquées par des eaux souterraines et des circulations lentes. La tourbière entre en stress hydrique et est soutenue par « un signal de fond » : des eaux souterraines à circulation lente marquées par les interactions eaux-roches. Seule la partie centrale est encore influencée par des eaux de versants (M2) mélangées aux eaux de M3. Le ruisseau de Fontfroide est tari à l'amont mais garde la signature de la masse d'eau M2 de l'amont à l'aval de la tourbière. Le flux d'étiage s'infiltré toujours dans les pertes même s'il est très faible. Les ruisseaux de Pezanti et du Lac sont quant à eux taris ainsi que tous les fossés et le ruisseau sans nom.

À travers ces résultats et leur interprétation, on voit donc bien que plusieurs sources (origines) d'alimentation en eau prennent le relais au fil de l'année pour garantir sinon la saturation mais au moins un apport d'eau continu dans la tourbière. Les apports de versants semblent jouer un rôle important dans l'alimentation du ruisseau de Fontfroide même s'il n'est pas possible, compte-tenu des données disponibles, de déterminer précisément l'origine des apports et leur importance relative. Cet apport semble perdurer même en période de stress hydrique dans la zone centrale. On note toutefois que lors

du fort étiage 2022, mi-juillet, les piézomètres P6 et P7 étaient quasiment à sec. En cas d'étiage prolongé, l'influence de cet apport pourrait fortement diminuer pour laisser la place aux apports d'eau souterraine de l'encaissant qui semblent quant à eux jouer le rôle d'un signal de fond faible mais continu.

18.1.6. *Étiage, soutien d'étiage et soutien de tourbière*

L'analyse comparative du ruisseau de Fontfroide et du ruisseau du Lac montre des comportements différents. Il s'avère que le ruisseau de Fontfroide qui traverse une tourbière, au contraire du Ruisseau du Lac, montre : 1) une restitution de l'eau de pluie plus fortement différée ; 2) un coefficient d'écoulement plus élevé en été. Ces constatations vont dans le sens d'un rôle de soutien d'étiage de la tourbière de Luitel.

Toutefois, l'analyse des données hydrologiques amont-aval et des traceurs géochimiques ne montrent pas d'évolution significative de la composition chimique des eaux de Fontfroide lors de la traversée de la tourbière. **Ceci tendrait à signifier que le ruisseau de Fontfroide est déconnecté de la tourbière et qu'il n'apporte pas d'eau à celle-ci à l'étiage. Ces analyses ne permettent pas de mettre en avant un soutien d'étiage avéré.**

Le débit d'étiage de Fontfroide (Q90) est de l'ordre de 0,36 l/s. Des essais de modélisation effectués en phase 2 du projet ZHTB, avaient mis en avant un soutien d'étiage modélisé compris entre 0,21 à 0,06l/s (302,4 à 86,4 l/jour) pour 2018 selon les périodes. Le bilan hydrologique calculé pour l'étiage 2019 donnait un débit de perte d'eau par gravité de la tourbière compris entre 1,05 et 2,52 l/s.

Il est vraisemblable que ces débits estimés correspondent au soutien de la tourbière à l'étiage par les apports en eaux souterraines de l'encaissant. Ce résultat, s'il est un peu décevant compte-tenu des objectifs du projet ZHTB, n'est pas étonnant compte-tenu de la revue bibliographique réalisée en phase 1 et des conditions de maintien d'une tourbière. Rappelons que pour qu'une tourbière se maintienne, elle doit être saturée en eau au moins 9 mois de l'année sous peine de voir les horizons asséchés se minéraliser et se tasser. Pour perdurer, elle doit avoir un bilan hydrologique excédentaire, autrement dit, elle doit être située dans un contexte lui permettant de stocker le maximum d'eau en perdant le moins possible.

Au Luitel, la localisation de la tourbière dans des cuvettes supposées imperméables permet le stockage direct de l'eau météorique qui tombe pour l'instant en quantité suffisante pour assurer la pérennité du système tourbeux. Lors des périodes sèches plusieurs réservoirs de l'hydrosystème local (plusieurs aires d'alimentation de versant, apports d'eaux souterraines) apportent de l'eau à la tourbière. Au plus fort de l'étiage, lorsque le système est en stress hydrique les orages, suivis des pluies d'automne, sont les bienvenus pour saturer de nouveau le système. Au final, ce résultat montre que la tourbière bénéficie d'apports en eau variés (précipitations, ruissellement, eaux souterraines) essentiels à son fonctionnement et à sa saturation. Cet hydrosystème est complexe et en interactions avec son bassin versant, ce n'est pas un système fermé.

En somme, la pérennité de la tourbière du Luitel semble intimement liée aux apports météoriques directs et aux précipitations différées. Si le régime des précipitations est modifié par les changements climatiques (ex : augmentation de la durée des périodes de sécheresse, diminution des précipitations annuelles, modification de la répartition des précipitations concentrées sur quelques événements extrêmes...) la tourbière est en danger. À l'échelle locale, les leviers d'actions sur le climat sont quasiment inexistants. Au Luitel, il est en revanche possible d'envisager des leviers pour favoriser le stockage d'eau dans la tourbière (ex : rehausse de la cote de l'exutoire vraisemblablement modifié et abaissé lors de la construction de la route) et limiter le drainage de la tourbière et la perte d'eau (ex : comblement des fossés de drainage). D'autres leviers d'actions peuvent aussi être envisagés à l'échelle de l'hydrosystème local afin de ne pas perturber, voire de restaurer, les flux hydrologiques qui contribuent à l'alimentation du site tourbeux.

Cela étant, il reste un certain nombre de questions non résolues pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique du Luitel et parmi elles :

- Existe-t-il des pertes d'eau ponctuelles (localisées dans l'espace et dans le temps), vraisemblablement de faible importance, au fond de la tourbière ?
- Quelles sont les interactions Pezanti/tourbière ?
- La localisation de la limite des partages des eaux Pezanti/Fontfroide est-elle variable dans le temps ?
- Quelles sont les interactions lac/tourbière du col ?
- Quelles sont les proportions de mélange des eaux contenues dans la tourbière ?
- Pour M2 et M3, préciser les origines pour mieux identifier les menaces pesant sur ces eaux ?
- Quelles sont les caractéristiques biogéochimiques des eaux les plus profondes de la tourbière et leur période de renouvellement ?
- ...

18.1.7. Changement d'échelle (espace et temps)

Si l'on regarde vers le passé, les archives tourbeuses du Luitel permettent de remonter le temps depuis le début de la turfigenèse sur le site à la fin des dernières glaciations. Nous disposons de 2 carottes de tourbes : 1) une première dans la zone nord d'une profondeur de 10,5 m couvrant environ 15 000 ans BP ; 2) la seconde dans la zone centrale d'une profondeur de 4,5 m couvrant environ 9 500 ans BP.

L'analyse de la seconde carotte montre que les conditions hydroécologiques ne sont pas constantes dans le temps au Luitel. On distingue 3 périodes :

- . 9 500 à 5 000 ans BP (-4,5 à -1,5 m) : au-dessus des dépôts lacustres, on observe de la tourbe saprique avec fraction minérale (apports d'eau ruissellement) présentant une accumulation régulière (carex et jonc) et indiquant une stabilité du contexte hydroécologique pour la période ;
- . 5 000 au 18^e/19^e siècle (-1,5 à 15 cm) : on observe une tourbe mésique à fibrique montrant une accumulation rapide (sphaignes) indiquant un changement des conditions hydroécologiques avec un climat plus froid et plus humide très favorable à la turfigenèse. Toutefois, on observe aussi les traces des premiers impacts anthropiques agropastoraux ;
- . 18^e/19^e à nos jours (-15 à 0 cm) : présence d'horizons assainis témoins d'une minéralisation et d'un tassement de la tourbe résultant d'un climat plus sec et d'un abaissement de la nappe. La minéralisation des horizons tourbeux s'accompagne de relargage de GES (gaz à effets de serre) et d'une destruction des archives tourbeuses ; il reste uniquement 58 cm pour les derniers 4 000 ans. On note que la zone nord a été moins sujette à la destruction puisqu'il reste 6 m de tourbe fibrique couvrant une période de 4 500 ans BP.

Maintenant, si l'on regarde au-delà du site et de l'échelle du complexe tourbeux, l'intégration l'hydrosystème local, voire régional, permet de mieux appréhender la complexité des flux hydrologiques qui alimentent le site tourbeux et garantissent sa pérennité. De plus, il semble intéressant d'étudier le potentiel de soutien d'étiage et/ou d'écrêtage de crue des zones humides à l'échelle de bassins versants ou de sous-bassins versants comme nous le faisons actuellement sur la haute-vallée de l'Aude avec l'ONF 11.

18.2. Synthèse du fonctionnement hydrologique de la tourbière de Frasne

La description du système tourbeux de Frasne réalisée en phase 2 du projet montre que ce site est d'une grande complexité : il a une emprise spatiale importante (environ 300 ha) structurée par une mosaïque de milieux et d'habitats. Il s'avère donc plus difficile à appréhender que la tourbière du Luitel qui, si elle aussi est composée d'une mosaïque d'habitats, est 30 fois plus petite. De plus, même s'il existe comme au Luitel des chroniques de données assez longues, le niveau de connaissance initiale est bien plus faible : 1) les limites du système et des aires d'alimentation en eau sont plus difficiles à préciser a priori ; 2) des travaux de réaménagement de la tourbière active coupent les chroniques de données en deux car ils ont provoqué une hausse significative du niveau d'eau dans la tourbière active (environ 0,3 à 0,5 m) et le bas-marais.

Comme au Luitel, les résultats préliminaires acquis en phase 2 montrent une interdépendance des différentes variables dans le temps et dans l'espace. Le fonctionnement hydrologique de cette tourbières doit donc être appréhendé comme celui d'un complexe tourbeux intégré dans son hydrosystème (incluant des influences régionales). Les eaux stockées (temporairement) et transitant dans un tel complexe ont vraisemblablement des origines différentes dans l'espace et dans le temps. Toutefois, face à l'étendue du système tourbeux de Frasne, le travail a été ciblé sur le secteur de la tourbière active et de son exutoire pérenne (côté est). Les études réalisées dans les phases 2 et 3 du projet ZHTB permettent de mettre en avant les éléments suivants.

18.2.1. Géométrie et structure

La prospection géophysique dans le complexe tourbeux de Forbonnet a permis de préciser de manière claire la topographie de l'interface substratum-tourbière sur 2 transects ouest-est et 2 transects nord-sud. L'interprétation de cette interface est validée par des sondages à la perche dont les plus profonds montrent une épaisseur de tourbe pouvant atteindre 5 m. Si l'on se réfère aux modèles d'âge construits à partir de 3 carottes de tourbe prélevées à Frasne, la relation âge profondeur est variable selon les secteurs. Selon les carottes, l'âge estimé peut atteindre 7 400 ans BP (Before Present) pour 4,35 m de tourbe ou seulement 1 000 ans BP pour 3,5 m. On note que le secteur de la tourbière active est plus jeune que le secteur de la tourbière bombée. Ce constat est logique. Il rend compte de la dynamique de comblement, le stade bombé correspond à l'évolution ultime avant le boisement

L'interprétation des profils montre l'existence d'un bombement du substratum dans la partie centrale du site à mi-distance entre le nord-ouest du complexe tourbeux et l'exutoire de la tourbière active (Figure 208). Ce bombement marque potentiellement la limite de deux aires d'alimentation de la nappe dans la tourbe et deux sens d'écoulement différents : 1) l'un d'est en ouest vers le secteur de la tourbière bombée (zone nord-ouest) ; 2) l'autre d'ouest en est vers l'exutoire de la tourbière active. Cette limite reste toutefois à préciser. En surface toutefois, un écoulement ouest-est vers l'exutoire est possible. Combiné aux autres limites connues des aires d'alimentations résultant des travaux d'aménagement et au positionnement supposé des moraines (Figure 208), l'espace s'organise en 3 grands secteurs distincts : 1) Zone nord-ouest (tourbière bombée) ; 2) Zone nord-est et tourbière active ; 3) Zone sud et Creux au Lard.

De plus, l'interprétation des profils géophysiques met en évidence des structures (interfaces), qui restent à valider par des investigations de terrain (ex : carottes de tourbes, sondages complémentaires...) et qui permettraient de préciser :

- la topographie vallonnée du substratum à l'amont de l'exutoire principal, marquant vraisemblablement des drains d'écoulement préférentiels de la nappe d'ouest en est ;
- des anomalies du substratum interprétables comme des conduits karstiques ou des dolines à l'aval de la tourbière active constituant potentiellement des zones de pertes de la tourbière vers le karst ou inversement de zones d'apports du karst vers la tourbière ;
- des structures internes subhorizontales dans la tourbe (jusqu'à 3 réflecteurs identifiés).

En contexte tourbeux, ces structures horizontales font penser au modèle diploielmique. Une modélisation statistique de prévision de la profondeur de la nappe met en avant deux comportements

reflétant vraisemblablement le changement des propriétés hydrodynamiques à partir de -20cm, limite acrotelme-catotelme potentielle. De plus, l'analyse des variations des niveaux de nappe en relation avec les débits à l'exutoire montre deux comportements en fonction de la profondeur de nappe : 1) de -30 à -10 cm, on observe peu de variation de débit à l'exutoire ; 2) à partir de -10 cm, on constate une forte hausse du débit et une réponse rapide à la pluie et à l'ETP. Pour terminer, le modèle hydrogéologique conceptuel élaboré pour la tourbière active propose trois niveaux de tourbe en interaction : superficiel, intermédiaire et profond (à l'interface avec le substratum).

Au final, dans le cas de la tourbière de Frasné, la méthode utilisée, fondée sur le radar géologique, a donné de très bons résultats et un rendement excellent. Elle a permis : 1) de bien connaître la profondeur et la forme de l'interface tourbière/substratum ; 2) une très bonne représentation du profil du substratum ; 3) de détecter des structures internes et des « anomalies » du substratum (karst).

18.2.2. *Comportement hydrologique : cheminement de l'eau et sectorisation*

Les données hydrologiques montrent que l'exutoire principal de la tourbière active ne connaît pas d'assec sur la période de suivi même si les débits peuvent être très faibles pour certains étiages (< 1l/s). Les autres exutoires identifiés de la tourbière fonctionnent de manière intermittente et connaissent tous un assec à l'étiage. Leur fonctionnement pourrait s'apparenter à celui d'un trop-plein du complexe tourbeux ; les écoulements se faisant vraisemblablement principalement dans le niveau tourbeux superficiel, voire la partie supérieure du niveau intermédiaire.

L'exutoire principal est alimenté par deux affluents distincts : 1) l'un en rive droite alimenté principalement par la tourbière active et qui a un rôle majeur à l'étiage puisqu'il ne connaît pas d'assec ; 2) le second, alimenté vraisemblablement par des eaux en provenance de la zone nord-est caractérisé par des asssecs de surface (des écoulements souterrains restent possibles) et une conductivité électrique (EC) plus forte.

On observe de plus une hausse des conductivités électriques des eaux de l'exutoire à l'aval de la confluence à l'étiage. Cette hausse de l'EC pourrait être liée à : 1) des apports d'eau souterraine en provenance du karst (local ou régional) ; 2) des apports d'eau souterraine des moraines sous-jacentes ou latérales ; 3) une concentration des espèces dissoutes par évaporation. La hausse de l'EC semble d'autant plus forte si la recharge hivernale (pluie) est importante sur le bassin versant régional. Toutefois, la recharge estivale locale est prépondérante sur la réponse de l'exutoire.

La tourbière active contient deux types d'eau différenciés en fonction de la profondeur, parfois en mélange : 1) eau de surface de type ombrotrophe (EC et pH faibles) ; 2) eau des niveaux profonds de type minérotrophe (EC et pH plus forts). La restauration de cette tourbière (comblement des fossés, repositionnement de la ligne de partage des eaux, implantation d'un seuil aval) a conduit à une hausse des niveaux d'eau (0,3 à 0,5 m) dans la tourbe et à sa reconnexion avec les tourbières boisées latérales.

Le suivi piézométrique dans les différents niveaux de tourbe montre que les trois niveaux ont subi une augmentation de pression suite à la restauration ce qui démontre son efficacité. La restauration a donc rétabli les relations hydrauliques entre les trois niveaux de tourbe en reconnectant les tourbières boisées alentours avec la tourbière active, en particulier via les couches de tourbes de profondeur intermédiaire.

L'analyse statistique des données hydrologiques souligne de plus : 1) des pertes d'eau dans la tourbière (dolines, écoulements diffus) et un fort impact de l'ETP ; 2) l'importance de la fréquence des orages en tant qu'apports d'eau estival régulier. La fréquence des orages et la forte ETP semblent liées au contexte orographique.

Le bilan hydrologique de la tourbière de Frasné est calculé pour une surface de bassin versant estimé à 0,92 km². On note que le bilan hydrologique est excédentaire en hiver et déficitaire en été. Ce travail souligne l'importance de l'interception des précipitations par la végétation (30 à 40% pour les boisements d'épicéas) et l'existence potentielle d'apports souterrains pour équilibrer ce bilan. Il reste à déterminer où, quand et comment se font ces apports. La doline du Creux au Lard n'a pas de fonctionnement émissif avéré. Seul le fonctionnement capacitif est prouvé, des traçages ayant montré un cheminement des eaux infiltrées dans la doline vers les sources de l'Ain (le temps de transfert est

Partie III – Conclusion

d'environ 8 jours). Pour l'instant, l'origine des eaux s'infiltrant dans le Creux au Lard n'est pas clairement déterminée. Elles proviennent vraisemblablement pour au moins une part de la tourbière.

Ce travail d'analyse de données hydrologiques et physico-chimiques a abouti à l'élaboration d'un modèle hydrogéologique conceptuel fondé principalement sur 3 niveaux de tourbe en interaction et 2 types d'apports souterrains (moraine et karst) locaux voire régionaux. Il a permis un travail de modélisation avec l'outil Karstmod. Le modèle mis en œuvre s'appuie sur 3 composantes ou réservoirs : 1) rapide (acrotelme - journalier/horaire – période de crue) ; 2) lent (catotelme - niveaux profond et intermédiaire - débit d'étiage) ; 3) bassin versant/aire d'alimentation (apports souterrains, recharge hivernale).

Les principaux apports de ce travail de modélisation sont les suivants :

- la surface optimale du bassin versant est de 0,88 km² ;
- la lame d'eau dynamique est inférieure à 100 mm (800 mm au total dans la tourbière pour 2 m d'épaisseur de tourbe et porosité efficace de 42%) ;
- la vitesse d'écoulement est très faible dans le catotelme et le comportement vraisemblablement advectif des apports profonds rendent la quantification des différentes contributions difficiles ;
- la simulation du débit à l'exutoire est convenable ;
- en basses-eaux, le modèle surestime les débits et exagère les temps de réponse. Les causes probables sont vraisemblablement liées à : 1) la recharge tourbière ; 2) la réhumectation des niveaux de surface de la tourbière ; 3) l'interception de la pluie par la végétation ; 4) la recharge de l'aquifère karstique via les dolines.

L'approche géochimique mise en œuvre sur le site de Frasne a permis de préciser la caractérisation du comportement hydrologique de la tourbière et d'apporter des informations sur l'origine et le cheminement des eaux. Dans un premier temps, l'analyse des données géochimiques permet de mettre en évidence 3 influences principales :

- **P1 : pôle eau de surface** (pluie) caractérisé par des eaux avec une faible EC et un faible pH. Ces eaux sont influencées par l'acidité milieu tourbeux et ne montrent pas d'interaction avec les roches. On note pour certains secteurs (tourbière bombée et secteur nord-est) une influence de l'évaporation. Ces eaux influencent majoritairement le bas-marais.
- **P2 : pôle eaux souterraines carbonatées** caractérisé par des EC et des pH plus forts, par les interactions eau-roches (calcaires, marnes, moraines) et un enrichissement en Ca et Mg. Ces eaux influencent la tourbière active.
- **Influence d'apports en NaCl** : secteurs ouest et sud de la tourbière

L'interprétation des résultats en basses-eaux (BE) donne les informations suivantes :

- la zone nord-ouest de la tourbière (excavations) est caractérisée par des eaux de pluie (P1) soumises à évaporation. Compte-tenu de cette signature, ces eaux ne se renouvellent pas ou très lentement (pas d'écoulement souterrain ou écoulement très lent). Ceci est compatible avec le modèle de tourbière ombrotrophe (tourbière bombée) et les fronts de tailles imperméables hérités de l'extraction de tourbes ;
- la tourbière active est globalement alimentée par des eaux carbonatées (P2). On note aussi l'influence des eaux de pluie (P1) sur certains secteurs. On observe une stratification de l'eau dans les piézomètres en flûte de pan avec en surface des eaux ombrotrophes et en profondeur des eaux carbonatées ;
- les eaux du bas-marais montrent une plus forte influence des eaux de pluie (P1) que des eaux carbonatées (P2) à l'inverse de la tourbière active ;
- l'affluent rive gauche de l'exutoire est marqué par l'évaporation d'eaux d'un réservoir de surface à circulation lente (P1) ;
- l'affluent rive droite de l'exutoire est caractérisé par des apports souterrains possibles (P2) à l'amont. Ces apports sont nettement plus marqués en hautes-eaux/moyennes-eaux ;
- l'aval de la confluence (exutoire) est majoritairement influencé par les eaux du bas-marais (P1) ;

- l'affluent à l'aval de l'exutoire est influencé par les eaux de pluie (P1). En hautes-eaux/moyennes-eaux, il est influencé par des eaux carbonatées (P2). Ce ruisseau possède un grand bassin versant drainant notamment les étangs de Frasne et du Moulin.

L'interprétation des résultats en moyennes-eaux/hautes-eaux (ME/HE) donne les informations suivantes :

- l'aval de la confluence (exutoire) reste fortement influencé par les eaux du bas-marais (P1) ;
- les fossés drainent un mélange d'eaux carbonatées (P2) et de pluie (P1) ;
- la fosse à tourbe au cœur de la zone bombée reste fortement marquée par l'évaporation même en période relativement humide. Ceci indique que le renouvellement de l'eau est nul (ou très lent) et que la connexion hydraulique avec les milieux environnant est nulle ou très faible. Ce milieu est donc ombrotrophe strict (P1).

Pour terminer, les résultats montrent une influence d'apports en NaCl (vraisemblablement liée à une contamination par du sel routier) à l'ouest et au sud du complexe tourbeux de Frasne, notamment dans la fosse à tourbe située en bordure de la zone bombée. En revanche, cette influence ne se fait pas ressentir aux niveaux des affluents et de l'exutoire, de la tourbière active et du bas-marais).

18.2.3. *Soutien d'étiage et soutien de la tourbière de Frasne*

Contrairement à ce que nous avons pressenti au départ, la tourbière de Frasne ne présente pas un écoulement souterrain général d'ouest (zone bombée) en est (exutoire principal), même s'il reste possible en surface. L'existence d'un bombement dans le substratum semble diviser le complexe tourbeux en 2 grands secteurs dont le fonctionnement hydrologique est potentiellement indépendant. En conséquence, l'aire d'alimentation supposée de l'exutoire principal est vraisemblablement plus petite que prévu car séparée en deux aires d'alimentation par une ligne de partage des eaux. On peut donc distinguer 2 grands secteurs hydrologiques au fonctionnement vraisemblablement globalement indépendant (Figure 208) hors écoulements de surface.

Le premier secteur, au nord-ouest, correspond approximativement à la tourbière bombée. Les écoulements souterrains se font d'est en ouest (du bombement du substratum à la tourbière bombée). La zone bombée ombrotrophe semble avoir un fonctionnement autonome (au moins pour sa partie supérieure) montrant des relations hydrauliques très faibles à nulles avec les milieux environnants notamment à l'étiage. En revanche, en période de hautes-eaux (saturation du milieu tourbeux), les exutoires au fonctionnement intermittent, notamment au nord, se mettent en charge ; une fois le surplus d'eau (ou trop-plein) évacué, le flux de ces exutoires se tarit. On note que les fossés drainent à la fois de l'eau de pluie et de l'eau carbonatée. En somme, de par son fonctionnement hydrologique, ce secteur est très peu favorable au soutien d'étiage des cours d'eau. Ce secteur, au moins sur la zone bombée est fortement soutenu par les eaux des précipitations et contraint par des écoulements très lents une fois le trop plein évacué vraisemblablement par le niveau de tourbe superficiel plus perméable. En l'état, il est difficile d'en dire plus compte-tenu du manque de connaissances : 1) sur le sens des écoulements souterrains à l'est et au sud de ce secteur ; 2) sur les relations hydrauliques entre la partie profonde du secteur bombé et le secteur sud ; 3) sur les relations hydrauliques avec les milieux extérieurs à la tourbière ; 4) sur les flux exportés à saturation pour les exutoires intermittents.

Le second secteur, au nord-est, correspond approximativement à la tourbière active et à la zone à l'est du bombement du substratum. Sur ce secteur, les écoulements souterrains semblent bien circonscrits par le bombement du substratum (nord-ouest sud-est) et les travaux de réaménagement et de comblement des fossés de la tourbière active (sud-ouest nord-est). Ainsi, il semble que tous les écoulements (souterrains et superficiels) convergent vers l'exutoire principal pérenne. Comme pour le secteur précédent, à saturation, des exutoires intermittents (notamment au nord-est) se mettent en charge en hautes-eaux pour évacuer le surplus d'eau jusqu'à tarissement.

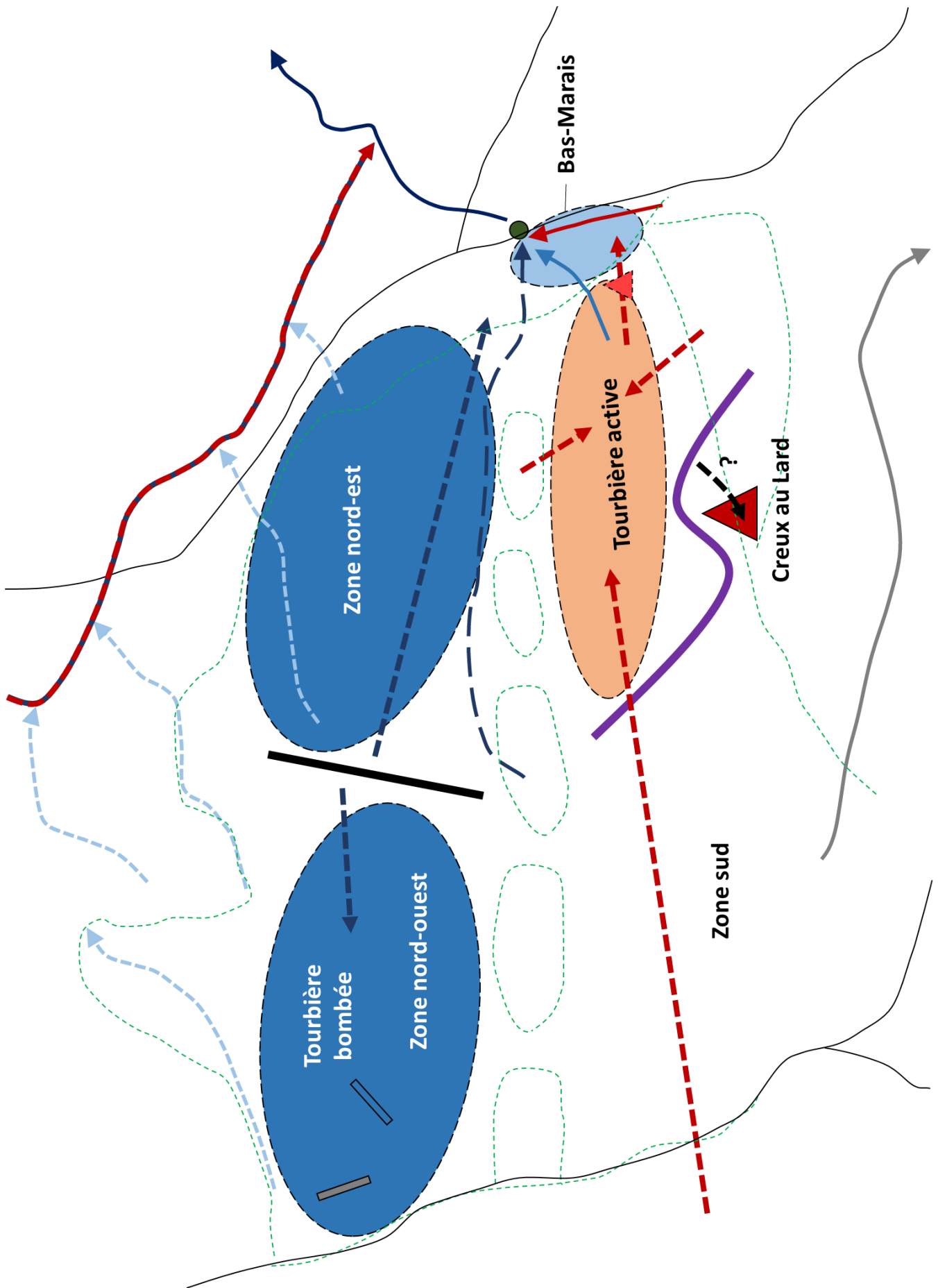


Figure 208. Interprétation des sectorisations et flux hydrologiques dans le complexe tourbeux de Frasne

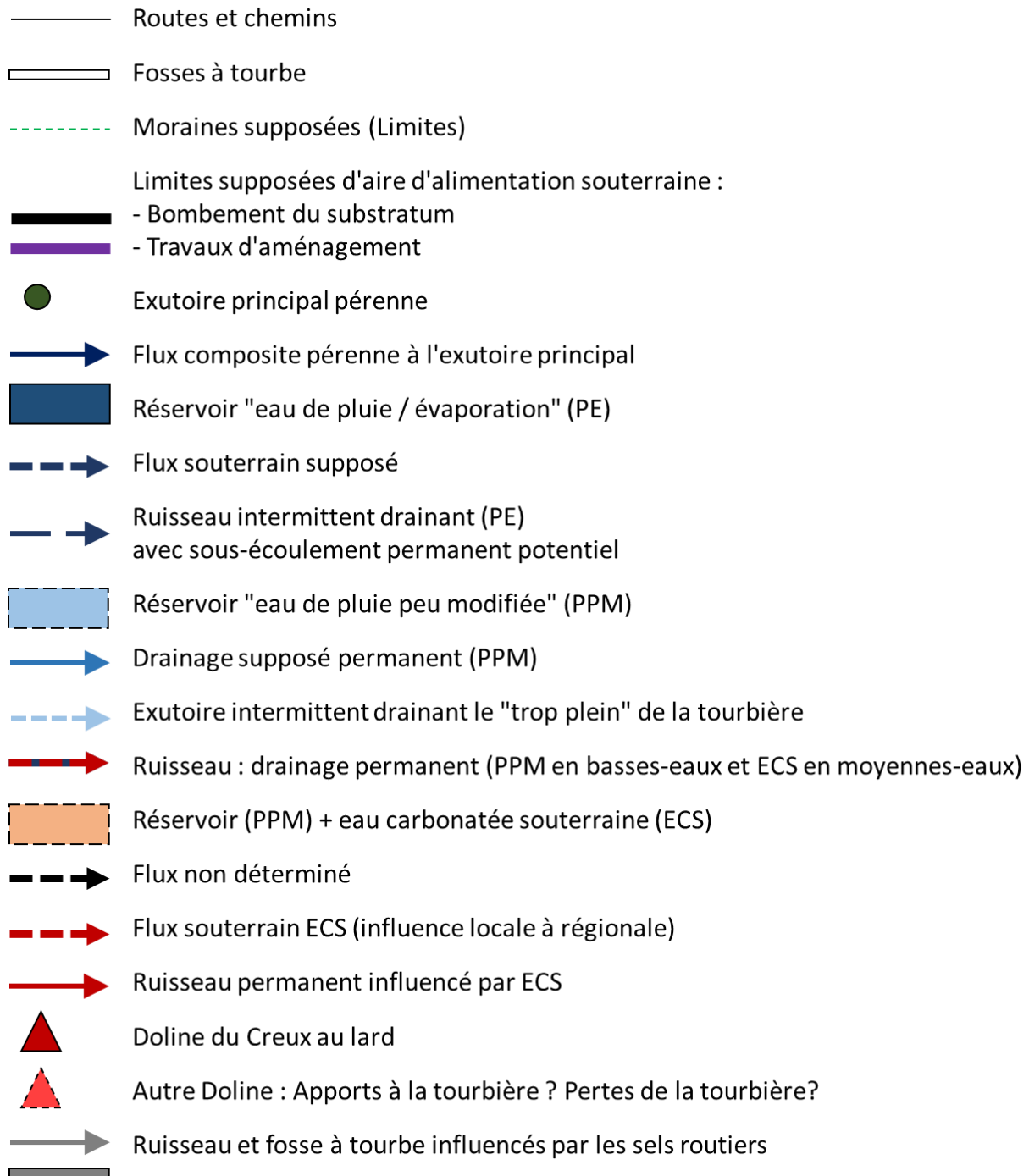


Figure 209 : Légende de la Figure 208

Le débit de l'exutoire principal pérenne est soutenu par 3 réservoirs principaux :

- 1) *Réservoir « pluie » : l'eau de pluie stocké dans la tourbière active et le bas-marais.* Ces eaux peu modifiées transitent de la tourbière active vers le bas-marais pour être évacuées à l'exutoire. On retrouve la signature de ces eaux dans le flux de l'exutoire à l'étéage. Ces eaux sont vraisemblablement soumises à des transferts rapides (niveau de tourbe superficiel) et plus lent (niveau de tourbe intermédiaire).
- 2) *Réservoir « pluie » soumis à l'évaporation : l'eau de pluie stockée dans un réservoir de surface au nord-est* vraisemblablement contraint par des écoulements lents. On retrouve aussi la signature de ces eaux dans l'affluent rive gauche et le flux de l'exutoire à l'étéage.
- 3) *Réservoir « carbonaté » : des eaux souterraines qui transitent dans la moraine et/ou le karst sous-jacent à la tourbière.* On retrouve la signature de ces eaux dans la tourbière active, l'affluent rive droite et l'exutoire à l'étéage.

Partie III – Conclusion

La persistance à l'étiage de la signature d'une eau de pluie peu modifiée dans la tourbière active, le bas-marais et le flux à l'exutoire indiquent que la tourbière est capable de stocker de l'eau et de la restituer avec un délai dans le temps au cours d'eau. De plus, la présence d'eau de pluie soumise à l'évaporation à l'exutoire indique un déphasage plus long encore pour le secteur nord-est entre stockage et transfert. Ce comportement hydrologique semble montrer que la tourbière est capable d'assurer un soutien d'étiage en déstockant de l'eau de pluie sur la durée à partir de ces 2 réservoirs et des vitesses de transfert différentes selon le niveau de tourbe considéré.

De plus, l'exutoire principal et la tourbière semblent soutenus à l'étiage par des apports d'eaux souterraines carbonatés, locaux à régionaux, sans que l'on sache s'il s'agit de transfert de pression ou de masse. Nous ne savons pas non plus si cette eau provient : 1) d'apports diffus de la moraine et/ou karst par drainance à travers la moraine ; 2) d'apports ponctuels du karst via des dolines situées sous la tourbe. On note que des dolines situées sous la tourbe pourraient aussi représenter des zones de pertes. La tourbière active semble dépendante à la fois des précipitations locales (stockées dans la tourbière active et le bas-marais) et du bassin versant avec des flux transitant par le karst. Si l'on regarde vers le futur, le modèle statistique de prévisions des niveaux d'eau dans la tourbière active prévoit une baisse niveau de nappe de -3 cm pour le scénario RCP 8,5 à l'horizon 2100. La tendance climatique pour ce scénario prévoit plus de pluie en hiver mais moins de pluie en été ; et donc des sécheresses plus longues.

En l'état des connaissances actuelles, il est difficile d'en savoir plus. Pour aller plus loin, il serait intéressant de connaître : 1) la variation dans le temps du taux de mélange des eaux à l'exutoire pour connaître les contributions de chacun des réservoirs ; 2) les écoulements souterrains du secteur nord-est ; 3) l'origine précise des eaux carbonatées (moraine, marne ou karst) ; 4) les relations hydrauliques avec le secteur sud ; 5) les relations hydrauliques avec les milieux extérieurs à la tourbière ; 6) les flux exportés à saturation pour les exutoires intermittents.

Concernant, les zones situées au sud-ouest de la tourbière active et du Creux au Lard, les connaissances restent fragmentaires. Il conviendrait d'éclaircir les relations potentielles avec la zone nord-ouest (tourbière bombée) et la zone nord-est (tourbière active). Cette zone semble toutefois déconnectée des 2 précédentes. En effet, la qualité des eaux semble y être influencée par les sels routiers (NaCl) ce qui n'est pas le cas de la tourbière bombée et de la tourbière active. Au nord-est, l'affluent situé à l'aval de l'exutoire est influencé par les eaux de pluie peu modifiées sans trace d'enrichissement en NaCl.

Les résultats acquis sur la tourbière de Frasne montrent qu'il est important de bien connaître son fonctionnement hydrologique global et les interactions entre anticlinal et synclinal, donc entre karst, tourbière et vallée du Dugeon. Les différents flux d'eau entre les différents secteurs du complexe tourbeux semblent contribuer à l'inertie hydrologique de la tourbière active favorisant peut-être la résilience de ces écosystèmes face aux changements climatiques. Localement ces flux d'eau sont donc essentiels pour maintenir la dynamique hydrologique et végétale du site. À l'inverse, le site a un impact limité à l'échelle de la vallée du Dugeon. Ainsi, il est probable que le stockage d'eau, même augmenté par la restauration, ait une influence minimale à l'échelle du bassin versant topographique. En d'autres termes, si le potentiel de soutien d'étiage de la tourbière active semble avéré, sa contribution reste faible à l'échelle du bassin versant. De plus, c'est le catotélme, regroupant les niveaux de tourbe intermédiaire et profonds où l'écoulement est plus lent qui semble assurer le débit d'étiage lorsqu'il n'y a plus d'eau dans l'acrotélme. L'acrotélme, en surface, ne serait pas le compartiment permettant d'assurer le soutien de l'étiage.

Au final, on peut conclure que contrairement au Luitel, le complexe tourbeux de Frasne semble présenter un potentiel de soutien d'étiage intéressant à l'exutoire principal pérenne à partir d'au moins 2 réservoirs. La Figure 208 propose une interprétation synthétique des sectorisations et des flux hydrologiques dans le complexe tourbeux de Frasne.

18.2.4. *Questions en suspens et perspectives*

Comme au Luitel, un certain nombre de questions restent en suspens et notamment :

- Où, comment et quand se font les apports souterrains dans la tourbière (karst, moraines, marnes) ? D'où proviennent-ils et en quelles quantités ?
- Quelle est la contribution relative des différents réservoirs au flux de l'exutoire principal ?
- Quelle est la nature des interfaces identifiées dans la tourbière par l'approche géophysique ? Quelles sont leurs propriétés hydrodynamiques ? Comment interviennent les différents compartiments verticaux identifiés dans le transfert des flux hydrologiques ?
- Comment se font les écoulements souterrains dans les secteurs nord-ouest et nord-est ?
- Quelles sont les relations hydrauliques entre les grands secteurs du complexe tourbeux ? Avec les systèmes connexes ?
- Quels sont et comment varient dans le temps le flux exportés par les exutoires intermittents ?
- ...

La réponse à ces questions passe par une analyse plus approfondie des données existantes, l'acquisition de nouvelles données voire l'agrandissement du dispositif de suivi :

- traitement des profils géophysiques non analysés et validation par l'analyse de carottes de tourbe ;
- implantation de nouveaux piézomètres selon un plan d'implantation stratifié (ex : piézomètres en flute de pan) ;
- essais d'eau dans les piézomètres pour détermination de la conductivité hydraulique de la tourbe ;
- campagnes de géochimie complémentaires pour travailler sur des équations de mélange.
- ...

18.3. Synthèse : indicateurs de soutien d'étiage

Les travaux conduits sur les indicateurs de soutien d'étiage des zones humides (tourbières) aux cours d'eau ont été conduits conjointement avec l'ONF de l'Aude et articulent les travaux menés dans le cadre des projets ZHTB et ZH Aude. Une synthèse globale des travaux menés sur la haute-vallée de l'Aude³⁴ et des fiches de synthèse, entre autres sur les indicateurs de soutien d'étiage, ont été réalisées (voir Annexe 9).

La recherche d'indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site de zone humide a été conduite à partir d'une étude fondée sur une loi de vidange de réservoir (équation de Boussinesq). Cette équation permet de calculer l'évolution du débit de vidange (tarissement) d'un réservoir aquifère, présentant un exutoire, en fonction du temps. Le calcul est fondé sur (Figure 210) : 1) les propriétés géométriques du réservoir de la zone humide, largeur, longueur, hauteur d'eau au-dessus de l'exutoire (charge hydraulique) ; 2) les propriétés hydrodynamiques du réservoir qui régissent sa capacité à stocker et déstocker de l'eau (notamment la porosité efficace pour le potentiel de déstockage gravitaire) et la facilité avec laquelle il se laisse traverser par un flux d'eau (conductivité hydraulique).

Les résultats montrent qu'il existe des combinaisons de paramètres réalistes qui correspondent théoriquement à un soutien d'étiage intéressant et supérieur à 1l/s (l'équivalent de la consommation journalière de 576 personnes à concurrence de 150 l/j) pour une durée de 90 jours (l'équivalent de 3 mois estivaux). Les configurations les plus intéressantes sont obtenues pour des réservoirs de zones humides présentant un volume important et une forte charge hydraulique. Ces réservoirs doivent aussi contenir un volume d'eau déstockable par gravité important mais présenter une facilité à se laisser traverser par un flux intermédiaire afin que la vidange ne soit ni trop rapide ni trop lente.

En l'état, les premiers calculs de débits à l'exutoire effectués sur un jeu de paramètres jugés représentatifs de la tourbière du Luitel sont à revoir, au regard de la différence en conductivité hydraulique estimée sur la base de l'analyse de la tourbe (10^{-1} à 10^{-5} m/s) et de la conductivité hydraulique calculée à partir d'essais d'eau (10^{-5} à 10^{-8} m/s). À partir de 10^{-5} m/s pour une surface de 10 ha, un rapport largeur/Longueur (l/L) de 5 et même en considérant une porosité efficace forte ($\phi = 50\%$), le débit initial calculé à l'exutoire est très faible et globalement inférieur à 1 l/s voire à 0,1 l/s.

De plus, en ce qui concerne les zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude aucun calcul n'a été réalisé. Toutefois, compte-tenu de la petite taille des zones humides en présence (volume faible), de la charge hydraulique et de la conductivité hydraulique vraisemblablement faibles, le potentiel de soutien d'étiage à l'échelle du site de la zone humide doit être limité voire très limité.

Les suites à donner à ce travail viseront à déterminer : 1) si de telles combinaisons de paramètres sont couramment identifiés sur des zones humides réelles ; 2) le tarissement de zones humides à partir de paramètres réels. Il conviendrait aussi d'intégrer la pluie et l'ETP dans le calcul pour se rapprocher au plus près de la réalité de terrain. À terme, un tutoriel serait le bienvenu pour faciliter l'utilisation de cette méthode.

34 ONF Aude (2023) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude. Synthèse des phases 1 à 3, Mines Saint-Etienne, IMT Mines Alès. AE-RMC, CD Aude.

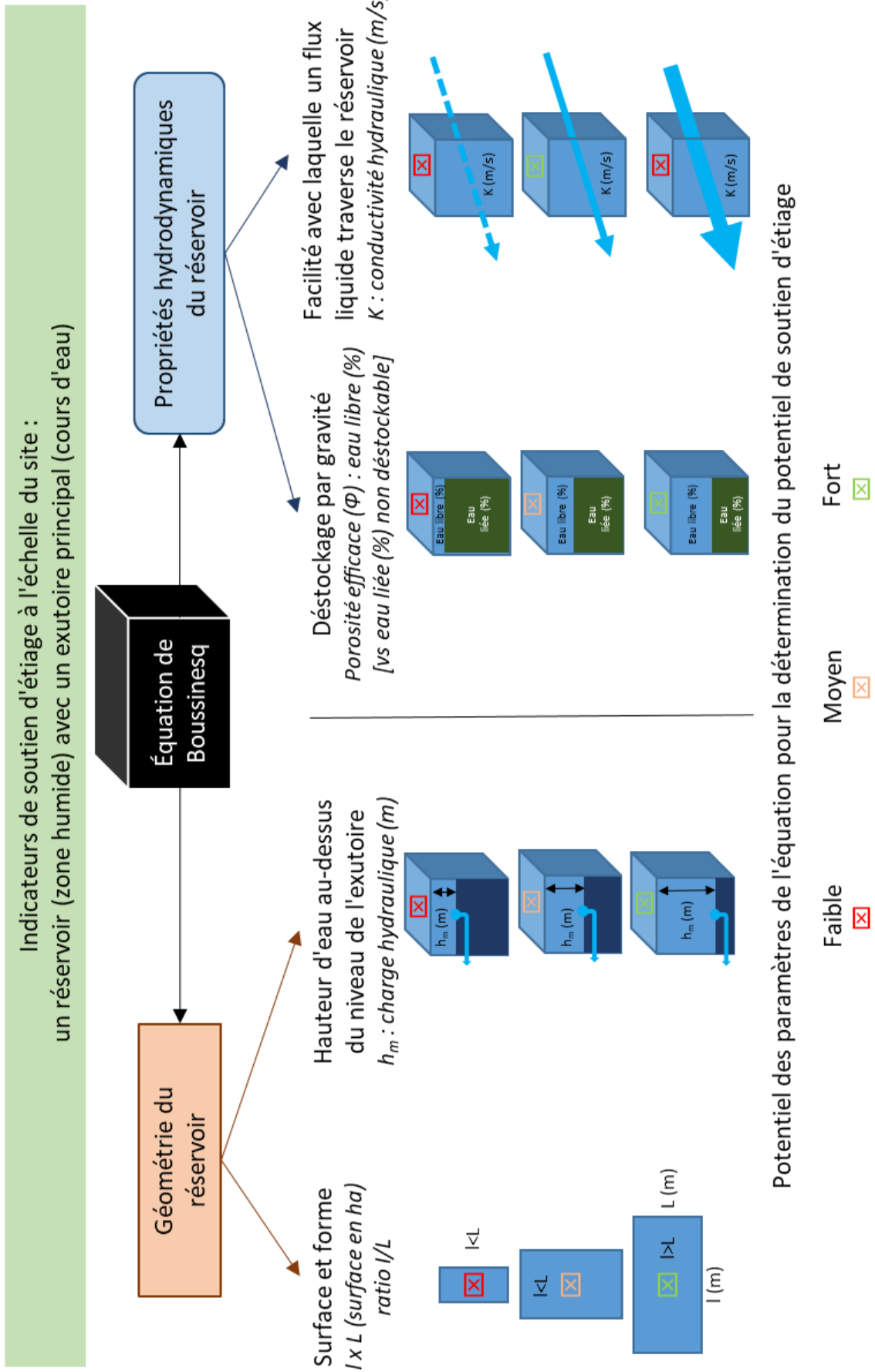


Figure 210 : Indicateurs de soutien d'été à l'échelle du site [un réservoir avec un exutoire principal]

Partie III – Conclusion

La recherche d'indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant a été conduite à partir d'une approche multi-critère spatiale. L'approche consiste à déterminer si une combinaison de critères permet de calculer un indice spatialisé du potentiel de soutien d'étiage et d'écêtement de crue d'un sous-bassin versant. Le travail a été réalisé sur les couples de bassins versants de Pountarrou et de Pinata et le calcul d'indice effectué sur les 2 types de bassins versants : 1) faible densité de zones humides ; 2) forte densité de zone humide.

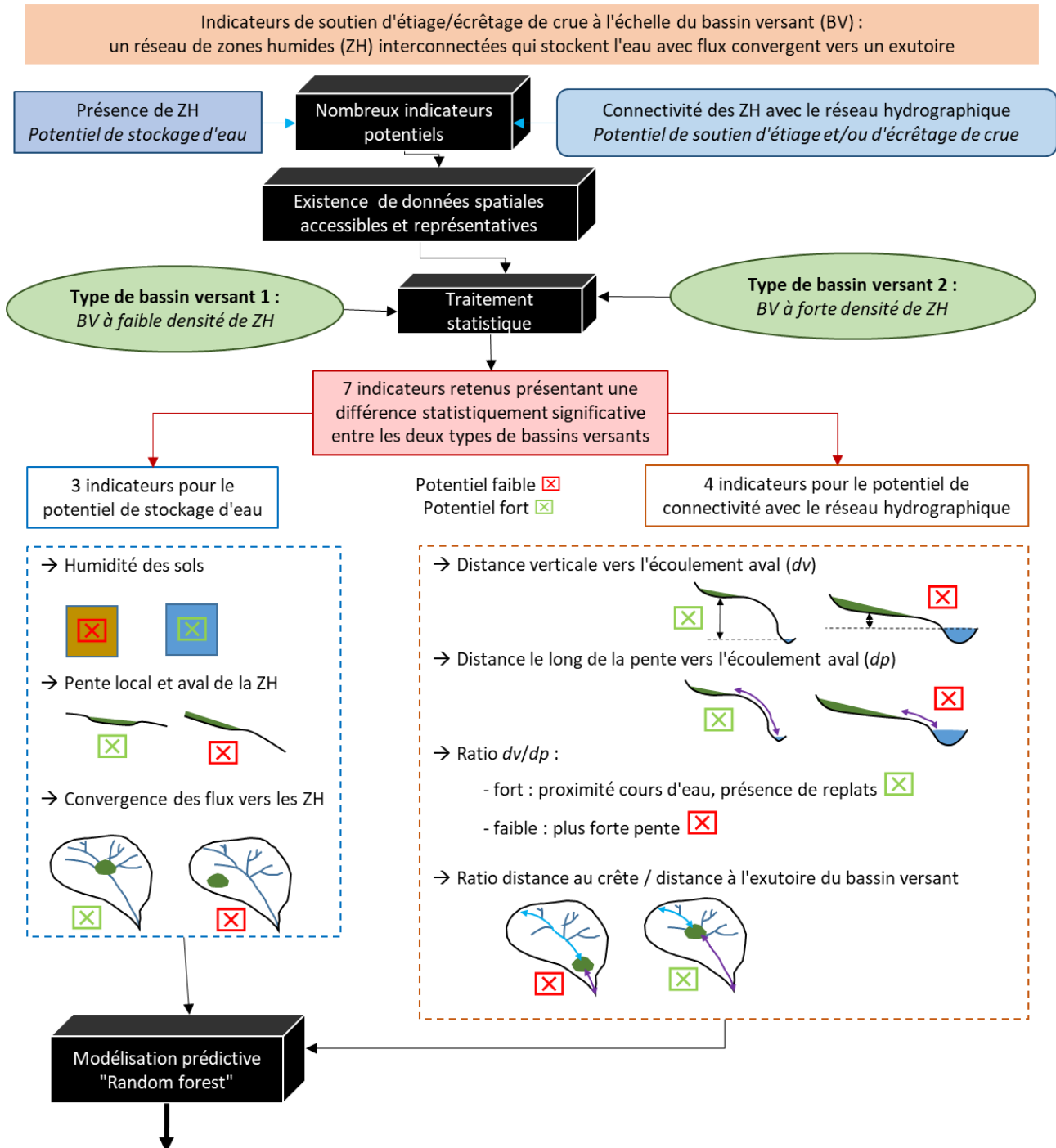


Figure 211 : Indicateurs de soutien d'étiage/écêtement de crue à l'échelle du bassin versant [un réseau de zones humides interconnectées qui stockent l'eau avec flux convergent vers un exutoire]

La construction de l'indice est fondée principalement sur des indicateurs topographiques pour lesquels les données étaient facilement disponibles et spatialement représentatives. Parmi tous les indicateurs testés, certains montrent une différence significative entre les deux types de bassins versants. On distingue deux catégories d'indicateurs (Figure 211) : 1) potentiel de présence de zone humide et de

stockage d'eau (ex : indice d'humidité des sols, pente, indice de convergence, ...); 2) potentiel de connectivité des zones humides avec le réseau hydrographique (ex : distance à l'écoulement le plus proche, distance à l'exutoire...).

Les résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les bassins versants de la Hautevallée de l'Aude selon la densité de zones humides. On obtient des résultats similaires sur des couples de bassins en Lozère et dans le Forez. Si ces premiers résultats sont encourageants, cela ne signifie pas que l'indice spatial calculé permet de déterminer les potentiels de soutien d'étiage ou d'écrêtage de crue d'un bassin versant. En effet, il manque une validation de terrain ; en l'état des connaissances l'analyse statistique des données hydrométéorologiques ne met pas évidence de différence de fonctionnement hydrologique entre les bassins versant en fonction de la densité de zones humides. À l'avenir, si la validation de terrain est possible, il serait intéressant d'intégrer d'autres indicateurs au calcul de l'indice intégrant notamment ceux liés aux zones humides (ex : type, géométrie, propriétés hydrodynamiques, connectivité...).

Toutefois, ces résultats permettent de mettre en avant des préconisations pour faciliter le choix de nouveaux couples de bassins versants. Il semble important de veiller à ce que les couples de bassins versant soient les plus similaires possibles : même forme, même taille, mêmes pentes, même organisation du réseau hydrographique, même occupation des sols. Il semble aussi important de s'assurer d'un contraste plus fort pour le paramètre de densité de zones humides.

18.4. Préconisations de gestion des zones humides de tête de bassin versant pour conserver ou restaurer leur fonctionnement hydrologique

Les travaux conduits, tant dans le projet ZHTB que le projet ZH Aude, sur la question du soutien d'étiage des zones humides (tourbières) aux cours d'eau font ressortir un certain nombre d'éléments ou préconisations en termes de gestion. Dans la synthèse globale présentant les travaux menés sur la haute-vallée de l'Aude avec l'ONF 11³⁵ des fiches de synthèse ont été rédigées, présentant entre autres des préconisations de gestion (voir Annexe 9). Cette synthèse intègre donc des réflexions sur des préconisations de gestion tant à l'échelle du site de zone humide qu'à l'échelle du bassin versant, voire au-delà.

L'exercice de préconisations de gestion pour favoriser le soutien d'étiage des zones humides vers les cours d'eau est difficile même dans le domaine restreint des tourbières de têtes de bassin versant. En effet, le rôle de soutien d'étiage n'est pas facile à démontrer et peut être faible voire nul. Il est donc préférable d'envisager des préconisations de gestion pour maintenir ou restaurer en priorité le fonctionnement hydrologique.

De plus, les tourbières de têtes de bassin versant, même lorsqu'elles sont de petite taille, sont des milieux hétérogènes aux habitats parfois nombreux, dits en mosaïques. Il est donc difficile d'émettre des préconisations globales quand on a à faire à des complexes tourbeux. Ce type de complexes hydroécologiques n'est pas déconnecté de son environnement. Leur fonctionnement et leur maintien dépend de connexions hydrauliques fortes avec l'hydrosystème local à régional intégrant les relations avec l'atmosphère.

Les différents sites des projets ZHTB et ZH Aude témoignent de cette diversité :

1. *Tourbière de Luitel* – Cette tourbière ombrogène et limnogène de petite taille est composée d'une diversité de milieux : lac tourbière (radeaux flottants), tourbière bombée boisée... Elle n'a pas de rôle de soutien d'étiage, mais est soutenue à l'étiage par des eaux souterraines en provenance de l'amont du bassin versant. Le ruisseau à l'exutoire de la tourbière la traverse en interagissant peu avec elle et dépend fortement du flux apporté par les eaux souterraines de versant. Le maintien de cette tourbière est donc fortement dépendant de sa capacité à stocker l'eau de pluie ou en provenance du bassin versant.
2. *Tourbière de Frasne* – Ce complexe tourbeux de grande taille est constitué d'une mosaïque d'habitats tourbeux (ombrotrophes et minérotrophes) ou non tourbeux (ex : tourbière active, bas-marais, tourbière bombée, pinèdes...). Cette tourbière semble assurer un rôle de soutien d'étiage à partir de réservoirs tourbeux. Elle est toutefois alimentée par des eaux des moraines et/ou du karst locales voire régionales. Ici, les interactions karst/moraine/tourbière restent à préciser tant à l'échelle locale que régionale.
3. *Zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude* – Les zones humides des sous-bassins versants forestiers étudiés sont globalement de petite taille. Une partie d'entre elles sont des tourbières hautes actives (tourbières de pente ou soligènes minérotrophes). Dans cette région, le contraste amont/aval est marqué par des têtes de bassin versant humides et des vallées sèches régulièrement en déficit hydrique. Le rôle de soutien d'étiage de ces zones humides n'a pas pu être démontré et le rôle d'écêtement de crue est faible et limité à la période de recharge après sécheresse. On observe toutefois que les bassins versants étudiés présentant une plus forte densité de zones humides contribuent plus fortement au cycle de l'eau local : 1) l'ETP plus forte sur ces secteurs favorise les orages à l'échelle du massif ; 2) le fonctionnement hydrologique de ces secteurs a tendance à limiter les écoulements superficiels à l'exutoire. Au final, les zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude sont vulnérables à la hausse des températures qui favorisent l'augmentation de l'ETP.

35 ONF Aude (2023) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude. Synthèse des phases 1 à 3, Mines Saint-Etienne, IMT Mines Alès. AE-RMC, CD Aude.

La persistance biologique de complexes tourbeux nécessite le maintien d'un état de saturation en eau le plus longtemps possible dans l'année et au moins 9 mois voire plus. La présence de tourbières est donc conditionnée par un bilan hydrologique excédentaire où les apports (entrées) sont plus importants que les pertes (sorties) :

1. *Entrées d'eau* – Les principaux apports sont la pluie (dont ruissellement), les eaux de fonte des neiges et les eaux souterraines. En tête de bassin versant, les apports amont des ruisseaux sont faibles ou anecdotiques ou intermittents. Il existe souvent plusieurs masses d'eau, d'origines spatiales parfois différentes, dont la prépondérance dans l'alimentation du complexe tourbeux est variable dans le temps et l'espace. Les eaux souterraines ont vraisemblablement un rôle non négligeable dans le soutien d'étiage des zones humides, notamment en période de sécheresse où leurs apports peuvent devenir prépondérants. De tels apports peuvent de plus constituer un signal hydrologique de fond tout au long de l'année
2. *Sorties d'eau* – La persistance de milieux humides impliquent que les pertes sont limitées ou au moins inférieures aux apports. Les sorties d'eau se font principalement par évapotranspiration. L'eau s'écoulant au ruisseau exutoire d'une tourbière ne provient pas forcément du déstockage de l'eau contenue dans la tourbe, mais comme au Luitel, du tarissement d'un réservoir souterrain. Dans d'autre cas, il peut s'agir, comme à Frasne, d'eau de vidange de réservoirs tourbeux. D'autres pertes, vraisemblablement limitées, du fait du caractère globalement imperméable du fond de la tourbière, peuvent potentiellement se faire dans des anomalies du substratum (ex : failles, dolines...).

Une fois ces éléments connus, le principe de gestion globale des tourbières est assez simple à énoncer : il faut permettre les entrées d'eau régulières et durables, favoriser le stockage d'eau et limiter les sorties d'eau. Ce principe peut être mis à mal par les activités humaines. Ces milieux donc sont vulnérables aux impacts des activités anthropiques et des changements climatiques conduisant à un bilan hydrologique déficitaire ne permettant pas une saturation en eau suffisamment longue pour assurer la turfigenèse et le maintien des tourbières. Seuls ou cumulés, le drainage des zones humides, les captages, l'augmentation de l'ETP ou la diminution de la pluviométrie peuvent conduire à la désaturation des horizons tourbeux superficiels ce qui conduit à la minéralisation de la matière organique, au dégagement de gaz à effet de serre (déstockage de carbone) et au tassement de l'histosol dégradé.

À l'échelle d'un site tourbeux, il est difficile de disposer de leviers d'actions pour contrer les changements climatiques. En revanche, il est possible de jouer sur des leviers d'actions visant à : 1) maintenir ou restaurer des connexions hydrauliques ; 2) favoriser le stockage d'eau ou limiter les pertes.

La présence de tourbière en tête de bassin versant indique que l'on a à faire des milieux en capacité de stocker les apports d'eau. Ces conditions peuvent découler de processus naturels en lien, par exemple, avec l'héritage du passé glaciaire qui en modelant la topographie par dépôts de cordons morainiques et création de cuvettes imperméabilisées à la fonte par des farines glaciaires favorables permet la mise en place de tourbières. Des processus anthropiques peuvent parfois aussi expliquer la mise en place de tourbières comme l'installation de seuils ou de petits barrages sur des ruisseaux.

Aujourd'hui, compte-tenu de la pression anthropique passée exercée sur les zones humides nombre d'entre elles ont disparu. Celles qui restent connaissent encore des pressions. Les questions qui se posent sont donc les suivantes : Quel futur pour les ZH ? Quels aménagements pour les faire perdurer ?

1. *À l'échelle locale*, des expériences de comblement des fossés de drainage, d'implantation de barrières hydrauliques dans la tourbe ou de seuils à l'exutoire semblent être favorables à un meilleur stockage de l'eau dans la tourbière. L'arrêt des pompages s'il y a lieu est une mesure indispensable. De plus, des actions visant à entretenir une ambiance microclimatique humide peuvent être envisagées à l'échelle du site de zone humide. Ces actions peuvent viser par exemple à favoriser l'ETP pour générer une baisse locale des températures. La gestion de l'interface forêt/tourbière (lisière) peut être intéressante pour générer des effets d'ombrage et brise-vent sur la zone humide.

Partie III – Conclusion

2. *À l'échelle du bassin versant* la limitation ou la suppression de prélèvements d'eau à l'amont et reconnexion des axes de ruissellement peut être bénéfique pour augmenter les apports d'eau dans une tourbière. Attention toutefois, à ne pas introduire une eau trop minéralisée dans le milieu tourbeux ce qui pourrait avoir pour conséquence de modifier son fonctionnement. La gestion forestière pourrait permettre de favoriser les conditions de maintien des zones humides en intégrant des réflexions sur la gestion de boisements, la limitation de l'impact des chemins forestiers ou sur le respect des sols.
3. *À l'échelle régionale* les leviers d'action sont moins évidents quand il s'agit de « gérer » les connexions hydrauliques (superficielles ou souterraines) responsables d'apports ou de pertes et d'intervenir sur le cycle de l'eau (ETP, pluviométrie régionale...).

Manneville et al. (1999), listent de nombreuses autres causes de dégradation ou de destruction des milieux tourbeux qu'elles soient d'origine naturelle (ex : dynamique de boisement, érosion ou glissement de terrain...) ou humaine réversibles (ex : abandon des activités agricoles extensives, pompages, fréquentation touristique, drainage, accumulation de pesticides, métaux lourds, sels de déneigement, fertilisants...) voire irréversibles (ex : incendies intenses ou répétés, détournement de source, drainage poussé, creusement de plan d'eau, lagunage pour les eaux usées, ...). On note au passage que si le trop peu d'eau est nuisible pour les milieux tourbeux, le trop d'eau l'est tout autant. Un ennoyage du site pouvant transformer une tourbière en un milieu lacustre, voire en réservoir hydroélectrique.

Références Bibliographiques

Frasne : Fonctionnement hydrologique et modélisation (thèse A. Lhosmot)

Allen, R., Pereira, Luis.S., Raes, D., Smith, M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).

Bertrand, G., Ponçot, A., Pohl, B., Lhosmot, A., Steinmann, M., Johannet, A., Pinel, S., Caldirak, H., Artigue, G., Binet, P., Bertrand, C., Collin, L., Magnon, G., Gilbert, D., Laggoun-Deffarge, F., Toussaint, M.-L., 2021. Statistical hydrology for evaluating peatland water table sensitivity to simple environmental variables and climate changes application to the mid-latitude/altitude Frasne peatland (Jura Mountains, France). *Science of The Total Environment* 754, 141931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141931>

Calvar, E., Magnan, G., Durllet, P., Moncorge, S., Collin, L., Resch, J.-N., Langlade, J., Mazuez, C., Decon, R., Vergon-Trivaudey, M.-J., Hagimont, A., 2021. Recueil d'expériences Restauration fonctionnelle de tourbières dans le massif du Jura. CEN FC ; EPAGE HDHL ; PNR HJ ; SMIX DD ; ARNLR ; DREAL BFC, LIFE13 NAT/ FR/762.

Calvar, E., Moncorge, S., Bettinelli, L., Durllet, P., Magnon, G., 2018. Program LIFE+ "Bogs of the Jura": 60 bogs to restore in six years, in: Inventory, value and restoration of peatlands and mires: recent contributions. Hazi Foundation, pp. P108-133.

Collin, L., 2016. Établissement d'un modèle conceptuel du fonctionnement hydro-écologique de la tourbière de Frasne (Master degree, internship report). Université de Franche-Comté - Communauté de communes du plateau de Frasne et du Val du Druegon.

Dohnal, M., Černý, T., Votrubová, J., Tesař, M., 2014. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62, 277–284. <https://doi.org/10.2478/johh-2014-0037>

Dubé, S., Plamondon, A.P., Rothwell, R.L., 1995. Watering up After Clear-Cutting on Forested Wetlands of the St. Lawrence Lowland. *Water Resour. Res.* 31, 1741–1750. <https://doi.org/10.1029/95WR00427>

Gerling, L., Weber, T.K.D., Reineke, D., Durner, W., Martin, S., Weber, S., 2019. Eddy covariance based surface-atmosphere exchange and crop coefficient determination in a mountainous peatland. *Ecohydrology* 12, 1–14. <https://doi.org/10.1002/eco.2047>

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Hoag, R.S., Price, J.S., 1997. The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undisturbed peat in laboratory columns. *Journal of Contaminant Hydrology* 28, 193–205. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(96\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00085-X)

Hökkä, H., Repola, J., Laine, J., 2008. Quantifying the interrelationship between tree stand growth rate and water table level in drained peatland sites within Central Finland. *Can. J. For. Res.* 38, 1775–1783. <https://doi.org/10.1139/X08-028>

Howie, S.A., Hebda, R.J., 2018. Bog surface oscillation (mire breathing): A useful measure in raised bog restoration. *Hydrological Processes* 32, 1518–1530. <https://doi.org/10.1002/hyp.11622>

Ingram, H.A.P., 1978. Soil layers in mires: function and terminology. *Journal of Soil Science*

Références bibliographiques

29, 224–227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1978.tb02053.x>

Lhosmot, A., Collin, L., Magnon, G., Steinmann, M., Bertrand, C., Stefani, V., Toussaint, M., Bertrand, G., 2021. Restoration and meteorological variability highlight nested water supplies in middle altitude/latitude peatlands: Towards a hydrological conceptual model of the Frasne peatland, Jura Mountains, France. *Ecohydrology* 14. <https://doi.org/10.1002/eco.2315>

Magnon, G., 2016. Compte-rendu de chantier TRAVAUX DE REHABILITATION DE LA TOURBIERE ACTIVE DE FRASNE. EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue 12.

Magnon, G., Grosvernier, P., 2015. Travaux de restauration fonctionnelle de la tourbière active de Frasne et du marais de Gû dans la réserve naturelle des tourbières de Frasne-Bouverans Rapport d'études synthétique.

Mazzilli, N., Guinot, V., Jourde, H., Lecoq, N., Labat, D., Arfib, B., Baudement, C., Danquigny, C., Dal Soglio, L., Bertin, D., 2019. KarstMod: A modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environmental Modelling & Software* 122, 103927. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>

McCarter, C.P.R., Price, J.S., 2013. The hydrology of the Bois-des-Bel bog peatland restoration: 10 years post-restoration. *Ecological Engineering* 55, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.003>

Mesri, G., Ajlouni, M., 2007. Engineering Properties of Fibrous Peats. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133, 850–866. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:7\(850\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:7(850))

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? *Journal of Hydrology* 303, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

Paran, F., Graillot, D., Dujardin, F., Gallice, F., Ré-Bahuaud, J., Pascoletti, Y., Sadkou, S., Artigue, G., Pinel, S., Caldirak, H., Johannet, A., Cubizolle, H., Jolly, T., Mazagol, P.-O., Sacca, C., Riquier, J., Bertrand, M., Lavastre, V., Chevet, J., Cocula, C., Ebrard, E., Thomassin, K., Laroque, B., Vion, M., Villarubias, S., in press. 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 (No. Rapport final Phase 3 (2019-2022)).

Pothier, D., Prévost, M., Auger, I., 2003. Using the shelterwood method to mitigate water table rise after forest harvesting. *Forest Ecology and Management* 179, 573–583. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00530-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00530-3)

Price, J.S., Heathwaite, A.L., Baird, A.J., 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management* 11, 20.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review* 81–92.

Quinton, W.L., Gray, D.M., Marsh, P., 2000. Subsurface drainage from hummock-covered hillslopes in the Arctic tundra. *Journal of Hydrology* 237, 113–125. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00304-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00304-8)

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. <https://doi.org/10.1002/hyp.7027>

Šrámek, V., Neudertová Hellebrandová, K., Fadrhonsová, V., 2019. Interception and soil water relation in Norway spruce stands of different age during the contrasting vegetation seasons of 2017 and 2018. *J. For. Sci.* 65, 51–60. <https://doi.org/10.17221/135/2018-JFS>

Toussaint, M.-L., Bertrand, G., Lhosmot, A., Gilbert, D., Binet, P., Jacotot, A., Gogo, S., Laggoun-Defarge, F., 2020a. Soil-meteorological dataset collected at Frasne peatland (192ha, Jura Mountains, France). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3763342>

Toussaint, M.-L., Bertrand, G., Lhosmot, Alexandre, Gilbert, D., Binet, P., Gogo, S., Laggoun-Défarge, F., 2020b. Water table depth dataset collected at Frasne peatland (192ha, Jura Mountains, France). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3763766>

Frasne : Géophysique

Annan A.P. (2003). Ground Penetrating Radar - Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc., 286 pages.

Bossuet G. (1997). Contribution des sondages électriques à l'étude des sites de tourbières. L'étang du Lautrey (Jura, France). Quaternaire, vol. 8, n°4, 1997. pp. 359-364

Carrier, C. 2003. Étude de l'interaction entre le système d'écoulement local d'une tourbière ombrotrophe et le système d'écoulement des eaux souterraines régionales dans le Sud-Est du Nouveau-Brunswick: caractérisation et modélisation hydrogéologique. Mémoire de Maîtrise, Sciences Géographiques, Université Laval, 232 p.

Comas X., Slater L. and Reeve A.S. (2005). Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR). *Journal of Hydrology* 315 (2005) 40–51.

Comas X., Slater L. and Reeve A.S. (2011). Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. *Journal of Hydrology* 399 (2011) 173–184

Dallaire P.-L. (2010). Utilisation du géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourbe et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région d'Eastmain, Baie James ; Mémoire de Master en géographie. Université du Québec à Montréal. 149p

Dangeard.M, Schneider.S, Bodet. L, Riviere. A, Guerin., R, Rejiba et F, Hovhannissian, G. (2017) Vers une interpolation hydrogéophysique des propriétés hydrodynamiques de la subsurface : apports du « time-lapse » sismique. PIREN-Seine phase VII - rapport 2017. 18 pages.

Desplanques et Garambois (2010). Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière ombrotrophe du Luitel au moyen de méthodes géophysiques. Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald — 15 (2009-2010) : 305 - 315

Doolittle, I A. et J. R. Butnor. 2009. Soils, Peatlands, and Biomonitoring. In *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, Harry M. Jol eds, Amsterdam: Elsevier, 524 pages.

Duranel A., 2015, Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France).Thèse de l'Université Jean Monnet EVS ISTHME UMR 5600.. 535 pages.

Graillet D., Paran F., Ré-Bahuaud J. (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 (2016-2017), Action ZABR n°51, 193 pages.

Jolly T. (2019). Caractérisation géométrique des faciès pédologiques 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 (Projet ZABR, action 68). Mémoire de Master 2, Dirigé par H. Cubizolle et T. Winiarski, Université Lyon 2, 141 pages

Lagneau L.A. (2006). Caractérisation environnementale de la tourbière de la colline de Covey. Approche écologique et géophysique. Institut de Recherche en Biologie Végétale, Université Catholique d'Angers Mémoire de licence professionnelle, 53 pages.

Références bibliographiques

- Lowry C.S., Fratta D. and Anderson M. P. (2009). Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland. *Journal of Hydrology* 373 (2009) 68–79.
- Mermillod-Blondin F., Winiarski T., Foulquier A., Perrissin A. and Marmonier P. (2015). Links between sediment structures and ecological processes in the hyporheic zone: ground-penetrating radar as a noninvasive tool to detect subsurface biologically active zones. *Ecohydrol.* 8, 626–641 (2015)
- Neal, (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66 (2004) 261–330.
- Paran F., Pascoletti Y., Graillot D., Dujardin F., Artigue G., Pinel S., Caldirak H, Johannet A., Winiarski T., Cubizolle H. Jolly T., Mazagol P.-O., Sacca C., Riquier J., Lavastre V., Chevet J., Cocula C., Ebrard E. et Laroque B. (2020). 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. Rapport final Phase 2 (2017-2019), Action ZABR n°57, 203 pages.
- Reynolds W.D. (2005). An introduction to applied and environmental geophysics. Chichester, England: Wiley, 796p.
- Theimer, B. D., Nobes D. C. et Warner B. G. (1994). A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying. *Geophysical Prospecting*. vol. 42, p. 179-209.
- Theimer, B.D., Nobes, D.C., Warner, B.G., 1994. A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying. *Geophysical Prospecting* 42, 179–209.
- Warner. B.G, Nobes.D.C, Theimer.B.D, (1990). An application of ground penetrating radar to peat stratigraphy of Ellice Swamp, southwestern Ontario. *Canadian Journal of Earth Science*. vol. 27, p. 932-938.
- Winiarski T., Roux G., Moiraud C., 2014. Caractérisation optimisée du remplissage sédimentaire des casiers Girardon - Optimisation par l'utilisation couplée de carottages haute résolution et de profils au radar géologique. Rapport CNR-ENTPE, 76 pages

Frasne : Traceurs géochimiques

- Barbieri M., Boschetti T., Petitta M., Tallini M., 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). *Applied Geochemistry*, Vol 20, p2063-2081
- 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.
- Gurrieri J.T., Furniss G., 2004 - Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. *J. Hydrol.* 297, 187-208.
- 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.
- Lhomot A., Bouchez J., Steinmann M., Lavastre V., Bichet V., Loup C., Stafani V., Boetsch A., Binet P., Toussaint M.-L., Gaillardet J., Guillaume B., 2022. Water and mineralization origins and transfers from the Carbonated Critical Zone to a high value peatland Socio-Ecosystem : a multi tracer evaluation [$87\text{Sr}/86\text{Sr}$, $18\text{O}/2\text{H}$ and elemental ratio] in the Jura Mountains. En préparation.

Maréchal J.C., Etcheverry D., 2003 - The use of 3H and 18O 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.

Luitel : Traceurs géochimiques

Barbieri M., Boschetti T., Petitta M., Tallini M., 2005. Stable isotope (2H, 18O and 87Sr/86Sr) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, Vol 20, p2063-2081

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.

Guitier F., Ponel Ph., Poher Y., Brisset E., Miramont C., Beaulieu J.-L., Guédron S., Charlet L., Sabatier P., Hustache E., Desplanque C., 1995. La réserve naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la Nature. In Cahier RNF n°5. Archives environnementales et évolution des écosystèmes. « Etudier le passé pour comprendre le présent et éclairer l'avenir ». Edition RNF, pages 91-112.

Gurrieri J.T., Furniss G., 2004 - Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. *J. Hydrol.* 297, 187-208.

IAEA/WMO (2022). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: <https://nucleus.iaea.org/wise>

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 18O tracers to characterize water inflows in alpine tunnels. *Appl. Geochem.* 18, 339-351.

ONF, 2019. Site N2000 FR8201732 «Tourbières du Luitel et leur bassin versant ». Disponible sur https://www.isere.gouv.fr/content/download/51612/351777/file/Carte5_Hydrographie.pdf. Consulté le 1/09/2022.

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-Reynauld J., 1972. Hydrogéologie du massif de Chamrousse. Exemple de liaison entre l'hydrogéologie et la structure tectonique. In: *Revue de géographie alpine*, tome 60, n°3. pp. 445-452. Doi : 10.3406/rga.1972.1277.

Thode H.G., 1991. Sulphur isotopes in Nature and the Environment: An overview. In : *Stable Isotopes in the Assessment of natural and anthropogenic Sulphur in the environment*. H.R. Krouse and V.A. Grinenko. 1999.

Luitel : Pédologie et géophysique

Afes (2008) Référentiel pédologique. Association française du sol, Quae, 435p.

Allègre V. (2006) Imageries hydrogéophysiques appliquées à l'étude d'une tourbière. Mémoire

Références bibliographiques

de stage, Osug, Université Joseph Fournier, 43p.

Becker J. (1952) Étude palynologique des tourbes flandriennes des Alpes françaises. Mémoires du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine. Imprimerie de l'Université, Strasbourg, n° 11.

Blaauw, M., 2010. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology* 5, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.01.002>

Bossuet G. (1997) Contribution des sondages électriques à l'étude des sites de tourbières. L'étang du Lautrey (Jura, France). *Quaternaire*, vol. 8, 4, 359-364.

Bradford H., McNamara P., BRowden W., Gooseff M.N. (2005) Measuring thaw depth beneath peat-lined arctic streams using ground-penetrating radar. *Hydrological Processes*. vol. 19,2689-2699.

Bristow C, Dickson M., Jol H. (2008) Ground penetrating radar (GPR) surveys of gravel banier beaches, Waitaki Coast, South Island, New Zealand». In 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR08), (June 1619). University of Birmingham, Birmingham, Angleterre.

Bristow C.S., Jol M.J. (2003) An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. *Geological Society London Special Publications*, 211(1):1-7.

Carozza J.M., Puig C. (2012) Les changements de tracés des cours d'eau d'après les sources historiques et géomorphologiques dans la plaine du Roussillon entre le XIIIe et le XVe siècle. Table ronde : archéologie et histoire Romaine, Nov 2007, Capestang, France. Éditions Monique Mergoil,.297-312.

Carrick E (2017) *Ground Penetrating Radar. Theory and Practice*. Butter Worth-Heinemann. 205p.

Cholet J., Magnon G. (2010) Tourbière des montagnes françaises - Nouveaux éléments de connaissance de réflexion et de gestion. Rapport d'étude, Pôle-relais tourbière, Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels, en partenariat avec la communauté de communes Frasne-Drugeon.

Chunjing Q. (2019) Modélisation de la dynamique du carbone et des surfaces dans les tourbières du nord. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay,

Comas X., Slater L., Reeve A. (2005) Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR). *Journal of Hydrology*, 315 (1), 40-51.

Comas X., Slater L., Reeve A. (2011) Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. *Journal of Hydrology*, 399 (3), 173-184.

Cubizolle H. (2009) *Paléoenvironnements*. Armand Colin, Collection Géographie U, 271 p.

Cubizolle H. (2019) *Les tourbières et la tourbe - Géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire*. Lavoisier, coll. environnement, 472p.

Dallaire P.L. (2010) Utilisation du géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourbe et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région d'Eastmain, baie James, Québec. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Montréal, 149p.

Dangeard M., Schneider S., Bodet L., Riviere A, Guerin R., Rejiba F., Hovhannissian G. (2017) Vers une interpolation hydrogéophysique des propriétés hydrodynamiques de la subsurface : apports du « time-lapse » sismique. PIREN-Seine phase VII - rapport 2017.

Dearing J.A., Hannam J.A., Anderson A.S., Wellington E.M.H. (2001) Magnetic, geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England *Geophys. J.Int.*, 144: 183-196.

Dendievel A.M. (2017) *Paléoenvironnements holocènes du plateau du Béage (massif du Mézenc,*

Massif Central, France). Les variations climatiques et les activités anthropiques révélées par l'étude des macro-restes dans les sédiments tourbeux et la gyttja. Thèse de doctorat, Université de Lyon.

Desplanque C. (2011) Annexe plan de gestion 2011-2020. ONF, 113p.

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

Duranel A. (2015) Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France). Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 535p.

Duranel A. (2016) Étude bibliographique relative à l'évaluation des services écosystémiques rendus par les têtes de bassin et proposition d'une approche expérimentale. Établissement Public Territorial de Bassin de la Vienne, 175p.

Garambois S. (2006) Acquisitions GPR au Lac Luitel. Université Joseph Fourier Grenoble- Alpes, 8p.

Garambois S. (2008) Caractérisation géologique et hydrologique 3D de la tourbière du col Luitel - Apports du GPR - Compléments géophysiques. Rapport de Synthèse, Université Joseph Fourier Grenoble-Alpes, 21p.

Gobat J.M., Grosvernier P., Matthey Y., Buttler A. (1991) Un triangle granulométrique pour les tourbes : analyse semi-automatique et représentation graphique. Science du sol, vo. 29, 1, 23-35.

Graillet D., Paran F., Ré-Bahaud J. (2016) Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau. Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône. Rapport phase 1, ZABR, AERMC, 195p.

Guererro O. (2014) Comparaison et couplage de méthodes géophysiques pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain. Mécanique [physics], Université de Bordeaux.

Gutter F., Ponel P., Poher Y., Brisset E., Miramont C., De Beaulieu J.L. (2013) Étude multidisciplinaire des archives paléo environnementales de la Réserve Naturelle du Lac Luitel – Vers une histoire pluri millénaire de la biodiversité. Compte rendu final du programme scientifique IMBE-ISTERRE, Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale et Institut des Sciences de la Terre ; Pôle Départementale de Biodiversité Isère, 61p.

Heiri O., Flotter A., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of Paleolimnology 25: 101–110.

Holden J., Burt P. (2002) Piping and pipeflow in a deep peat catchment. Catena, 48 (3),163-199.

Holmquist, J.R., Finkelstein, S.A., Garneau, M., Massa, C., Yu, Z., MacDonald, G.M., 2016. A comparison of radiocarbon ages derived from bulk peat and selected plant macrofossils in basal peat cores from circum-arctic peatlands. Quaternary Geochronology 31, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.10.003>

Jol H.M., Smith D.G. (1995) Ground penetrating radar surveys of peatlands for oilfield pipelines in Canada». Journal of Applied Geophysics, vol. 34, 109-123.

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 (Projet ZABR, action 57). Rapport de stage de Master 1 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE. Université de

Références bibliographiques

Saint-Etienne, Mines

Jolly T. (2019) Caractérisation géométrique des faciès pédologiques 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 (Projet ZABR, action 68). Rapport de stage de master 2 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE, Université de Saint-Etienne, EVS UMR 5600, ENTPE, Mines Saint-Etienne, ZABR, AERMC, 141p.

Lagneau L.A. (2006) Caractérisation environnementale de la tourbière de la colline de Covey - Approche écologique et géophysique. Mémoire de licence professionnelle, Institut de Recherche en Biologie Végétale.

Leopold M., VOLkel L. (2003) GPR images of periglacial slope deposits beneath peat bogs in the Central European Highlands, Germany». In *Ground Penetrating Radar in Sediments*, C. S. & Jol Bristow, H. M. (eds), p. 181-189. London: The Geological Society of London.

Lowry C.S., Fratta D., Anderson M.P. Ground Penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland. *Journal of hydrology*, 373 (1), 68-79. 12 p.

Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (2010) *Le monde des tourbières et des marais - France, Suisse, Belgique, Luxembourg*. Delachaux et Niestlé, 320 p.

Naudin A. (2012) Potentiel de la minéralogie magnétique en tant que marqueur des variations environnementales enregistrées par les dépôts tourbeux : Application au marais de la Trézence (17). Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.

Payette S., Rochefort L. (2001) *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses de l'Université de Laval, 621 p.

Porteret J. (2008) *Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif Central*. Thèse de doctorat Interface Nature Société, Université Jean Monnet, Saint-Étienne, 414p.

Reimer, P., Austin, W., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., . . . Talamo, S. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725-757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

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*, 429, 75-84.

Rosa E. (2007) *Caractérisation hydrogéologique du complexe tourbeux de Lanoraie, Québec, Canada*. Mémoire de maîtrise, Sciences de la Terre, Université du Québec à Montréal, 95p.

Rosa E., Larocque M., Pellerin S, Gagne S., Fournier B. (2009) Detennining the number of manual measurements required to improve peat thickness estimations by ground penetrating radar. *Earth Surface Process and Landforms*, 7.

Salomon F. (2013) *Géoarchéologie du delta du Tibre : Evolution géomorphologique holocène et contraintes hydro sédimentaires dans le système Ostie– Portus*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2.

Warmer B.G., Nobes D.C., Theimer B.D. (1990) An application of ground penetrating radar to peat stratigraphy of Ellice Swamp, southwestern Ontario». *Canadian Journal of Earth Science*. vol. 27, 932-938.

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

Wegmüller S. (1977) *Pollenanalytische Untersuchungen zur spät- und postglazialen*

Vegetationsgeschichte des Französischen Alpen (Dauphiné). Verlag Paul Haupt, Bern, 41-48.

Winiarski T., Chabrier C., Goutaland D., Roux G. (2017) Traitement et analyse des radargrammes - PDR. Observatoire des Sédiments du Rhône, LEHNA IPE. OSR4 2015- 2017.

Winiarski T., Roux G., Moiraud C. (2014) Caractérisation sédimentologique d'un casier Girardon et de sa pollution associée ; couplage carottage et radar géologique

Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site

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

Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng P., Al-malki A. (2003) Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 248-269.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00418-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00418-3)

Duranel A. (2016). Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France) [Phdthesis, Université de Lyon]

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01560566>

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

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.

Gillon F. (2004) Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à communications électroniques, 183.

Glossaire Eau, Milieu Marin et Biodiversité : <http://www.glossaire-eau.fr/concept/rang-de-confluence-de-strahler>

Ingram H.A.P. (1978) Soil layers in mires: function and terminology. *J. Soil Sci.*, 29 (1978), pp. 224-227, [10.1111/j.1365-2389.1978.tb02053.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1978.tb02053.x)

Ivanov K.E. (1953) The Hydrology of Bogs [in Russian], Gidrometeorologicheskoe Izd-vo (1953)

Jolly, T. (2019) Caractérisation géométrique des faciès pédologiques de la tourbière de la Réserve Naturelle Nationale du Lac Luitel. Université Lumière Lyon II.

Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (1999) Le monde des tourbières et des marais. Delachaux et Niestlé ed. Lausanne (Switzerland)-Paris, 320p.

Nordstrom D. (2012) Models, validation, and applied geochemistry: Issues in science, communication, and philosophy. *Applied Geochemistry*, 27(10), 1899-1919.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.07.007>

Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col du Luitel (Isère). École des Mines de Saint-Etienne.

PNRZH (2005) Caractérisation des zones humides. Cahier Thématique, 70p.

Porteret J. (2005) Étude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nord-est du Massif Central français : La Prenarde dans les Monts du Forez. In P. du C. de R. sur l'Environnement et

Références bibliographiques

l'Aménagement (Éd.), Origine, dynamique et conservation des tourbières (p. 378). Publication de l'Université de Saint Etienne.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00371252>

Romanov V.V. (1968) Hydrophysics of bogs. Israël Program for Scientific Translations, Jerusalem, 299p.

Sadkou S. (2020) Étude du fonctionnement hydrodynamique des tourbières et de leur potentiel de soutien d'étiage (Projet ZABR, action 67). Rapport de Master 2 parcours Géosphère (GEOgraphies – eSPaces – Homme/Environnement – Ressources). Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS, ZABR, AE-RMC, 83p.

Smets H. (2016) Le droit de l'eau : quelle quantité minimum ? Académie de l'Eau, France.

https://www.aquapublica.eu/sites/default/files/event/file/2017-11/smets_le_droit_a_l_eau.pdf

Wastiaux C. (2008) Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement ?

<https://pdfs.semanticscholar.org/ee85/011fff635874018a9ff8a8bcde8928e9fcc6.pdf>

Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant

Acreman M., Holden J. (2013) How wetlands affect floods. *Wetlands*, 33(5), 773-786.

Ali G., Birkel C., Tetzlaff D., Soulsby C., McDonnell J.J., Tarolli P. (2014) A comparison of wetness indices for the prediction of observed connected saturated areas under contrasting conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 399-413.

Ameli A.A., Creed I.F. (2019) Does wetland location matter when managing wetlands for watershed-scale flood and drought resilience?. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 55(3), 529-542.

Barnaud G., Fustec É. (2007) Conserver les milieux humides : pourquoi ? Comment ? Educagri éditions.

Bertrand M. (2020) Élaboration d'indicateurs synthétiques du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant. Rapport de Post-doc, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, Université de Saint-Etienne-Isthme, Mines Alès, ZABR, AE-RMC, ONF Aude, Département de l'Aude, 61p.

Beven K.J., Kirkby M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69.

Böhme B., Becker M., Diekkrueger B., Foerch G. (2016) How is water availability related to the land use and morphology of an inland valley wetland in Kenya?. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 93, 84-95.

Bourget É., Dû-Blayo L.L. (2010) Définition d'unités paysagères par télédétection en Bretagne : méthodes et critiques. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (216), 69-83.

Branton C., Robinson D.T. (2020) Quantifying topographic characteristics of wetlandscapes. *Wetlands*, 40(2), 433-449.

Bullock A., Acreman M. (2003) The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 358-389.

Chaplot V., Walter C. (2006) Improving the spatial prediction of soils at local and regional levels through a better understanding of soil-landscape relationships: soil hydromorphy in the Armorican Massif of western France. *Developments in Soil Science*, 31, 507-630.

Chaplot V., Walter C., Curmi P. (2000) Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*, 97(3-4), 405-422.

- Chaplot V., Walter C., Curmi P. (2003) Testing quantitative soil-landscape models for predicting the soil hydromorphic index at a regional scale. *Soil science*, 168(6), 445-454.
- Cocula C., Parmain V., Ebrard E. (2018) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude. Rapport phase 1. ONF, AE-RMC, CD Aude, 57p.
- Cocula C., Parmain V., Ebrard E. (2019) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude. Rapport phase 2. ONF, AE-RMC, CD Aude, 91p.
- Cowley K.L., Fryirs K.A., Hose G.C. (2018) The hydrological function of upland swamps in eastern Australia: The role of geomorphic condition in regulating water storage and discharge. *Geomorphology*, 310, 29-44.
- Crave A., Gascuel-Oudou C. (1997) The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological processes*, 11(2), 203-210.
- Curie F., Gaillard S., Ducharme A., Bendjoudi H. (2007) Geomorphological methods to characterise wetlands at the scale of the Seine watershed. *Science of the total environment*, 375(1-3), 59-68.
- Fossey M., Rousseau A.N., Savary S. (2016) Assessment of the impact of spatio-temporal attributes of wetlands on stream flows using a hydrological modelling framework: a theoretical case study of a watershed under temperate climatic conditions. *Hydrological Processes*, 30(11), 1768-1781.
- Gayet G., Baptist F., Baraille L., Caessteker P., Clément J.C., Gaillard J., Touroult J. (2016) *Méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides*. Fondements théoriques, scientifiques et techniques. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, Muséum national d'Histoire naturelle.
- Grabs T., Seibert J., Bishop K., Laudon H. (2009) Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 15-23.
- Gravelius I.I. (1914) *Rivers in German*. Berlin, Germany: Göschen. Grundri[dtilde] der gesamten Gewässerkunde, Band I: Flußkunde (Compendium of Hydrology, vol. I.
- Güntner A., Seibert J., Uhlenbrook S. (2004) Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. *Water Resources Research*, 40(5).
- Guo M., Li J., Sheng C., Xu J., Wu L. (2017) A review of wetland remote sensing. *Sensors*, 17(4), 777.
- Hjerdt K.N., McDonnell J.J., Seibert J., Rodhe A. (2004) A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. *Water resources research*, 40(5).
- Hogg A.R., Todd K.W. (2007) Automated discrimination of upland and wetland using terrain derivatives. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33(sup1), S68-S83.
- Holden J. (2006) Peatland hydrology. *Developments in Earth Surface Processes*, 9, 319-346.
- Holden J., Kirkby M.J., Lane S.N., Milledge D.G., Brookes C.J., Holden V., McDonald A.T. (2008) Overland flow velocity and roughness properties in peatlands. *Water Resources Research*, 44(6).
- Infascelli R., Faugno S., Pindozi S., Boccia L., Merot P. (2013) Testing different topographic indexes to predict wetlands distribution. *Procedia Environmental Sciences*, 19(0), 733-746.
- Kaplan G., Avdan U. (2017) Mapping and monitoring wetlands using Sentinel-2 satellite imagery. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- Kaplan G., Avdan U. (2018) Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion for mapping and monitoring wetlands.
- Kaplan G., Avdan U. (2019) Evaluating the utilization of the red edge and radar bands from

Références bibliographiques

sentinel sensors for wetland classification. *Catena*, 178, 109-119.

Kirkby M.J., Cox N.J. (1995) A climatic index for soil erosion potential (CSEP) including seasonal and vegetation factors. *Catena*, 25(1-4), 333-352.

Kiss R. (2004) Determination of drainage network in digital elevation model, utilities and limitations *Journal of Hungarian Geomathematics*, vol.2, p.16-29

Lacoste M., Lemerrier B., Walter C. (2011) Regional mapping of soil parent material by machine learning based on point data. *Geomorphology*, 133(1-2), 90-99.

Lacoste M., Lemerrier B., Walter C. (2011) Regional mapping of soil parent material by machine learning based on point data. *Geomorphology*, 133(1-2), 90-99.

Lang M., McCarty G., Oesterling R., Yeo I.Y. (2013) Topographic metrics for improved mapping of forested wetlands. *Wetlands*, 33(1), 141-155.

Laroche B., Richer-De-Forges A., Saby N., Martelet G., Tourlière B., Deparis J., Arrouays D. (2013) Potentiel de la spectrométrie gamma aéroportée pour la cartographie des sols et du régolithe: une mini-revue et des premiers exemples en régions Centre et Limousin. *Etude et Gestion des Sols*, 20(1), 15-28.

Larocque M., Biron P.M., Buffin-Bélanger T., Needelman M., Cloutier C.A., McKenzie J.M. (2016) Role of the geomorphic setting in controlling groundwater–surface water exchanges in riverine wetlands: A case study from two southern Québec rivers (Canada). *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 41(4), 528-542.

Lefebvre G., Davranche A., Willm L., Campagna J., Redmond L., Merle C., Poulin B. (2019) Introducing WIW for detecting the presence of Water In Wetlands with Landsat and Sentinel satellites. *Remote Sensing*, 11(19), 2210.

Leibowitz S. G., Wigington Jr P.J., Schofield K.A., Alexander L.C., Vanderhoof M.K., Golden H.E. (2018) Connectivity of streams and wetlands to downstream waters: an integrated systems framework. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(2), 298-322.

Lemerrier B., Lacoste M., Loum M., Berthier L., Le Bris A.L., Walter C. (2013) Apport de la cartographie numérique des sols pour prédire l'hydromorphie et l'extension des zones humides potentielles à l'échelle régionale. *Étude et Gestion des Sols*, 20(1), 47-66.

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.

Martin C., Didon-Lescot J.F., Marc V. (2001) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides du Mont-Lozère : l'exemple de la tourbière des Sagnes.

Mckee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Actes de la 8th Conference on Applied Climatology (Anaheim, Californie)*, p. 179-184

McLaughlin D.L., Kaplan D.A., Cohen M.J. (2014) A significant nexus: Geographically isolated wetlands influence landscape hydrology. *Water Resources Research*, 50(9), 7153-7166.

Melton M.A. (1965) The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona. *J Geol* 73:1–38.

Merot P., Ezzahar B., Walter C., Arousseau P. (1995) Mapping waterlogging of soils using digital terrain models. *Hydrological processes*, 9(1), 27-34.

Merot P., Squidant H., Arousseau P., Hefting M., Burt T., Maitre V., Viaud V. (2003) Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling*, 163(1-2), 51-71.

O'Neil G.L., Saby L., Band L.E., Goodall J.L. (2019) Effects of LiDAR DEM smoothing and

conditioning techniques on a topography-based wetland identification model. *Water Resources Research*, 55(5), 4343-4363.

Pack, Tarboton et Goodwin (1998) *Terrain Stability Mapping with SINMAP, Technical Description and Users Guide for Version 1.00.*

Porteret J. (2005) *Étude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nord-est du Massif Central français : la Prenarde dans les Monts du Forez. Origine, dynamique et conservation des tourbières, Octobre 2005, Château de Goutelas, France. pp.378. hal-00371252*

Porteret J. (2008) *Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif Central (Doctoral dissertation, Université Jean Monnet-Saint-Etienne).*

Rampi L.P., Knight J.F., Lenhart C.F. (2014) *Comparison of flow direction algorithms in the application of the CTI for mapping wetlands in Minnesota. Wetlands*, 34(3), 513-525.

Seibert J., McGlynn B. (2007) *A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. Water Resources Research*. 43. -. 10.1029/2006WR005128.

Thompson J.C., Moore R.D. (1996) *Relations between topography and water table depth in a shallow forest soil. Hydrological processes*, 10(11), 1513-1525.

Vaudor L. (2015) *Classification par forêts aléatoires. R-atique : Analyse de Données avec R.*
<http://perso.ens-lyon.fr/lise.vaudor/URL>

Weise K., Paganini M., Wolf B., Fitoka E., Hansen H., Bonino E., van Valkengoed E. (2012) *Globwetland II – the new opportunities with Sentinel – 2 for wetland mapping and monitoring. Proc. 'First Sentinel-2 Preparatory Symposium', Frascati, Italy 23–27 April 2012, ESA SP-707, July 2012*

Whyte A., Ferentinos K.P., Petropoulos G.P. (2018) *A new synergistic approach for monitoring wetlands using Sentinels-1 and 2 data with object-based machine learning algorithms. Environmental Modelling & Software*, 104, 40-54

Wood A.P., van Halsema G.E. (2008) *Scoping agriculture–wetland interactions: Towards a sustainable multiple-response strategy (Vol. 33). FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987) *Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surf. Process. Landforms*, 12: 47-56. doi:10.1002/esp.3290120107

Zuecco G., Rinderer M., Penna D., Borga M., van Meerveld H.J. (2019) *Quantification of subsurface hydrologic connectivity in four headwater catchments using graph theory. Science of the Total Environment*, 646, 1265-1280.

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3) | 7 |
| Figure 2 : Fonctionnement hydrologique du complexe tourbeux de Luitel : schéma conceptuel..... | 17 |
| Figure 3 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne | 24 |
| Figure 4 : Suivi en continu de la conductivité électrique de l'eau à l'exutoire principal de la tourbière de Frasne | 25 |
| Figure 5 : Estimation de la contribution relative (%) des 2 tributaires à l'exutoire principal | 25 |
| Figure 6 : Estimation de la contribution en débit (l/s) des 2 tributaires à l'exutoire principal | 25 |
| Figure 7 : Remplissage/vidage de la doline du Creux au lard..... | 27 |
| Figure 8 : Relation hauteur d'eau/volume d'eau (courbe bleue) et hauteur d'eau/surface noyée (courbe orange) dans la doline du Creux au lard | 27 |
| Figure 9 : Remplissage rapide du Creux au lard suite à un orage estival (3 et 4 juillet 2018)..... | 28 |
| Figure 10 : Remplissage consécutif du Creux au lard suite à 2 épisodes pluvieux hivernaux (20 au 26 décembre 2018)..... | 28 |
| Figure 11 : Remplissage double non consécutif du Creux au lard suite à 2 épisodes pluvieux hivernaux (14 au 24 janvier 2021) | 29 |
| Figure 12 : Remplissage long du Creux au lard lors d'un long épisode pluvieux hivernal avec un niveau d'eau important (jusqu'à environ 11,5 m) | 29 |
| Figure 13 : Carte topographique IGN de la Réserve Naturelle Régionale des tourbières de Frasne et de Bouverans | 33 |
| Figure 14 : Carte géologique de la RNR des tourbières de Frasne et de Bouverans. La zone de tourbière étudiée est délimitée par un trait rose..... | 34 |
| Figure 15 : Photographie aérienne de la zone d'étude. Tourbière du Forbonnet. Localisation des piézomètres (étoiles rouges et jaunes), des ruisseaux (traits bleus, numérotation cercles jaunes) ; des fossés (traits jaunes et noirs, numérotation cercles roses), des fosses (numérotation cercles rouges) et autres zones d'excavation (trous, cercles verts) localisation supposés des moraines (trait gris) | 34 |
| Figure 16 : Vue aérienne détaillée de la tourbière du Forbonnet et localisation des piézomètres (étoiles colorées), des zones excavées (rond vert) et des points de prélèvement à l'exutoire de la tourbière (points jaunes) | 35 |
| Figure 17 : Variations du pH et des conductivités pour les eaux collectées sur le secteur de la tourbière du Forbonnet en juillet 2019 | 39 |
| Figure 18 : Distribution dans un diagramme de Piper des échantillons d'eau collectés sur le secteur de la Tourbière du Forbonnet en juillet 2019 | 39 |
| Figure 19 : Cercle des corrélations de l'ACP effectuée à partir des données obtenues sur les eaux la tourbière du Forbonnet de juillet 2019 | 40 |
| Figure 20 : Graphique des observations – Représentation des observations dans l'espace ACP. Eaux de la tourbière du Forbonnet – campagne de juillet 2019 | 40 |

Liste des figures et tableaux

| | |
|---|----|
| Figure 21 : Distribution dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ des eaux des piézomètres, des zones d'excavation et des ruisseaux de la zone humide du Forbonnet. GMWL : Global Meteoric Water Line ; LMWL : Local Meteoric Water Line..... | 41 |
| Figure 22 : Variations du pH et de la conductivité pour les eaux des ruisseaux, des zones d'excavation et des piézomètres de la tourbière de Forbonnet en novembre 2020..... | 42 |
| Figure 23 : Distributions sur un diagramme de Piper des échantillons d'eau collectés en novembre 2020 .. | 43 |
| Figure 24 : Cercle des corrélations de l'ACP effectuée à partir des données obtenues sur les eaux de la tourbière du Forbonnet de novembre 2020 | 43 |
| Figure 25 : Graphique des observations – représentation des observations dans l'espace ACP – Eaux de la tourbière du Forbonnet – Campagne de novembre 2020. | 44 |
| Figure 26 : Distribution des données isotopiques dans un diagramme $\delta^{18}O$ vs δD pour les eaux de la tourbière vivante, de la tourbière de bas-marais, les ruisseaux et zones d'excavation en période de moyennes-eaux/hautes-eaux (novembre 2020). GMWL = Global Meteoric Water Line ; LMWL1 et 2 = Local Meteoric Water Line (Lhosmot et al., 2022) | 44 |
| Figure 27 : Principe de l'approche statistique. [pt : Profondeur de la nappe ; Pt : Précipitations ; ETP : Évapotranspiration potentielle]..... | 47 |
| Figure 28 : Synthèse de l'approche et des tendances modélisées via une approche statistique (Bertrand et al., 2021) | 48 |
| Figure 29 : Profondeur de la nappe par rapport à la surface (WTD) au niveau de la plateforme scientifique en fonction du débit journalier (Période de mesure 2015-septembre 2020 ; Toussaint et al., 2020). [Surface du sol : ligne continue horizontale, $y = 0$; Limite acrotelme-catotelme : ligne pointillée, $y = -0,10$ m]..... | 51 |
| Figure 30 : Estimation du gain de bassin versant topographique après la restauration (d'après Magnon et Grosvernier, 2015 ; Fond de carte IGN 2018). [La surface du Bassin Versant topographique pour Amont Droit et Amont Gauche est calculée avec le logiciel QGIS à partir du MNT Lidar de 2011]... | 51 |
| Figure 31 : Localisation des piézomètres étudiés par rapport aux ouvrages de restauration. [Drains comblés lors des travaux de restauration : ligne bleue ; Digue : rectangle pointillés violets ; Zone inondée après la restauration : pointillés jaunes]. | 52 |
| Figure 32 : Niveaux piézométriques des deux systèmes de flutes de pan sur la période 2014-2018. [Incertitude associée à l'acquisition des données : contour coloré autour des courbes noires ; Deux phases des travaux de restauration (21 septembre - 14 octobre 2015 et 23 mai -21 juin 2016 respectivement) : barres verticales ; Niveau de surface : couleur verte ; Profondeur intermédiaire : couleur jaune ; Niveau profond : brun]..... | 52 |
| Figure 33 : Évolution verticale de la conductivité électrique de l'eau de la tourbière pour la saison 2016 (Données issues de Collin, 2016). [Se référer à la Figure 31 pour la localisation des piézomètres]. . | 53 |
| Figure 34 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la tourbière du Forbonnet (Lhosmot et al., 2021)..... | 54 |
| Figure 35 : Variation d'altitude de la nappe pour les piézomètres TV11, 12, 13 et 14. Les cercles symbolisent la moyenne mensuelle pour juillet 2014 et avril 2020 respectivement. C'est cette moyenne qui a été utilisée pour comparer la variation de stockage d'eau dans la tourbière entre ces deux périodes. ... | 56 |
| Figure 36 : Évolution de la distance $H_{\text{toit piezo}} - H_{\text{sol}}$ pour certains piézomètres de la tourbière active. Les courbes colorées sont les moyennes annuelles tandis que les courbes grisées suivent les valeurs de mesures ponctuelles..... | 57 |
| Figure 37 : ETP mensuel calculée avec différentes méthodes sur la période Juillet 2014 - Avril 2020. ETo*Kc signifie l'ETo de Penman Monteith multiplié par un « crop » coefficient..... | 58 |

Figure 38 A : Précipitations et débit mensuels. La bande grise autour de la courbe de débit correspond à l'incertitude calculée à partir de la courbe de tarage. B : ETP mensuel. La courbe verte représente la moyenne des trois méthodes de calcul de l'ETP. La bande colorée en gris correspond à la l'intervalle compris entre les valeurs minimales et maximales parmi les trois méthodes de calcul de l'ETP. C : L'axe vertical à gauche est associé aux courbes cumulées du bilan hydrologique mensuel moyen, maximum et minimum. Le graphique en barre (axe vertical à droite) représente le bilan hydrologique mensuel moyen. La barre d'erreur correspond à la différence entre la valeur moyenne et la valeur maximum/minimal de bilan hydrologique calculé. 59

Figure 39 : Schéma conceptuel du modèle réservoir utilisé pour reproduire le débit à l'exutoire de la tourbière du Forbonnet. 62

Figure 40 : Débit mesuré et simulé (Q_{S-prob} et intervalle de confiance) en fonction du temps pour la totalité de la période d'étude. Le fond de couleur indique si la période est en warm-up (fond transparent), calibration (vert) ou en validation (beige) 64

Figure 41 : Évolution du débit mesuré et simulé (Q_{S-prob} et intervalle de confiance) en fonction du temps. Chaque partie représente une année civile. Le fond de couleur indique si la période est en calibration (vert) ou en validation (beige). La Figure 42 montre que de la quantité d'eau cumulée exportée par le système est très proche entre les débits simulés et observés. Cela montre la qualité du modèle pour reproduire la quantité d'eau exportée de la tourbière à une échelle pluriannuelle. La différence de volume exportée entre le cumul de débit simulé et observé est seulement de 1,6 % pour la période de calibration et de 2 % pour la période de validation du modèle. L'ellipse rouge montre des évènements mal pris en compte par le modèle. 64

Figure 42 : Volume cumulé à l'exutoire de la tourbière sur la période calibration et validation. La comparaison des courbes simulé et observé montre la qualité du modèle pour reproduire la quantité d'eau exportée de la tourbière à une échelle pluriannuelle. 65

Figure 43 : Distribution des valeurs de KGE (période de calibration) en fonction des valeurs obtenues pour chaque paramètre parmi les 15973 simulations où le KGE est supérieur à 0.70. Le point rouge correspond à la simulation dont le KGE est le plus haut. L'axe horizontal pour les 3 graphiques du bas est en log. 66

Figure 44 : Évolution du débit mesuré et du Q_{loss} en fonction du temps. Chaque partie représente une année civile. Le fond de couleur indique si la période est en calibration (vert) ou en validation (beige). 67

Figure 45 : Décomposition du signal de la courbe cumulée du de la moyenne mensuelle de la somme du niveau d'eau dans les réservoirs E et M du modèle Karstmod avec la fonction seasonal decompose. Le signal d'entrée est décomposé en trois signaux : 1) la tendance long terme, 2) un cycle saisonnier et 3) les résidus. La somme de ces trois signaux permet de reconstruire la courbe cumulée du $\Delta stock$ mensuel (modèle dit additif)..... 68

Figure 46 : Acquisition GPR en hiver sur la tourbière de Frasne (25) – Février 2022 69

Figure 47 : Exemple de résultat obtenu par GPR dans une tourbière du Wisconsin (USA) qui permet une interprétation du profil en fonction des caractéristiques du milieu (Lowry et al., 2009). 72

Figure 48 : Exemple de résultat obtenu par GPR dans une tourbière du Maine (USA) qui permet une interprétation du profil en fonction des caractéristiques du milieu (Comas et al., 2005) 73

Figure 49 : Exemple de résultat obtenu par ERT (Comas et al., 2011). 73

Figure 50 : Le système d'acquisition SIR-3000 au premier plan, et de gauche à droite les antennes de 100 (non utilisée dans cette étude), 200 et 400 Mhz..... 74

Figure 51 : Adaptation de l'antenne 200 Mhz sur une pulka pour les campagnes hivernales. 75

Figure 52 : Répartition et localisation de tous les profils acquis lors des trois campagnes de mesures. 76

Liste des figures et tableaux

| | |
|--|-----|
| Figure 53 : Répartition et localisation des profils traités et interprétés. Les points représentent le départ et l'arrivée des différents sous profils. | 76 |
| Figure 54 : Positionnements des 5 carottes existantes, des profils GPR acquis durant cette étude et des profils ERT acquis dans des travaux ultérieurs. | 78 |
| Figure 55 : Profils de Tomographie de Résistivité Électrique, dispositif Wenner-Schlumberger (UMR CNRS 6249-Chrono-environnement, juillet 2015). | 78 |
| Figure 56 : Illustration de la démarche avec le sous profil NS_GPR2E : a) radargramme brut ; b) radargramme traité selon la procédure de l'étape 1 ; c) radargramme traité et interprété, avec positionnement des sondages à la perches..... | 80 |
| Figure 57 : Localisation du sous profil NS_GPR2E et position des sondages à la perche..... | 81 |
| Figure 58 : Synthèse des résultats du profil EW_GPR1 | 82 |
| Figure 59 : Synthèse des résultats du profil EW_GPR2 | 83 |
| Figure 60 : Synthèse des résultats du profil NS_GPR1. | 85 |
| Figure 61 : Synthèse des résultats du profil NS_GPR2 | 86 |
| Figure 62 : Exemple du profil NS_GPR1_B structures internes (extrait)..... | 87 |
| Figure 63 : Exemples d'anomalies rencontrées et premières tentatives d'interprétation. | 88 |
| Figure 64 : Tentative d'interprétation globale sur influence de la morphologie du mur de la nappe sur les écoulements dans la tourbière de Frasne | 89 |
| Figure 65 : Instrumentation hydrologique au Luitel..... | 102 |
| Figure 66 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel | 103 |
| Figure 67 : Chronique de données du ruisseau de Fontfroide (26 avril 2018 au 27 juillet 2022)..... | 105 |
| Figure 68 : Étiage estival 2018 (11 juin au 29 octobre 2018) | 106 |
| Figure 69 : Étiage estival 2019 (13 juin au 23 octobre 2019) | 106 |
| Figure 70 : Étiage estival 2020 (4 juin au 10 octobre 2020) | 106 |
| Figure 71 : Étiage estival 2021 (7 juin au 19 juillet)..... | 107 |
| Figure 72 : Étiage 2022 (en cours d'acquisition) | 107 |
| Figure 73 : Étiage hivernal 2018-2019 (21 décembre au 2 mars) | 107 |
| Figure 74 : Étiage 2018 – zone nord (1 juin au 16 aout)..... | 108 |
| Figure 75 : Étiage 2018 – zone sud (1 juin au 16 aout) | 108 |
| Figure 76 : Étiage 2019 – zone nord (1 juin au 31 juillet)..... | 109 |
| Figure 77 : Étiage 2019 – zone centrale - Fontfroide (1 juin au 31 juillet) | 109 |
| Figure 78 : Étiage 2019 – zone sud (1 juin au 31 juillet)..... | 109 |
| Figure 79 : Étiage 2019 – zone nord (1 aout au 30 septembre) | 110 |
| Figure 80 : Étiage 2019 – zone centrale - Fontfroide (1 aout au 30 septembre) | 110 |
| Figure 81 : Étiage 2019 – zone sud (1 aout au 30 septembre) | 110 |
| Figure 82 : Étiage 2020 – zone nord (1 juin au 1 septembre) | 111 |
| Figure 83 : Étiage 2020 – zone centrale - Fontfroide (1 juin au 1 septembre)..... | 111 |
| Figure 84 : Étiage 2020 – zone sud (1 juin au 1 septembre) | 111 |
| Figure 85 : Chronique de données du piézomètre P4 (17 mai 2019 au 27 juillet 2022)..... | 113 |

| | |
|--|-----|
| Figure 86 : Chronique de données du piézomètre P6 (6 novembre 2018 au 27 juillet 2022) | 113 |
| Figure 87 : Essai d'eau sur le piézomètre P3 - courbe de remontée après pompage..... | 115 |
| Figure 88 : Débits moyens mensuels sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide. | 118 |
| Figure 89 : Débits spécifiques moyens mensuels sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide..... | 119 |
| Figure 90 : Débits classés de Fontfroide et du Ruisseau du Lac..... | 119 |
| Figure 91 : Autocorrélation des débits sur la période 2014-2020 pour le Ruisseau du Lac et sur la période 2012-2020 pour Fontfroide. | 120 |
| Figure 92 : Corrélations croisées Précipitations – débit et Température moyenne journalière – débit pour le Ruisseau du Lac..... | 120 |
| Figure 93 : Corrélations croisées Précipitations – débit et Température moyenne journalière – débit pour Fontfroide..... | 121 |
| Figure 94 : Corrélations croisées Précipitations – débit pour Fontfroide et le Ruisseau du Lac sur les périodes estivales (juin à août)..... | 121 |
| Figure 95 : Coefficients d'écoulement comparés sur Fontfroide (2012-2019) et le Ruisseau du Lac (2014-2019) par année..... | 122 |
| Figure 96 : Coefficients d'écoulement comparés sur Fontfroide et le Ruisseau du Lac par mois. | 122 |
| Figure 97 : Valeurs moyennes, médianes, maximales et minimales par date pour le piézomètre P3. | 123 |
| Figure 98 : hauteurs classées pour le piézomètre P3..... | 123 |
| Figure 99 : Autocorrélation du piézomètre P3 sur l'ensemble de la durée de mesure. Le décalage en abscisse est donné en jours ainsi que pour les figures suivantes. | 124 |
| Figure 100 : Corrélations croisées pluie-niveau sur l'ensemble des données du piézomètre P3..... | 124 |
| Figure 101 : Corrélations croisées température-niveau sur l'ensemble des données du piézomètre P3. | 125 |
| Figure 102 : Débits observés sur Fontfroide amont et Fontfroide aval. | 125 |
| Figure 103 : Différence entre aval et amont à Fontfroide et moyenne mobile sur 10 jours | 126 |
| Figure 104 : Débits classés comparés amont et aval..... | 126 |
| Figure 105 : Autocorrélation des valeurs de débit amont et aval..... | 127 |
| Figure 106 : Corrélations croisées pluie-débit amont et aval..... | 127 |
| Figure 107 : Corrélations croisées température-débit..... | 128 |
| Figure 108 : Architecture sélectionnée. La sortie (point rouge) donne le débit simulé..... | 129 |
| Figure 109 : Résultat en test pour l'année 2020. | 129 |
| Figure 110 : Marquage temporel de l'apparition de débits négatifs simulés dans l'année..... | 130 |
| Figure 111 : Cumul sur 30 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus..... | 130 |
| Figure 112 : Cumul sur 60 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus..... | 131 |
| Figure 113 : Température moyenne des 10 derniers jours en fonction du débit simulé de juillet à octobre inclus..... | 131 |
| Figure 114 : ETP cumulée sur 30 jours en fonction du débit simulé entre juillet et octobre inclus. | 132 |
| Figure 115 : Extrait de la carte géologique au 1/50000ème. La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge | 133 |

Liste des figures et tableaux

| | |
|---|-----|
| Figure 116 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac Luitel (Desplanque, 2001 in Guiter et al., 2015) | 134 |
| Figure 117 : Bassin versant des tourbières de Luitel (ONF, 2019) | 135 |
| Figure 118 : Localisation des points d'échantillonnage [les piézomètres de la zone humide sont notés P _{xx} ; les fossés/drains sont notés Fo _x ; le ruisseau de Fontfroide est noté FF (AMBV = amont bassin versant; SAV = seuil aval; SAM = seuil amont; CE = centre); CAP = captage; P _{sm} = station météorologique] | 135 |
| Figure 119 : Distribution des précipitations du Luitel dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ [DEMM : droite des eaux météoriques mondiales; DEML-Thonon : droite des eaux météoriques locales de Thonon (IAEA/WMO, 2022)] | 139 |
| Figure 120 : Évolution du $\delta^{18}O$ des précipitations mensuelles à Thonon (IAEA/WMO, 2022) (valeurs maximales = pointillés fin gris; valeurs moyennes = trait continu gris; valeurs minimales = trait gris pointillés fins. Pour les $\delta^{18}O$ des précipitations cumulées à Thonon : points bleus = date de collecte; trait bleu = période de cumul des précipitations du Luitel) | 139 |
| Figure 121 : Évolution du δD des précipitations mensuelles à Thonon (IAEA) (valeurs maximales = pointillés fin gris; valeurs moyennes = trait continu gris; valeurs minimales = trait gris pointillés fins. Pour le δD des précipitations cumulées à Thonon : points bleus = date de collecte; trait bleu = période de cumul des précipitations du Luitel) | 139 |
| Figure 122 : Distribution des eaux de surface du bassin versant de Fontfroide dans un diagramme de Piper | 141 |
| Figure 123 : Distribution des eaux de la Sagne du Pin en tête du bassin versant de Fontfroide dans un diagramme de Schoeller | 141 |
| Figure 124 : Distribution des eaux du ruisseau de Fontfroide dans un diagramme de Schoeller pour les eaux prélevées en amont (rouge), en entrée (bleu), au passage (orange) et en sortie (vert) de la tourbière du Col pour différentes dates | 141 |
| Figure 125 : Distribution des eaux du bassin versant de Fontfroide dans le diagramme Cl (mg/L) vs Na (mg/L) pour les eaux de pluies et les eaux prélevées dans les lacs de Praver et du Luitel et pour les eaux prélevées en tête de bassin versant (Sagne du pin), dans le ruisseau de Fontfroide entre la Sagne du pin et la tourbière (Libellé des points, voir Tableau 12) | 142 |
| Figure 126 : Distribution dans un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ des eaux de surface de la Sagne du pin et du ruisseau de Fontfroide et de la Sagne de l'ours et du ruisseau Pezanti (carrés blancs [DEMM = Droite des Eaux Météoriques Mondiales; DEML-Thonon = Droite des Eaux Météoriques Locales de Thonon (DEML-Thonon; IAEA)] | 142 |
| Figure 127 : Évolution du $\delta^{18}O$ des eaux du ruisseau de Fontfroide (cercles pleins oranges) et de Pezanti (carrés verts) au cours de la période d'étude | 142 |
| Figure 128 : Distribution des δD vs $\delta^{18}O$ des eaux de la Sagne du pin et du ruisseau de Fontfroide, du captage et du ruisseau de Pezanti. La droite en pointillés correspond à la droite des Eaux Météoriques Mondiales (DEMM) et la droite en trait plein orange correspond à la droite des eaux météoriques locales de Thonon (DEML – Thonon; IAEA) | 142 |
| Figure 129 : Distribution des eaux du ruisseau de Pezanti dans le diagramme de Piper. | 143 |
| Figure 130 : Typologie des eaux de la Sagne de l'Ours (rouge) et des eaux du ruisseau de Pezanti à l'amont (bleu) et à l'aval (orange) de la tourbière pour différentes dates de prélèvement | 143 |
| Figure 131 : Diagramme de Schoeller - Comparaison des tendances définies par les eaux prélevées au niveau des têtes de sous-bassins versants (Sagne du pin et Sagne de l'ours) et des fossés 1 et 3 .. | 144 |
| Figure 132 : Diagramme de Schoeller, comparaison des tendances définies par les eaux prélevées au niveau du captage et de la partie amont du ruisseau de Fontfroide pour les campagnes de juin 2018, juillet 2019 et 2020 (Trait plein = captage; traits pointillés = eaux du ruisseau de Fontfroide) | 145 |

| | |
|---|-----|
| Figure 133 : Variations des valeurs de pH pour les eaux de la tourbière prélevées en juin 2018, Juillet 2019 et 2020..... | 146 |
| Figure 134 : Variations des conductivités mesurées sur les eaux de la tourbière pour juin 2018, Juillet 2019 et 2020..... | 146 |
| Figure 135 : Distribution des eaux de la tourbière (juin 2018 et juillet 2019-2020) dans un diagramme de Piper pour les campagnes de juin 2018 (carrés jaunes), juillet 2019 (triangles blancs) et 2020 (hexagones bleus)..... | 148 |
| Figure 136 : Gamme de variations des concentrations en espèces dissoutes majeures pour les eaux prélevées dans la tourbière en juin 2018, juillet 2019 et 2020..... | 148 |
| Figure 137 : Distribution sur un diagramme Cl vs Na des données obtenues pour les eaux de pluie, les ruisseaux et les eaux de la tourbière pour les campagnes de juin 2018 (A), juillet 2019 (B) et 2020 (C) et pour l'ensemble des données (D). Sont représentées par les droites les tendances pour une influence des eaux par la dissolution de la halite (NaCl; masse d'eau n° 1, trait noir plein), l'influence par les apports de versants (masse d'eau n° 2 ; trait pointillé bleu) et une troisième influence plus marquée par les interactions eau-roche (masse d'eau n° 3 ; trait pointillés orange)..... | 149 |
| Figure 138 : Visualisation de la distribution des eaux de la tourbière du Luitel collectées lors des campagnes de juin 2018 (moyennes-eaux), juillet 2019 et 2020 (basses-eaux) dans les différents groupes définis par des rapports Cl/Na. [Rond bleu = masse d'eau n°1, 1 : Influence processus interaction eau-roche négligeable ; Carré rose = masse d'eau n° 2, 2 : faible influence interaction eau-roche ; Triangle jaune = masse d'eau n° 3, 3 : influence interaction eau-roche modérée ; Hexagone jaune = Intermédiaires groupes 1 et 2 ; losange vert = Intermédiaires groupes 2 et 3]..... | 150 |
| Figure 139 : Distribution des eaux de la tourbière sur un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ pour les campagnes de juin 2018, juillet 2019 et 2020..... | 151 |
| Figure 140 : Distribution sur un diagramme δD vs $\delta^{18}O$ des eaux de la tourbière prélevées à moyennes-eaux en juin 2018. Représentation de la droite des eaux météoriques mondiales (Trait pointillés bleu) et de la droite des eaux météoriques locales (trait orange)..... | 152 |
| Figure 141 : Processus de formation d'une tourbière ombrotrophe bombée..... | 156 |
| Figure 142 : Interprétation de la série sédimentaire – secteur Nord tourbière du col (Guiter et al., 2013). 160 | |
| Figure 143 : Première estimation de la paléographie du socle de la tourbière du col du Luitel (Desplanque et al., 2010)..... | 161 |
| Figure 144 : Localisation de l'ensemble des profils radar et des points CMP effectués en complément (CMP 9 à 11)..... | 162 |
| Figure 145 : Localisation des transects GPR (2008 et 2018)..... | 164 |
| Figure 146 : Acquisition au GPR by night (Desplanque, 2018)..... | 166 |
| Figure 147 : Matériel utilisé pour l'acquisition géophysique au Luitel (Winiarski, 2014)..... | 167 |
| Figure 148 : Radargramme T1 de 200 et 400 Mhz sans interprétation..... | 168 |
| Figure 149 : Clef de détermination d'un radargramme en contexte tourbeux (Logiciel Radan)..... | 169 |
| Figure 150 : Localisation des points d'échantillonnage pédologique..... | 171 |
| Figure 151 : Principe de fonctionnement du carottier russe (Guiter et al., 2013)..... | 172 |
| Figure 152 : Carotte S10 (0-60 cm) – ruisseau de Fontfroide..... | 172 |
| Figure 153 : Simulation d'utilisation du triangle des textures des tourbes..... | 174 |
| Figure 154 : Synthèse stratigraphique couplée des points de prélèvements au carottier russe 2018 et 2019..... | 179 |

Liste des figures et tableaux

| | |
|---|-----|
| Figure 155 : Analyse de la chronique sédimentaire S8 | 181 |
| Figure 156 : Analyse de la chronique sédimentaire S9 | 183 |
| Figure 157 : Analyse de la chronique sédimentaire S10 | 185 |
| Figure 158 : Analyse de la chronique sédimentaire S11 | 187 |
| Figure 159 : Analyse de la chronique sédimentaire S12 | 189 |
| Figure 160 : Répartition des secteurs à réductisols et histosol..... | 191 |
| Figure 161 : Radargramme P3 (Garambois, 2006) | 193 |
| Figure 162 : Interprétation du radargramme T2 | 193 |
| Figure 163 : Interprétation croisées des carottes S2, S8 et du radargramme T2..... | 195 |
| Figure 164 : Code des structures identifiées (secteur nord) | 195 |
| Figure 165 : Code des structures identifiées (secteurs sud) | 196 |
| Figure 166 : Ligne de partage des eaux et principaux réservoirs des systèmes tourbeux du col Luitel (Wiert, 1984)..... | 199 |
| Figure 167 : Reconstitution 3D du substratum de la tourbière du col du Luitel par interpolation vue de dessus | 209 |
| Figure 168 : Reconstitution 3D du substratum de la tourbière du col du Luitel par interpolation vue de dessous | 209 |
| Figure 169 : Structure interne 3D uniformisée de la tourbière du col du Luitel | 210 |
| Figure 170 : Cote de surverse de Fontfroide (partie sud de la tourbière du col du Luitel) et cote de surverse nord vers sud par rapport à la géométrie du modelé du substratum..... | 210 |
| Figure 171 : Plans de surverses et de gyttja supérieurs par rapport à la structure 3D de la tourbière du col du Luitel | 211 |
| Figure 172 : Plans de surverses et de gyttja supérieurs par rapport à la structure 3D de la tourbière du col du Luitel (partie sud)..... | 211 |
| Figure 173 : Niveaux piézométriques du 27 août 2020 (niveau le plus bas de l'été 2020) par rapport à la géométrie 3D du substratum..... | 212 |
| Figure 174 : Niveaux piézométriques du tarissement de l'été 2020 (14 juin et 27 août) dans la structure 3D de la tourbière du Luitel (cuvette nord)..... | 213 |
| Figure 175 : Localisation du point de carottage au sein du système tourbeux de Luitel (Isère ; 1261,5 m) - Source : Géoportail..... | 217 |
| Figure 176 : Stratigraphie de la séquence tourbeuse extraite de la tourbière de Luitel le 22 juin 2018 (Isère ; 1261,5 m)..... | 218 |
| Figure 177 : Datations réalisées sur la séquence extraite de la tourbière de Luitel (Isère ; 1261,5 m) le 22 juin 2018. | 219 |
| Figure 178 : Modèle âge/profondeur à partir des 12 datations obtenues sur la tourbe (Luitel, Isère ; alt. 1261,5 m)..... | 219 |
| Figure 179 : Résultats des mesures de pertes au feu effectuées sur la séquence tourbeuse de Luitel (Isère ; 1261,5 m)..... | 220 |
| Figure 180 : Résultats des mesures du rapport C/N massique effectuées sur la séquence tourbeuse de Luitel (Isère ; 1261,5 m)..... | 221 |
| Figure 181 : Chronologie de l'Holocène | 222 |
| Figure 182 : Chronologie fondée sur les chronozones définies par les palynologues | 223 |

| | |
|---|-----|
| Figure 183 : Structure diploïdique des tourbières et variation des paramètres hydrodynamiques en relation avec la profondeur (Wastiaux, 2008)..... | 240 |
| Figure 184 : Paramètres de l'équation de Boussinesq (1903 ; Dewandel et al., 2002)..... | 240 |
| Figure 185 : Abaque illustrant les valeurs de débit initial (Q_0 en l/s) pour des combinaisons de conductivité hydraulique (K de 10^{-2} à 10^{-6}) et du rapport l/L (donné entre parenthèse 2, 5, 10, 1/2, 1/5, 1/10) ; sans indication le rapport vaut 1) en fonction de l'épaisseur mouillée (h_m de 0,2 à 6 m) | 244 |
| Figure 186 : Abaque des temps de vidange (en jours) pour des combinaisons de conductivité hydraulique (K de 10^{-2} à 10^{-5} m/s) et de porosité efficace (donnée entre parenthèse de 0,1 à 0,5 soit 10 à 50%) par rapport à l'épaisseur mouillée (h_m de 0,2 à 6 m). Cet abaque est valide pour un rapport l/L de 10 ; un débit seuil de 1 l/s et une surface 10 hectares..... | 245 |
| Figure 187 : Abaque illustrant les courbes de tarissement du débit de vidange (l/s) en fonction en temps pour des combinaisons de conductivité hydraulique (données entre parenthèse ; K de 10^{-2} à 10^{-6}) et de charges hydrauliques (h_m de 0,2 à 6 m). Cet abaque est valide pour une porosité efficace de 0,1 (10%), un rapport l/L de 1 et une surface de 10 hectares..... | 246 |
| Figure 188 : Graphique montrant la baisse de niveau du réservoir au Luitel sans l'ETP et pluie, avec l'ETP et avec l'ETP et la pluie | 247 |
| Figure 189 : Positionnement du cas du Luitel par rapports aux abaques | 248 |
| Figure 190 : Dispositif d'instrumentation dans les sous bassins versant du Madres..... | 252 |
| Figure 191 : Bassins versants du Chantereine (nombreuses zones humides) et de la Mare dans le massif du Forez (d'après Porteret 2008 et Porteret 2005)..... | 254 |
| Figure 192 : Bassins versants du Peschio (nombreuses zones humides) et du Samouse sur le Mont Lozère (d'après Martin et Didon-Lescot, 2007)..... | 254 |
| Figure 193 : Facteurs de contrôle du soutien d'étiage..... | 255 |
| Figure 194 : Géotraitement appliqués pour la production des indicateurs | 260 |
| Figure 195 : Schéma d'illustration des indicateurs topographiques calculés | 260 |
| Figure 196 : Analyse en composantes principales : variables sur le plan factoriel formé des axes 1 et 2.... | 266 |
| Figure 197 : Diminution de l'erreur « out of bag » avec le nombre d'arbres dans le modèle | 267 |
| Figure 198 : Importance des variables dans le modèle random forest..... | 268 |
| Figure 199 : Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les couples Pountarrou et Pinata .. | 269 |
| Figure 200 : Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les bassins des Monts du Forez..... | 269 |
| Figure 201 Spatialisation des résultats du modèle random forest sur les bassins du Mont Lozère | 269 |
| Figure 202 : Taille des zones humides des sous bassins des couples du Pountarrou et du Pinata..... | 273 |
| Figure 203 : Morphologie des zones humides : à gauche le rapport longueur (dans le sens de l'écoulement) / largeur et à droite l'indice de Gravélius (plus il est proche de 1, plus les zones humides se rapprochent d'un cercle) | 273 |
| Figure 204 : Légende de la Figure 205..... | 293 |
| Figure 205 : Sectorisation pédo-écologique des réservoirs, des aires d'alimentation et des flux hydrologique pour la tourbière du col (Luitel) – Légende : voir page suivante..... | 294 |
| Figure 206 : Variations saisonnières du comportement hydrologique de la tourbière du col (Luitel) | 295 |
| Figure 207 : Légende la Figure 206..... | 296 |
| Figure 208. Interprétation des sectorisations et flux hydrologiques dans le complexe tourbeux de Frasne | 304 |
| Figure 209 : Légende de la Figure 208..... | 305 |

Liste des figures et tableaux

Figure 210 : Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site [un réservoir avec un exutoire principal]... 309

Figure 211 : Indicateurs de soutien d'étiage/écrêtage de crue à l'échelle du bassin versant [un réseau de zones humides interconnectées qui stockent l'eau avec flux convergent vers un exutoire]..... 310

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 : Liste des points de prélèvements choisis sur le secteur de la tourbière du Forbonnet et symbole de représentation sur les photos aériennes de la Figure 15 et de la Figure 16 | 36 |
| Tableau 4 : Présentation des résultats du bilan hydrologique (Δ stock) pour chaque année. Le cumul de précipitation ainsi que l'estimation de l'interception (30 % et 40 % des précipitations respectivement) sont également présentés dans le tableau. L'ensemble des résultats est exprimé en millimètre par mètre carré par an..... | 60 |
| Tableau 5 : Synthèse bibliographique des principales méthodes géophysiques utilisées en contexte de tourbeux..... | 70 |
| Tableau 6 : Résolution verticale et profondeur de pénétration théoriques en fonction de la fréquence d'antenne dans les sédiments | 71 |
| Tableau 7 : Comparaison entre les méthodes ERT et GPR..... | 74 |
| Tableau 8 : Ensemble des noms des fichiers Shapefile et données disponibles..... | 77 |
| Tableau 9 : Perméabilités et porosité efficace au niveau des piézomètres. Les données de perméabilités issues de la littérature sont données Tableau 23..... | 114 |
| Tableau 10 : Liste des données disponibles sur le site de Luitel..... | 117 |
| Tableau 11 : Représentation de la disponibilité des données en fonction du temps (vert : disponible ; orange : partiellement disponible ; rouge : indisponible)..... | 118 |
| Tableau 12 : Tableau récapitulatif des prélèvements d'eaux de surface et d'eaux souterraines réalisés lors des 3 campagnes et de manière plus isolée (P_{xx} = piézomètres)..... | 136 |
| Tableau 13 : Périodes de cumuls des précipitations échantillonnées au niveau du collecteur d'eau de pluie installé sur la tourbière du col..... | 137 |
| Tableau 14 : Typologie des textures de tourbe (d'après Payette et Rochefort, 2001 ; Cubizolle, 2019) | 155 |
| Tableau 15 : Synthèse typologique des sols paratourbeux (d'après Cubizolle, 2019 ; Graillot et al., 2016 ; Afes, 2008)..... | 157 |
| Tableau 16 : Paramètres hydrophysiques de la tourbe | 157 |
| Tableau 17 : Méthodes géophysiques testées en contexte de tourbeux | 158 |
| Tableau 18 : Informations sur les transects GPR..... | 165 |
| Tableau 19 : Justificatif du plan d'échantillonnage pédologique..... | 170 |
| Tableau 20 : Classement des textures des tourbes (Cubizolle, 2019)..... | 175 |
| Tableau 21 : Synthèse de détermination des propriétés hydrauliques et structurales..... | 176 |
| Tableau 22 : Valeurs de référence (Wastiaux, 2008) | 177 |
| Tableau 23 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques en fonction des faciès pédologique, des unités géophysiques et de la profondeur théorique de l'acrotelme (pt : porosité totale ; TH : Taux d'humidité ; Pe : porosité efficace ; K : conductivité hydraulique ou perméabilité)..... | 200 |
| Tableau 24 : Codes structure de la tourbière du col | 202 |
| Tableau 25 : Estimation des volumes de tourbe saturée en eau sur la tourbière du col du Luitel..... | 213 |
| Tableau 26 : Bilan des écoulements pour Fontfroide sur l'étiage 2020 et 2019..... | 214 |

Liste des figures et tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 27 : Bilan des volumes d'eau pour la zone nord de la tourbière du col du Luitel pour l'été 2020 et 2019 | 214 |
| Tableau 28 : Bilan des volumes d'eau pour la zone sud de la tourbière du col du Luitel pour l'été 2020 et 2019 | 215 |
| Tableau 29 : Gammes de valeurs et niveaux adoptés pour le protocole expérimental et la création d'abaques | 242 |
| Tableau 30 : Description des différents abaques créés..... | 243 |
| Tableau 31 : Combinaisons de conductivité hydraulique (K) et de charge hydraulique (h_m) qui génèrent un débit initial (Q_0) inférieur à 0,01 l/s à t_0 | 244 |
| Tableau 32 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants | 252 |
| Tableau 33 : Liste des indicateurs pour le calcul du potentiel de soutien d'été des zones humides (ZH : zone humide ; BV : bassin versant ; SE : soutien d'été) à tester à l'échelle du bassin versant.... | 259 |
| Tableau 34 : Synthèse des indicateurs significatifs entre les bassins présentant beaucoup de zones humides et ceux présentant peu de zones humides. Les cases bleues avec le signe > indiquent que la valeur médiane du bassin présentant beaucoup de zones humides est plus élevée que celle du bassin présentant peu de zones humides, et inversement dans les cases oranges avec le signe <. 0 indique que la différence n'est pas significative. Les cases en gris indiquent que les tests n'ont pas été réalisés en raison du manque de données disponibles..... | 264 |
| Tableau 35 : Synthèse des indicateurs significatifs entre les zones humides et en dehors des zones humides pour le couple de bassins versants du Pountarrou et du Pinata. Les cases bleues avec le signe > indiquent que la valeur médiane des zones humides est plus élevée que celle en dehors des zones humides, et inversement dans les cases oranges avec le signe <. 0 indique que la différence n'est pas significative..... | 265 |
| Tableau 36 : Matrice de confusion du modèle random forest..... | 268 |
| Tableau 37 : Taux de réalisation des tâches de la phase 3..... | 283 |
| Tableau 38 : Bilan des tâches effectuées au Luitel en phases 2 et 3 du projet ZHTB | 285 |
| Tableau 39 : Bilan des tâches effectuées à Frasne en phases 2 et 3 du projet ZHTB..... | 286 |
| Tableau 40 : Stages et post-doc du projet ZHTB | 287 |

Table des matières complète

| | |
|---|-------------|
| Fiche signalétique | I |
| Table des matières synthétique | III |
| Résumé | V |
| Acronymes, sigles et abréviations | IX |
| Préambule | XIII |
| Remerciements | XV |
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. Objectifs, planification, résultats clefs des phases 1 et 2..... | 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> | 3 |
| 1.3.1. Présentation synthétique de la phase 1 | 3 |
| 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 |
| 1.4.3. Bilan : volet hydrologique..... | 8 |
| 1.4.3.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel) | 8 |
| 1.4.3.2. Modèles réservoirs (Luitel)..... | 10 |
| 1.4.3.3. Réseaux de neurones (Luitel) | 10 |
| 1.4.3.4. Éléments complémentaires concernant le volet hydrologique | 11 |
| 1.4.4. Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne) | 11 |
| 1.4.5. Bilan : volet pédologique (Luitel) – articulation avec le volet géophysique..... | 12 |
| 1.4.6. Volet géochimie (Luitel)..... | 13 |
| 1.4.7. Bilan général | 15 |
| 1.4.7.1. Bilan au Luitel | 15 |
| 1.4.7.2. Bilan Frasne | 18 |
| 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> | 18 |
| 2. Organisation du rapport phase 3 (2019-2022) | 19 |
| PARTIE I – Tourbière de Frasne | 21 |
| 3. Suivi hydrologique | 23 |
| 3.1. <i>Partage de données et suivis</i> | 23 |
| 3.2. <i>Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique</i> | 23 |
| 3.3. <i>Présentation rapides des données acquises</i> | 24 |
| 3.3.1. Relevés de conductivité à l'exutoire principal de la tourbière de Frasne | 24 |
| 3.3.2. Creux au Lard | 27 |
| 4. Analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones..... | 31 |
| 5. Traceurs géochimiques | 33 |
| 5.1. <i>Contexte de l'étude</i> | 33 |
| 5.2. <i>Les zones humides de Frasne</i> | 33 |

Table des matières complète

| | | |
|----------|--|----|
| 5.3. | <i>Campagnes de prélèvements et méthodologie</i> | 35 |
| 5.3.1. | Les campagnes de prélèvement | 35 |
| 5.3.2. | Approche géochimique mise en œuvre | 37 |
| 5.3.2.1. | Paramètres physico-chimiques | 37 |
| 5.3.2.2. | Éléments majeurs | 37 |
| 5.3.2.3. | Les isotopes de l'eau | 37 |
| 5.4. | <i>Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux des tourbières de Frasne</i> | 38 |
| 5.4.1. | Les précipitations | 38 |
| 5.4.2. | La campagne de juillet 2019 – Basses-eaux | 38 |
| 5.4.2.1. | Paramètres physico-chimiques | 38 |
| 5.4.2.2. | Les données isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD | 40 |
| 5.4.2.3. | Caractéristiques des masses d'eau identifiées et implications en termes d'alimentation de la zone d'étude en basses-eaux | 41 |
| 5.4.3. | La campagne de novembre 2020 – Moyennes-eaux/Hautes-eaux | 42 |
| 5.4.3.1. | Paramètres physico-chimiques | 42 |
| 5.4.3.2. | Les compositions isotopiques | 44 |
| 5.4.3.3. | Caractéristique des masses d'eaux identifiées et implications en termes d'alimentation de la zone d'étude en moyennes-eaux/hautes-eaux | 45 |
| 5.5. | <i>Synthèse et conclusions</i> | 45 |
| 6. | Origine, transfert, et export d'eau de la tourbière active du Forbonnet : rôle du suivi à long terme pour la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique (A. Lhosmot et G. Bertrand) | 47 |
| 6.1. | <i>Utilisation des données hydrométéorologiques pour prédire la profondeur de la nappe d'eau durant le prochain siècle</i> | 47 |
| 6.2. | <i>Suivi à long terme des variables hydrométéorologique sur la tourbière du Forbonnet : vers un modèle hydrogéologique conceptuel</i> | 49 |
| 6.3. | <i>Approche bilan de masse</i> | 55 |
| 6.3.1. | Estimation de la variation du stock d'eau sur la période d'étude 2014-07/2020-04 en utilisant le delta altitude de la nappe d'eau | 55 |
| 6.3.1.1. | Matériel et Méthode | 55 |
| 6.3.1.2. | Résultats | 56 |
| 6.3.1.3. | Variabilité spatiale de l'effet de la restauration et représentativité de la surface du bassin versant | 57 |
| 6.3.2. | Estimation des variations du stock d'eau dans la tourbière à un pas de temps mensuel : approche bilan hydrologique | 58 |
| 6.3.2.1. | Matériel et Méthode | 58 |
| 6.3.3. | Résultats et discussions | 59 |
| 6.4. | <i>Modélisation du débit à l'exutoire à partir d'un modèle réservoir</i> | 61 |
| 6.4.1. | Principe | 61 |
| 6.4.2. | Résultats et Discussion | 63 |
| 6.4.2.1. | Validité du modèle | 63 |
| 6.4.2.2. | Mise en évidence d'un réservoir d'eau dynamique | 65 |
| 6.4.2.3. | Sensibilité de modèle | 65 |
| 6.4.2.4. | Réponse du modèle en période de basses-eaux | 66 |
| 6.4.2.5. | Évaluation du Q_{loss} | 66 |
| 7. | Campagnes géophysique (GPR) : juin 2018, janvier 2019 et septembre 2019 | 69 |
| 7.1. | <i>Contexte de l'étude et objectifs</i> | 69 |
| 7.2. | <i>Éléments bibliographiques</i> | 70 |
| 7.2.1. | Principe du radar géologique ou GPR | 70 |
| 7.2.2. | Le GPR : un outil particulièrement adapté | 71 |
| 7.2.3. | Quelques mots sur la méthode ERT | 73 |
| 7.2.4. | Conclusion | 73 |
| 7.3. | <i>Matériels et méthodes</i> | 74 |
| 7.3.1. | Le radar géologique ou GPR | 74 |
| 7.3.2. | Campagnes d'acquisition et localisation des profils | 75 |

| | |
|---|------------|
| 7.3.3. Données existantes..... | 77 |
| 7.3.4. Méthodologie adoptée..... | 79 |
| 7.4. Résultats de la campagne géophysique..... | 79 |
| 7.4.1. De l'acquisition à l'interprétation..... | 79 |
| 7.4.2. Synthèse des deux longs profils est-ouest (EW_GPR1 et EW_GPR2)..... | 81 |
| 7.4.3. Synthèse des deux longs profils nord-sud (NS_GPR1 et NS_GPR2)..... | 84 |
| 7.4.4. Quelques résultats spécifiques..... | 87 |
| 7.4.4.1. Réflecteurs internes..... | 87 |
| 7.4.4.2. Anomalies dans le substratum..... | 87 |
| 7.5. Conclusion..... | 87 |
| 8. Synthèses – Frasne..... | 91 |
| 8.1. Suivi hydrologique, analyses hydrostatistiques et essais de modélisation par réseau de neurones..... | 91 |
| 8.2. Traceurs géochimiques..... | 92 |
| 8.3. Fonctionnement hydrologique et modélisation (thèse A. Lhosmot)..... | 95 |
| 8.4. Campagnes géophysiques..... | 97 |
| PARTIE II – Tourbière du Luitel..... | 99 |
| 9. Suivi hydrologique..... | 101 |
| 9.1. Partage de données et suivis existants..... | 101 |
| 9.2. Instrumentation et mesures..... | 101 |
| 9.2.1. Dispositif de suivi..... | 101 |
| 9.2.2. Présentation rapides des données acquises..... | 103 |
| 9.2.2.1. Débits de Fontfroide..... | 103 |
| 9.2.2.2. Niveaux piézométriques..... | 108 |
| 9.2.3. Essais d'eau..... | 114 |
| 10. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones..... | 117 |
| 10.1. Données disponibles..... | 117 |
| 10.2. Analyses statistiques : Ruisseau du Lac contre Fontfroide aval..... | 118 |
| 10.2.1. Régime hydrologique..... | 118 |
| 10.2.2. Débits classés..... | 119 |
| 10.2.3. Autocorrélations..... | 120 |
| 10.2.4. Corrélations croisées..... | 120 |
| 10.2.5. Coefficients d'écoulement..... | 122 |
| 10.3. Analyses statistiques autour du piézomètre P3..... | 123 |
| 10.3.1. Régime de hauteurs..... | 123 |
| 10.3.2. Valeurs classées..... | 123 |
| 10.3.3. Autocorrélation..... | 124 |
| 10.3.4. Corrélations croisées..... | 124 |
| 10.4. Analyses statistiques entre amont et aval..... | 125 |
| 10.4.1. Différences en valeur..... | 125 |
| 10.4.2. Débits classés..... | 126 |
| 10.4.3. Autocorrélations et corrélations croisées..... | 127 |
| 10.4.4. Coefficients d'écoulement..... | 128 |
| 10.5. Modélisation par réseaux de neurones..... | 128 |
| 10.5.1. Modèle sélectionné..... | 128 |
| 10.5.2. Tests croisés..... | 129 |
| 10.5.3. Analyse des résultats..... | 130 |
| 10.6. Discussions et conclusions..... | 132 |
| 11. Traceurs géochimiques..... | 133 |
| 11.1. Contexte de l'étude..... | 133 |
| 11.2. Les zones humides du Luitel..... | 133 |

Table des matières complète

| | |
|--|-----|
| 11.3. Campagnes de prélèvements et méthodologie | 136 |
| 11.3.1. Approche géochimique mise en œuvre | 137 |
| 11.3.2. Paramètres physico-chimiques..... | 137 |
| 11.3.3. Éléments majeurs | 137 |
| 11.3.4. Les isotopes de l'eau..... | 138 |
| 11.4. Caractérisation chimique et isotopique des eaux de pluie..... | 138 |
| 11.5. Caractéristiques chimiques et isotopiques des eaux de surface | 140 |
| 11.5.1. Sous-bassin versant de Fontfroide | 140 |
| 11.5.2. Sous-bassin versant de Pezanti | 143 |
| 11.5.3. Les eaux des fossés de drainage..... | 144 |
| 11.5.4. Les eaux des lacs..... | 144 |
| 11.5.5. Comparaison des différentes masses d'eau de surface..... | 144 |
| 11.6. Les eaux souterraines..... | 145 |
| 11.6.1. À l'amont du bassin versant..... | 145 |
| 11.6.2. Les eaux de la tourbière | 146 |
| 11.6.2.1. Les propriétés chimiques | 146 |
| 11.6.2.2. Les propriétés isotopiques | 151 |
| 11.7. Synthèse des observations géochimiques..... | 153 |
| 12. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col du Luitel | 155 |
| 12.1. Rappels : éléments de contexte..... | 155 |
| 12.1.1. Mise en place, texture et sols d'une tourbière | 155 |
| 12.1.2. Structure interne et propriétés hydrodynamiques..... | 157 |
| 12.1.3. Intérêt du couplage géophysique/pédologie dans les tourbières | 158 |
| 12.1.4. Investigations paléoenvironnementales antérieures menées au Luitel | 160 |
| 12.1.4.1. Carotte de tourbe : 10,5 m de profondeur daté à 15 000 ans BP | 160 |
| 12.1.4.2. Investigations géophysiques : un paléorelief lié à des héritages glaciaires | 161 |
| 12.2. Matériel et méthode : couplage pédologie/géophysique | 163 |
| 12.2.1. Radar géologique : géométrie et structure interne de la tourbière..... | 163 |
| 12.2.1.1. Localisation des profils GPR | 163 |
| 12.2.1.2. Principes d'acquisition des informations géophysiques | 165 |
| 12.2.1.3. Choix du matériel | 165 |
| 12.2.1.4. Analyse et interprétation des informations géophysiques | 167 |
| 12.2.2. Pédologie : validation des structures caractérisées par l'approche géophysique et détermination des propriétés hydrodynamiques | 169 |
| 12.2.2.1. Justification du plan d'échantillonnage..... | 169 |
| 12.2.2.2. Prélèvement au carottier russe : validation des structures..... | 171 |
| 12.2.2.3. Prélèvements à la tarière : détermination des zones de contacts sols/histosols..... | 172 |
| 12.2.2.4. Protocole d'analyse en laboratoire : détermination des propriétés hydropédologiques | 173 |
| 12.2.2.4.1. Susceptibilité magnétique | 173 |
| 12.2.2.4.2. Type de tourbe : taux de fibre et teneur en MO..... | 173 |
| 12.2.3. Interprétation croisée des carottes et des profils géophysiques | 177 |
| 12.3. Résultats : pédologie..... | 178 |
| 12.3.1. Rappel des principaux résultats acquis en 2018..... | 178 |
| 12.3.2. Texture et stratigraphie | 178 |
| 12.3.2.1. Description des carottes..... | 178 |
| 12.3.2.2. Synthèses croisées 2018 et 2019 | 180 |
| 12.3.3. Chroniques sédimentaires..... | 181 |
| 12.3.3.1. Chroniques sédimentaires S8..... | 181 |
| 12.3.3.2. Chronique sédimentaire S9..... | 183 |
| 12.3.3.3. Chronique sédimentaire S10..... | 185 |
| 12.3.3.4. Chronique sédimentaire S11 | 187 |
| 12.3.3.5. Chronique sédimentaire S12 | 189 |
| 12.3.4. Limites de l'écomplexe tourbeux | 190 |

| | |
|--|------------|
| 12.4. Résultat : interprétation géophysique | 192 |
| 12.5. Interprétation croisée pédologie géophysique | 194 |
| 12.5.1. Exemple : interprétation croisée des carottes S2 et S8 et du radargramme T2 | 194 |
| 12.5.2. Secteur nord : des faciès de tourbe mésique à saprique | 196 |
| 12.5.3. Secteur central : affleurement du socle morainique et faciès de gyttja | 197 |
| 12.5.4. Secteur sud : secteur composite | 197 |
| 12.5.5. Bilan sur le travail préliminaire | 198 |
| 12.6. Construction d'une géométrie et d'une structure 3D de la tourbière du Col du Luitel | 202 |
| 12.6.1. Codes structures de la tourbière du col | 202 |
| 12.6.2. Structure interne : Zone nord de la tourbière du col | 203 |
| 12.6.3. Structure interne : Zone sud de la tourbière du col | 204 |
| 12.6.4. Structure interne : Carottes | 205 |
| 12.6.5. Topographie du substratum | 206 |
| 12.6.6. La tourbière du col du Luitel en images avec ArcGIS pro | 208 |
| 12.6.6.1. Géométrie et structure | 208 |
| 12.6.6.2. Points et plans de références | 208 |
| 12.6.6.3. Niveaux de nappe et estimation des volumes de tourbe saturée en eau et des volumes écoulés | 212 |
| 12.6.7. Autres éléments et finalisation | 216 |
| 12.7. Analyse de la grande carotte de la zone sud (secteur de Fontfroide) de la tourbière du col | 217 |
| 12.7.1. Principaux résultats d'analyse de la carotte | 217 |
| 12.7.2. Synthèse, commentaire et interprétation des résultats | 222 |
| 13. Synthèses – Luitel | 225 |
| 13.1. Suivi hydrologique | 225 |
| 13.2. Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones | 226 |
| 13.3. Traceurs géochimiques | 227 |
| 13.4. Pédologie et Géophysique : géométrie et structure interne de la tourbière du col | 231 |
| 13.4.1. Articulation pédologie et géophysique | 231 |
| 13.4.2. Géométrie et structure 3D de la tourbière du col | 234 |
| 13.4.3. Analyse la grande carotte de la tourbière du col | 235 |
| PARTIE III – Indicateurs de soutien d'étiage | 237 |
| 14. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un site tourbeux | 239 |
| 14.1. Choix des paramètres à prendre en compte | 239 |
| 14.2. Matériel et méthode | 240 |
| 14.2.1. Équation de Boussinesq | 240 |
| 14.2.2. Protocole expérimental pour la production d'abaques | 241 |
| 14.3. Résultats | 243 |
| 14.3.1. Débit initial (Q_0) | 243 |
| 14.3.2. Autres abaques : exemples | 245 |
| 14.4. Discussion et conclusion | 246 |
| 14.4.1. Limites méthodologiques | 246 |
| 14.4.2. Apports de la modélisation pour intégrer des paramètres météorologiques (pluie, ETP) .. | 246 |
| 14.4.3. Analyse des résultats et comparaison avec les hypothèses de départ | 248 |
| 14.4.4. Vers des abaques opérationnels | 249 |
| 14.4.5. Les tourbières assurent-elles théoriquement un soutien d'étiage ? | 249 |
| 15. Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage à l'échelle d'un bassin versant tourbeux | 251 |
| 15.1. Sites d'études | 251 |
| 15.1.1. Sites principaux : bassins Pountarrou et Pinata (Massif du Madres, Haute-vallée de l'Aude) .. | 251 |
| 15.1.2. Sites complémentaires : Monts du Forez et Mont Lozère | 253 |
| 15.2. Facteurs de contrôle et données disponibles | 255 |
| 15.2.1. Facteurs de contrôle du potentiel soutien d'étiage | 255 |
| 15.2.1.1. Indices topographiques | 256 |

Table des matières complète

| | |
|---|------------|
| 15.2.1.2. Couvert végétal et occupation des sols..... | 256 |
| 15.2.1.3. Géométrie et propriétés hydrodynamiques..... | 257 |
| 15.2.1.4. Autres facteurs | 257 |
| 15.2.2. Données disponibles | 258 |
| 15.3. Méthode | 258 |
| 15.3.1. Prétraitements des données | 258 |
| 15.3.2. Indicateurs retenus | 258 |
| 15.3.3. Extraction des indicateurs | 258 |
| 15.3.4. Analyses statistiques | 261 |
| 15.3.5. Prédiction du rôle hydrologique d'un bassin versant | 262 |
| 15.4. Résultats | 264 |
| 15.4.1. Analyse à l'échelle des bassins versants | 264 |
| 15.4.2. Analyse des indicateurs au regard de la présence/absence de zones humides dans les bassins versants | 265 |
| 15.4.3. Signatures spectrales des zones humides | 265 |
| 15.4.4. Analyse multivariée et modélisation prédictive | 266 |
| 15.5. Discussion et conclusion..... | 270 |
| 15.5.1. Synthèse sur les indicateurs à l'échelle du bassin versant et au regard de la présence / absence de zones humides..... | 270 |
| 15.5.2. Caractéristiques des zones humides | 272 |
| 15.5.3. Effets de la résolution des données et tendance des indicateurs et effets de l'échantillonnage stratifié | 274 |
| 15.5.4. Analyse multivariée pour la prédiction du rôle hydrologique de soutien d'étiage ou d'écrêtement de crues | 274 |
| 16. Synthèses – Indicateurs | 277 |
| 16.1. Indicateurs à l'échelle du site tourbeux..... | 277 |
| 16.2. À l'échelle du bassin versant..... | 279 |
| 16.2.1. Indicateurs à l'échelle du bassin versant | 279 |
| 16.2.2. Analyses statistiques des données météorologiques et hydrologiques de la Haute-Vallée de l'Aude (ONF ZH Aude)..... | 280 |
| CONCLUSION..... | 283 |
| 17. Bilan du travail de la phase 3 | 283 |
| 17.1. Avancement et taux de réalisation..... | 283 |
| 17.2. Bilan des stages et post-doc..... | 287 |
| 18. Synthèse générale du projet ZHTB et perspectives..... | 288 |
| 18.1. Synthèse du fonctionnement hydrologique du Luitel | 288 |
| 18.1.1. Sectorisation pédo-écologique | 288 |
| 18.1.2. Comportement hydrologique | 289 |
| 18.1.3. Points clefs de la sectorisation pédo-écologique et l'analyse du comportement hydrologique..... | 290 |
| 18.1.4. Cheminement de l'eau et sectorisation hydrologique par approche géochimique | 291 |
| 18.1.5. Interprétations des variations saisonnières du comportement hydrologique | 296 |
| 18.1.6. Étiage, soutien d'étiage et soutien de tourbière..... | 298 |
| 18.1.7. Changement d'échelle (espace et temps) | 299 |
| 18.2. Synthèse du fonctionnement hydrologique de la tourbière de Frasne | 300 |
| 18.2.1. Géométrie et structure | 300 |
| 18.2.2. Comportement hydrologique : cheminement de l'eau et sectorisation | 301 |
| 18.2.3. Soutien d'étiage et soutien de la tourbière de Frasne | 303 |
| 18.2.4. Questions en suspens et perspectives | 307 |
| 18.3. Synthèse : indicateurs de soutien d'étiage | 308 |
| 18.4. Préconisations de gestion des zones humides de tête de bassin versant pour conserver ou restaurer leur fonctionnement hydrologique | 312 |
| Références Bibliographiques | 315 |

| | |
|--|------------|
| <i>Frasne : Fonctionnement hydrologique et modélisation (thèse A. Lhosmot)</i> | 315 |
| <i>Frasne : Géophysique</i> | 317 |
| <i>Frasne : Traceurs géochimiques</i> | 318 |
| <i>Luitel : Traceurs géochimiques</i> | 319 |
| <i>Luitel : Pédologie et géophysique</i> | 319 |
| <i>Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site</i> | 323 |
| <i>Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant</i> | 324 |
| Liste des figures et tableaux | 329 |
| <i>Liste des figures</i> | 329 |
| <i>Liste des tableaux</i> | 339 |
| Table des matières complète | 341 |
| Tables des matières des Annexes | 349 |

Tables des matières des Annexes

| | |
|--|------------|
| Annexe 1 : Fiches projets | 1 |
| A1.1. Fiche action recherche valorisation n°51 – Phase 1 (2016-2017) | 2 |
| A1.2. Fiche action recherche valorisation n°56 – Phase 2 (2017-2018) | 7 |
| A1.3. Fiche action recherche valorisation n°68 – Phase 3 (2019-2021) | 11 |
| Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabr | 22 |
| A2.1. Fiche de synthèse Zabr - Phase 1 (2016-2017) | 23 |
| A2.2. Fiche de synthèse Zabr - Phase 2 (2017-2019) | 25 |
| A2.3. Fiche de synthèse Zabr - Phase 3 (2019-2022) | 27 |
| Annexe 3 : Critères de sélection des sites de zones humides | 29 |
| Annexe 4 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1, 2 et 3) | 30 |
| A4.1. Comité de pilotage | 31 |
| A4.2. Sites d'études | 31 |
| A4.3. Autres sites complémentaires potentiels | 32 |
| A4.4. Chercheurs de l'équipe projet | 32 |
| A4.5. Site zones humides de la haute-vallée de l'Aude | 33 |
| A4.6. Post-doc et stagiaires | 33 |
| Annexe 5 : Comité de pilotage | 34 |
| A5.1. Comité de pilotage phase 1 - Juin 2017 | 35 |
| A5.2. Comité de pilotage phase 2 - Février 2019 | 46 |
| Annexe 6 : Poster du projet et présentations type | 54 |
| A6.1. Poster du projet | 55 |
| A6.2. Présentation type phase 1 | 56 |
| A6.3. Présentation type phase 2 | 64 |
| A6.4. Présentation type phase 3 | 75 |
| Annexe 7 : Frasne - Géophysique | 96 |
| A7.1. Sous profils de NS_GPR1 | 97 |
| A7.2. Sous profils de NS-GPR2 | 103 |
| A7.3. Sous profils d'EW_GPR1 | 109 |
| A7.4. Sous profils d'EW_GPR2 | 116 |
| Annexe 8. Analyse croisée de la disponibilité des données et des indicateurs de soutien d'étiage identifiés à l'échelle du bassin versant | 127 |
| Annexe 9 : Fiches techniques et synthèse de l'étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude (Massif du Madrès) | 131 |
| A9.1. Fiche technique n°1 : Mise en place d'une instrumentation adaptée | 132 |
| A9.2. Fiche technique n°2 : Structuration d'une base de données | 134 |
| A9.3. Fiche technique n°3 : Fonctionnement hydrologique des zones humides | 136 |
| A9.4. Fiche technique n°4 : Indicateurs de soutien d'étiage | 138 |
| A9.5. Fiche technique n°5 : Préconisations de gestion des zones humides | 140 |
| A9.6. Synthèse des travaux sur les zones humides de la Haute-Vallée de l'Aude | 142 |

