



HAL
open science

**Modélisation du fonctionnement hydrologique de la
tourbière du Col du Luitel (Isère) : recherches menées
dans le cadre de l'étude du rôle hydrologique et
hydrogéologique des zones humides de tête de bassin
versant dans le soutien d'étiage (projet ZABR /
AE-RMC)**

Yvan Pascoletti

► **To cite this version:**

Yvan Pascoletti. Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du Col du Luitel (Isère) : recherches menées dans le cadre de l'étude du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de tête de bassin versant dans le soutien d'étiage (projet ZABR / AE-RMC). Génie des procédés. 2018. dumas-02546363

HAL Id: dumas-02546363

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02546363>

Submitted on 17 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE LA TOURBIERE DU COL DU LUITEL (ISERE)

RECHERCHES MENEES DANS LE CADRE DE L'ETUDE DU ROLE
HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES ZONES HUMIDES DE
TETE DE BASSIN VERSANT DANS LE SOUTIEN D'ETIAGE (PROJET
ZABR / AE-RMC)

UMR CNRS 5600 EVS MINES SAINT-ETIENNE
CENTRE SPIN DEPARTEMENT PEG

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
SOUS LA DIRECTION DE
- DIDIER GRAILLOT
- FREDERIC PARAN

YVAN PASCOLETTI
MASTER 2 GEOGRAPHIE
MENTION GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT

SEPTEMBRE 2018



Δαίμονα κικλήσκω
μεγάλαν ηγήτορα
φρικτόν, μειλίχιον
Δία, παγγενέτην,
βιοδώτορα θνητών,
Ζήνα μέγαν,
πολύπλαγκτον, αλάστορα,
παμβασιλήα, πλουτοδότην,
οπότεν γε βρυάζων
οίκον εσέλθηι,
έμπαλι δέ τρύχοντα
βίον θνητών πολυμόχθων:
εν σοί γάρ λύπης
τε χαράς κληίδες
οχούνται. τοιγάρ τοι,
μάκαρ, αγνέ,
πολύστονα κήδε
'ελάσσας, όσσα
βιοφθορίην πέμπει
κατά γαίαν άπασαν,
ένδοξον βιοτής
γλυκερόν τέλος
εσθλόν οπάζοις.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à Frédéric Paran et Didier Graillot qui ont été mes tuteurs au cours de ce stage. Je les remercie d'une part de m'avoir fait confiance pour mener ce travail à bien, et d'autre part pour la qualité de leur encadrement, pour leurs conseils et leur soutien. Merci de m'avoir donné cette chance de découvrir le monde de la recherche, qui plus est dans le cadre de ce projet stimulant qui m'a tant apporté. Merci en particulier à Didier Graillot d'avoir fait son possible pour permettre une prolongation de cette expérience pour un mois supplémentaire. Et merci en particulier à Frédéric Paran qui a suivi mon travail de près et avec attention.

Ce projet m'a également permis de me familiariser avec le travail de terrain, accompagné par des scientifiques issus de divers horizons. Je salue et remercie ainsi Thierry Winiarski et Hervé Cubizolle pour leur sympathie et pour tout ce qu'ils m'ont transmis au cours de nos échanges. Je remercie également Jean-Paul Laurent, qui m'a appris à relever les sondes piézométriques et qui s'est rendu disponible pour éclaircir certains points.

Je remercie Carole Desplanques pour le soin qu'elle a mis à nous accueillir à la Réserve Naturelle du Luitel et à nous accompagner et nous guider pendant nos campagnes. Merci aussi pour sa conversation et pour le temps qu'elle m'a accordé afin d'améliorer ma compréhension du site.

Quelques pensées aussi pour Thomas Jolly, qui a été employé tout comme moi en tant que stagiaire pour ce projet et avec qui nous avons maintenu de bons échanges qui nous ont toujours permis d'aller de l'avant.

Je ne saurai oublier de remercier chaleureusement toute l'équipe du « D3 » grâce à laquelle j'ai pu réaliser mes travaux dans une bonne atmosphère. Merci à vous tous pour ces bons moments, ces rires et ces échanges. Et de manière plus générale, je remercie l'École des Mines qui m'a accueilli, le CNRS qui m'a employé, avec une mention particulière pour Patrick Gilbert, et l'agence de l'eau pour le financement de ce projet.

Et je salue également chaleureusement toutes les personnes sympathiques que j'ai eu la chance de rencontrer chemin faisant. Merci à Natacha Gondran qui s'est intéressée à mon devenir en me transmettant régulièrement les offres de thèse ou d'emploi dont elle avait connaissance. Merci à Michelle Mongo qui m'a fait participer au projet zones humides et industries extractives en Afrique de l'Ouest. Et merci à Paul Ouedraogo qui m'a accordé un entretien skype très riche autour des zones humides dans le cadre de la Convention Ramsar.

Côté pédagogique, je tiens à remercier l'équipe enseignante de l'Université Jean Monnet, en particulier Christine Jacqueminet et George Gay pour ces deux années de master qui ont marqué une avancée dans mon parcours.

Enfin, merci à ma famille qui m'a toujours soutenu et à qui je dois d'être fier de ce que je suis et de ce qu'il me reste encore à faire. Et merci aux frères, qui m'ont reconnu.

Sommaire

REMERCIEMENTS	III
SOMMAIRE	IV
LISTE DES FIGURES ET PHOTOGRAPHIES	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES ABREVIATIONS ET GLOSSAIRE SPECIFIQUE	VIII
INTRODUCTION - LE SERVICE DE SOUTIEN D'ETIAGE DES ZONES HUMIDES DEBATTU : DEMARCHE D'EVALUATION QUANTITATIVE PAR LA MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN SITE DE REFERENCE	1
PARTIE I - UN TRAVAIL INCLUS DANS LE PROJET DE CARACTERISATION DU ROLE DE SOUTIEN D'ETIAGE DES ZONES HUMIDES ..	5
1. La structure d'accueil : l'École des Mines de Saint-Étienne	5
2. L'employeur : le CNRS - UMR 5600	6
3. Le projet ZABR - AE RMC	7
4. Conclusion : logigramme de synthèse du projet	8
PARTIE II - ÉTAT DE L'ART DES TROIS THEMATIQUES PRINCIPALES : ZONES HUMIDES, SOUTIEN D'ETIAGE ET MODELISATION ..	9
1. Zones humides et tourbières, des milieux complexes caractérisés par quatre facteurs clés : écologie, pédologie, hydrologie et fonctionnalité	9
1.1. Les zones humides de tête de bassin versant : des habitats, des sols et des fonctions spécifiques conditionnés par l'hydrologie	9
1.1.1. Définition des zones humides d'après le glossaire des eaux et des milieux aquatiques	9
1.1.2. Typologies écologique, pédologique, hydrologique et fonctionnelle des zones humides	10
1.1.3. Fonctions et services écosystémiques des zones humides et enjeux de conservation	12
1.2. Les tourbières, des milieux dont l'origine et le maintien dépendent principalement du bilan hydrologique	13
1.2.1. Définition des tourbières d'après Manneville et al., 2006	13
1.2.2. Approche typologique basée sur la formation des tourbières et leur fonctionnement hydrologique	14
2. Le soutien d'étiage vu comme un service rendu par les zones humides : paramètres et variables à retenir en vue d'une évaluation quantitative	16
2.1. Le soutien d'étiage, une notion hydraulicienne appliquée aux zones humides	16
2.2. Le comportement de stockage-restitution des zones humides : bilan hydrologique, paramètres et variables impliqués	17
2.3. Structuration et hydrodynamisme des sols tourbeux	19
3. La modélisation, une démarche de représentation et d'étude des systèmes hydrologiques	23
3.1. Le systémisme, une conception de la réalité complexe et dynamique	23
3.2. La modélisation hydrologique par l'approche dynamique des systèmes	24
3.3. État des travaux de modélisation hydrologique des tourbières à travers quelques exemples	28
4. Conclusion : L'approche des modèles réservoirs retenue pour la quantification des débits de soutien d'étiage	29
PARTIE III - CONCEPTION D'UN MODELE RESERVOIR REPRESENTANT L'HYDROLOGIE DE LA TOURBIERE DU COL DU LUITEL AFIN D'EVALUER LES DEBITS DE SOUTIEN D'ETIAGE	31
1. Présentation de la tourbière du col du Luitel et de son environnement	31
1.1. Situation de la tourbière et de son bassin versant	31
1.2. Géologie : un massif de roches métamorphiques faillé et recouvert par une moraine glaciaire	32
1.3. Géomorphologie du socle : deux cuvettes séparées par une remontée de substrat	33
1.4. Pédologie : tourbes blondes à noires, fibriques à sapriques et une couche d'argile tapissant le socle ..	34
1.5. Hydrologie : le ruisseau de Fonfroide comme exutoire principal	35
1.6. Climatologie : un microclimat froid et humide	36
1.7. Habitat : grandes unités de forêts tourbeuses de pins à crochets et sphaignes caractéristiques des milieux acides	37

1.8. Typologie : une tourbière limnogène ombrotrophe bombée et partiellement minérotrophe	38
1.9. Activités socio-économiques : la vocation pédagogique de la réserve	40
1.10. Risques de perturbation du fonctionnement de la tourbière : principales menaces et conséquences de l'assèchement	40
2. Matériel utilisé et méthode de construction du modèle	42
2.1. Matériel : les logiciels ArcGis et Vensim et les données hydroclimatologiques du Luitel.....	42
2.1.1. Représentation et analyse géographique sous ArcGis	42
2.1.2. Conception du modèle et simulation sous Vensim	42
2.1.3. Les données hydro-climatologiques du Luitel.....	43
2.2. Méthode : modélisation des variations des niveaux de nappe pour quantifier les débits de soutien d'étéage.....	46
2.2.1. Conceptualisation du modèle : trois réservoirs reliés à un exutoire.....	47
2.2.2. Construction du modèle à partir des termes du bilan hydrologique	50
2.2.3. Méthode de quantification du soutien d'étéage à partir des écoulements sortant des trois réservoirs.....	56
3. Résultats : validation du modèle et valeurs de débit de soutien d'étéage retenues.....	58
4. Conclusion : de l'implémentation progressive des flux vers la validation du modèle	62
PARTIE IV - DISCUSSION : MISE EN PERSPECTIVE DES RESULTATS OBTENUS ET REFLEXION METHODOLOGIQUE	65
1. Interprétation et contextualisation des débits de soutien d'étéage évalués	65
1.1. Comparaison des débits de soutien d'étéage et des débits de Fontfroide sur la période d'étude	65
1.2. Mise en perspective temporelle : une évaluation des débits de soutien d'étéage par rapport au QMNA5 et au module interannuel ?.....	69
1.3. Mise en perspective spatiale : l'étéage dans le département de l'Isère.....	71
2. Le modèle hydrologique de la tourbière du Col du Luitel : une approche simplifiée mais perfectible	73
2.1. Trois pistes d'amélioration après analyse des courbes comparant la simulation et l'observation	73
2.2. Généralisation des constantes pour un système en réalité hétérogène	75
2.3. Les tourbières, des systèmes évolutifs dans le temps	77
3. L'utilisation des données environnementales pour une modélisation : méthodologie et limites	79
3.1. Des données brutes aux données traitées.....	79
3.2. Fiabilité des données : marges d'imprécision, potentielles défaillances techniques et substitution de données.....	81
3.3. L'ETP, une valeur calculée à ajuster en fonction de la végétation	85
4. Conclusion : des résultats significatifs dans un contexte local et obtenus par une approche simplificatrice	87
CONCLUSION GENERALE : QUELLE EVALUATION POUR QUELLES PERSPECTIVES ?	89
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXES	101
A1 : Les deux premiers niveaux de la typologie CORINE-Biotopes (INPN).....	102
A2 : Description des types de zones humides en fonction des mécanismes de transfert d'eau et de la position topographique (D'après Acreman et Miller, 2006)	103
A3 : Tableau des profils pédologiques retenus par l'arrêté ministériel du 24 juin 2008.....	104
B1 : Liens entre services écosystémiques et bien-être humain (UICN)	105
C1 : Le système de failles de la chaîne de Belledonne (Sarrot-Reynaud, 1972)	106
D1 : Carte des profils d'acquisitions géoradar (Garambois, 2006)	107
D2 : Profils géophysiques (Garambois, 2006)	108
E1 : Lithologie synthétique des profils palustres prélevés à la tourbière du Col du Luitel en 2011 (Guiter et al., 2015)	115
F : Caractéristiques des piézomètres de la Tourbière du col du Luitel (d'après Hustache 2004).....	116
G1 : Campagne géophysique (du 5 au 7 mars 2018)	117
G2 : Campagne de carottage (du 25 au 26 avril 2018)	119
G3 : Campagne de géochimie (du 25 au 27 juin 2018)	125
RÉSUMÉ	128

Liste des figures et photographies

Figure 1 : L'École des Mines de Saint-Etienne.....	5
Figure 2 : Logigramme de synthèse du cadre de nos recherches.....	8
Figure 3 : Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides (d'après Acreman et Miller, 2006).....	11
Figure 4 : Processus de formation de la tourbe (Francez, 2000).....	14
Figure 5 : Fonctionnement hydrologique des principaux types de tourbières (Manneville et al., 2006).....	15
Figure 6 : Classification des zones humides en fonction des flux d'eau (d'après Gilvear et Bradley, 2009).....	18
Figure 7 : Triangle des textures des histosols (Gobat et al., 1991).....	20
Figure 8 : Profil schématique d'une tourbière haute, structures et propriétés des sols (Wastiaux, 2008).....	22
Figure 9 : Typologie des modèles hydrologiques (d'après Duranel, 2016).....	25
Figure 10 : Démarche de modélisation des systèmes dynamiques (d'après Jutla, 2006).....	27
Figure 11 : Localisation et emprise de la RN du Luitel.....	31
Figure 12 : Emprise au sol de la tourbière du Col du Luitel et de son bassin versant.....	32
Figure 13 : Géologie du Luitel (Barféty et al., 1972).....	33
Figure 14 : Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel (Ravatin, 2017).....	34
Figure 15 : Points de prélèvements de tourbe.....	35
Figure 16 : Réseau hydrographique de la tourbière du Col du Luitel.....	36
Figure 17 : Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 - 2016 (Ravatin, 2017).....	37
Figure 18 : Habitats naturels de la tourbière du col.....	37
Figure 19 : <i>Drosera rotundifolia</i> au Luitel.....	38
Figure 20 : Formation des tourbières du Luitel (Desplanques, 2011).....	39
Figure 21 : Comparaison du comportement d'une nappe non drainée (P3) avec une nappe drainée (P17).....	41
Figure 22 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel.....	43
Figure 23 : Représentation schématique d'un piézomètre.....	45
Figure 24 : Courbe de tarage du Ruisseau de Fontfroide (Laurent, 2010).....	46
Figure 25 : Carte piézométrique de la tourbière du Col du Luitel (construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018).....	47
Figure 26 : Conceptualisation du modèle : flux et réservoirs.....	48
Figure 27 : Corrélations des piézomètres retenus pour la modélisation avec les autres piézomètres du même secteur.....	49
Figure 28 : Réponse de la nappe en fonction de la pluie.....	51
Figure 29 : Modélisation du secteur Nord - ETP et pluies.....	51
Figure 30 : Évolution des niveaux de nappe pendant une sécheresse hivernale.....	52
Figure 31 : Modélisation du secteur Nord - Neige.....	52
Figure 32 : La tourbière du col et les sous-bassins versants.....	53
Figure 33 : Modélisation du secteur Nord - Ruissellement.....	54
Figure 34 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002).....	54
Figure 35 : Les trois surfaces de modélisation des écoulements.....	55
Figure 36 : Modélisation du secteur Nord - Tarpissement.....	55
Figure 37 : Décomposition d'un hydrogramme de crue en trois phases d'écoulements (Ben Amor, 2010).....	56
Figure 38 : Décomposition de l'hydrogramme de crue de Fontfroide.....	57
Figure 39 : Modèle final réalisé sous Vensim.....	58
Figure 40 : Graphiques de comparaison entre les valeurs de niveaux piézométriques simulées et observées.....	60
Figure 41 : Débits et volumes participant au soutien d'étiage.....	61
Figure 42 : Schéma de synthèse du modèle réalisé : flux et réservoirs.....	62
Figure 43 : Débits moyens et minimaux mensuels de Fontfroide.....	66
Figure 44 : Comparaisons entre les débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'étiage.....	68
Figure 45 : Estimation des débits de référence d'étiage (QMNA5) (DIREN, 2001).....	72
Figure 46 : Comparaison entre la simulation et l'observation de P3 en hiver.....	73
Figure 47 : Adéquation ou décrochage du modèle par rapport à la réalité.....	75
Figure 48 : Carotte prélevée dans le secteur Nord au cours de notre campagne de carottage (Photo : Cubizolle).....	76
Figure 49 : Tarpissement observé en hiver 2016 pour P3 et tarpissement simulé avec la loi de Bouissinesq.....	77
Figure 50 : Phénomène d'hystérèse apparaissant entre les phases d'humidification et d'assèchement (Razanezhad, 2016).....	78
Figure 51 : Relevage des sondes piézométriques.....	80
Figure 52 : La station météorologique de la tourbière du Col du Luitel.....	81
Figure 53 : Corrélations ETP Safran-ISBA - Station du Luitel.....	83
Figure 54 : Extrait des paramètres mesurés par la station météo où un paramètre mal mesuré fausse le calcul de l'ETP.....	83
Figure 55 : Corrélations entre les pluies mesurées au Luitel et les précipitations de Chamrousse.....	84
Figure 56 : Corrélations entre l'ETP et l'ETR (Cohard, 2007).....	85
Figure 57 : Comparaison des niveaux de nappe de P13 et de P14.....	86

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Fonctions des zones humides (d'après Smith et al., 2013)</i>	12
<i>Tableau 2 : Les services rendus par les zones humides (d'après eaufrance.fr)</i>	12
<i>Tableau 3 : Types de tourbières et mécanismes de formation (d'après Manneville et al., 2006)</i>	14
<i>Tableau 4 : Les zones humides classifiées d'après leur source d'alimentation en eau dominante</i>	18
<i>Tableau 5 : Synthèse des paramètres et variables d'intérêt pour le stockage et la restitution</i>	19
<i>Tableau 6 : Valeurs de conductivités hydrauliques selon le type de tourbière, de tourbe et le degré de décomposition de Von Post (Porteret, 2008)</i>	20
<i>Tableau 7 : Gammes de paramètres des histosols, tableau de synthèse (d'après Rezanezhad et al., 2016)</i>	21
<i>Tableau 8 : Traits structuraux et fonctionnels d'un système (d'après De Rosnay, 1975)</i>	24
<i>Tableau 9 : Elements de base pour construire un modèle de système dynamique (d'après Deaton et Winebrake, 2001)</i>	26
<i>Tableau 10 : Caractéristiques de la tourbe selon les points de prélèvements (Hustache 2004)</i>	35
<i>Tableau 11 : Paramètres mesurés par la station et capteurs correspondant (Laurent, 2016)</i>	44
<i>Tableau 12 : Comportement de la nappe en fonction des piézomètres</i>	45
<i>Tableau 13 : Indices de corrélation entre la simulation et l'observation</i>	60
<i>Tableau 14 : Comparaison des moyennes de débits de Fonfroide et de soutien d'étiage par période</i>	69
<i>Tableau 15 : Débits moyens mensuels de Fonfroide</i>	70
<i>Tableau 16 : Débits moyens annuels de Fontfroide</i>	71
<i>Tableau 17 : Précision des capteurs installés sur la tourbière du Col du Luitel</i>	82

Liste des abréviations et glossaire spécifique

- Signification des sigles utilisés :

AE-RMC : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse

AFES : Association Française de l'Étude des Sols

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

CORINE : COordination et Recherche de l'INformation en Environnement

DCR : Débit de CRise

DOE : Débit Objectif Etiage

ENS : Espaces Naturels Sensibles

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

EUNIS : EUropean Nature Information System

EVS : Environnement, Ville, Société

GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique

GPR : Ground Penetrating Radar

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement

ISBA : Interaction Sol Biosphère Atmosphère

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

PEG : Procédés pour l'Environnement et Géo-ressources

QMNA5 : Débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A)

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIG : Système d'Information Géographique

SPIN : Science des Processus Industriels et Naturels

UICN : Union Internationale de Conservation de la Nature

UMR : Unité Mixte de Recherche

ZABR : Zone Atelier du Bassin du Rhône

ZHTB : Zones humides en tête de bassin versant

- Brève définition des éléments du vocabulaire technique :

Acrotelme : Partie supérieure de la structure tourbeuse, généralement épaisse d'un mètre au maximum. Zone hydrauliquement active et sous condition aérobie. Caractérisée par une conductivité hydraulique et une porosité élevées.

Canal d'information : Permet de connecter les variables entre elles.

Catotelme : Partie inférieure de la structure tourbeuse. Occupe l'essentiel du volume de la structure. Caractérisée par une densité élevée et une faible conductivité hydraulique par rapport à l'acrotelme.

Etiage : Plus bas niveau des eaux dans un cours d'eau.

Evapotranspiration : Transfert de l'eau vers l'atmosphère par évaporation au niveau du sol et par transpiration des plantes.

Flux : Transitent à travers les réservoirs et en modifient les niveaux.

Histosol : Sol très riche en matière organique. Appellation scientifique de la tourbe en pédologie.

Hydromorphe : Se dit des sols qui présentent les marques d'une saturation régulière en eau.

Hygrophile : Se dit des plantes dont les besoins en eau pour leur développement sont élevés.

Minérotrophie : Régime d'alimentation hydrique majoritairement constitué d'eaux minéralisées.

Ombrotrophie : Régime d'alimentation hydrique majoritairement constitué d'eaux de pluie (peu minéralisées).

Porosité efficace : Représente le volume d'eau mobilisable par gravité.

Service écosystémique : Renvoie aux biens et services que les écosystèmes fournissent à l'humain permettent son bien-être et son développement.

Structure diplotelmique : Définie par Ingram (1978), permet de simplifier la compréhension structurel de la tourbe en la divisant en deux parties, la couche supérieure appelée acrotelme, et la couche inférieure appelée catotelme.

Variables auxiliaires : Apparaissent dans le canal d'information et conditionnent les flux ou les variables d'état. Peuvent prendre la forme de constantes, de fonctions ou de délais.

Variables de niveau ou d'état : Représentent des réservoirs dont la quantité est susceptible de varier dans le temps en fonction des flux.

Introduction - Le service de soutien d'étiage des zones humides débattu : démarche d'évaluation quantitative par la modélisation du fonctionnement hydrologique d'un site de référence

Les zones humides sont des milieux fragiles qui bénéficient aujourd'hui d'un intérêt scientifique particulier. Cet intérêt peut en partie s'expliquer par le fait qu'elles sont présentées, entre autres par la Convention de Ramsar qui vise à leur protection au niveau international, comme vitales pour la survie de l'humanité. Or de nombreuses menaces environnementales pèsent sur ces milieux. Pour n'en citer que quelques-unes, il peut s'agir de la pollution, de l'urbanisation, de l'exploitation minière ou encore des changements climatiques. Au cours des siècles passés, les zones humides ne bénéficiaient pas de statuts de protection et le développement humain s'est ainsi fait à leur détriment. Scientifiques et gestionnaires s'accordent aujourd'hui sur un constat : plus de la moitié de ces milieux ont disparu dans le monde au cours du siècle dernier. Dans notre contexte sociétal où le réchauffement climatique et l'érosion de la biodiversité sont sources de vives inquiétudes pour la pérennité des générations futures, la protection des zones humides revêt un caractère d'urgence. Cette protection est motivée par l'intérêt que présentent les services écosystémiques que ces milieux rendent aux sociétés. Les zones humides sont ainsi jugées comme vitales pour l'humanité de par les fonctions qu'elles assument, et sont aux fondements d'un argumentaire de protection.

Parmi ces services en apparaît un qui est particulièrement intéressant pour la gestion de la ressource en eau et la préservation de la biodiversité, il s'agit du soutien d'étiage. Les zones humides sont, de façon plutôt consensuelle, considérées comme des éponges qui absorbent l'eau pendant les épisodes de pluie assurant ainsi l'écêtement des crues, et qui la restituent de manière déphasée après les pluies induisant ainsi le maintien des niveaux des cours d'eau. L'importance de ce service est néanmoins contestée dans la littérature scientifique et semblerait ainsi devoir être nuancée. Il apparaît donc utile de préciser le rôle de soutien d'étiage des zones humides afin de faire avancer le débat en cours et la recherche scientifique.

Tel est l'objectif du projet ZABR / AE-RMC intitulé : « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de tête de bassin versant dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône ». Ce projet associe le CNRS, via l'École des Mines, à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse et présente ainsi l'intérêt d'unir le scientifique à l'opérationnel. Il comporte trois phases, la première a permis de retenir plusieurs sites d'étude, la deuxième est en cours et nos travaux contribuent à sa réalisation. Dans le cadre

de nos recherches, c'est ainsi le site de la tourbière du Col du Luitel qui a été étudiée. Cette tourbière peut effectivement être caractérisée comme une zone humide de tête de bassin versant. Elle se situe en Isère, au cœur de la chaîne de Belledonne et fait l'objet d'une protection nationale en étant incluse dans la Réserve Naturelle du Luitel. C'est à partir de ce site d'étude, et des données météorologiques et hydrologiques disponibles, qu'une évaluation du soutien d'étiage a été réalisée.

L'approche qui a été choisie pour réaliser cette évaluation est la modélisation numérique. Un modèle de type « réservoir » a ainsi été conçu pour simuler le fonctionnement hydrologique du site. Cette approche consiste en une simplification du système constitué de la tourbière et de son bassin versant. Le modèle a été réalisé à l'aide de Vensim, qui est un outil de la dynamique des systèmes facile à prendre en main et qui permet de mettre en œuvre des modèles rapidement à l'aide d'équations simplifiées. Le modèle ainsi réalisé a permis une simulation que nous avons cherché à faire se rapprocher suffisamment de l'observation, de sorte que le modèle puisse être validé. Cette validité a été évaluée à l'aide du calcul d'un indice de corrélation, lequel atteste d'une bonne fiabilité des résultats présentés. C'est à partir de ce modèle validé que les débits de soutien d'étiage ont été calculés. Nous proposons ainsi principalement une quantification en termes de débits exprimés en L/s. Et, afin de mieux se figurer ce que ces débits peuvent représenter, nous proposons également plusieurs comparaisons en utilisant plusieurs échelles de temps ou d'espace.

Nos recherches sont présentées de manière à aboutir progressivement aux résultats, en ayant en premier lieu bien cerné les thématiques clés sur lesquelles elles s'appuient, puis en ayant explicité notre méthode. Tout d'abord, le cadre, tant professionnel que scientifique, de nos recherches est détaillé. Nous montrons donc comment nos travaux se positionnent dans le projet ZABR / AE-RMC, dans quelles thématiques de recherches ils s'inscrivent et à quels objectifs plus spécifiques ils visent à répondre. Puis l'état de l'art est réalisé, autour de trois questions fondamentales à explorer pour mener à bien cette étude : les zones humides, en particulier les tourbières, le soutien d'étiage et la modélisation. Une fois ces champs de recherche parcourus, nous présentons notre méthode ainsi que le matériel, c'est-à-dire les logiciels utilisés et les données hydrométéorologiques du site, sur lequel elle s'est construite et les résultats auxquels nous avons abouti. Ces résultats sont ensuite interprétés et commentés. Il s'agit alors de voir ce qu'ils peuvent avoir de significatif tout proposant un recul critique et réflexif sur notre méthode et nos résultats. Cette prise de recul nous permet d'observer dans quelle mesure la réalité a été simplifiée afin de mettre en œuvre notre modèle et dans quelle mesure cette simplification est acceptable et ne compromet pas nos résultats.

Notons que ce stage a également été l'occasion de participer à trois campagnes scientifiques de terrain. Les résultats de ces campagnes sont encore à discuter, ou bien n'ont pas encore été obtenus, ou encore n'ont pas présenté d'intérêt significatif pour nous permettre de réaliser notre étude. Quelques résultats de ces campagnes sont tout de même présentés en annexe. Nos travaux sont par ailleurs à mettre en lien avec ceux de Thomas Jolly qui s'est employé conjointement à traiter la même problématique que celle dont ce mémoire traite, mais par l'approche hydrogéomorphologique. Thomas Jolly a également participé aux campagnes scientifiques de terrain, nous présentons donc en annexe quelques-uns de ses résultats.

Enfin, pour la présentation des figures et des tableaux, la convention suivante est adoptée :

- L'auteur est indiqué entre parenthèses quand nous lui empruntons l'une de ses figures ou tableaux tels quels.
- La mention « d'après » précède l'auteur quand nous apportons des modifications, qu'il s'agisse de traduction, ou de réagencement ou d'ajouts de certains éléments à ce que nous lui empruntons.
- Enfin, rien n'est spécifié quand l'auteur de ces figures et tableaux est l'auteur même de ce mémoire.

Les cartes que nous avons réalisées pour ce rapport ont été construites à partir des données SIG qui nous ont été transmises par Carole Desplanques, hormis la figure 12 qui utilise une orthophoto provenant de l'IGN.

Et quant aux sites internet que nous avons utilisés et qui sont cités tout au long de ce travail, ils ont tous été consultés pour la dernière fois le 30 août 2018 au cours de la relecture du présent mémoire.

Partie I - Un travail inclus dans le projet de caractérisation du rôle de soutien d'étiage des zones humides

Cette partie a pour objet de replacer la mission effectuée dans son contexte professionnel en indiquant les structures qui l'encadrent et les projets et thématiques de recherche dans lesquels elle s'inscrit. Elle présente ainsi la structure d'accueil du stage, l'École des Mines de Saint-Etienne, l'employeur, le CNRS, et le projet qui vise à préciser le rôle de soutien d'étiage des zones humides porté par la Zone Atelier du Bassin du Rhône et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

1. La structure d'accueil : l'École des Mines de Saint-Étienne

L'École des Mines de Saint-Etienne¹ est la structure d'accueil de ce stage. Elle se consacre à la formation d'ingénieurs généralistes et de spécialités de haut niveau et déploie une recherche orientée vers l'industrie. Les recherches ici présentées ont été réalisées au sein du centre SPIN (Sciences des Processus Industriels et Naturels), département PEG (Procédés pour l'Environnement et Géo-ressources).



Figure 1 : L'École des Mines de Saint-Etienne

L'école est organisée autour de 5 centres de Formation et de Recherche positionnés en fonction de leurs domaines applicatifs :

- Centre Ingénierie et Santé (CIS)
- Centre Microélectronique de Provence (CMP)
- Institut Henri FAYOL (FAYOL)
- Science des Matériaux et des Structures (SMS)
- **Sciences des Processus Industriels et Naturels (SPIN)**

Le centre SPIN se décompose lui-même en trois départements :

- **Procédés pour l'Environnement et Géo-ressources (PEG)**
- Procédés de Mise en œuvre des Milieux Granulaires (PMMG)
- Procédés de Transformation des Solides et Instrumentation (PTSI)

¹ Les informations contenues dans cette partie proviennent du site internet de l'école : <https://www.mines-stetienne.fr/recherche/5-centres-de-formation-et-de-recherche/sciences-des-processus-industriels-et-naturels/> et <https://www.mines-stetienne.fr/recherche/departements/procedes-pour-environnement-et-georessources-peg/>

La stratégie du département PEG est centrée sur les géo-ressources pour l'environnement et le redéploiement industriel. Ses champs disciplinaires sont les suivants : géologie, géochimie, valorisation des minerais, hydrologie, hydrogéologie, géomatique, écophysiologie végétale, hydrométallurgie, sciences participatives. L'un des objectifs du département est de répondre à la demande sociétale en matière de gestion durable des ressources naturelles et anthropisées. Nos recherches contribuent à cet objectif en cherchant à préciser les services que les zones humides rendent aux sociétés humaines à des fins de gestion et de conservation et à travers l'étude d'un site de référence.

2. L'employeur : le CNRS - UMR 5600

Le département SPIN fait partie de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 5600, « Environnement, ville, société ». Les UMR permettent d'associer un ou plusieurs laboratoires de recherche d'un établissement d'enseignement supérieur avec le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Le CNRS est en l'occurrence l'employeur pour la réalisation de ce travail.

L'UMR 5600 EVS² se consacre aux dynamiques de changement en fonction d'enjeux territoriaux et environnementaux ciblés. La présente étude s'intéresse à cette thématique, avec le constat de changements liés à une action anthropique directe comme le creusement de fossés de drainage, ou bien au climat dont l'évolution est susceptible d'altérer les fonctions étudiées.

L'UMR se structure selon les ateliers suivants :

- Atelier 1 : Bien-être en ville
- Atelier 2 : Flux et circulations
- Atelier 3 : Urbanisation et anthropoconstruction
- Atelier 4 : Ressource et changement rapide
- Atelier 5 : Changements environnementaux
- Atelier 6 : Faire territoire, faire société
- Atelier 7 : Épistémologie et heuristique
- Atelier 8 : Recherches géomatiques

L'atelier 8 se consacre à la structuration de cadres théoriques et méthodologiques permettant l'analyse de l'information géographique. Il s'intéresse également à la modélisation des processus et à leur représentation à l'aide de méthodes d'analyse statistique ou de simulation numérique. Le travail décrit dans ce rapport s'inscrit dans cet atelier en proposant une modélisation du fonctionnement hydrologique d'une zone humide de référence à partir des données environnementales disponibles.

² Les informations présentées dans cette partie proviennent du site de l'UMR 5600 : <http://umr5600.cnrs.fr/fr/accueil/> et <http://umr5600.cnrs.fr/fr/la-recherche/ateliers/atelier-8/>

3. Le projet ZABR / AE-RMC

Ce projet³ intitulé : « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de tête de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône » (ZHTB Action 51) résulte d'un accord-cadre entre l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AE-RMC) et la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). L'AE-RMC est un établissement public du ministère de l'environnement consacré à la préservation de l'eau. La ZABR est un regroupement de 24 établissements publics à caractère scientifique et technologique menant des recherches sur les hydrosystèmes du Rhône. Ce partenariat confère ainsi au projet une double finalité : opérationnelle et scientifique.

D'un point de vue scientifique, les attentes de ce projet sont les suivantes :

- Améliorer la compréhension des interactions cours d'eau/zones humides/eaux souterraines et la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides.
- Mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (principalement régulation et stockage).
- Préciser les vulnérabilités physiques des zones humides de têtes de bassins pour une meilleure protection et gestion.

Et d'un point de vue opérationnel :

- Transférer les connaissances (guide méthodologique ou technique).
- Produire des argumentaires pour la protection des zones humides.
- Construire des indicateurs de diagnostic et de suivi (restauration et bon fonctionnement).

Afin d'atteindre ces objectifs, le projet est décomposé en trois phases :

- Phase 1 (2016 - 2017) : état de l'art, choix des sites d'étude, des compétences et de l'instrumentation.
- Phase 2 (2017 - 2018) : mesures et instrumentation des sites, développement d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides.
- Phase 3 (2019 - 2021) : analyse et interprétation des données, test des indicateurs, valorisation des résultats.

Notre étude se situe dans la phase 2 du projet. Les campagnes de mesure et d'instrumentation auxquelles nous avons participé sont présentées en annexe⁴ de ce rapport. Cette phase prévoit également une modélisation du comportement stockage/déstockage des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques, afin de déterminer les paramètres et variables clefs et d'identifier des indicateurs de suivi. C'est précisément à cette à attente que notre étude vise à apporter une réponse.

³ Les informations présentés dans ce chapitre proviennent de la fiche du projet :

<https://www.graie.org/zabr/zabrdoc/accordcadre-fiches/2016/2016-FRechercheA18.pdf>

⁴ Voir annexes G1 à G3

4. Conclusion : logigramme de synthèse du projet

En guise de conclusion à cette première partie, nous proposons un logigramme qui permet de visualiser rapidement les différents partenaires associés au projet ZABR / AE-RMC, ainsi que le phasage du projet avec les objectifs associés à chaque phase. Le diagramme fait ressortir la phase dans laquelle se situe notre étude et met par ailleurs en avant l'interdisciplinarité du projet en montrant l'apport des différentes disciplines scientifiques.

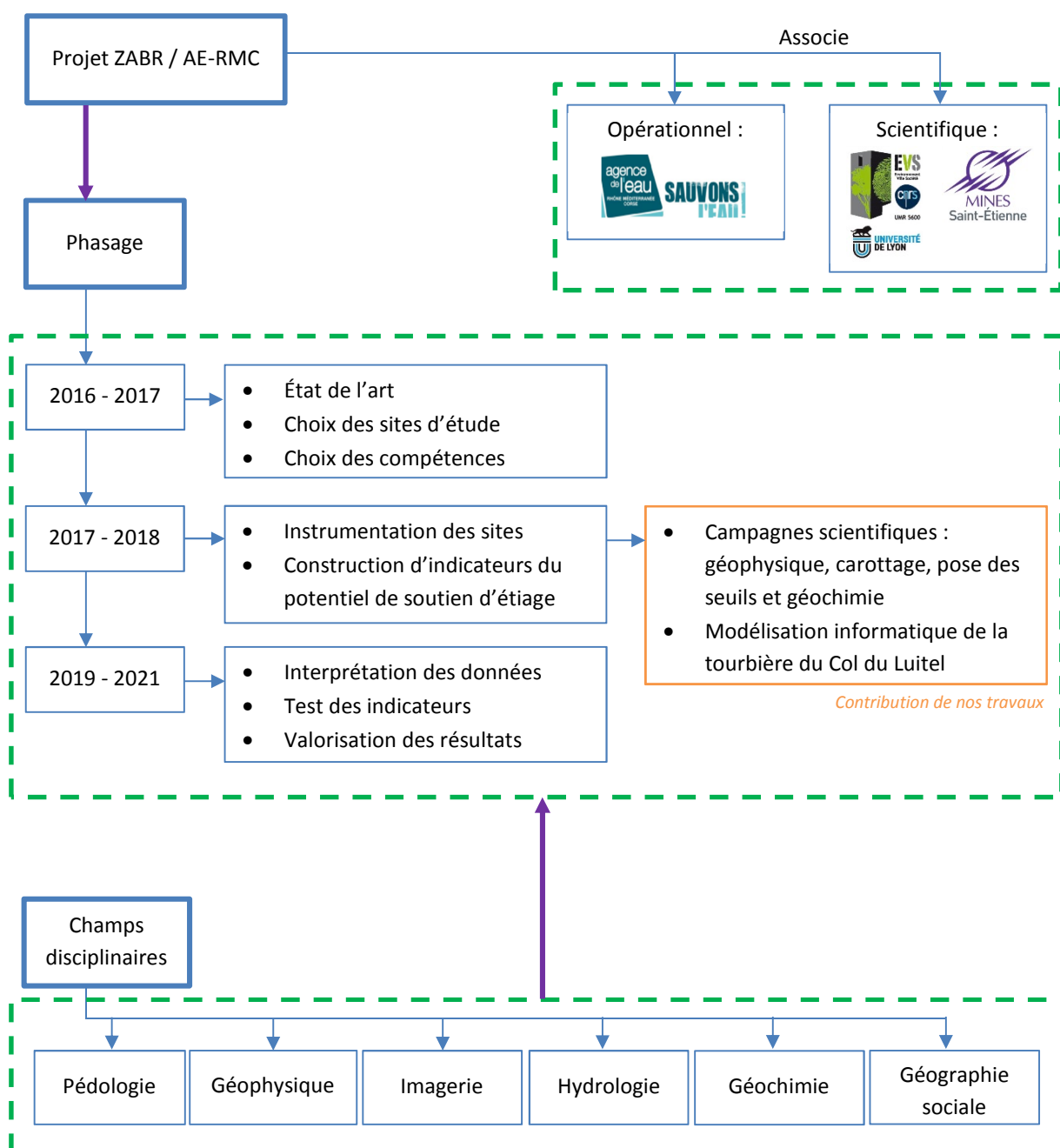


Figure 2 : Logigramme de synthèse du cadre de nos recherches

Partie II - État de l'art des trois thématiques principales : zones humides, soutien d'étiage et modélisation

Les zones humides sont des milieux complexes caractérisés par de multiples aspects. Nous en retenons ici quatre : l'écologie, l'hydrologie, la pédologie et la fonctionnalité. L'hydrologie est prépondérante notamment pour les fonctions des zones humides et les services qui en découlent tels que le soutien d'étiage que notre étude vise à préciser. Pour cela, une bonne compréhension du bilan hydrologique est nécessaire en vue d'une évaluation quantitative des débits de soutien d'étiage. Une telle démarche est complexe, ainsi l'approche systémique est adaptée puisque qu'elle vise à traduire de manière simplifiée un ensemble d'éléments en interaction. Un hydrosystème peut ainsi être représenté par un modèle composé de réservoirs dont les variations sont conditionnées par des flux.

1. Zones humides et tourbières, des milieux complexes caractérisés par quatre facteurs clés : écologie, pédologie, hydrologie et fonctionnalité

1.1. Les zones humides de tête de bassin versant : des habitats, des sols et des fonctions spécifiques conditionnés par l'hydrologie

1.1.1. Définition des zones humides d'après le glossaire des eaux et des milieux aquatiques

Définir les zones humides est complexe car de nombreux critères les caractérisent. Les définitions sont ainsi multiples et divergent selon leurs rédacteurs. Nous retiendrons ici la définition du glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques : les zones humides sont des zones « où l'eau, douce, salée ou saumâtre, est le principal facteur qui contrôle le milieu naturel et la vie animale et végétale associée. Les zones humides sont alimentées par le débit du cours d'eau et/ou par les remontées de nappes phréatiques et sont façonnées par l'alternance de hautes eaux et basses eaux. Il s'agit par exemple des ruisseaux, des tourbières, des étangs, des mares, des berges, des prairies inondables, des prés salés, des vasières, des marais côtiers, des estuaires. Ces zones sont des espaces de transition entre la terre et l'eau (ce sont des écotones). La végétation présente à un caractère hygrophile (qui absorbe l'eau) marqué. Comme tous ces types d'espaces particuliers, ils présentent une forte potentialité biologique

(faune et flore spécifique) et ont un rôle de régulation de l'écoulement et d'amélioration de la qualité des eaux. »⁵ Cette définition met en avant trois aspects prépondérants dans le cadre de notre étude, particulièrement les deux derniers :

- L'aspect écologique (forte potentialité biologique)
- L'aspect hydrologique (présence d'eau permanente ou temporaire)
- L'aspect fonctionnel (régulation des écoulements, amélioration de la qualité de l'eau)

Cette définition permet également de déduire un quatrième aspect. En effet, les fonctions énumérées sont intimement liées aux caractéristiques des sols, donc au critère pédologique. Ce critère est par ailleurs primordial pour l'identification et la délimitation des zones humides dans le contexte réglementaire français.⁶

Quant au syntagme « tête de bassin versant », le glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques propose la définition suivante : « *Partie amont des bassins versants et par extension tronçon amont des cours d'eau qui, en zone de relief notamment, sont le plus souvent moins exposés aux pressions anthropiques que les parties aval (mais restent très fragiles) et qui de ce point de vue constituent des secteurs de référence à préserver* ».⁷ La vulnérabilité et les forts enjeux de conservation des têtes de bassin versant ressortent de cette définition. Les têtes de bassin versant ont par ailleurs une influence déterminante sur la quantité et la qualité des eaux à l'aval (US EPA, 2015), d'où notre intérêt pour ces secteurs.

1.1.2. Typologies écologique, pédologique, hydrologique et fonctionnelle des zones humides

De la complexité d'une approche de définition découle une complexité typologique. Les nombreuses typologies qui existent diffèrent selon leur portée et les critères sur lesquels elles se fondent. Nous ne retiendrons ici que quelques typologies en lien avec les aspects écologiques, hydrologiques et pédologiques que nous avons mis en avant plus haut.

La typologie européenne CORINE-Biotopes⁸, permet d'appréhender l'aspect écologique des zones humides. Elle est actuellement utilisée en France pour caractériser et délimiter ces milieux suite à l'arrêté ministériel du 24 juin 2008.⁹ CORINE-Biotope est la première typologie européenne à voir le jour. Elle a été remplacée par EUNIS-Habitat au niveau européen et la transition est en cours au niveau français¹⁰. CORINE-Biotope a ainsi servi de base à l'élaboration d'EUNIS-Habitat, ces deux typologies classifient les habitats de façon hiérarchique et en comprennent respectivement plus de 350 et plus de 5200. La notion d'habitat est définie dans la classification EUNIS de la façon suivante : « *espace où des animaux ou plantes vivent, caractérisé premièrement par ses particularités physiques (topographie, physiologie des plantes ou animaux, caractéristiques du sol, climat, qualité de*

⁵ Glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques, p. 671

⁶ Voir note technique du 26 juin 2017 : http://circulaires.legifrance.gouv.fr/pdf/2017/07/cir_42418.pdf

⁷ Glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques, p. 628

⁸ Les deux premiers niveaux de la typologie sont présentés en annexe A1, et en intégralité à l'adresse suivante : http://zones-humides.org/sites/default/files/corine_biotopes_complet.pdf (Bissardon et al. 1997)

⁹ Voir <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000019151510> et <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021309378&categorieLien=id>

¹⁰ À cette fin, un tableau des correspondances entre EUNIS et CORINE a été publié en français (LOUVEL et al. 2015) : https://inpn.mnhn.fr/docs/ref_habitats/Correspondances_CORINE_biotopes_EUNIS_Rapport_SPN

l'eau, etc.) et secondairement par les espèces de plantes et d'animaux qui y vivent » (Louvel et al. 2013). Les types d'espèces végétales présentes dans un milieu sont à mettre en lien avec l'hydrologie car ils peuvent servir d'indicateurs permettant de mieux cerner ce dernier aspect. C'est par ailleurs l'hydrologie (« présence d'eaux permanentes ou temporaires ») qui conditionne la spécificité écologique des zones humides (« végétation hygrophile »).

L'aspect hydrologique peut être abordé via la typologie construite par Acreman et Miller (2006)¹¹. Cette typologie propose des types topographiques et des sous-types liés aux mécanismes de transferts des eaux dans les zones humides. Ces mécanismes sont des sources d'apport ou de pertes en eau, ou en d'autres termes des flux, qui conditionnent le fonctionnement hydrologique du milieu et le milieu lui-même :

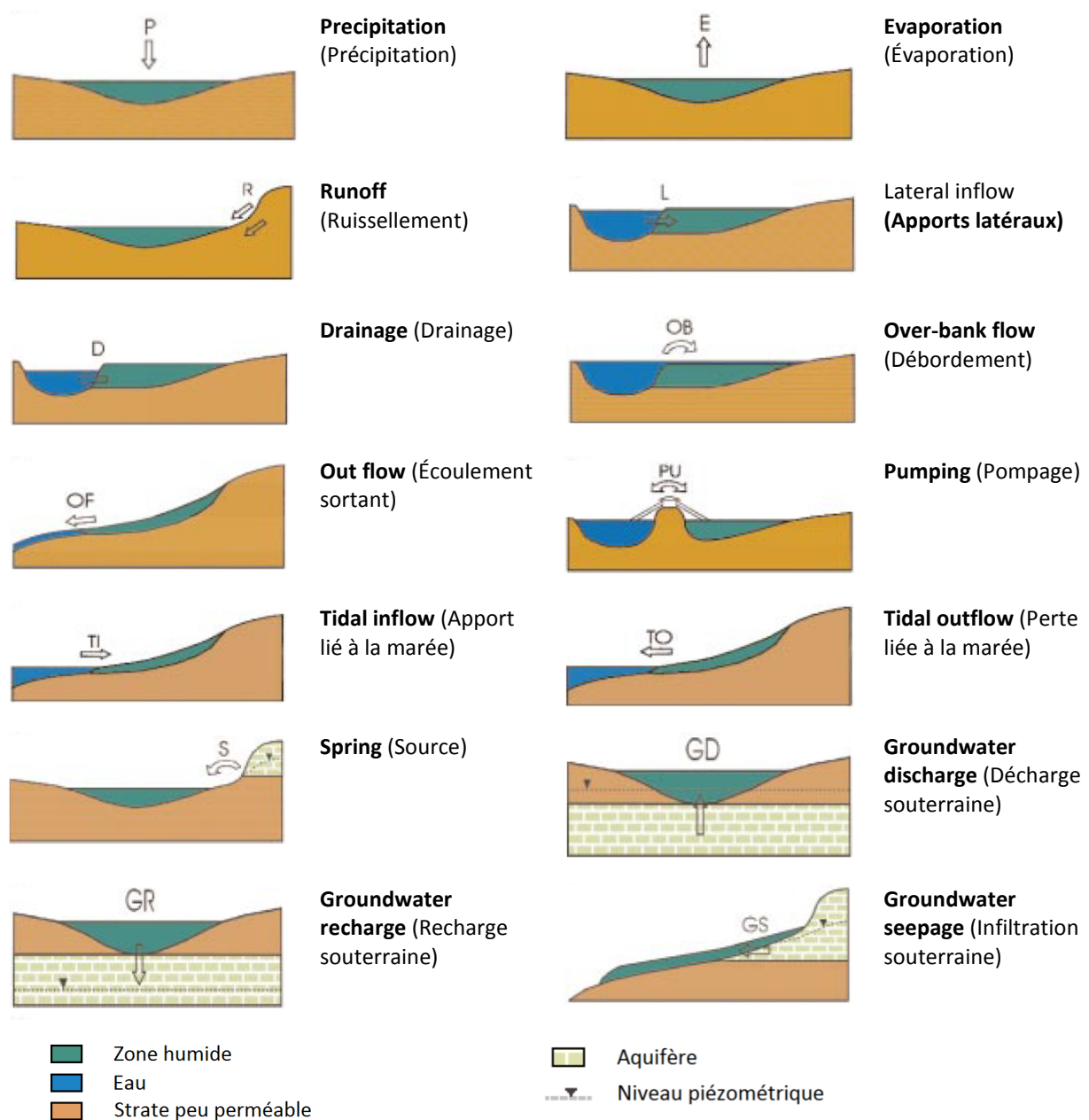


Figure 3 : Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides (d'après Acreman et Miller, 2006)

¹¹ Cette typologie est présentée en annexe A2

Enfin l'hydrologie des zones humides conditionne leur pédologie. En effet, la « présence d'eau permanente ou temporaire » confère aux sols des zones humides leurs propriétés hydromorphes (MEDDE et GIS Sol, 2013). D'après l'ONEMA, les sols hydromorphes sont définis comme comportant « *des horizons dont certains caractères sont attribuables à un excès d'eau.* » (Pollet, 2009). La typologie des sols hydromorphes élaborée par l'Association Française d'Étude des Sols (AFES, 2008) est ainsi retenue par la législation pour permettre la caractérisation des zones humides¹².

1.1.3. Fonctions et services écosystémiques des zones humides et enjeux de conservation

Le bon fonctionnement hydrologique d'une zone humide est garant de la qualité des services assumés. L'ensemble des documents consultés pour ce travail bibliographique fait ressortir une classification en trois grandes familles de fonctions :

Fonctions hydrologiques	Fonctions épuratrices ou biogéochimiques	Fonctions écologiques ou d'habitat
<ul style="list-style-type: none"> • Stockage temporaire d'eaux de surface • Stockage temporaire d'eaux de subsurface • Soutien des écoulements de base 	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclage des nutriments • Rétention des éléments toxiques • Interception des particules en suspension • Stockage de carbone 	<ul style="list-style-type: none"> • Support de communautés de plantes spécifiques • Support de communautés faunistiques spécifiques • Support de communautés d'invertébrés spécifiques

Tableau 1 : Fonctions des zones humides (d'après Smith et al., 2013)

Le glossaire des eaux et des milieux aquatiques spécifie les fonctions hydrologiques : « *Leur capacité de stockage, à plus ou moins long terme, prévient des risques d'inondation en diminuant l'intensité des crues et soutient le débit à l'étiage. La plupart d'entre elles participent à la recharge de la nappe phréatique et à l'épuration des eaux.* »

Ces fonctions rendent des services utiles aux sociétés humaines, elles sont alors qualifiées de « services écosystémiques ». Cette notion représente les avantages que les hommes tirent des zones humides. Le portail eaufrance dédié aux zones humides en retient trois types¹³ :

Services d'approvisionnement	Services de régulation	Services culturels et sociaux
<ul style="list-style-type: none"> • Fourniture d'eau • Source de matières premières • Source de produits agricoles ou d'élevage 	<ul style="list-style-type: none"> • Pouvoir épurateur • Régulation des débits • Influence sur le climat 	<ul style="list-style-type: none"> • Patrimoine paysager et naturel • Creuset des grandes civilisations (aspect historique) • Espaces de loisir et de tourisme

Tableau 2 : Les services rendus par les zones humides (d'après eaufrance.fr)

¹² Voir <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000019151510>, Cette typologie est consultable en annexe A3.

¹³ Voir <http://www.zones-humides.org/interets/services-rendus>

La prise en compte de ces services écosystémiques amène à considérer la valeur socio-économique des zones humides, donc leur contribution dans le développement sociétal et humain. L'UICN montre ainsi que les zones humides préservées assurent davantage de services écosystémiques, ceux-ci se corrélant avec le bien-être humain.¹⁴ Cet argumentaire justifie ainsi la préservation des zones humides, fragiles et menacées (Bernard, 2016). La vulnérabilité des têtes de bassin versant a de plus été soulignée dans la définition du glossaire des eaux et des milieux aquatiques citée plus haut. Or les zones humides de tête de bassin versant sont principalement représentées par les tourbières.

1.2. Les tourbières, des milieux dont l'origine et le maintien dépendent principalement du bilan hydrologique

1.2.1. Définition des tourbières d'après Manneville et al., 2006

Les tourbières, tout comme les zones humides dont elles font partie, constituent un ensemble de milieux extrêmement divers. Le vocabulaire anglais, très développé, fait d'ailleurs bien ressortir cette diversité en proposant de nombreuses nuances pour distinguer plusieurs types de tourbières (mire, fen, bog, peatland...). Entreprendre la définition de ces milieux est donc peu aisé. Nous pouvons néanmoins retenir la définition simple d'Olivier Manneville : « *Par définition, une tourbière est un milieu humide colonisé par la végétation qui se développe sur un sol peu perméable formé de tourbe, sur une épaisseur de 30 à 40 cm ou plus* »¹⁵. Cette épaisseur constitue un seuil à partir duquel il est possible de désigner un milieu en tant que tourbière. Il s'agit du seuil retenu par l'International Mire Conservation Group, mais il est susceptible de varier selon les pays ou les disciplines scientifiques (Porteret, 2008). Le pole tourbière fait par ailleurs ressortir la présence d'eau stagnante ou peu mobile saturant les sols de manière permanente comme la principale caractéristique de ces milieux¹⁶. Comme nous l'avons vu, cette caractéristique induit l'hydromorphie des sols et la présence d'espèces végétales spécifiques telles que les sphaignes.

Quant à la tourbe, plus volontiers qualifiée d'histosol en termes scientifiques, elle est définie d'après Manneville comme étant « *constituée au minimum de 20 à 30 % de matière organique mal dégradée et cette teneur peut monter jusqu'à 97 %* » La définition se poursuit en explicitant son processus de formation : « *Cette matière organique provient de l'accumulation, sur de longues périodes, de l'ordre du siècle ou du millénaire, de résidus végétaux (bryophytes et plantes supérieures) dans un environnement toujours humide, voire franchement aquatique. Cette permanence de l'eau, stagnante ou plus rarement mobile, donc appauvrie en oxygène, provoque l'anaérobiose, ou vie en milieu asphyxiant, dont résulte la dégradation ralentie des débris végétaux pour former la tourbe. En milieu plus sec et plus riche en oxygène, soumis à l'aérobiose, les débris végétaux se décomposent plus vite et plus fortement, sous l'action de divers micro-organismes, pour se transformer en éléments minéraux.* » Le schéma suivant permet de visualiser ce processus :

¹⁴ Voir en annexe B1 les schémas de l'UICN montrant le lien entre les services écosystémiques et le bien-être humain.

¹⁵ Manneville et al, 2006. Le monde des tourbières et des marais, p.35

¹⁶ Voir <http://www.pole-tourbieres.org/a-la-decouverte-des-tourbieres/article/qu-est-ce-qu-une-tourbiere>

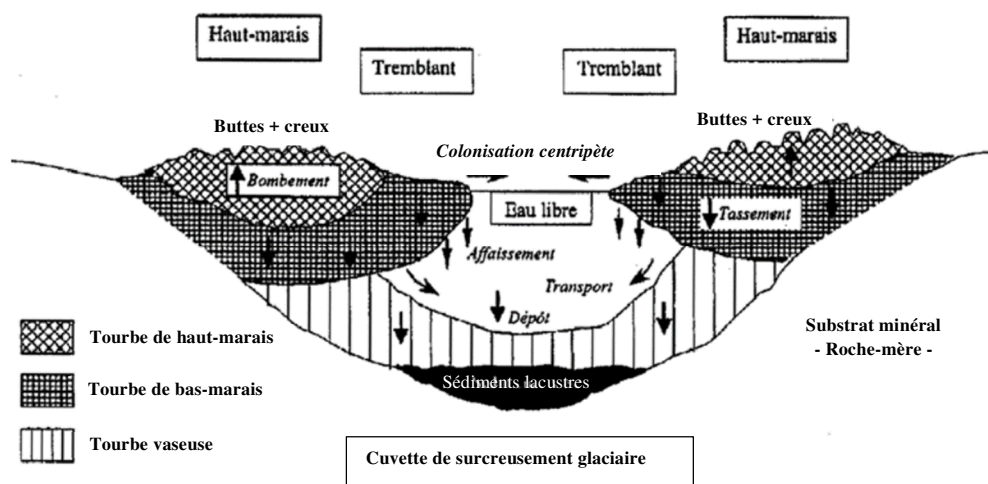


Figure 4 : Processus de formation de la tourbe (Francez, 2000)

Enfin il existe un certain nombre de facteurs indispensables à la formation des tourbières. Tout d'abord, le facteur le plus important est le bilan hydrologique, c'est-à-dire la différence entre les apports d'eau et les pertes (ou en d'autres termes les mécanismes de transfert ou flux mis en lumière plus haut dans la typologie d'Acreman et Miller). Celui-ci doit être équilibré ou légèrement positif pour permettre la formation de la tourbe. La durée d'engorgement en eau du milieu doit ainsi dépasser les 6 mois par an en règle générale. La température est également un facteur important car la chaleur agit sur les mécanismes de transfert des eaux et active le métabolisme des micro-organismes qui minéralisent la matière. Le climat doit donc être favorable, c'est-à-dire suffisamment humide. D'autres facteurs plus secondaires tels que la topographie, la géologie ou la chimie du milieu peuvent également favoriser l'apparition et le maintien des tourbières.

1.2.2. Approche typologique basée sur la formation des tourbières et leur fonctionnement hydrologique

Tout comme pour les zones humides, si la mise en place d'une définition est complexe, il en va de même pour la typologie. Cela dit, la classification mondiale tend à s'homogénéiser autour de l'origine des tourbières et de leur mode d'alimentation hydrique (Manneville et al., 2001). Les tourbières peuvent ainsi être classées selon une série de termes composés de la racine *gène*, du grec ancien *génos*, « naissance », qui désigne leurs origines :

Classification	Genèse de la tourbe et origine des eaux
Ombrogène	Presque exclusivement sous influence des eaux météoriques (pluies et neige)
Soligène	Dépendante de sources, suintements, ruissellements à la surface du sol ou percolations sous la surface
Topogène	Présence d'une nappe stagnante dans une dépression
Fluviogène	Crues périodiques chargées en limon venues d'une nappe alluviale ou d'un cours d'eau
Limnogène	Atterrissement dans un étang ou un lac à partir de radeaux flottants de végétation
Thalassogène	Nappe affleurante et stagnante dans une panne dunaire
Condensarogène	Condensation atmosphérique dans des éboulis de blocs grossiers où circule de l'air froid et humide

Tableau 3 : Types de tourbières et mécanismes de formation (d'après Manneville et al., 2006)

La formation des tourbières est dépendante des mécanismes de transferts des eaux. Ces deux processus sont associés dans la typologie suivante :

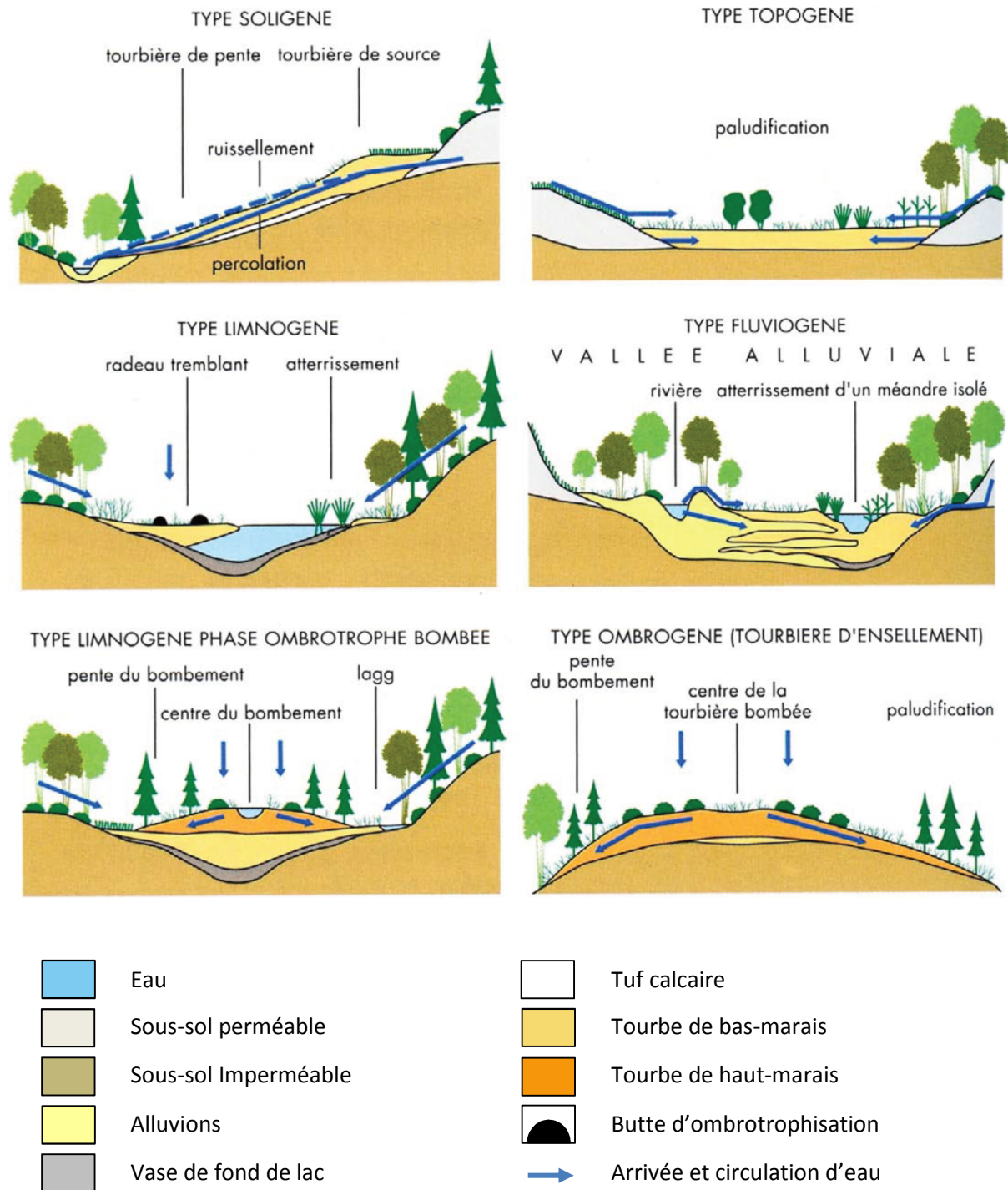


Figure 5 : Fonctionnement hydrologique des principaux types de tourbières (Manneville et al., 2006)

Le fonctionnement hydrologique de ces milieux est essentiel à cerner pour appréhender leurs services en particulier celui de soutien d'étiage.

2. Le soutien d'étiage vu comme un service rendu par les zones humides : paramètres et variables à retenir en vue d'une évaluation quantitative

2.1. Le soutien d'étiage, une notion hydraulicienne appliquée aux zones humides

L'étiage¹⁷ est défini de la façon suivante dans le glossaire des eaux et des milieux aquatiques : « *Période de plus basses eaux des cours d'eau et des nappes souterraines (généralement l'été pour les régimes pluviaux)* ». D'autres concepts en lien avec cette notion peuvent alors être définis :

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

La notion d'étiage concerne donc les cours d'eau et les nappes souterraines. Elle correspond à une période de l'année où les eaux sont au plus bas, c'est-à-dire cantonnées au lit mineur du cours d'eau. Cette période étant généralement estivale, elle peut être marquée par des phénomènes de sécheresse qui provoquent l'étiage. D'après la définition du glossaire des eaux et des milieux aquatiques, l'étiage est analysé en fonction des fréquences des faibles débits. Or le bon fonctionnement écologique d'un bassin versant et les usages associés sont dépendants de la quantité des eaux qui transitent en son sein. Les SDAGE et SAGE définissent ainsi un Débit d'Objectif d'Étiage (DOE) correspondant au « *débit permettant de satisfaire l'ensemble des usages en moyenne 8 années sur 10 et d'atteindre le bon état des eaux* »¹⁸. L'étiage peut donc également être considéré comme une limite basse à ne pas dépasser à la fois pour préserver les écosystèmes du bassin versant, mais également pour permettre les prélèvements nécessaires aux usages sociétaux. Cette notion permet ainsi de définir des volumes prélevables pour favoriser une bonne gestion quantitative de la ressource en eau.

¹⁷ Les définitions qui suivent sont tirées du glossaire des eaux et des milieux aquatiques, P299, 169, 170, 382 et 605

¹⁸ Voir l'Arrêté du 17 mars 2006 relatif au contenu des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000609821>

Quant à l'expression soutien d'étiage, elle est définie comme : « [l']action d'augmenter le débit d'un cours d'eau en période d'étiage à partir d'un ouvrage hydraulique (barrage réservoir ou transfert par gravité ou par pompage...) ». Le soutien d'étiage donc est une notion hydraulicienne à mettre en lien avec des ouvrages tels que les barrages, ceux-ci permettant la régulation des débits d'un cours d'eau. En effet, la mesure de soutien d'étiage la plus connue est le « lâcher de barrage » qui permet de faire remonter les niveaux des cours d'eau grâce à des stocks d'eau accumulés dans des barrages réservoirs. Le concept de soutien d'étiage est utilisé néanmoins par extension pour les zones humides et est traditionnellement admis comme étant un service assumé par ces milieux. Ce service serait possible grâce à la porosité des sols de ces milieux, qui permettrait le stockage temporaire des eaux et leur restitution avec effet retard (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2002). Il s'agit d'un service important puisqu'il supporte tous les enjeux liés à la présence d'eau (écologie des milieux aquatiques, loisirs nautiques, eau potable, besoins agricoles, besoins industriels, pêche...). Le soutien d'étiage « naturel » semble également présenter un intérêt économique intéressant en évitant les coûts du soutien d'étiage par lâcher de barrage (Agence de l'Eau Adour Garonne, 2009)¹⁹.

2.2. Le comportement de stockage-restitution des zones humides : bilan hydrologique, paramètres et variables impliqués

Pour caractériser le rôle de soutien d'étiage d'une zone humide, il est nécessaire en premier lieu de bien connaître le type de zone humide concerné, ce que la première partie de notre état de l'art vise à permettre. En second lieu, il est indispensable de réaliser un bilan des flux entrants et sortants dans le milieu, ce en tenant compte des fluctuations des réserves d'eau. Ce bilan hydrologique est exprimé de la manière suivante (Porteret, 2008 ; Price, 2001) :

$$(P + QeSo + QeSu) - (ET + QsSo + QsSu) = \Delta R$$

Avec,
 ΔR : Variation
 du stock d'eau

Et

• Flux entrants :
 P : Précipitations
 QeSo : Débit entrant souterrain
 QeSu : Débit entrant de surface

• Flux sortants :
 ET : Évapotranspiration
 QsSo : Débit sortant souterrain
 QsSu : Débit sortant de surface

La typologie de Gilvear et McInnes (1994) reprend les variables utilisées dans le bilan hydrologique précédent. Elle permet de cerner des types de zones humides d'après leurs mécanismes préférentiels d'alimentation en eau. Ces différents types sont construits avec la racine *trophe*, du grec ancien *trophê*, « nourriture ». Nous les retranscrivons dans le tableau suivant :

¹⁹ L'agence de l'eau Adour Garonne propose d'ailleurs une quantification économique des services rendus par les zones humides : http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/58506/GED_00000004.pdf

Type	Alimentation en eau principale
Ombrotrophe	Précipitations (P)
Minérotrophe	Eaux souterraines (QeSo)
Rhéotrophe	Eaux superficielles (QeSu)
Omnitrophe	À la fois précipitations, eaux souterraines et superficielles

Tableau 4 : Les zones humides classifiées d'après leur source d'alimentation en eau dominante

Cette typologie permet donc d'identifier les flux entrants mais elle s'intéresse également aux flux sortants que nous avons détaillés plus haut. Or c'est bien l'ensemble de ces mécanismes de transfert qui permet d'évaluer les variations des stocks d'eau dans une zone humide. Le schéma de synthèse suivant, offre une vue sur 12 grands types de zones humides conditionnées tant par les flux entrants que sortants :

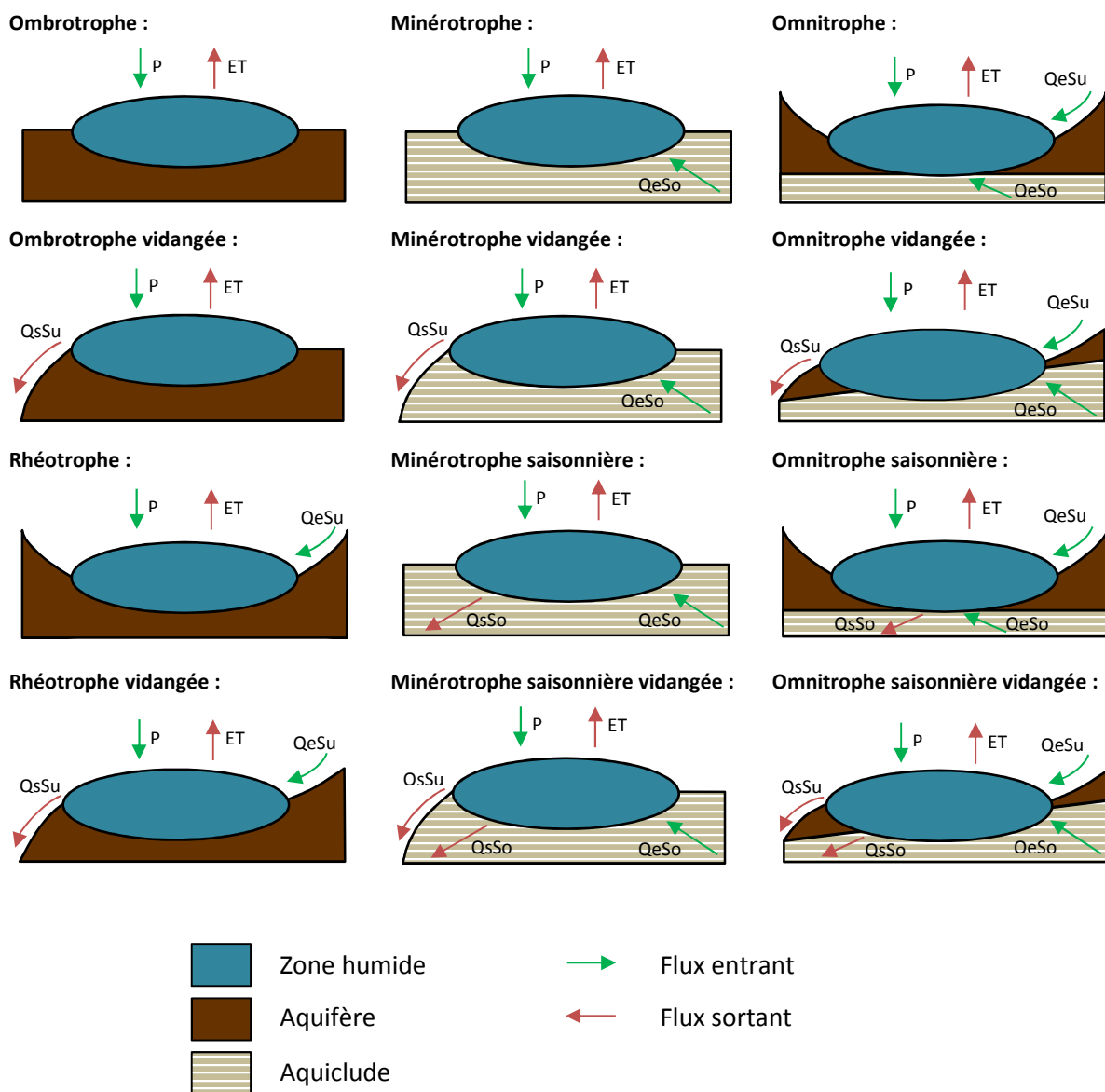


Figure 6 : Classification des zones humides en fonction des flux d'eau (d'après Gilvear et Bradley, 2009)

Gilvear et McInnes décrivent également les paramètres (statiques) et les variables (dynamiques) qui interviennent dans les variations de stock d'eau (ΔR) des zones humides. Nous ne retiendrons ici que les paramètres et variables qui jouent un rôle significatif dans les processus de stockage et de restitution. Le tableau suivant les récapitule en les explicitant :

	Stockage	Restitution
Paramètres	<ul style="list-style-type: none"> • Proportion d'eau libre, ou porosité efficace : proportion d'eau qui peut circuler de façon gravitaire et donc potentiellement participer au soutien d'étiage. • Proportion d'eau utile : proportion d'eau qui ne s'écoule pas de façon gravitaire, elle est liée au sol par les forces capillaires. • Volume total de la zone humide : permet de pondérer les deux paramètres précédents. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perméabilité : capacité d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, généralement exprimée en m/s. • Pente du substratum : elle impose un gradient de charge hydraulique qui accélère le drainage gravitaire. • Proportion d'eau libre par rapport au volume total : proportion d'eau en mesure de circuler et donc de soutenir l'étiage. • Hauteur (NGF) de l'exutoire : la nappe doit être au-dessus de cette hauteur pour que la tourbière puisse se vidanger.
Variables	<ul style="list-style-type: none"> • État des réserves (eaux libre + utile) : conditionne la capacité de stockage, moins il y a de réserve en stock, plus la capacité de stockage est grande. • Vitesse de remplissage des stocks : elle dépend souvent de la capacité d'infiltration du milieu. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient hydraulique de la zone humide : conditionne la vitesse de drainage, dépend de l'état de recharge. • Conditions aux limites au niveau de l'exutoire : définissent les modalités de drainage et dépendent de la position, la forme et la nature de l'exutoire. • État des réserves d'eau libre : renseigne sur le volume de soutien d'étiage potentiel, les eaux libres ne sont mobilisées que si le gradient hydraulique et les conditions aux limites le permettent.

Tableau 5 : Synthèse des paramètres et variables d'intérêt pour le stockage et la restitution

Les paramètres et variables conditionnant le fonctionnement hydrologique des zones humides et donc leur service de soutien d'étiage ayant été déterminés, il nous faut maintenant les rapprocher de la structuration verticale des tourbières et de leur pédologie spécifique.

2.3. Structuration et hydrodynamisme des sols tourbeux

La manière dont les eaux s'écoulent dans les tourbières dépend de la structuration et des caractéristiques de leurs sols. Les sols tourbeux, ou histosols, peuvent être classés en fonction du taux de fibre qu'il contiennent. Gobat et al. (1991) proposent trois classes granulométriques, les tailles des fibres sont indiquées entre parenthèses :

- La tourbe fibrique (> 200 μm)
- La tourbe mésique (50 à 200 μm)
- La tourbe saprique (<50 μm)

Les sols peuvent également être classifiés d'après l'échelle de Von Post à laquelle le tableau fait référence. Cette échelle indique des degrés de décomposition de la matière organique. Il est intéressant de noter que la conductivité hydraulique et la porosité efficace tendent à décroître à mesure que le degré de décomposition et la profondeur augmentent.

Rezanezhad et al (2016) ont rassemblé et synthétisé, d'après la littérature scientifique, un ensemble de valeurs régulant l'hydrodynamique des sols tourbeux. Le tableau de synthèse suivant présente ces gammes de valeur :

Paramètre	Gamme de valeurs
Densité apparente	0,02 - 0,254 g.cm ⁻³
Porosité totale	71 - 95,1 %
Porosité efficace	0,048 - 0,45
Rétrécissement	18 - 34 mm (pour 100 mm d'épaisseur initiale)
Compression	8 - 48 mm (pour 100 mm d'épaisseur initiale)
Conductivité hydraulique saturée (K _{sat})	0,7× 10 ⁻⁵ - 1,3 × 10 ⁻² m.s ⁻¹
Conductivité hydraulique non saturée (K _{usat})	7,9× 10 ⁻⁷ - 1,2 × 10 ⁻⁵ m.s ⁻¹
Diamètre des pores	0,1 - 4,6 mm
Coefficient d'adsorption-desorption-partage	1,33 - 5400 L.g ⁻¹
Coefficient de diffusion	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹ m ² .s ⁻¹
Coefficient de dispersion	0,3 × 10 ⁻³ - 9,0 × 10 ⁻⁷ m ² s ⁻¹
Coefficient de transfert de masse	4.4 × 10 ⁻⁹ - 2.8 × 10 ⁻⁵ s ⁻¹

Tableau 7 : Gammes de paramètres des histosols, tableau de synthèse (d'après Rezanezhad et al., 2016)

Enfin, la variabilité verticale des paramètres évoquée plus haut implique que les écoulements ne peuvent être appréhendés de la même manière selon la profondeur où ils ont lieu. Ingram (1978) propose néanmoins une structuration bipartite qui simplifie la compréhension de l'hydrodynamisme des sols. Il s'agit de la structure diplotelmique qui se compose de :

- L'acrotelme : il s'agit de la partie hydrauliquement active de la tourbière. Il se situe dans les premiers centimètres de tourbe et correspond à la zone de fluctuation de la nappe. Il se caractérise par une forte porosité efficace et une forte conductivité hydraulique. Ces deux paramètres ne sont néanmoins pas uniformes sur toute la zone. En effet, leur valeur tend à diminuer fortement en fonction de la profondeur. C'est par ailleurs dans l'acrotelme, zone alternativement aérobie et anaérobie en fonction des niveaux de la nappe, qu'a lieu la décomposition des végétaux à l'origine de la formation de la tourbe.
- Le catotelme : il constitue la partie inférieure de la tourbière et occupe l'essentiel de son volume. Sa conductivité hydraulique et sa porosité efficace sont bien plus faibles que celles de l'acrotelme.

Ces observations quant aux propriétés de l'acrotelme et du catotelme apparaissent sur le schéma de synthèse suivant. Ce schéma fait ressortir la structure diplotelmique et permet d'observer l'évolution de quelques paramètres en fonction de la profondeur de l'histosol.

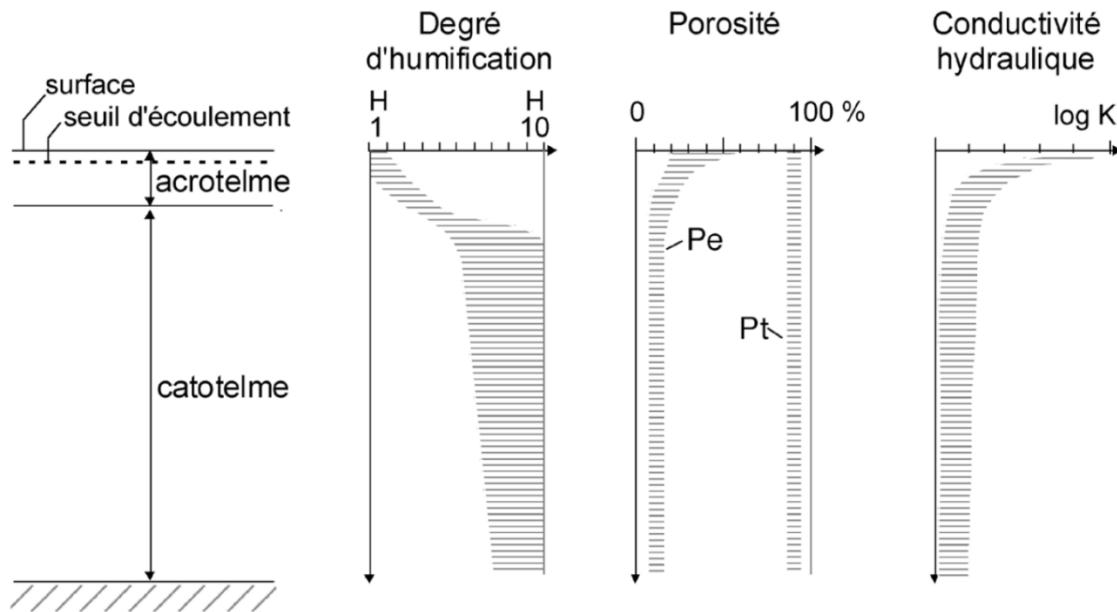


Figure 8 : Profil schématique d'une tourbière haute, structures et propriétés des sols (Wastiaux, 2008)

Les écoulements qui ont lieu dans l'acrotelme peuvent également être appréhendés de façon simplifiée. Les écoulements horizontaux peuvent être de trois types, conditionnés par le niveau hydrostatique, autrement dit par des seuils :

- Les écoulements rapides à sursaturation, qui ont lieu lorsque les niveaux piézométriques correspondent à la côte altimétrique de surface.
- Les écoulements rapides en sous-saturation, correspondant au drainage de la partie supérieure de l'acrotelme qui est la plus perméable. Ces écoulements ont lieu lorsque les niveaux piézométriques passent au-dessus du seuil d'écoulement rapide, situé légèrement au-dessus du contact entre l'acrotelme et le catotelme.
- Les écoulements de base lents, correspondant au drainage de la partie inférieure de l'acrotelme. Ils ont lieu lorsque les niveaux piézométriques passent sous le seuil d'écoulement rapide. Ils représentent une part bien moindre que celle des écoulements rapides.

Quant aux écoulements verticaux, ils sont généralement considérés comme négligeables (Van Der Schaaf, 2002) puisque le substratum des zones humides est presque toujours imperméable, sans quoi la mise en place et le maintien de ces milieux serait compromis.

La tourbe apparaît ainsi comme un matériau hétérogène, cette particularité induit une forte variabilité des paramètres conditionnant l'aspect hydrodynamique. Par ailleurs les processus de décomposition des végétaux façonnent la distribution des pores dans lesquels l'eau s'écoule en conférant aux sols un caractère anisotrope. Cette anisotropie fait que les fluides ne s'écoulent pas de la même façon selon la direction qu'ils suivent (Beckwith et al., 2013). Tout cela complique donc une démarche d'évaluation du soutien d'étiage. Les simplifications proposées plus haut sont donc nécessaires. De plus, une approche par la modélisation peut permettre de réaliser cette évaluation en favorisant une mise en place simplifiée du système observée. Les gammes de valeurs présentées plus haut peuvent ainsi servir de référence pour la réalisation du modèle.

3. La modélisation, une démarche de représentation et d'étude des systèmes hydrologiques

3.1. Le systémisme, une conception de la réalité complexe et dynamique

Le systémisme est une manière d'appréhender la réalité qui émerge au cours du XX^e siècle. Cette conception marque une rupture avec la compréhension des systèmes basée sur les relations de causalité qui caractérisait la période des Lumières. C'est Ludwig Von Bertalanffy, biologiste autrichien, qui va permettre dans les années 1920-1930 d'ouvrir la conception mécaniste des Lumières vers le vivant en formulant tout d'abord une « Théorie des Systèmes vivants » qui deviendra par la suite la « Théorie générale des systèmes ». Puis dans les années 1970, les chercheurs anglo-saxons élargissent le champ de la pensée systémique vers les sciences sociales. L'approche systémique se caractérise ainsi par son interdisciplinarité, l'enjeu étant d'appréhender un objet d'étude dans sa complexité et dans son rapport avec l'environnement avec lequel il interagit.

Nous proposons ici, afin de nous familiariser avec cette pensée, de définir brièvement quelques concepts qui lui sont propres (Skyttner, 1996) :

- L'interdépendance : chacune des composantes du système est incluse dans une interrelation avec les autres composantes. Un élément indépendant ne saurait ainsi faire partie du système.
- L'holisme : principe qui veut qu'un ensemble soit supérieur à la somme de ses parties. Le système, conçu en tant qu'ensemble, se distingue ainsi de la simple somme des parties par ses propriétés émergentes.
- La téléologie : en d'autres termes, la finalité ou le but du système.
- L'ouverture et la fermeture : un système ouvert entretient des échanges avec son environnement tandis qu'un système fermé en est coupé. Cette fermeture augmente l'entropie du système.
- L'entropie : ce concept désigne le degré de désorganisation ou d'imprédictibilité d'un système.
- L'homéostasie : par ce principe, un système tend naturellement à retourner à un état d'équilibre grâce à des mécanismes d'autorégulation.
- L'équifinalité : ce terme désigne le fait qu'il soit possible de produire un système représentant convenablement un aspect de la réalité à partir de plusieurs jeux de paramètres différents. Le terme de convergence peut aussi être employé.

Hreiche (2003) souligne dans ses travaux de thèse que l'existence de ce dernier concept pose une « question quasiment philosophique ». De fait, l'approche systémique est largement tributaire de la philosophie, et cela est perceptible à travers cette énumération de concepts. Comme tout concept, ceux listés plus haut ont pour fonction, à travers leur définition et leur utilisation, de permettre une certaine compréhension de la réalité. Un système n'est donc jamais qu'une représentation partielle et partielle du réel qui dépend de la manière dont celui-ci est perçu. En outre, la propension du systémisme à couvrir un

champ disciplinaire vaste, ou en d'autres termes son interdisciplinarité, se retrouve dans sa conceptualisation même. En effet, le concept d'entropie est emprunté à la thermodynamique et celui d'homéostasie à la médecine.

Le mot système vient du grec ancien *systema*, « *combinaison* ». L'étymologie fait donc apparaître une idée d'assemblage d'éléments. Bertalanffy (1993) définit un système comme un « *complexe d'éléments en interaction* ». Ce principe d'interaction, c'est-à-dire d'influences réciproques entre les éléments, est fondamental. Garcia (2017) complète d'ailleurs cette définition en précisant que « *tout changement dans n'importe lequel des éléments affecte l'ensemble dans sa globalité* ». Un système, dans la conception que nous venons de développer, peut être décrit selon deux groupes de traits caractéristiques d'après De Rosnay (1975) :

- L'aspect structural, qui concerne l'organisation spatiale des composants du système
- L'aspect fonctionnel, qui concerne l'organisation temporelle des composants du système

Le tableau suivant liste et définit les traits structuraux et fonctionnels :

	Composants d'un système	Définition
Aspect structural	Limite	Frontière qui sépare le système de l'environnement.
	Éléments	Parties constitutives du système qui peuvent être dénombrées et assemblées.
	Réservoirs	Composants qui stockent et/ou restituent des flux.
	Réseau de communication	Permet aux éléments du système de s'échanger les flux.
Aspect fonctionnel	Flux	Circulent entre les réservoirs et font varier leurs niveaux. Ils s'expriment en quantités.
	Vannes	Contrôlent les débits des flux.
	Délais	Résultent des vitesses de circulation des flux.
	Boucles de rétroaction	Déterminent le comportement du système et sont dites positives quand elles induisent une dynamique de changement, ou négatives quand elles induisent de la stabilité.

Tableau 8 : Traits structuraux et fonctionnels d'un système (d'après De Rosnay, 1975)

Ces aspects renvoient à la dynamique des systèmes élaborée par Forrester (1984), laquelle est une sous discipline de la théorie des systèmes. Il s'agit d'une approche qui vise à comprendre le comportement des systèmes complexes dans le temps et les changements qui s'y produisent (Provitolo, 2006). Cette approche peut être utilisée en hydrologie, le système hydrologique alors perçu peut-être représenté grâce à la modélisation.

3.2. La modélisation hydrologique par l'approche dynamique des systèmes

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe. Tous les modèles sont ainsi nécessairement faux, mais ils n'en sont pas moins utiles, pour améliorer la

compréhension d'un système, ou bien pour en prévoir le comportement (Grillot et Paran, 2011). De nombreux types de modèles sont utilisés en hydrologie. Le diagramme suivant résume les approches possibles :

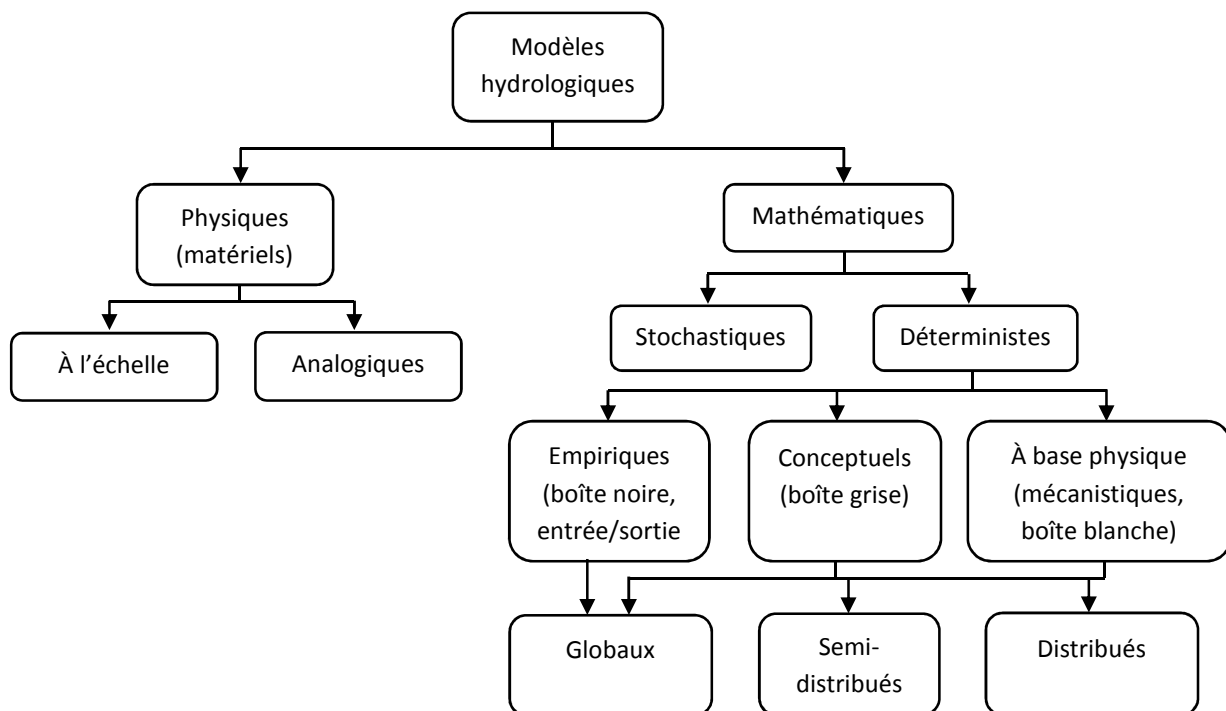


Figure 9 : Typologie des modèles hydrologiques (d'après Duranel, 2016)

Les modèles physiques sont des modèles concrets, c'est-à-dire construits à partir de matériaux. Les modèles à l'échelle offrent une représentation réduite d'un système qui conserve les rapports de dimensions. Les modèles analogiques consistent en une transposition électrique d'un original hydraulique. Dans ces modèles, la résistance par exemple simule la transmissivité.

Les modèles mathématiques sont en revanche abstraits, ils se basent sur des fonctions mathématiques et permettent la représentation numérique d'un système. Dans les modèles déterministes, une seule sortie est possible pour une entrée donnée, tandis que dans les modèles stochastiques, pour une même entrée, plusieurs sorties sont possibles, ces derniers modèles intégrant au moins une variable aléatoire. Les modèles empiriques n'utilisent pas les lois de la physique et visent à reproduire des variables de sortie d'après des variables d'entrée. Les modèles conceptuels permettent de représenter un hydrosystème sous forme de réservoirs interconnectés entre eux dans lesquels des flux transitent, ce à l'aide d'équations très simplifiées. Ce type de modèle est parfois qualifié de paramétrique, car l'appellation modèle conceptuel peut prêter à confusion (Duranel, 2016). Elle peut en effet désigner une étape préalable à la réalisation du modèle numérique. Les modèles à base physique utilisent des équations de base de la physique telles que la loi de Darcy par exemple pour modéliser les écoulements dans les milieux poreux. Les modèles globaux résument les propriétés d'un bassin versant de manière à permettre une relation directe entre les pluies et les débits. Ils se fondent sur des équations différentielles ordinaires qui n'intègrent pas les caractéristiques géométriques du système. Les modèles semi-distribués

ne globalisent qu'une partie des paramètres inhérents au système. Les modèles distribués intègrent les variabilités spatiales du système.

Enfin une classification selon le degré d'opacité des processus de fonctionnement interne apparaît dans le diagramme présenté plus haut. Dans les systèmes de type « boîte noire » les mécanismes de fonctionnement internes n'apparaissent pas, l'intérêt ne se porte ainsi que sur les échanges avec l'extérieur. À l'inverse, dans les systèmes de type « boîte blanche », les processus de fonctionnement internes sont connus. Enfin, les systèmes de type « boîte grise » sont mixtes et s'articulent autour des deux paradigmes précités.

La méthode de modélisation retenue pour notre étude s'inscrit dans la dynamique des systèmes évoquée plus haut. Cette approche convient bien à des problèmes spécifiques et d'ordre pratique. Elle peut de plus s'appréhender facilement grâce au langage « DYNAMO » (DYNAMIC MODELS) qui ne comprend que quatre blocs de construction élémentaires pour tous types de modèles. Le tableau suivant les présente, les symboles indiqués sont empruntés au logiciel STELLA :

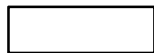
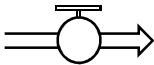


Nom	Description	Symbole
Variables de niveau ou d'état	Représentent des réservoirs dont la quantité est susceptible de varier dans le temps en fonction des flux.	
Flux	Transitent à travers les réservoirs et en modifient donc l'état.	
Variables auxiliaires	Apparaissent dans le canal d'information et conditionnent les flux ou les variables d'état. Peuvent prendre la forme de constantes, de fonctions ou de délais.	
Canal d'information	Permet de connecter les variables entre elles et de simuler les rétroactions.	

Tableau 9 : Elements de base pour construire un modèle de système dynamique (d'après Deaton et Winebrake, 2001)

Les modèles de systèmes dynamiques reposent sur la mise en lien de réservoirs et de flux en fonction d'un pas de temps défini. Cette relation s'exprime mathématiquement sous forme d'équation différentielle. L'enjeu d'une modélisation est de permettre la résolution numérique de ce type d'équations de ce type. Ces équations prennent ainsi, par exemple, la forme suivante :

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P - ET$$

Avec,

S = Stock
t = Temps

P = Pluie
ET = Évapotranspiration

Enfin, le diagramme suivant synthétise la démarche de construction de ce type de modèles :

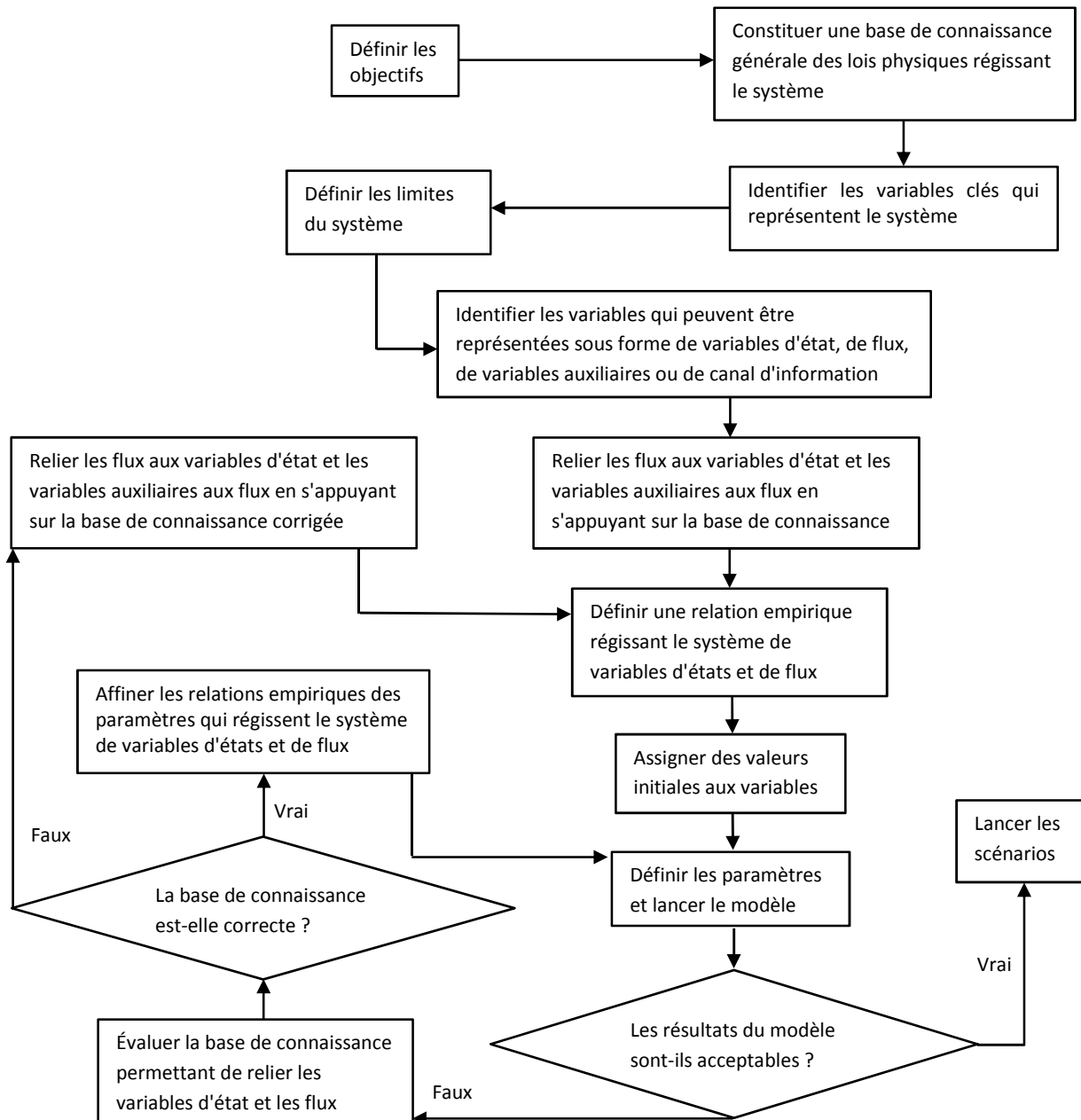


Figure 10 : Démarche de modélisation des systèmes dynamiques (d'après Jutla, 2006)

Un modèle se construit donc selon une série d'étape et grâce à une démarche itérative permettant d'affiner progressivement les résultats. L'approche permet également de multiplier la façon de concevoir un système à travers la construction de différents scénarios.

3.3. État des travaux de modélisation hydrologique des tourbières à travers quelques exemples

De nombreuses études se sont intéressées à la modélisation hydrologique des tourbières. Holden (2006) déplore le fait que l'essentiel des études de modélisation hydrologique des tourbières ne se soit fondé que sur des modèles de type boîte noire. Cela dit, Duranel (2016) met en avant un certain nombre de modèles de type boîte blanche, c'est-à-dire distribués. Nous présentons ici, à titre d'exemple, quelques travaux ainsi que leurs conclusions, lesquelles peuvent constituer des perspectives intéressantes pour notre étude.

Bradley (1996) a réalisé un modèle en trois dimensions qui simule les variations des hauteurs de nappes dans un aquifère tourbeux représenté par trois couches aux propriétés hydrodynamiques distinctes. L'étude démontre l'importance de la prise en compte de la variabilité des caractéristiques hydrauliques en fonction de la profondeur dans les zones humides. Il montre également que les variations du niveau de la nappe dépendent de sa hauteur préalable et du taux d'humidité du sol. Le modèle de Van Loon et al. (2009) permet d'établir un lien entre les types d'écoulements qui ont lieu dans une tourbière de référence et la végétation et démontre l'intérêt des écoulements hypodermiques pour la préservation de la biodiversité floristique. En effet, les écoulements hypodermiques permettent le transport et la diffusion des minéraux apportés par les eaux souterraines. Les auteurs soulignent l'impact négatif du drainage sur ce mécanisme. Lewis et al. (2012) ont modélisé l'impact du drainage sur les variations des hauteurs de nappes. Le modèle élaboré permet de constater que la conductivité hydraulique plus faible en bordure de la tourbière étudiée induit un rehaussement de la nappe en son centre et montre que le creusement de fossés de drainage annule cet effet. Enfin, Dimitrov et al. (2014) se sont intéressés aux zones humides en tant qu'écotones, c'est-à-dire espaces de transition entre la terre et l'eau. Le modèle produit montre le lien hydrologique entre la zone humide étudiée et son bassin versant. Les variations des niveaux de nappe sont ainsi liées à des apports de surfaces ou latéraux dont la provenance est au-delà des limites de la zone humide. Cela démontre la nécessité de comprendre un système hydrologique dans sa relation avec l'environnement extérieur duquel il reçoit des flux.

L'approche de modélisation des systèmes dynamiques est également utilisée en hydrologie. Elle est généralement appréciée dans le cadre d'études sur la gestion de la ressource en eau. En effet l'ouverture interdisciplinaire qui caractérise cette approche permet la création de modèles qui couplent les problématiques sociétales, économiques et hydrologiques. Les travaux de Mirchi (2013) en sont un bon exemple. Mais cette approche peut également être utilisée pour des problématiques hydrologiques plus spécifiques. Elshorbagy et al. (2007) ont ainsi réalisé un modèle de type conceptuel visant à évaluer la performance hydrologique des bassins versants reconstruits (suite à l'exploitation minière). Ce modèle présente pour nous l'intérêt de modéliser l'évolution des hauteurs d'eau dans un réservoir constitué de tourbe à la faveur des flux entrants et sortants qui l'affectent.

4. Conclusion : L'approche des modèles réservoirs retenue pour la quantification des débits de soutien d'étiage

Les zones humides sont des milieux fragiles faisant l'objet d'une protection à différentes échelles (nationale, européenne, ou internationale). L'aspect hydrologique est fondamental pour ces milieux qui se caractérisent par la présence d'eau permanente ou temporaire. Par ailleurs, l'hydrologie conditionne d'autres aspects cruciaux, tels que l'écologie, en induisant la présence d'une flore spécifique et rare au caractère hygrophile, et la pédologie, en conférant aux sols leur propriété hydromorphe. Les zones humides sont donc classifiées d'après des typologies basées sur ces aspects, que ce soit CORINE-Biotopes pour l'écologie, ou la typologie légale de l'AFES pour la pédologie. Les zones humides sont néanmoins au cœur d'enjeux de conservation majeurs de par les fonctions qu'elles assument. Ainsi, diverses typologies liées à leur fonctionnalité existent. Acreman et Miller (2006) proposent par exemple une classification qui conjugue la topographie et les mécanismes de transfert des eaux. Les fonctions assumées par les zones humides ont de plus une valeur socio-économique, elles sont alors traduites en services écosystémiques, notion qui renvoie aux bénéfices que l'humain peut tirer de ces fonctions. Les zones humides de tête de bassin versant apparaissent comme particulièrement intéressantes à cet égard car elles occupent une position stratégique. En effet, leur influence est généralement déterminante sur la quantité et la qualité des eaux à l'aval. Nos travaux s'intéressent plus particulièrement aux tourbières, puisqu'il s'agit des principaux milieux représentant les zones humides de tête de bassin versant.

Ces milieux doivent leur apparition et leur fonctionnement à un bilan hydrologique équilibré ou légèrement positif. L'hydrologie ressort encore une fois comme un facteur prépondérant. Un consensus scientifique se fait donc autour des approches typologiques fondées sur la genèse de ces milieux mise en lien avec leur source d'approvisionnement en eau dominante. Il est néanmoins nécessaire de garder à l'esprit les trois autres facteurs mis en avant plus haut. Cela se justifie pour le facteur écologique, par le fait que la végétation est l'expression du type d'alimentation hydrique. Par exemple, les tourbières ombrotrophes voient s'épanouir en leur sein des espèces de plantes carnivores telles que la drosera. Les pluies, pauvres en minéraux, constituant la source d'approvisionnement dominante de ce type de tourbière, la végétation s'adapte à l'oligotrophie du milieu. La pédologie, c'est-à-dire les caractéristiques de la tourbe, ou plutôt des histosols, constituant le milieu est également d'une grande importance puisqu'elle prête aux tourbières une hydrodynamique spécifique dont dépend leur fonctions, notamment celles de stockage et de restitution.

Les fonctions des zones humides conditionnent les services écosystémiques que ces milieux rendent à l'humain et à la nature. La valeur socio-économique de ces services les rend particulièrement intéressants, ils ont ainsi pu faire l'objet d'évaluations économiques quantitatives (par exemple, combien cela coûterait-il de remplacer un service écosystémique assumé par une zone humide ?). Les zones humides sont généralement assimilées dans leur fonctionnement à des « éponges ». Ainsi, en période de précipitation, elles stockent l'eau, rendant à l'homme un service d'écêtement des crues. Puis suite à ces précipitations, les eaux stockées sont restituées progressivement et de manière déphasée aux cours d'eau, les zones humides rendent alors à l'humain le service de soutien d'étiage. Ce sont donc les

fonctions de stockage et de restitution qui induisent le service de soutien d'étiage. Cette notion est empruntée à l'hydraulique et renvoie à la gestion quantitative de la ressource en eau (les lâchers de barrage sont par exemple des mesures de soutien d'étiage). Néanmoins la littérature scientifique tend aujourd'hui à nuancer ce rôle. La présente étude vise donc à le préciser à travers l'étude d'une zone humide de tête de bassin versant servant de référence. Quantifier ce soutien d'étiage nécessite de maîtriser le bilan hydrologique de la tourbière étudiée. Généralement ce bilan s'exprime de la manière suivante : $(P + Q_{eSo} + Q_{eSu}) - (ET + Q_{sSo} + Q_{sSu}) = \Delta R$

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

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

Partie III - Conception d'un modèle réservoir représentant l'hydrologie de la tourbière du Col du Luitel afin d'évaluer les débits de soutien d'étiage

La phase 1 du projet ZABR a permis de passer en revue une série de sites pressentis pour mener des recherches plus approfondies en phase 2. Les sites du Luitel (Isère) et de Frasne (Doubs) ont ainsi été retenus. Nos travaux ciblent la tourbière du Col du Luitel qui est plus adaptée pour une première approche de modélisation dans le cadre de ce projet que le complexe de tourbières de Frasne, plus étendu et moins évident à appréhender. Les données hydrologiques et météorologiques recueillies par l'équipement de mesure du site ont été traitées et utilisées afin de produire un modèle de type réservoir traduisant le fonctionnement hydrologique de la tourbière et de son bassin versant à l'aide de Vensim. Le logiciel ArcGis a également été utilisé pour définir la géométrie de certaines aires de travail, pour calculer des bassins ou sous-bassins versants ou encore pour réaliser la carte piézométrique de la tourbière. Nous avons ainsi abouti à un modèle représentant 3 cycles hydrologiques qui permet de calculer les débits de soutien d'étiage sur cette période.

1. Présentation de la tourbière du Col du Luitel et de son environnement

1.1. Situation de la tourbière et de son bassin versant

Notre site d'étude fait partie de la Réserve Naturelle du Luitel, située sur la commune de Séchilienne, à 25 km au Sud-Est de l'agglomération grenobloise dans le département de l'Isère. La réserve borde une route départementale qui mène à la station de ski de Chamrousse située plus au Nord-Est. Les cartes ci-contre indiquent sa localisation et son emprise au sol qui est de 17 hectares.

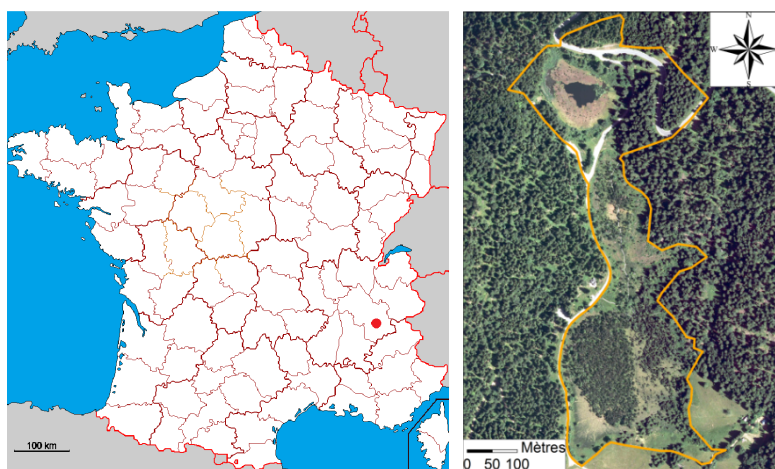


Figure 11 : Localisation et emprise de la RN du Luitel

La réserve se compose de deux ensembles tourbeux, au Nord le Lac Luitel, et au Sud la tourbière du Col du Luitel. Ces deux ensembles ont un fonctionnement hydrologique indépendant, de plus ils ne se situent pas sur le même bassin versant (voir figure 11 ci-dessous). Notre étude ne s'intéresse qu'à la tourbière du Col du Luitel qui s'étend sur une surface de 10 hectares et qui fait partie d'un bassin versant de 555 hectares :

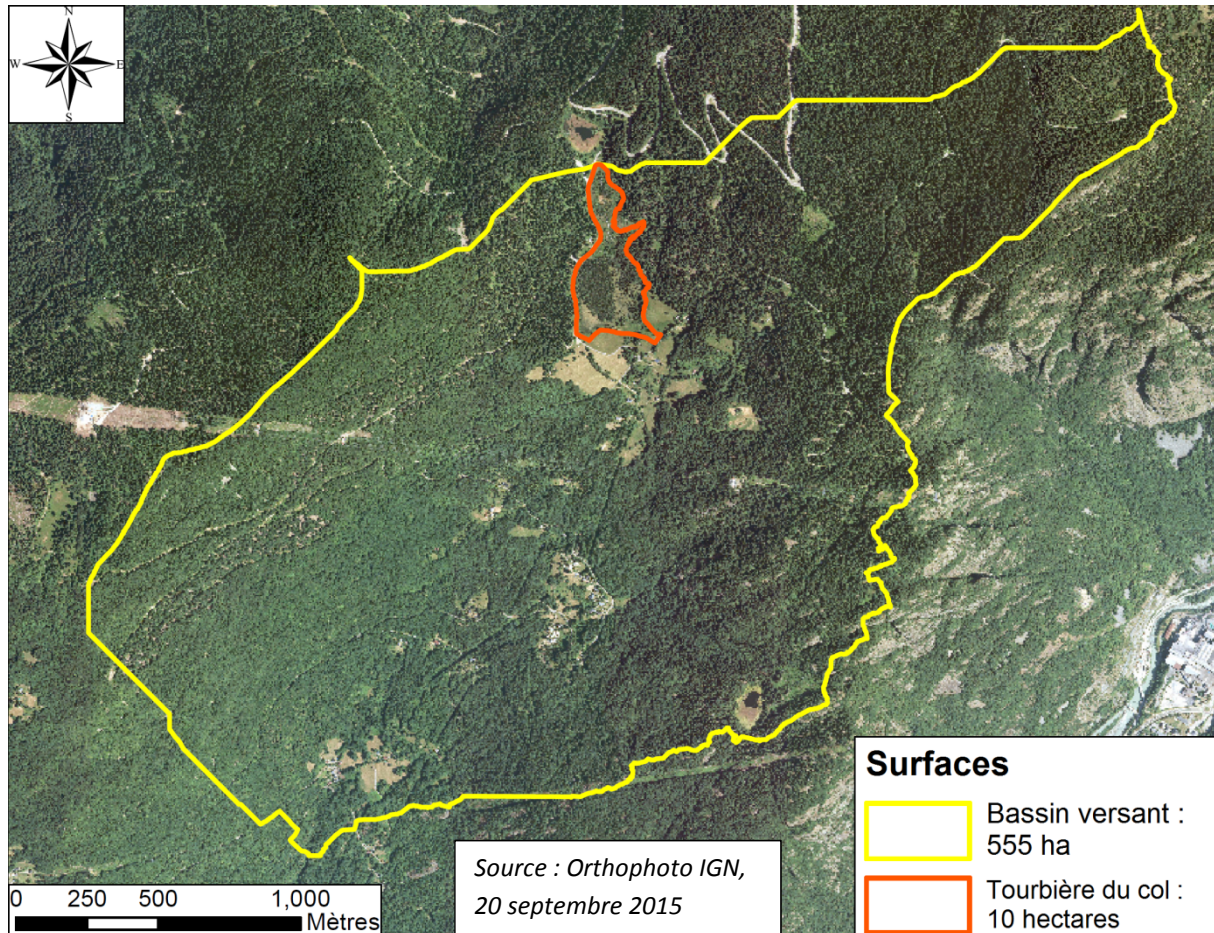


Figure 12 : Emprise au sol de la tourbière du Col du Luitel et de son bassin versant

Cette carte nous permet également de visualiser la position en tête de bassin versant de la tourbière. Enfin précisons que le versant qui la borde à l'Ouest est celui du Pic de l'Oeilly, tandis qu'à l'Est s'étend la forêt de Séchilienne et le versant de Fontfroide.

1.2. Géologie : un massif de roches métamorphiques failé et recouvert par une moraine glaciaire

La tourbière du Col du Luitel est au cœur de la chaîne de Belledonne, massif cristallin externe des Alpes. Cette chaîne est parcourue par un réseau de failles longues de plusieurs kilomètres. La principale de ces failles passe à côté du Lac Luitel, il s'agit de « l'accident médian de Belledonne ». Cet accident forme une cassure longitudinale qui sépare les

rameaux externe, sur le versant Ouest, et interne, sur le versant Est.²⁰ Cette limite est figurée en pointillée sur la carte géologique qui suit, le contour rouge représente la réserve :

Le versant Ouest (rameau externe) constitue un ensemble monotone au relief peu élevé. Il est essentiellement formé de micaschistes. Les micaschistes sont des roches métamorphiques cristallophylliennes surtout caractérisées par leurs cristaux de micas. Ces roches, feuilletées et peu cohérentes, s'érodent facilement.

Le versant Est (rameau interne) constitue l'essentiel du massif. Sa composition est plus variée, elle comprend des gneiss, des amphibolites et des gabbros. Les gneiss sont également des roches métamorphiques cristallophylliennes mais très cohérentes et donc résistantes à l'érosion. Les amphibolites sont aussi des roches métamorphiques. Enfin les gabbros sont des roches intrusives qui se sont constituées par la cristallisation du magma.



Figure 13 : Géologie du Luitel (Barféty et al., 1972)

Les roches que nous venons de décrire sont recouvertes d'une moraine formée par le glacier Würmien de la Romanche. La moraine désigne un amas de débris rocheux véhiculés par un glacier. Quant aux alluvions modernes, ils désignent ici la tourbière, la tourbe étant considérée d'un point de vue géologique comme un dépôt sédimentaire carboné.

1.3. Géomorphologie du socle : deux cuvettes séparées par une remontée de substrat

La géomorphologie de la tourbière est connue grâce aux campagnes géophysiques menées par Stéphane Garambois en 2006²¹. La géophysique a été réalisée à l'aide de la technique du Ground Penetrating Radar (GPR) qui utilise la réfraction des ondes électromagnétiques à haute fréquence dans le sol (Garambois et Cloarec, 2006). Cet outil a été retenu car il peut être mis en œuvre de façon simple et rapide et donne de bons résultats (Desplanques et Garambois, 2010). Des antennes de 50 MHz et 100 MHz ont ainsi été déplacées sur 13 transects. L'objectif de ces campagnes était de déterminer la profondeur du socle, en

²⁰ Ce réseau de failles a été représenté par Sarrot-Reynaud (1972), voir annexe C1

²¹ La carte des profils d'acquisition géoradar ainsi que les différents profils issus de cette campagne sont consultables en annexe C2

d'autres termes, de définir l'interface entre la tourbière et le substrat rocheux sur lequel elle repose²².

Les résultats montrent que l'assise de la tourbière du Col du Luitel est composée de deux cuvettes séparées par une remontée de substrat. Une interpolation de ces résultats a permis de modéliser le socle minéral. La carte ci-contre retranscrit les profondeurs du socle qui ont été interpolées.

La partie la plus au Nord est appelée « œil de la tourbière » car il s'agit de la zone la plus profonde, la roche mère se situant à 11 mètres sous la tourbe. C'est ce secteur que la turfigenèse a refermé en dernier.

La partie Sud se compose de la cuvette à proprement parler, qui avoisine les 8 mètres de profondeur, et d'une remontée de socle qui forme un plateau à environ 4 mètres de profondeur et sur lequel se situe une pinède.

Cette interpolation permet de plus d'évaluer le volume de tourbe qui est ainsi estimé à 325 000 m³ (Ravatin, 2017).

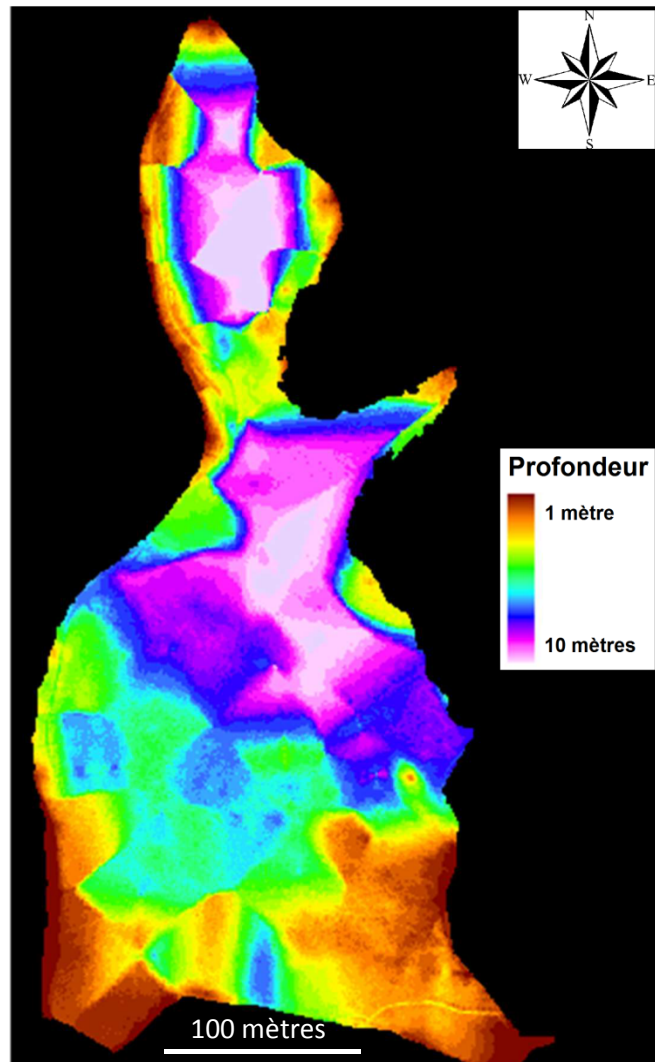


Figure 14 : Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel (Ravatin, 2017)

1.4. Pédologie : tourbes blondes à noires, fibriques à sapriques et une couche d'argile tapissant le socle

Comme nous l'avons vu, la tourbe se classe dans la catégorie des histosols d'un point de vue pédologique. Afin de permettre l'installation des piézomètres sur la tourbière, en 2004, plusieurs prélèvements de tourbe ont été réalisés à l'aide d'une tarière pédologique. Ces prélèvements ont été décrits ce qui permet de mieux appréhender les types d'histosols composant la tourbière.

²² Une nouvelle campagne de géophysique a eu lieu au cours de ce stage avec pour objectif la caractérisation des interfaces tourbeux à un niveau plus superficiel. Les résultats sont présentés en annexe G1.

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



Tableau 10 : Caractéristiques de la tourbe selon les points de prélèvements (Hustache 2004)

Figure 15 : Points de prélèvements de tourbe

La tourbe prélevée est de plusieurs types : blonde, brune ou noire et de texture fibrique ou saprique. Notons également la présence d'argile dans les couches les plus profondes. Par ailleurs, 10 mètres de tourbe ont été prélevés en 2011 à proximité du point numéro 3²³. Elle révèle un fois de plus la présence d'argile à proximité du socle qui semble donc tapisser celui-ci.²⁴

1.5. Hydrologie : le ruisseau de Fonfroide comme exutoire principal

Les éléments constitutifs de l'hydrologie de la tourbière du Col du Luitel peuvent se résumer à trois ruisseaux (Fontfroide, la source Pezanti et le « ruisseau anonyme »), et un ensemble de fossés de drainage (deux principaux, un secondaire et plusieurs tertiaires). La carte suivante illustre le réseau hydrologique de la tourbière :

²³ Le profil de cette carotte est consultable en annexe E1.

²⁴ Une nouvelle campagne de carottage a également eu lieu, avec pour objectif de permettre une meilleure compréhension de la structuration de la tourbe. L'état de nos connaissances pédologiques est donc aujourd'hui plus développé. Les résultats de cette campagne sont présentés en annexe G2.

Le ruisseau de Fontfroide constitue le principal exutoire de la tourbière. Il la traverse d'Est et Ouest et se situe légèrement au Sud de la remontée de substrat qui sépare les deux cuvettes. Ses effets sur la nappe de la tourbière semblent être limités aux quelques mètres qui le bordent. À l'aval, peu après sa sortie de la tourbière, Fontfroide rencontre trois pertes, c'est-à-dire trois zones d'infiltration, situées dans des dépressions. Biju-Duval (2001) a montré, à l'aide de traçages colorimétriques, que la résurgence de Fontfroide se trouvait 650 m plus au Sud (il s'agit de la « source » Manquat). Ce phénomène de pertes confirme donc l'hypothèse d'une faille passant à proximité de la tourbière émise par Sarrot-Reynaud (1972).

La source Pezanti, située tout à fait au Sud semble constituer un second exutoire pour la tourbière (Hustache, 2004).

Quant au ruisseau anonyme, il rejoint et approvisionne Fontfroide au centre de la tourbière, mais ne s'écoule que temporairement.

Enfin les fossés de drainage ont une influence directe sur le comportement hydrologique de la tourbière. Ils induisent une recharge rapide en période de montée des eaux, et une décharge rapide quand il cesse de pleuvoir (Manneville, 2016).

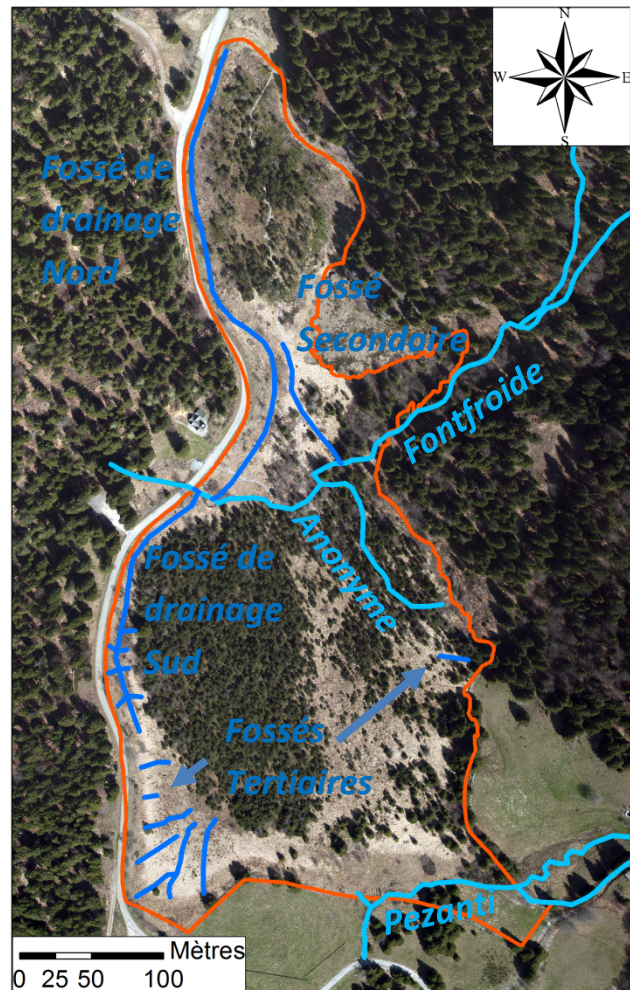


Figure 16 : Réseau hydrographique de la tourbière du Col du Luitel

1.6. Climatologie : un microclimat froid et humide

Le climat au Luitel est de type océanique sous influence montagnarde (Desplanques 2011). Les précipitations sont ainsi réparties régulièrement tout au long de l'année et les températures sont plutôt basses. La situation de la tourbière sur un col à 1260 m légèrement en creux lui confère un microclimat froid et humide. Elle est en effet bordée à l'Ouest par le Pic de l'Oeilley et à l'Est par le versant sous le plateau de l'Arselle, où s'étend la forêt de Séchilienne. Ce relief ne permet qu'un faible ensoleillement d'autant qu'il induit le stationnement des nuages et du brouillard. Les étés sont donc plutôt frais et même marqués par la présence du brouillard. Enfin, la tourbière est enneigée de façon abondante et continue de la mi-décembre jusqu'à avril.

Ci-contre, le diagramme ombrothermique permet de se familiariser avec le climat du Luitel. Pour la période 2007-2016, la température moyenne est de 5,68°C et la moyenne des précipitations annuelles est de 1233 mm, ce qui correspond assez bien aux caractéristiques d'un climat alpin, frais et humide.

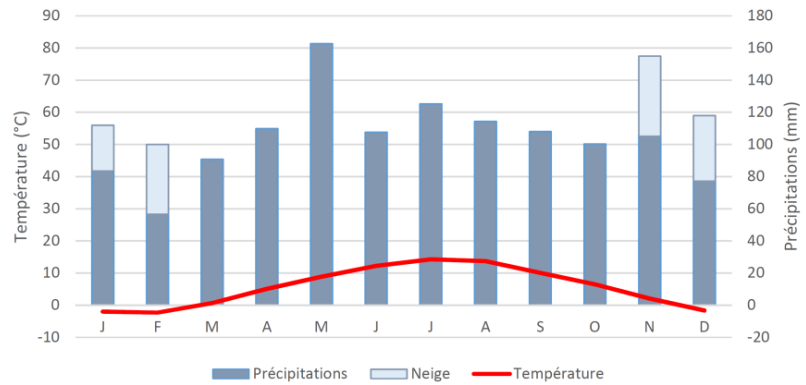
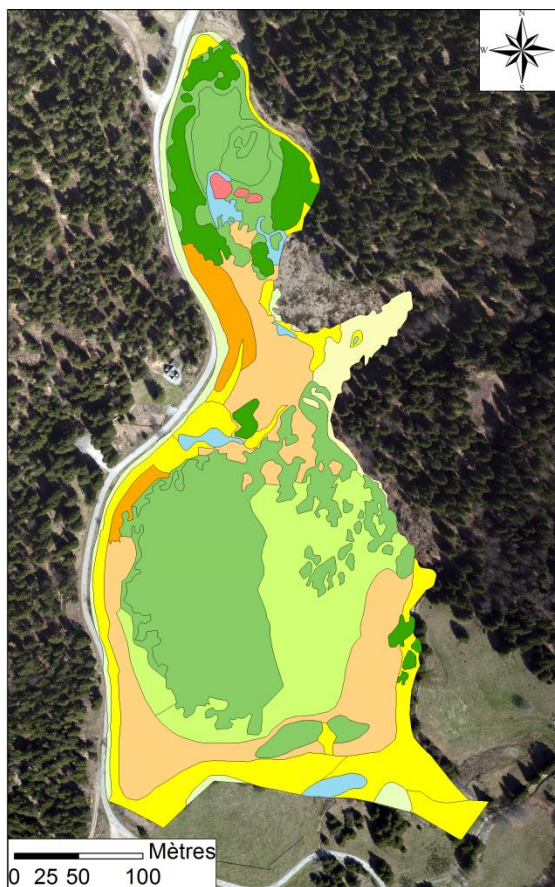


Figure 17 : Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 - 2016 (Ravatin, 2017)

1.7. Habitat : grandes unités de forêts tourbeuses de pins à crochets et sphaignes caractéristiques des milieux acides

L'habitat de la tourbière du Col du Luitel a été cartographié à l'aide de la typologie CORINE-Biotopes. Les codes correspondant à chaque unité d'habitat sont indiqués dans la légende. Cela dit, la dénomination de la légende diffère de celle de la typologie car elle est beaucoup plus spécifique et s'adapte ainsi à notre échelle de travail qui est relativement fine.



Habitat de la tourbière du Col du Luitel :

- 51.15 - Chenal à laïche à ampoule
- 31.87 - Clairières forestières à épilobe à feuilles étroites et framboisier
- 51.1 - Dépression à Scheuchzérie des marais et laïche des bourbiers
- 44.A4 - Forêt tourbeuse d'écépicas colonisant la pinède
- 44.A1 - Forêt tourbeuse de bouleaux pubescents
- 44.A3 - Forêt tourbeuse de pins à crochets
- 51.2 - Groupement à canche flexueuse
- 37.2 - Jonçaille
- 51.2 - Prairie à molinie bleue
- 51.16 - Prébois de pins à crochets

Figure 18 : Habitats naturels de la tourbière du col

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

La tourbière du Col du Luitel comprend également plusieurs espèces protégées, trois d'entre elles font l'objet d'une protection nationale : la Laïche des bourbiers (*Carex limosa*), la Rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*) et la Scheuchzérie des marais (*Scheuchzeria palustris*) (Desplanques 2011). Ci-contre, nous pouvons voir des droseras qui s'épanouissent au milieu des sphaignes. Elles forment un tapis rouge caractéristique.



Figure 19 : *Drosera rotundifolia* au Luitel

Enfin, en ce qui concerne la faune, notons l'importance particulière que revêt le site du Luitel pour les odonates, il héberge en effet 6 espèces de la Liste Rouge France.

1.8. Typologie : une tourbière limnogène ombrotrophe bombée et partiellement minérotrophe

Maintenant que l'environnement de la tourbière a été défini, nous proposons de reprendre la démarche typologique qui s'intéresse à la formation et à la source dominante d'approvisionnement en eau pour caractériser la tourbière du Col du Luitel. Pour ce qui est de la formation, la tourbière du Col du Luitel est limnogène (du grec ancien *limnê*, « marais » et *génos*, « origine »). Cela signifie qu'elle s'est constituée par atterrissement progressif des pièces d'eau à partir de radeaux flottants. Ce processus est plurimillénaire. Il y a 20 000 ans, la région était occupée par les glaciers dits würmiens (la glaciation de Würm correspond à la dernière période de glaciation dans les Alpes au cours du Pléistocène). Ces glaciers ont façonné le relief au niveau du Luitel. Aux alentours de 10 000 av. J.-C., le réchauffement du climat fait progressivement fondre ces glaciers, les surcreusements du relief se remplissent d'eau, formant des lacs. Ces lacs sont ensuite colonisés par la végétation. Vers 4000 av. J.-C., des sphaignes se développent et forment les radeaux flottants qui progressent vers le centre du lac. La matière mal décomposée s'accumule au fond du lac et forme la tourbe. Enfin, de nos jours, la tourbière du col a atteint son stade final, elle est dite « bombée ». La tourbe a en effet continué de croître après avoir comblé (ou « fermé ») la cuvette lacustre et ainsi

provoqué l'élévation du niveau du sol. Le schéma suivant récapitule l'ensemble du processus :

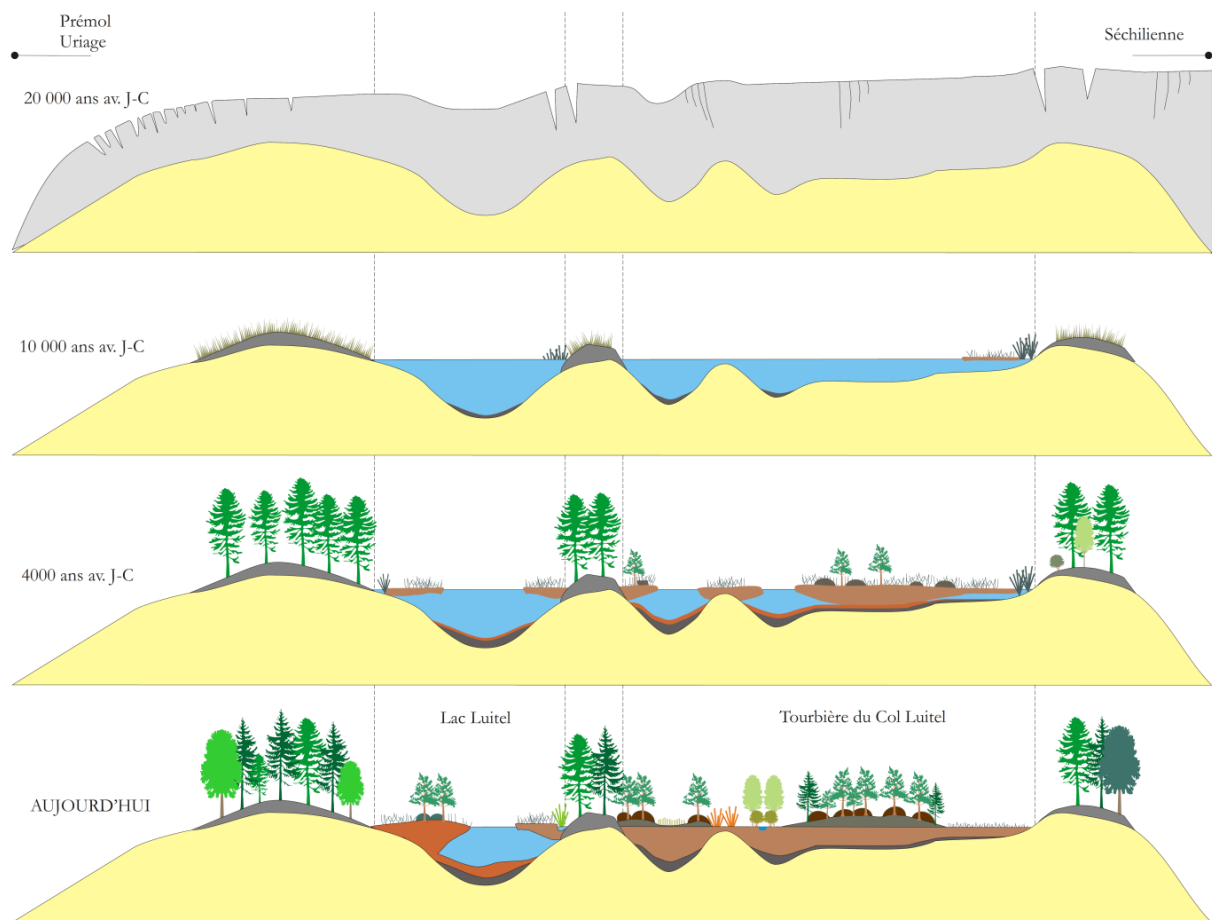


Figure 20 : Formation des tourbières du Luitel (Desplanques, 2011)

Enfin, pour ce qui est de la source dominante d'apport en eau, la tourbière est désignée comme ombrotrophe et partiellement minérotrophe. Les secteurs ombrotrophes (du grec ancien, *ombros*, « orage ») se situent au Nord et au centre de la partie Sud. Ces secteurs ne sont approvisionnés que par des eaux de pluie. Celles-ci n'étant que très peu minéralisées, les milieux qu'elles alimentent sont oligotrophes. Une végétation caractéristique telle que les sphaignes se développe ainsi dans ces types de milieux en les acidifiant. Dans les secteurs minérotrophes en revanche, l'alimentation hydrique provient des ruisseaux dont l'eau est minéralisée. Sur la tourbière du Col du Luitel, ce sont ainsi les zones environnant deux cours d'eau, Fontfroide et la source Pezanti, qui sont qualifiées de minérotrophes. La carte des conductivités électriques présentée en annexe G3 permet de distinguer les zones minérotrophes des zones ombrotrophes (les conductivités électriques les plus faibles indiquent l'ombrotrophie, et les plus élevées la minérotrophie)

1.9. Activités socio-économiques : la vocation pédagogique de la réserve

L'origine de la Réserve Naturelle remonte à 1961, date à laquelle André Malraux, alors ministre de la culture, permet le classement du Lac. Le Lac Luitel est la première réserve naturelle créée en France. Puis en 1991, la réserve est agrandie et intègre la tourbière du Col du Luitel. Son classement en réserve fait que certaines activités qui pourraient nuire à sa conservation, telles que le pâturage, n'y sont plus possibles. Par ailleurs la pêche dans le Lac est interdite depuis 1991 et la réserve naturelle est classée en réserve de chasse.

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

1.10. Risques de perturbation du fonctionnement de la tourbière : principales menaces et conséquences de l'assèchement

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

Tout d'abord la tourbière du Col du Luitel a été pendant plusieurs années soumise aux activités pastorales. Or le pastoralisme induit le piétinement, et donc un risque de tassement de la tourbe. De ce fait, certaines fonctions et les services qui leur sont liés tels que le soutien d'étiage, peuvent être altérés, étant donné que la compression du sol amoindrit les capacités de stockage des sols.

La pollution représente également une menace, à ce titre, des études géochimiques ont mis en évidence l'impact des industries grenobloises en activité au XX^e siècle au Luitel (Guédron et al., 2016). Les sédiments lacustres ont en effet enregistré des pollutions industrielles au plomb ou au mercure (Guiter et al., 2015). Ces pollutions sont aujourd'hui un legs du passé, et les strates de tourbe nous permettent de lire l'histoire des humains et des paysages. Plus récemment, le lac Luitel a été perturbé par les sels de déneigement, ce pendant plus de 30 ans. L'écosystème de Lac est normalement oligotrophe, or cette pollution l'a

progressivement enrichi en chlorure de sodium. Une dérivation a ainsi été installée en 2001 (Desplanques, 2011).

Le développement des épicéas a constitué une menace pour la population de pins à crochets qu'ils concurrençaient. Ils ont donc fait l'objet d'une coupe en 2004 (Desplanques, 2011).

La présence de fossés de drainage induit un risque d'altération pour les tourbières sur plus d'un plan. Les fossés de drainage affectent le bon fonctionnement hydrologique de la tourbière en induisant un rabattement rapide des niveaux nappes. De ce fait, ils rompent la structure diplotelmique (Landry et Rochefort, 2011). Comparons par exemple le comportement d'une nappe non drainée avec une nappe drainée à l'aide de deux piézomètres installés sur la tourbière du Col du Luitel. Le premier se situe au centre de la cuvette Nord (P3), le second est à proximité du fossé de drainage Sud (P17) et donc influencé par celui-ci. Les niveaux de nappe sont exprimés par rapport au niveau du sol :

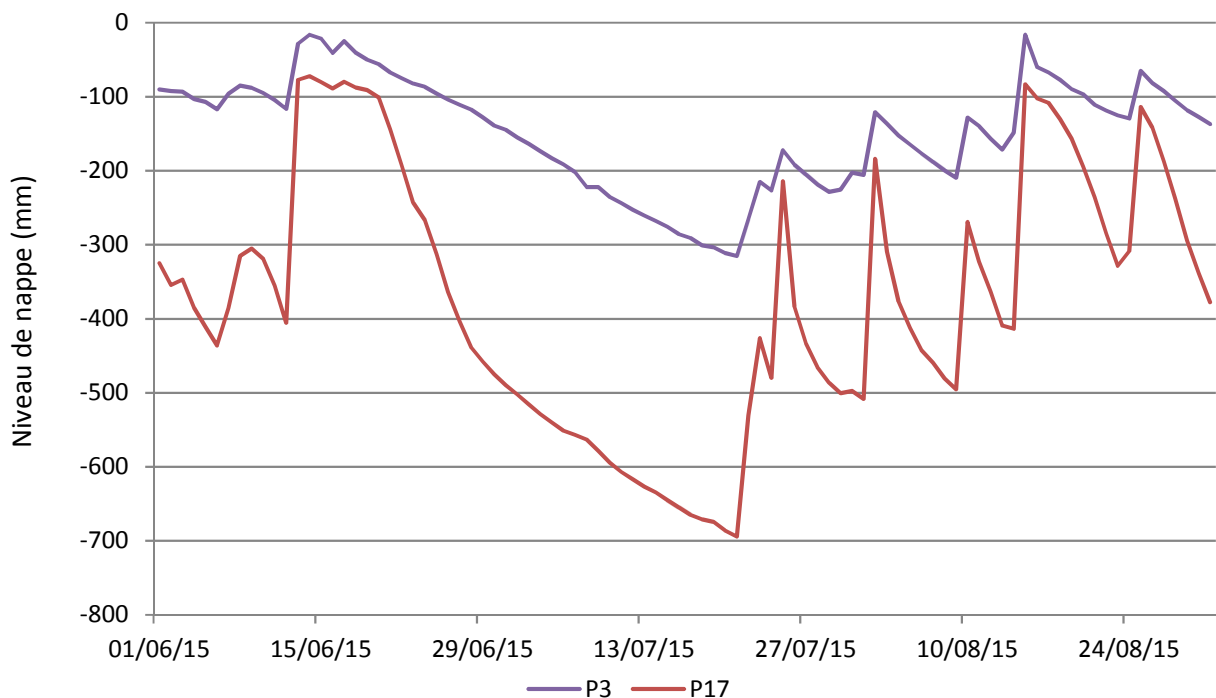


Figure 21 : Comparaison du comportement d'une nappe non drainée (P3) avec une nappe drainée (P17)

Les fossés de drainage tendent donc à vider les tourbières de leur eau, et ainsi à les assécher. Cet assèchement a pour conséquence de réduire progressivement la taille des pores, et de manière irréversible. Les fonctions des tourbières en sont ainsi altérées, leurs capacités de stockage sont par exemple amoindries, or ces capacités conditionnent les capacités de soutien d'étiage. En outre, la molinie bleue et la canche flexueuse qui peuplent le secteur des fossés de drainage constituent des formes dégradées de la végétation des tourbières hautes actives. Ces espèces sont en effet caractéristiques des zones asséchées.

Enfin, outre les fossés de drainage, un assèchement plus conséquent de la tourbière peut survenir dans les années à venir avec le réchauffement climatique. Dans son travail de mémoire, Ravatin (2017) met en avant deux tendances observées sur 10 ans : 0,9°C en plus sur la température annuelle de l'air, et 112 mm de pluies en moins sur le cumul annuel.

2. Matériel utilisé et méthode de construction du modèle

2.1. Matériel : les logiciels ArcGis et Vensim et les données hydroclimatologiques du Luitel

La mise en œuvre du modèle a été possible grâce aux logiciels ArcGis, pour l'aspect SIG, et Vensim, pour la conception du modèle. Un tel travail de modélisation requiert des données qui nous ont été fournies par la gestionnaire de la réserve, Carole Desplanques. Il s'agit de données météorologiques, piézométriques et débitométriques provenant de l'instrumentation de la tourbière, relevées et traitées par Jean-Paul Laurent (IGE).

2.1.1. Représentation et analyse géographique sous ArcGis

ArcGis est une suite de logiciels consacrée aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) et développés par la société américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute). ESRI définit le SIG comme « *un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent* ». ²⁵



Nous avons effectivement utilisé ArcGis afin de produire des représentations cartographiques telles que celles qui ont été présentées tout au long de ce rapport. Mais outre la fonction de représentation, ArcGis dispose également de puissants outils d'analyse. L'ArcToolbox comprend par exemple une série d'outils dédiés à l'hydrologie. Ces outils permettent entre autres le calcul d'un bassin versant et de ses sous-bassins versants à partir de rasters de relief. Ils permettent également de réaliser des cartes piézométriques afin de connaître les sens d'écoulement de l'eau dans un milieu à l'aide des outils d'interpolation. L'interpolation permet en effet de généraliser une information ponctuelle à une étendue spatiale complète.

2.1.2. Conception du modèle et simulation sous Vensim

Vensim est un outil de la dynamique des systèmes développé par la société américaine Ventana Systems. Nous avons utilisé pour ce travail la version DSS qui est la version professionnelle permettant la réalisation de modèles complexes. Les modèles conçus sous Vensim se composent des quatre éléments de base du langage de la dynamique des systèmes (variables d'état, variables auxiliaires, flux et canal d'information). Ces modèles sont donc de type conceptuel et peuvent également être qualifiés de modèles réservoirs puisqu'ils représentent l'évolution des niveaux des variables d'état en fonction d'un pas de temps ajustable. Vensim est donc aussi un outil de simulation. Plusieurs simulations d'un



²⁵ Voir la présentation des SIG d'après ESRI France : <https://www.esrifrance.fr/sig11.aspx>

même modèle peuvent être réalisées avec la possibilité de comparer les résultats à l'aide de graphiques. Enfin ce logiciel est également équipé d'outils d'analyse et de validation.

L'environnement de construction des modèles proposé par Vensim est adapté à la représentation des flux d'eau. Il permet de modéliser les dynamiques d'échange entre les réservoirs à l'aide d'équations simplifiées. Des modèles opérants peuvent ainsi être rapidement construits grâce à cette approche simplificatrice, d'autant plus que l'aspect physique du système n'est pas, ou pas totalement, pris en compte. Il s'agit donc d'une approche qualifiée de « boîte noire », ou « boîte grise » (Hreich, 2003)

2.1.3. Les données hydro-climatologiques du Luitel

Les données à partir desquelles nous avons réalisé notre travail ont pu être recueillies grâce à l'instrumentation de la tourbière du Col du Luitel présentée sur la carte ci-dessous.²⁶

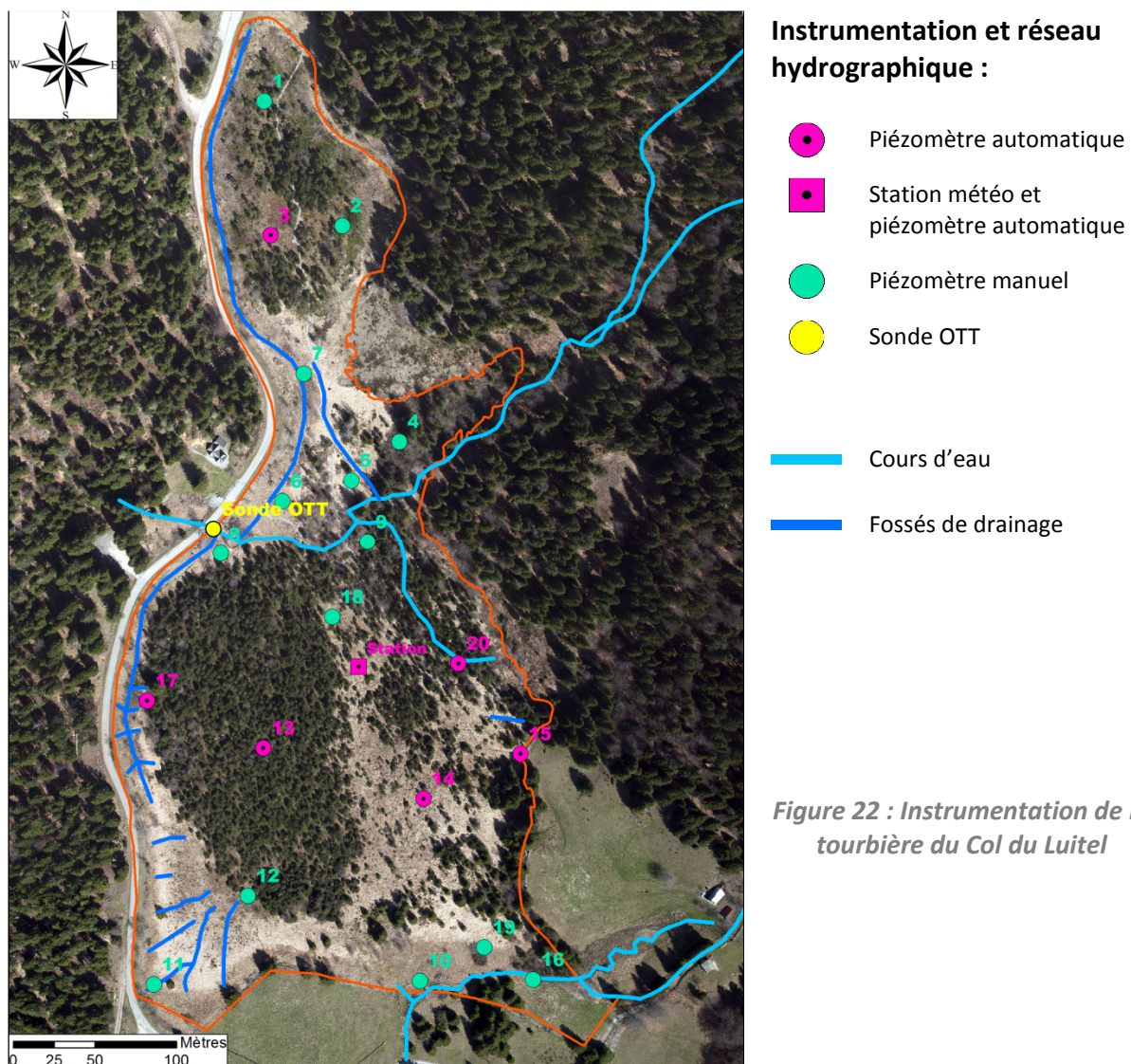


Figure 22 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel

²⁶ Nous avons complété cet équipement durant nos campagnes de terrain. Deux seuils ainsi que deux sondes ont été installés en amont et en aval de Fontfroide. Ces nouveaux équipements sont présentés en annexe G2.

La tourbière du Col du Luitel est équipée d'une station hydrométéorologique gérée par l'Institut des Géosciences de Grenoble (IGE) depuis juillet 2006. Les capteurs composant la station enregistrent toutes les 15 minutes les mesures suivantes :

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

Tableau 11 : Paramètres mesurés par la station et capteurs correspondant (Laurent, 2016)

La station comprend également une centrale d'acquisition qui calcule automatiquement l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de la formule de Penman (Cohard, 2007) :

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

Avec,

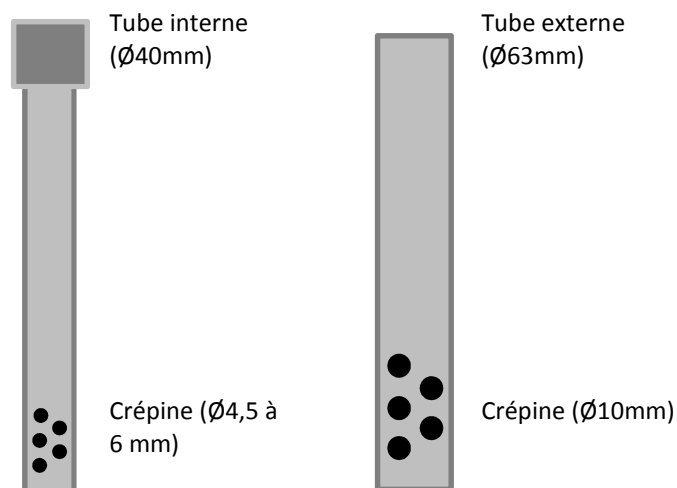
ETP : évapotranspiration potentielle (mm/h),
 Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa.°C⁻¹),
 R_n : rayonnement net (W.m⁻²),
 E_a : pouvoir évaporant de l'air (kg.s⁻¹)

L : chaleur latente de vaporisation d'eau (J.kg⁻¹),
 γ : Constante psychrométrique (kPa.°C⁻¹),
($\gamma = 66 \text{ Pa.K}^{-1}$)

Enfin ce dispositif de mesure est complété par un pluviomètre chauffant installé en 2009 au Sud du site, chez un particulier.

Un réseau piézométrique a également été installé sur la tourbière en 2004. Il est composé de 20 piézomètres de longueurs variables (de 0.8 à 4 m de long). Chaque piézomètre est constitué de deux tubes de PVC crépinés sur 30 cm tous les 1 m.²⁷

Figure 23 : Représentation schématique d'un piézomètre



Parmi ces piézomètres, 6 sont équipées de sondes mini-divers qui permettent un relevé des niveaux de nappe au pas de temps horaire. Les piézomètres 13, 14 et 20 sont équipés de ces sondes depuis juillet 2013 et les piézomètres 3, 15 et 17 depuis juin 2014. Cela dit les données acquises au niveau du piézomètre 20 n'ont pas été exploitées, car la sonde associée est tombée en panne en septembre 2016 et enregistrait des données incohérentes bien avant. Des sondes solinst ont été installées en supplément depuis octobre 2017 dans les piézomètres 13, 14, 15, 17 et 20 à titre préventif en cas de nouveau dysfonctionnement. Or les mini-divers n'accusant pas à l'heure actuelle de signes de faiblesse, nous envisageons de déplacer les sondes solinst (sauf celle du piézomètre 20 où il n'y a plus de mini-diver) dans d'autres piézomètres. Un piézomètre additionnel est également automatisé, il s'agit de celui qui a été installé avec la station hydrométéorologique. Quant aux piézomètres non équipés, leur niveau est relevé manuellement par les gardes de la réserve pendant l'été depuis 2004.

Le comportement de la nappe est donc bien connu. Le tableau ci-contre synthétise les tendances de la nappe à partir des relevés piézométriques effectués de 2004 à 2017. Nous proposons une lecture des tendances à travers le code couleur suivant :

- Vert** : battements de nappe faibles
- Orange** : battements de nappe moyens
- Rouge** : battements de nappe forts

L'influence des fossés de drainage est notable pour les piézomètres 11, 15 et 17. Cela n'est en revanche pas le cas pour le 7, mais l'amplitude est à relativiser du fait de la proximité du substrat.

Tableau 12 : Comportement de la nappe en fonction des piézomètres

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

²⁷ Les caractéristiques des piézomètres sont décrits en annexe F de ce rapport.

Enfin dernier point concernant l'équipement, un capteur de niveau OTT « orpheus mini » a été installée à l'aval du ruisseau de Fontfroide afin d'estimer son débit à la sortie de la tourbière en novembre 2009. Il permet de relever les hauteurs d'eau du ruisseau toutes les 15 minutes. Ces hauteurs d'eau peuvent être converties en débit à l'aide de la courbe de tarage suivante :

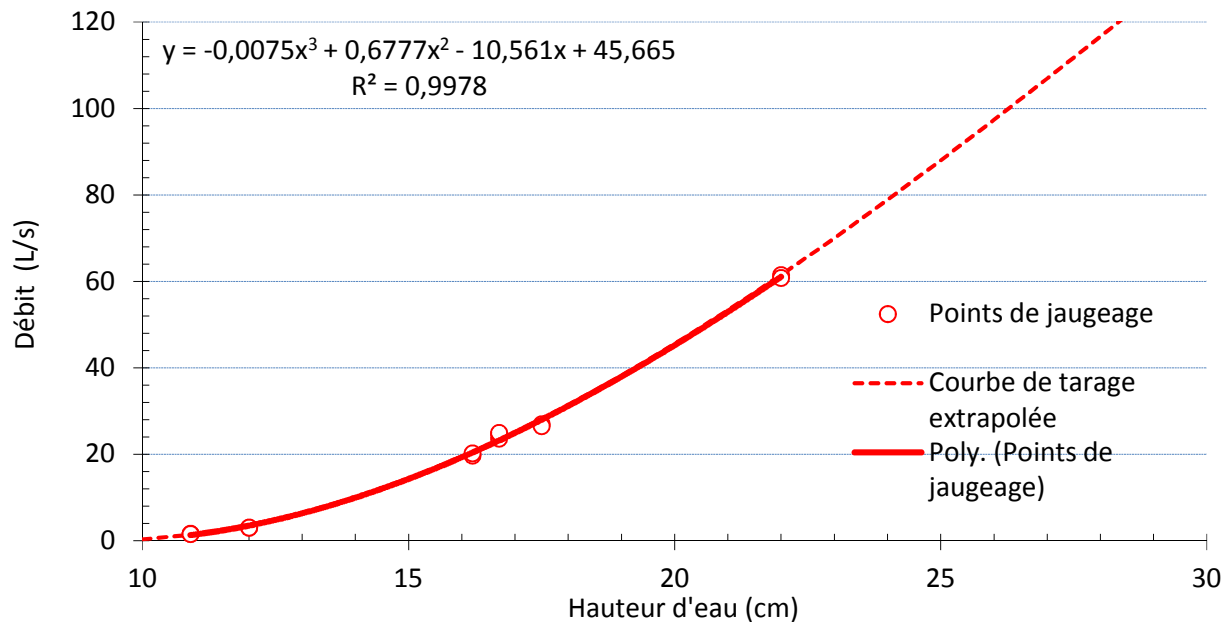


Figure 24 : Courbe de tarage du Ruisseau de Fontfroide (Laurent, 2010)

Notre étude s'est en outre appuyée sur des données additionnelles. Nous disposons ainsi de quelques données pluviométriques provenant de la station de Chamrousse, située à 1700 m d'altitude, 5 km au Nord-Est du Luitel. Ces données sont utiles lorsque le pluviomètre de la station est défectueux. Et pour pallier les lacunes dans les valeurs d'ETP, nous avons utilisé les valeurs provenant du modèle Safran-ISBA élaboré par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). Ce modèle simule, entre autres, des valeurs d'ETP interpolées sur une grille de calcul de 8 x 8 km. Jean-Paul Laurent a pu établir, dans les fichiers de données dont nous disposons, que les valeurs du modèle se corrélaient bien avec celles calculées au Luitel. Enfin, pour la partie SIG, nous disposons de bases de données géographiques qui nous ont été fournies par Carole Desplanques. Nous avons également eu recours aux données IGN, disponibles sur le site internet²⁸, notamment pour ce qui concerne le relief.

2.2. Méthode : modélisation des variations des niveaux de nappe pour quantifier les débits de soutien d'étiage

La construction du modèle s'est réalisée de manière progressive et itérative. Elle suit en cela les étapes qui ont été explicitées dans le logigramme de construction des modèles systèmes dynamiques donné en 3.1, figure 10. Ce logigramme est donc à rapprocher de la démarche

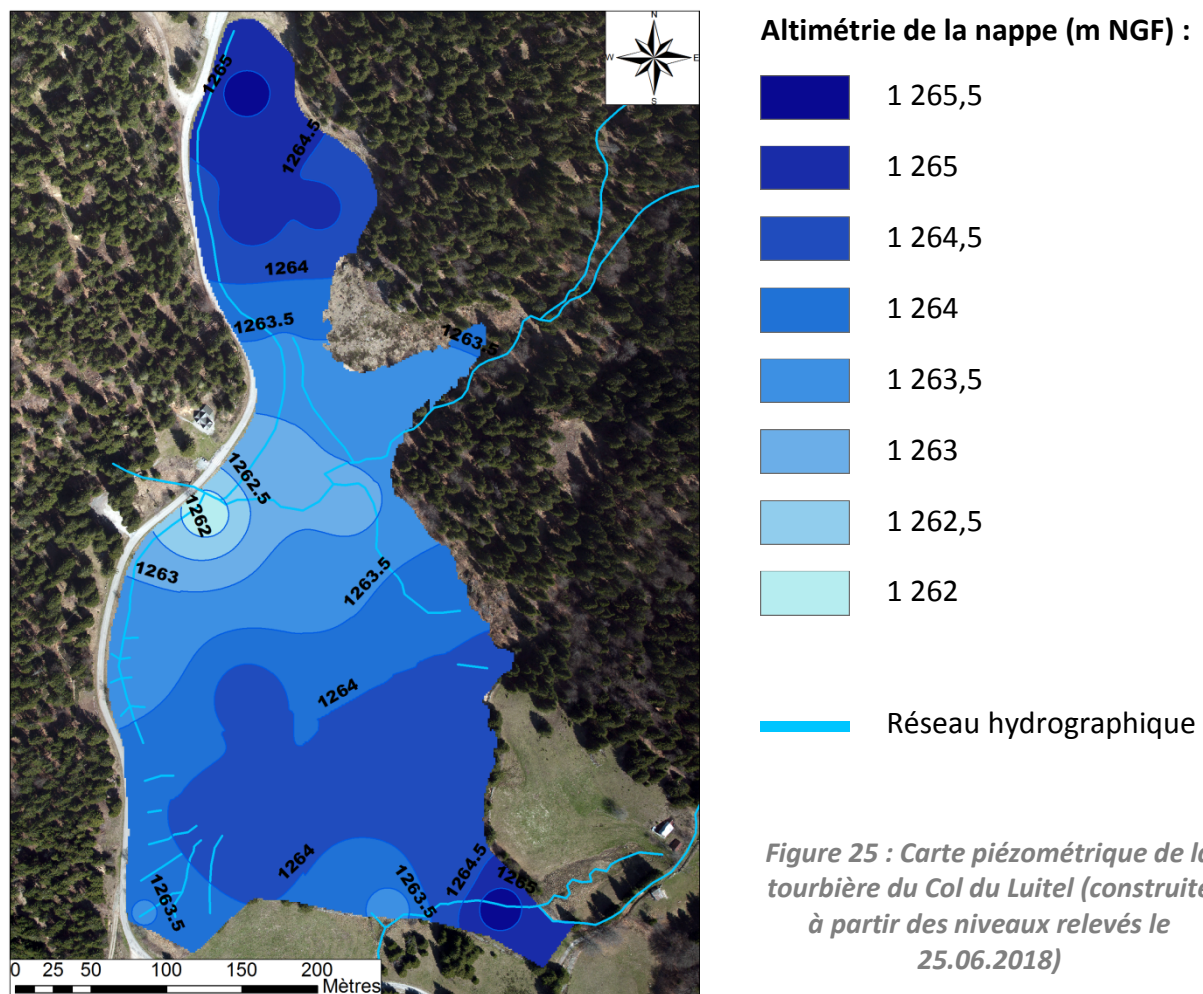
²⁸ Les données IGN peuvent être téléchargées à cette adresse : <http://professionnels.ign.fr/>

que nous présentons ci-après. Cette présentation est néanmoins construite non pas de manière à faire ressortir explicitement les différentes étapes, mais plutôt de façon à cibler certains points essentiels qui ont présidé à cette construction et qui sont dans la continuité logique des questions abordées dans notre état de l'art. La conceptualisation de notre modèle en fonction de nos objectifs est ainsi présentée, puis le bilan hydrologique établi dans notre état de l'art est repris, enfin l'implémentation progressive des flux, des variables d'état et des variables auxiliaires à partir des termes constitutifs de celui-ci est décrit.

2.2.1. Conceptualisation du modèle : trois réservoirs reliés à un exutoire

Étant donné que nous disposons d'un jeu de données piézométriques solide et à un pas de temps suffisamment resserré, nous avons utilisé Vensim pour construire un modèle qui simule les variations des niveaux de nappe. L'intérêt ayant été de pouvoir par la suite comparer la simulation avec l'observation traduite par les données piézométriques dont nous disposons. Cette comparaison a permis de juger de la justesse du modèle, c'est-à-dire de le valider. Ce n'est qu'une fois le modèle validé que nous avons utilisé les écoulements de base lents en période d'étiage pour réaliser un calcul du débit de soutien d'étiage.

La carte piézométrique permet de distinguer deux secteurs :



Cette carte montre en effet clairement que la partie Nord est reliée au ruisseau de Fontfroide, les écoulements de cette partie trouvant ce ruisseau pour exutoire. Quant à la partie Sud, il apparaît que la source Pezanti recueille une certaine proportion des écoulements, mais qu'elle est en majeure partie reliée à Fontfroide, où se dirigent l'essentiel des écoulements. En reprenant les différents flux qui ont été présentés au cours de notre état de l'art, nous pouvons conceptualiser le modèle de la façon suivante :

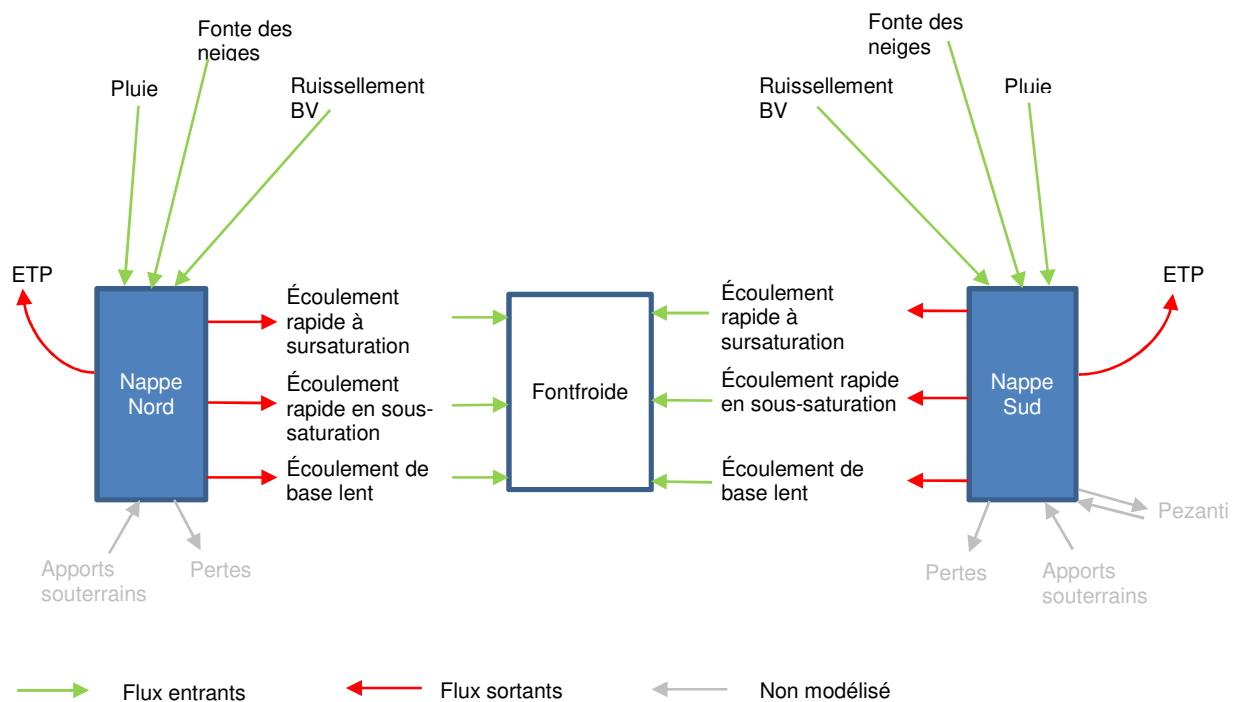


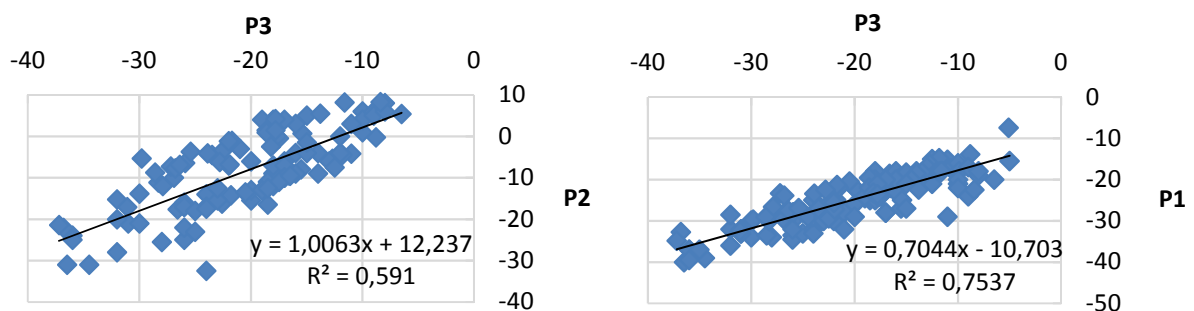
Figure 26 : Conceptualisation du modèle : flux et réservoirs

Nous obtenons donc un système composé de deux réservoirs dont nous avons modélisé les fluctuations de niveau en fonction des différents flux ici présentés. Les écoulements sortant de ces réservoirs se dirigent effectivement vers leur exutoire, Fontfroide. En l'occurrence, cet exutoire a été modélisé comme une boîte qui calcule automatiquement les débits de soutien d'étiage. Par ailleurs, la partie Sud a été divisée en deux réservoirs indépendants. En effet, dans cette partie, l'Ouest est occupé par une pinède, tandis que l'Est forme un prébois. Dans les secteurs forestiers, l'ETP a tendance à être plus élevée, car les arbres puisent d'avantage d'eau et plus profondément dans la nappe du fait de la longueur de leurs racines. Notons également que le secteur drainé par Pezanti n'a pas été modélisé car cela ne présente pas d'intérêt au vu de notre problématique. De plus, les pertes et les apports souterrains n'ont plus été pris en compte. En effet, nous avons vu au cours de notre état de l'art qu'une couche d'argile semblait tapisser le fond de la cuvette. De ce fait, nous admettons que cette couche imperméabilise le socle et prévient ainsi les apports et les pertes ou les rend négligeables.

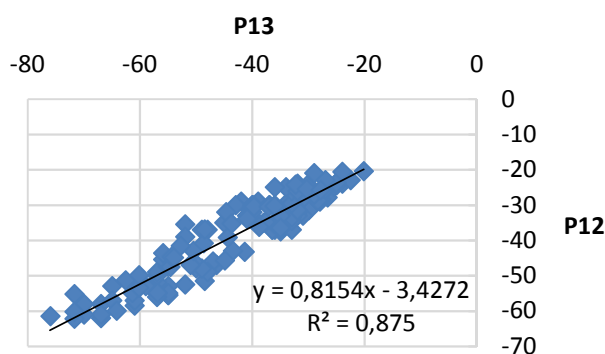
Enfin, notre approche vise à simuler le comportement de la nappe sur une surface complète, et non pas de façon ponctuelle, ce de manière à pouvoir calculer les volumes d'eau qui soutiennent l'étiage et de les convertir en débits. Il s'agit donc de retenir un piézomètre représentatif d'un secteur et de tenter de modéliser ses variations, puis, si le modèle est

validé, de l'appliquer à une surface entière. La nappe du réservoir Nord peut donc être représentée par le piézomètre 3, celle du réservoir Sud-Ouest par le piézomètre 13, et celle du réservoir Sud-Est par le piézomètre 14. Il s'agit de piézomètres équipés des sondes mini-divers dont les relevés nous permettent de travailler au pas de temps journalier. Nous ne tenons ici pas compte des piézomètres 15 et 17 car ils représentent un comportement spécifique à une nappe drainée. Les secteurs influencés par les fossés de drainage n'ont ainsi pas été intégrés à notre approche à des fins de simplification. Voyons maintenant si les 3 piézomètres retenus sont bien représentatifs de leurs secteurs en observant comment ils se corrélaient avec les autres :

- Corrélations de P3 avec P1 et P2 :



- Corrélation de P13 avec P12 :



- Corrélations de P14 avec P18 et P20 :

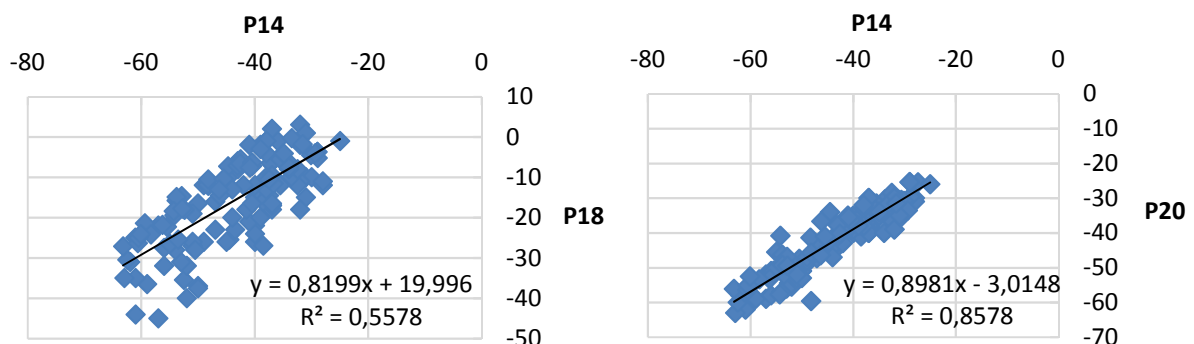


Figure 27 : Corrélation des piézomètres retenus pour la modélisation avec les autres piézomètres du même secteur

Ces corrélations ont été réalisées avec les relevés piézométriques manuels effectués sur la période 2004 - 2016. Ces nuages de point montrent que les piézomètres retenus se corrèlent bien avec ceux du même secteur, nous pouvons ainsi en déduire qu'ils sont représentatifs de leur secteur. Enfin les données pour ces trois piézomètres représentatifs étant disponibles du 7 août 2014 au 26 octobre 2017, notre modèle a été réalisé sur la même période, qui est de 3 ans et 2 mois.

2.2.2. Construction du modèle à partir des termes du bilan hydrologique

Pour mener à bien notre démarche, il faut que le modèle retranscrive le bilan hydrologique que nous avons retenu plus haut, pour mémoire, il s'agit de :

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

Ce bilan comprend l'ensemble des flux qui influence les niveaux des réservoirs. Nous retenons ici trois réservoirs dont les variations sont exprimées en mm, car notre modèle simule des variations de hauteurs d'eau. Les flux entrants et les flux sortants sont ainsi également exprimés en mm (il est d'usage de mesurer l'ETP et la pluie en mm, considérant que le niveau d'un réservoir vide baisse ou monte d'autant de mm). Cela dit, nos réservoirs ont cela de particulier qu'ils contiennent déjà de la matière, en l'occurrence de la tourbe. Pour une quantité de pluie reçue et exprimée en mm, les hauteurs d'eau dans les réservoirs ne varient pas d'autant que la quantité reçue. Il faut tenir compte du matériau déjà présent et considérer que l'eau reçue circule par les pores de la tourbe. La proportion d'eau qui s'écoule librement et qui fait ainsi varier les niveaux piézométriques est représentée par la porosité efficace du matériau. En nous référant à notre état de l'art, nous retenons la valeur de 0.4 pour la porosité efficace (Rezanehzad et al., 2016 ; Wastiaux, 2008). Cette valeur nous permet de représenter les variations des niveaux du réservoir en tenant compte de la matière. Telle quantité d'eau reçue dans un réservoir et exprimée en mm vide a ainsi été divisée par 0.4 dans le modèle de manière à traduire les variations de niveau dans un réservoir poreux. Voyons maintenant comment nous implémentons les flux.

Nous disposons des valeurs de pluie et des valeurs d'ETP grâce à la station hydrométéorologique placée sur la tourbière du Col du Luitel. Ces données ont été enregistrées tous les quart d'heure, notre premier traitement est donc de transformer ces relevés à un pas de temps journalier, il suffit pour cela de calculer le cumul des relevés sur une journée. Les capteurs de la station sont parfois malheureusement sujets à des défaillances techniques (panne d'un capteur, auget du pluviomètre bouché, etc...). Certaines valeurs peuvent ainsi être aberrantes ou même absentes. En ce qui concerne l'ETP, des défaillances ponctuelles dans la mesure d'un paramètre peuvent engendrer des erreurs dans le calcul effectué par la centrale. Ainsi nous avons, quand cela a été nécessaire, remplacé les valeurs fautives par des valeurs plausibles (c'est-à-dire des valeurs qui s'inscrivent dans la tendance décrite par les données) afin de réeffectuer le calcul manuellement. Et quand cette reconstitution des valeurs d'ETP s'est avérée impossible, nous avons utilisé les valeurs issues du modèle Safran-ISBA.

En ce qui concerne les pluies, nous n'avons manqué de données que sur une seule semaine. Nous avons remplacé ces données par celles de la station de Chamrousse. Une analyse du

comportement piézométrique par rapport aux précipitations montre que la nappe de la tourbière est très réactive, ce dont notre modèle a tenu compte. Le graphique suivant montre que la nappe répond aux précipitations le jour même :

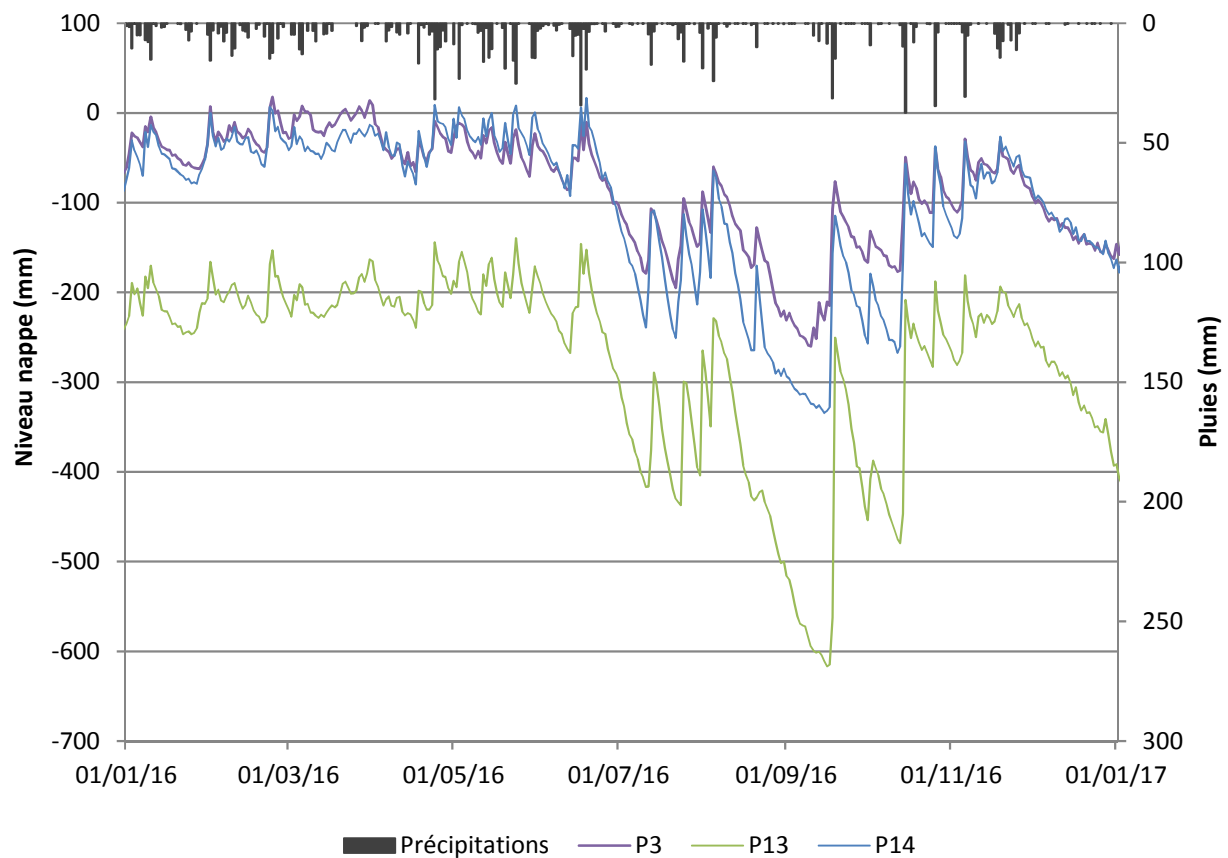


Figure 28 : Réponse de la nappe en fonction de la pluie

Le réservoir représentant le secteur Nord a ainsi été construit de la manière suivante sous Vensim. Nous reconnaissons ici les éléments de langage de la dynamique des systèmes avec les flèches noires qui symbolisent des flux, la boîte rectangulaire qui symbolise une variable d'état, les flèches bleues qui représentent le canal d'information et les variables auxiliaires qui sous Vensim n'ont pas d'encadré.

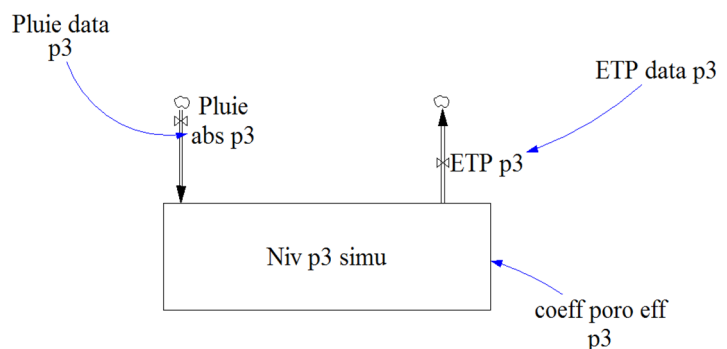


Figure 29 : Modélisation du secteur Nord - ETP et pluies

Les précipitations indiquées dans le bilan hydrologique comprennent également la neige. L'implémentation de ce flux est plus complexe. Nous remarquons sur le graphique ci-dessus

que l'essentiel des variations de nappe ont surtout lieu pendant la période estivale. En période hivernale, le niveau de nappe se maintient au plus près de la surface. Cela s'explique par le fait que les précipitations hivernales conjuguées à l'absence de sécheresse et à des valeurs d'ETP faibles maintiennent la tourbière en eau. Néanmoins il est intéressant de relever un phénomène rare qui nous apporte des informations sur le comportement de la tourbière. Pendant l'hiver 2016 - 2017, et contrairement à ce qui peut être habituellement observé, les niveaux de nappe baissent beaucoup, car cet hiver a été exceptionnellement froid et sec.

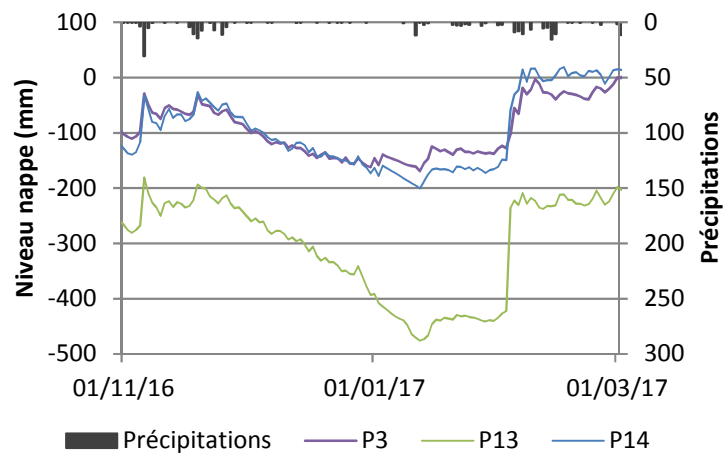


Figure 30 : Évolution des niveaux de nappe pendant une sécheresse hivernale

Il faut par ailleurs souligner que la stabilité hivernale des niveaux de nappe s'explique par le manteau neigeux qui recouvre la tourbière et qui a pour effet de rendre les remontées de nappes beaucoup moins drastiques qu'en période estivale (cela s'observe bien sur le graphique précédent). Nous considérons donc que ce manteau neigeux agit comme un réservoir dans lequel les eaux de pluie se cumulent et qui se vidange progressivement (Bouron, 2013) dans la tourbière, maintenant ainsi les niveaux d'eau de celle-ci proches de la surface. Ce réservoir s'active en fonction d'un seuil de température fixé à 3°C ²⁹, considérant que la neige peut se former lorsque les températures passent sous ce seuil. Enfin la quantité de précipitation sous forme neigeuse a été déterminée en soustrayant les valeurs de pluies à celles du pluviomètre chauffant. Sous Vensim nous obtenons ainsi la construction suivante :

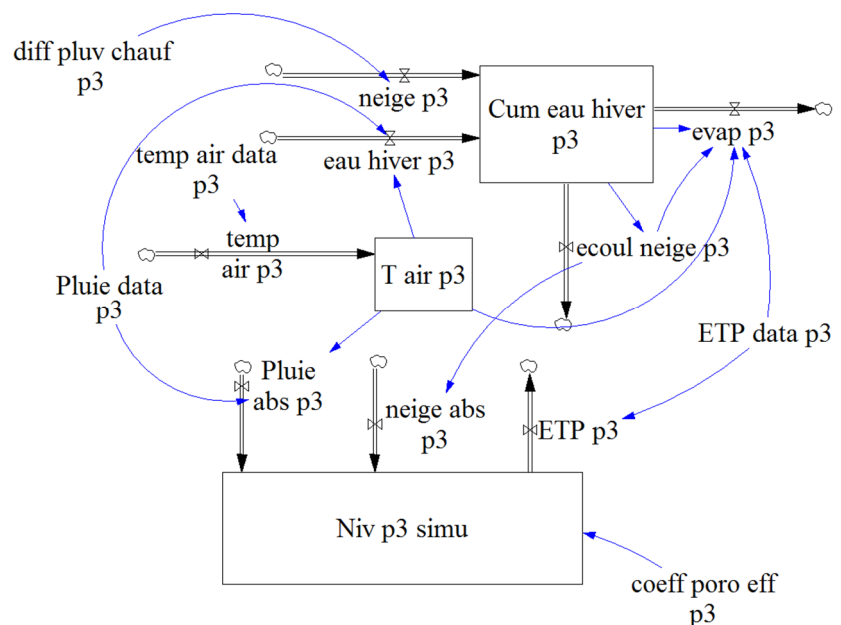


Figure 31 : Modélisation du secteur Nord - Neige

Les écoulements entrants de surface « QeSu » représentent les quantités d'eau qui ruissellent sur les pentes du bassin versant de la tourbière. Nous avons indiqué plus haut que

²⁹ Voir <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/la-neige-en-plaine>

le bassin versant de la tourbière était de 555 ha, et nous l'avons délimité. Cela dit, il nous faut maintenant connaître l'emprise des sous-bassins versant afin de comprendre comment ils alimentent certaines aires de la tourbière. Cela a pu être réalisé grâce au raster de relief disponible sur IGN Pro. À partir de ce raster, nous avons utilisé les outils relatifs à l'hydrologie disponible dans l'ArcToolbox d'ArcGis afin de calculer les sous bassin-versants. Nos résultats sont les suivants :

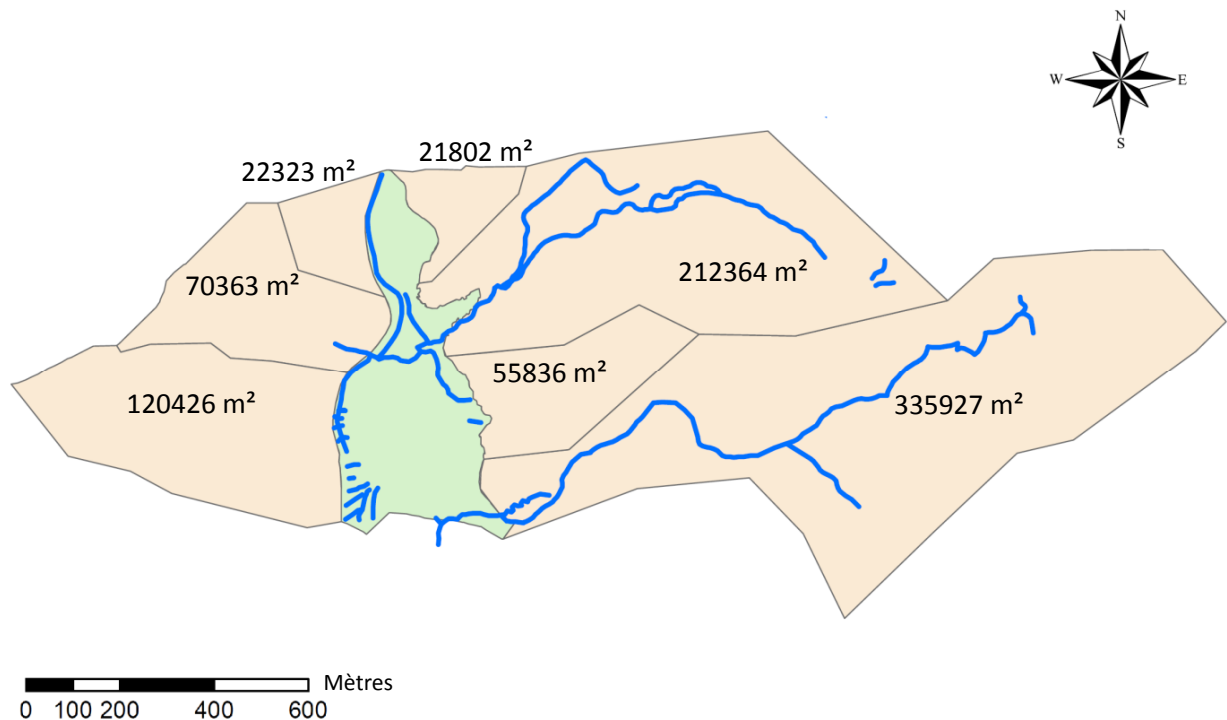


Figure 32 : La tourbière du col et les sous-bassins versants

Les bassins versants de Fontfroide et Pezanti apparaissent clairement sur cette carte. Il apparaît également que le secteur Nord pourrait être alimenté par deux sous-bassins versants. Cela dit le sous-bassin versant qui borde ce secteur à l'Ouest n'a pas été intégré au modèle car la configuration du site rend peu probable une arrivée d'eau depuis le pic de l'Oeilly vers cette partie de la tourbière³⁰. Enfin les secteurs Sud-Ouest et Sud-Est sont alimentés respectivement par un sous-bassin versant de 120426 m² et un sous-bassin versant de 55836 m². Afin d'évaluer le volume d'eau fourni par ces sous-bassins versants à la tourbière, nous multiplions les hauteurs de pluies par la surface, puis par un coefficient de ruissellement qui est de 0,1. Ce coefficient correspond à la proportion d'eau ruisselée sur un bassin versant boisé. Il provient de la norme suisse SNV 640 351 qui est fréquemment utilisée pour ce type d'étude (Musy et Higy, 2013)³¹. Nous obtenons ainsi le modèle suivant avec Vensim :

³⁰ D'après une observation de Carole Desplanques

³¹ Voir le tableau des coefficients de ruissellement dans Musy et Higy, Hydrologie - Une science de la nature, p 102.

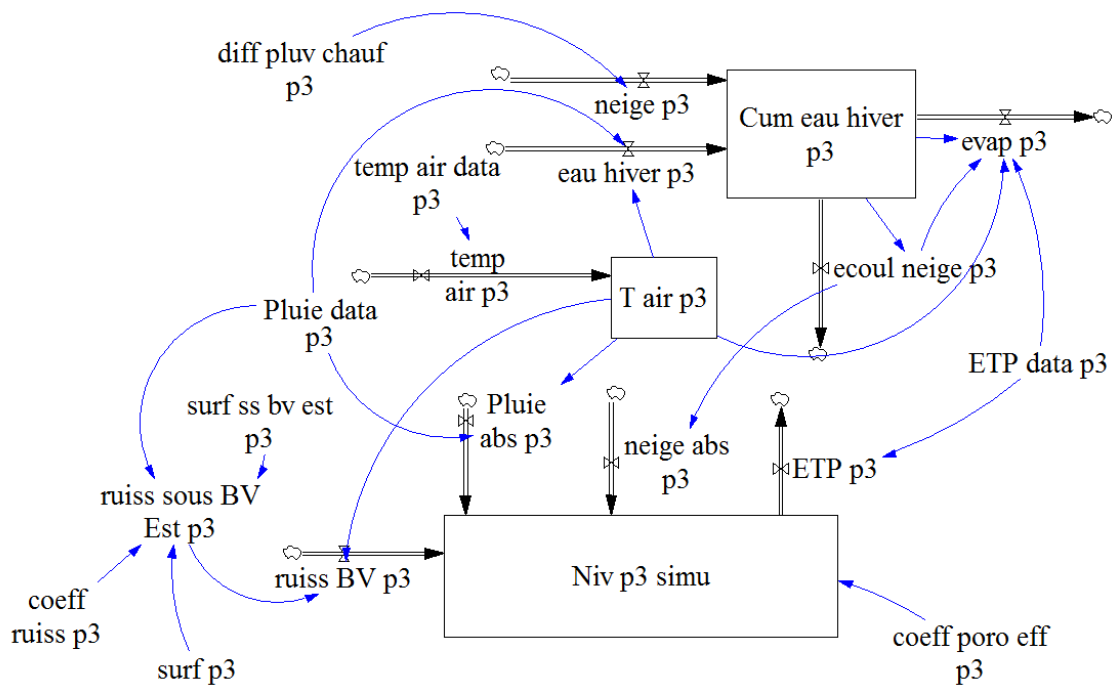


Figure 33 : Modélisation du secteur Nord - Ruissellement

Les écoulements entrants souterrains étant négligés de par la présence d'une couche d'argile imperméabilisant le fond, il nous reste à traiter des écoulements sortants. Nous ne disposons d'aucune donnée permettant de les quantifier, il nous a donc fallu utiliser une loi de tarissement afin de simuler la vidange du réservoir. Il s'agit de la loi de Boussinesq (1877) qui convient pour les réservoirs poreux et se présente de la manière suivante :

Modèle :

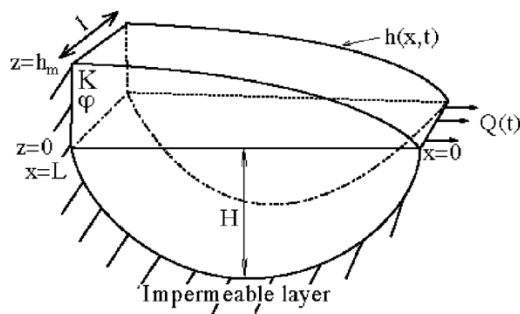


Figure 34 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002)

Formule :

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

$$Q_0 = (\pi/2)KHl(h_m/L),$$

$$\alpha = \pi^2 KH/4\phi L^2$$

Avec,

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

Dans la formule ici décrite, les unités de temps sont exprimées en secondes, et celles de distance en m. Mais cette formule est appliquée dans le modèle avec une conversion des secondes en jours et des mètres en millimètres afin de bien obtenir des variations de réservoir en millimètres par jours. La mise en œuvre de l'équation de Boussinesq oblige par ailleurs à déterminer la géométrie des surfaces d'écoulements, qui nous avons simplifiées en des surfaces rectangulaires. Nous proposons donc la discrétisation suivante :

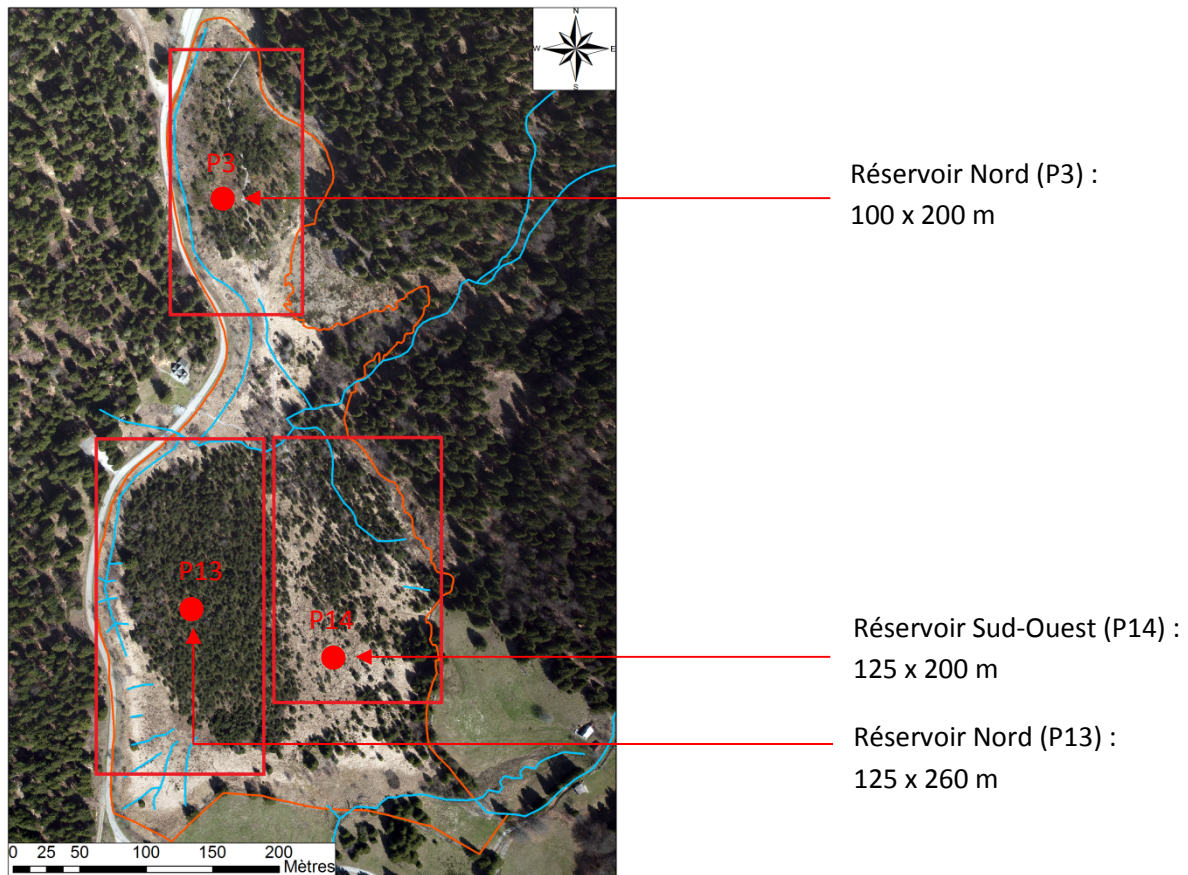


Figure 35 : Les trois surfaces de modélisation des écoulements

Au final, nous obtenons pour le secteur Nord le modèle suivant sous Vensim :

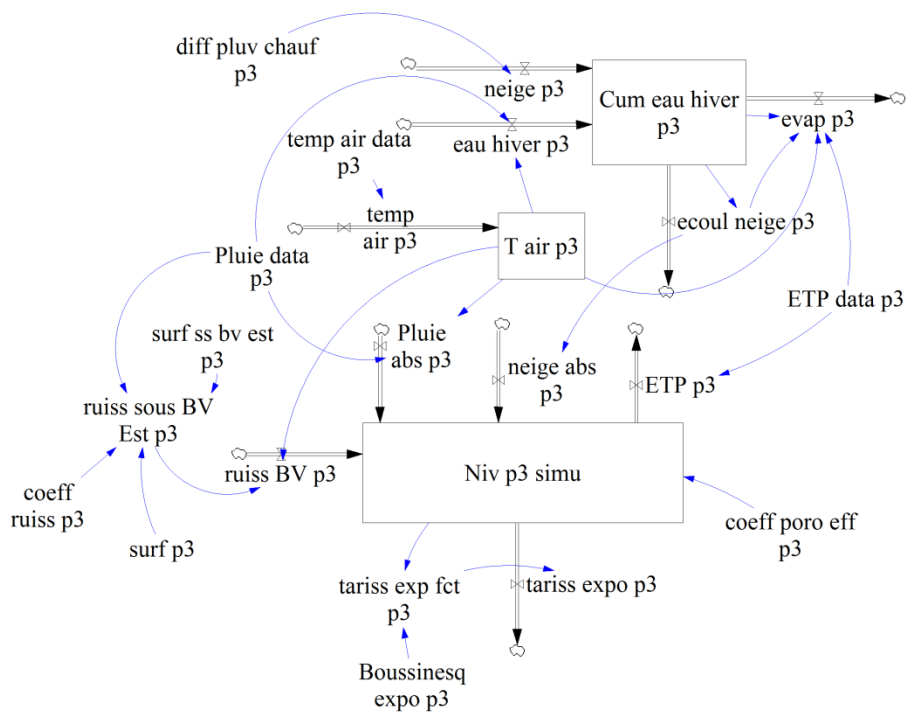


Figure 36 : Modélisation du secteur Nord - Tarissement

L'ensemble de la démarche que nous venons de décrire a ensuite été reprise pour construire les modèles représentant les secteurs Sud-Est et Sud-Ouest. Puis, la dernière étape a été de connecter ces trois ensembles à une boîte dans laquelle le débit de soutien d'étiage peut être calculé.

2.2.3. Méthode de quantification du soutien d'étiage à partir des écoulements sortant des trois réservoirs

Lors d'un épisode de crue et de décrue, la courbe de l'hydrogramme qui en résulte peut être décomposée en trois parties qui correspondent à trois types d'écoulements comme l'illustre le schéma suivant :

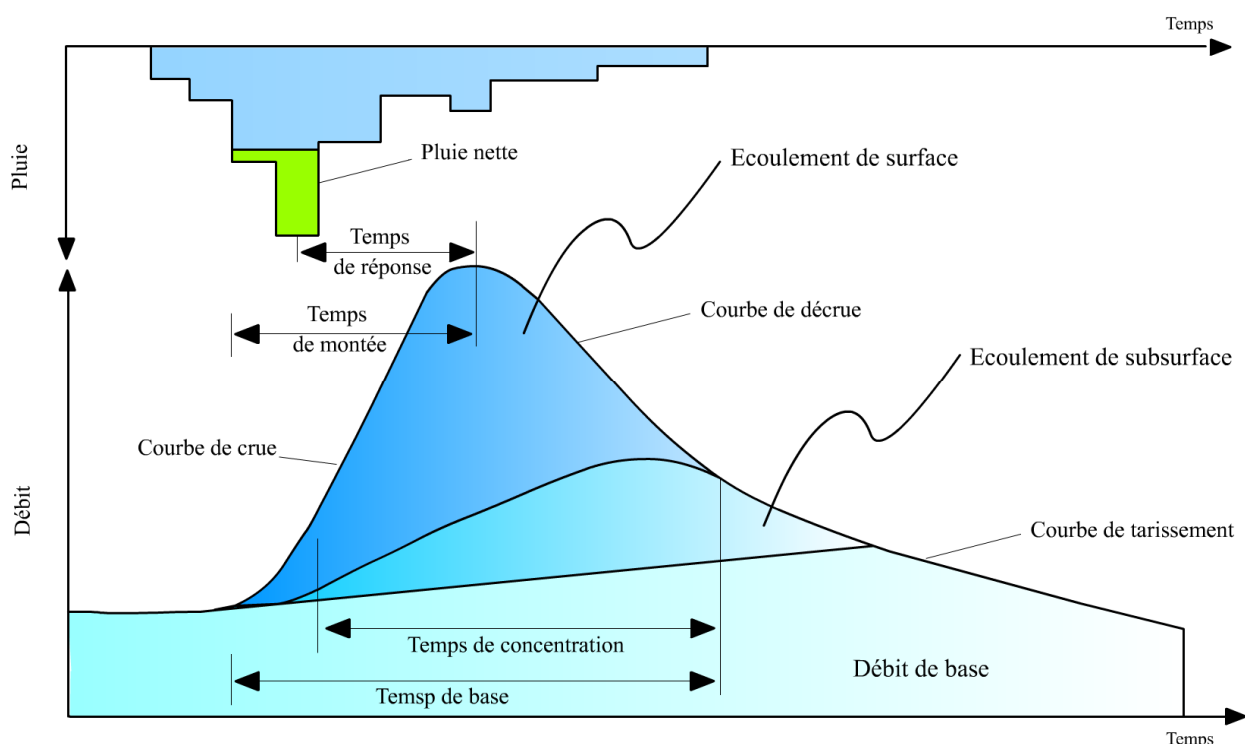


Figure 37 : Décomposition d'un hydrogramme de crue en trois phases d'écoulements (Ben Amor, 2010)

Les débits d'eau qui forment le pic de crue correspondent au ruissellement sur le bassin versant. Ce pic apparaît lorsque le sol est saturé par les eaux de pluies, les précipitations qui continuent de tomber ruissèlent alors sur la surface du sol et atteignent rapidement l'exutoire où elles se concentrent en grande quantité. Ces débits d'eau diminuent également relativement rapidement, ils constituent les écoulements de surface. Ils laissent ensuite apparaître dans l'hydrogramme les écoulements de subsurface ou hypodermiques qui correspondent aux volumes d'eau circulant dans les couches superficielles du sol. Enfin, une fois ce dernier écoulement atténué, le débit de base apparaît, il correspond aux apports de la nappe.

L'approche que nous proposons pour discerner les écoulements liés au soutien d'étiage repose sur la méthode de décomposition graphique de Barnes (1939) appliquée à l'hydrogramme de crue de Fontfroide. L'hydrogramme retenu pour appliquer cette méthode correspond à l'été 2015 car il comporte un long épisode de sécheresse qui permet de bien visualiser la décrue :

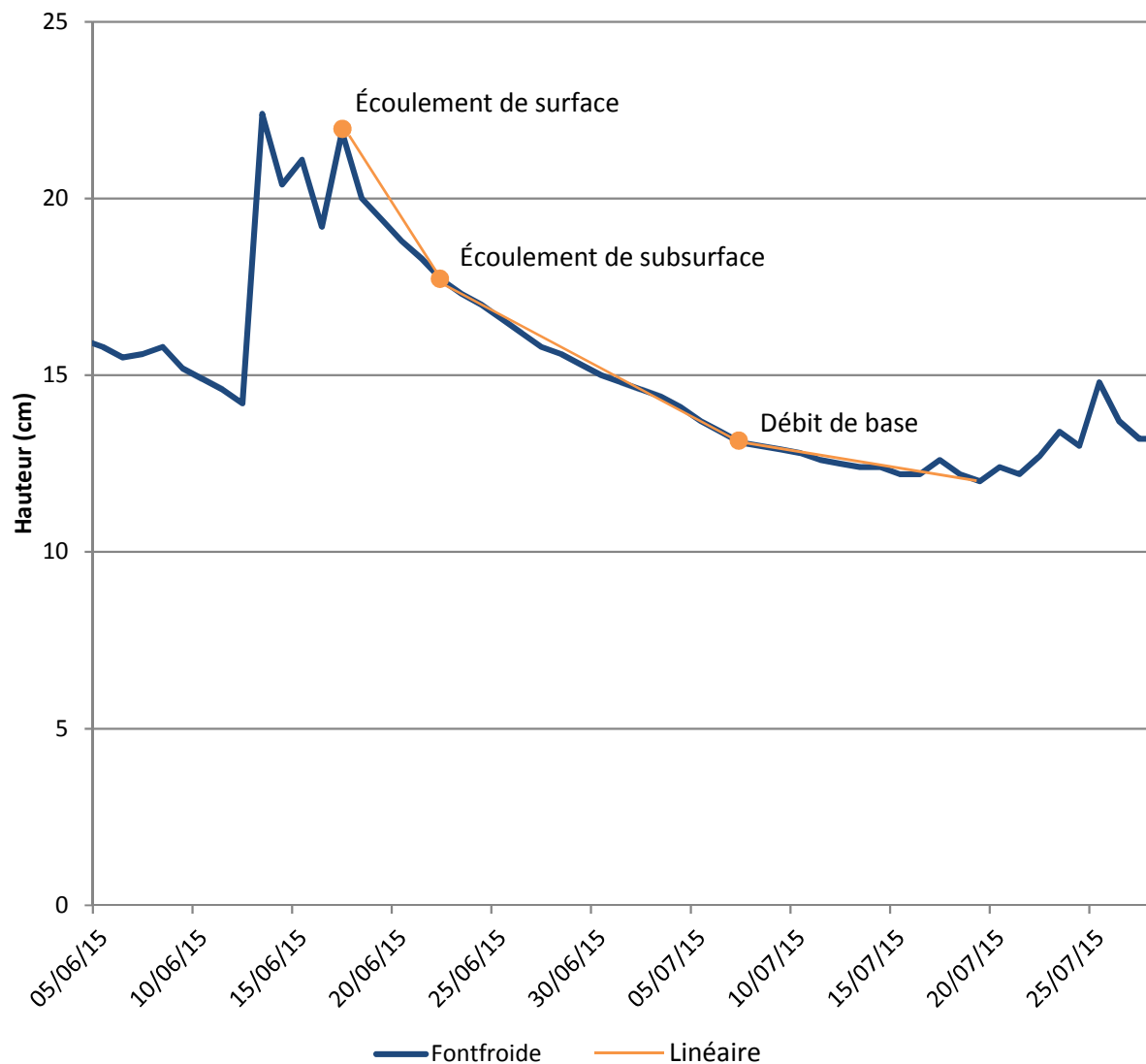


Figure 38 : Décomposition de l'hydrogramme de crue de Fontfroide

Cette méthode nous permet de remarquer que le ruisseau de Fontfroide n'est plus soutenu que par des écoulements de base à partir du 8 juillet. C'est à partir de cette date qu'apparaît donc le « lit d'étiage » défini plus haut. Nous relevons donc les hauteurs de nappe sur les piézomètres 3, 13 et 14 afin de les utiliser comme seuils. Ainsi, ce n'est qu'au moment où les hauteurs de nappes sont inférieures à ces seuils que les écoulements sortants de la tourbière sont comptabilisés comme soutenant l'étiage.

3. Résultats : validation du modèle et valeurs de débit de soutien d'étiage retenues

Tout d'abord, voici le modèle final que nous avons réalisé à l'aide de Vensim

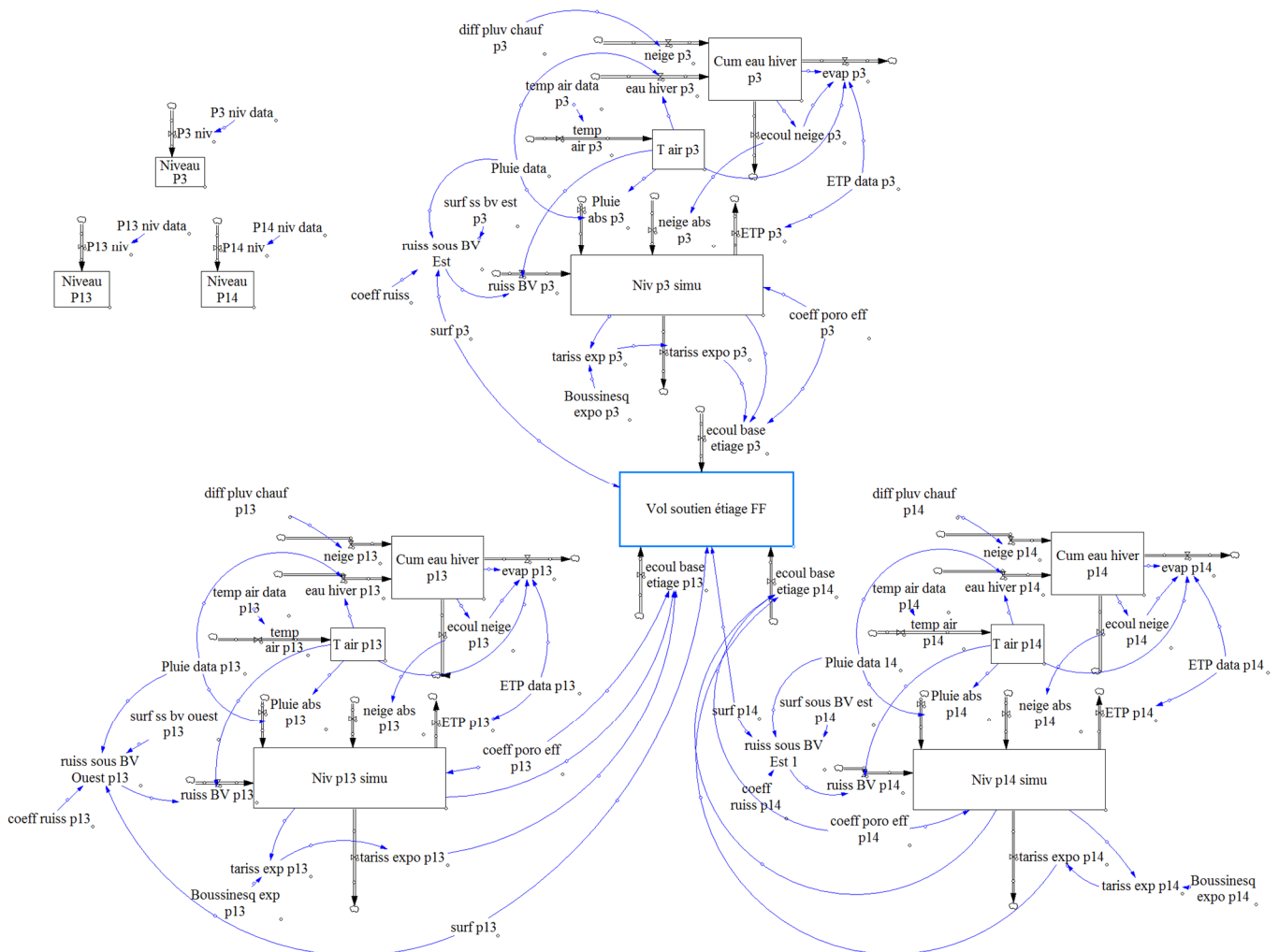
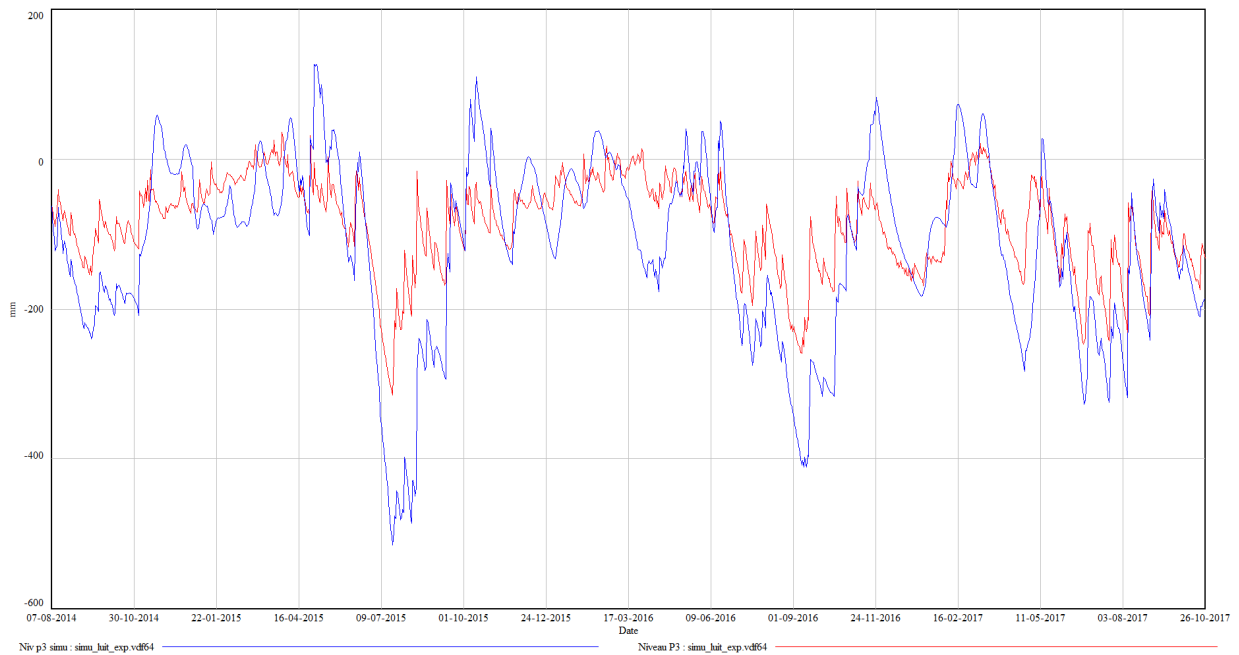


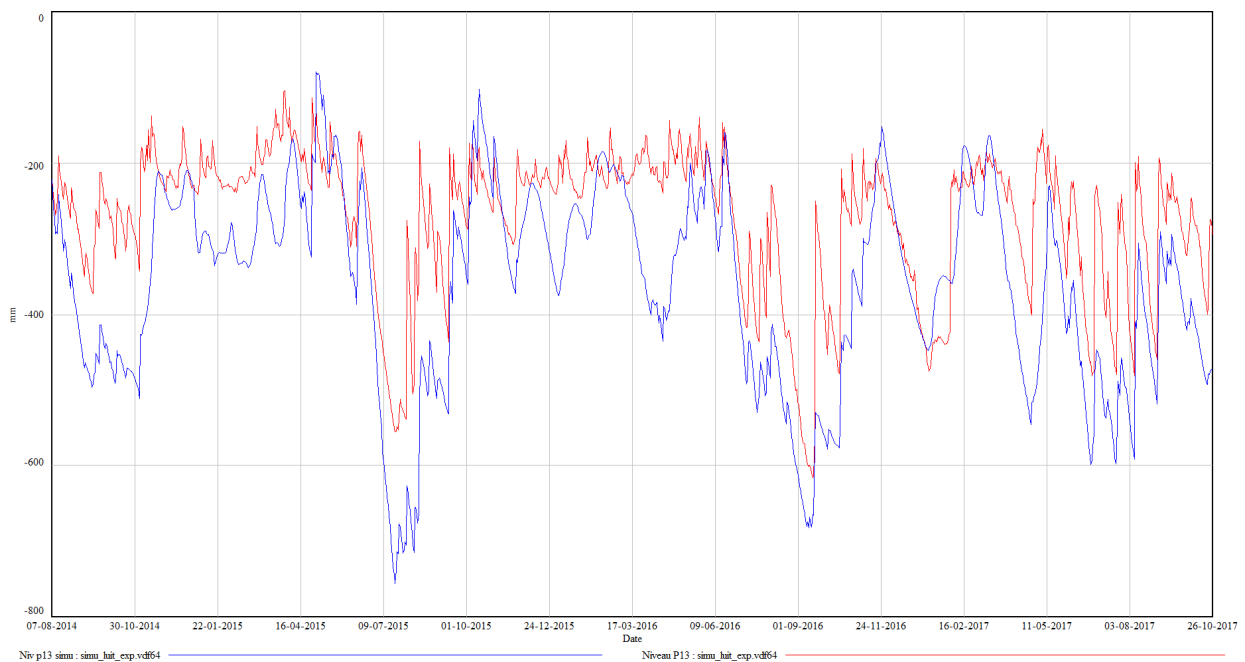
Figure 39 : Modèle final réalisé sous Vensim

Les trois secteurs modélisés apparaissent clairement, ils respectent l'orientation géographique pour favoriser la lecture (le secteur Nord apparaît bien en haut, etc...). Ils sont connectés à la boîte centrale où sont réalisés les calculs de soutien d'étiage. Enfin, en haut à gauche apparaissent les données piézométriques réelles qui permettent de faire la comparaison entre la simulation et l'observation. Cette comparaison est possible avec Vensim sous forme graphique.

- P3 (Nord) : Niveaux de nappe **simulés** et **observés**



- P13 (Sud-Ouest) : Niveaux de nappe **simulés** et **observés**



- P14 (Sud-Est) : Niveaux de nappe **simulés** et **observés**

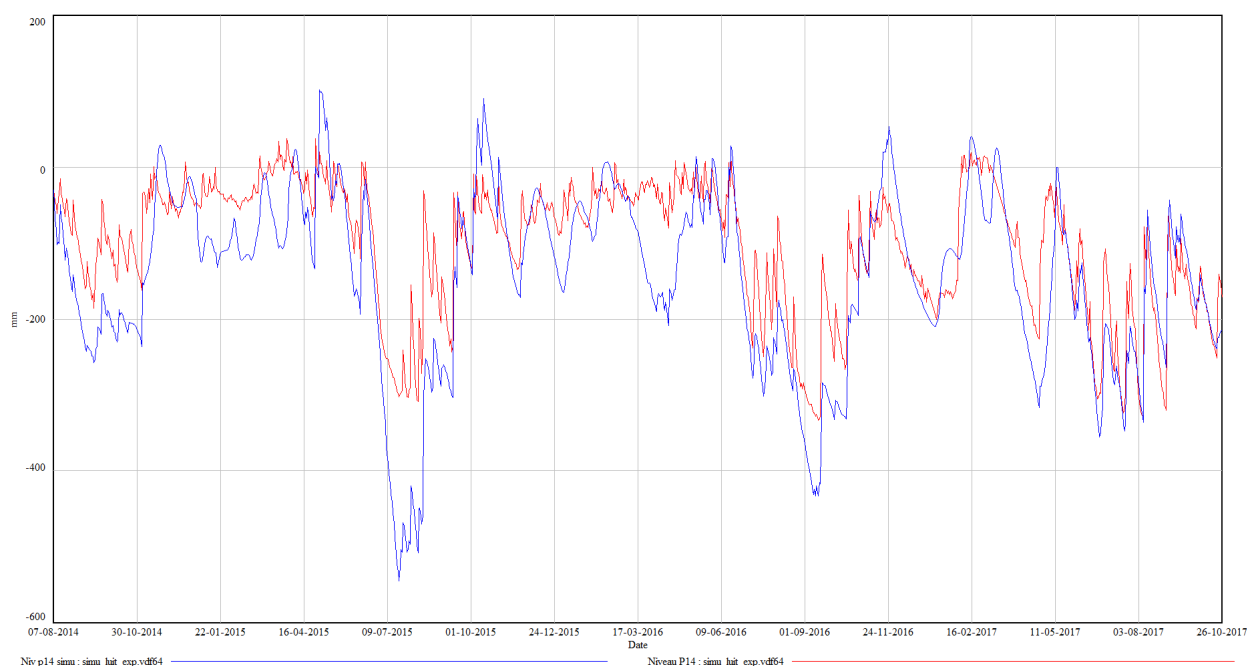


Figure 40 : Graphiques de comparaison entre les valeurs de niveaux piézométriques simulées et observées

Les courbes sont assez proches, le modèle semble donc reproduire les variations de niveaux de nappe de façon correcte.

L'indice de corrélation peut être utilisé pour déterminer la validité du modèle :

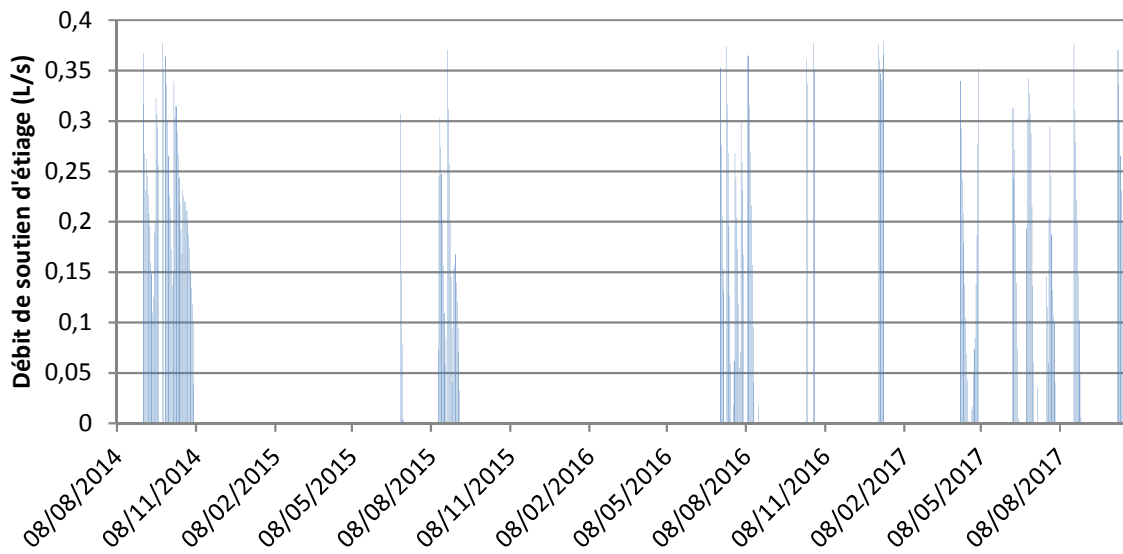
	Indices de corrélations calculés	Formule utilisée
P3	0.8	$Correl(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$
P13	0.8	
P14	0.84	

Tableau 13 : Indices de corrélation entre la simulation et l'observation

D'après ces coefficients, notre modèle semble représenter la réalité de manière acceptable, il peut donc être validé.

Nous pouvons donc proposer nos résultats quant aux valeurs de débit assurant le soutien d'étiage. Nous proposons ces résultats sous forme de graphiques, le premier indique les débits moyens journaliers soutenant l'étiage en L/s et le second permet d'observer le cumul des volumes participant au soutien d'étiage. Ces cumuls sont réalisés par cycles hydrologiques, en d'autres termes, pour chacune des années modélisées :

- Soutien d'étéage exprimé en débits (L/s) :



- Soutien d'étéage exprimé en volumes annuels cumulés (m³) :

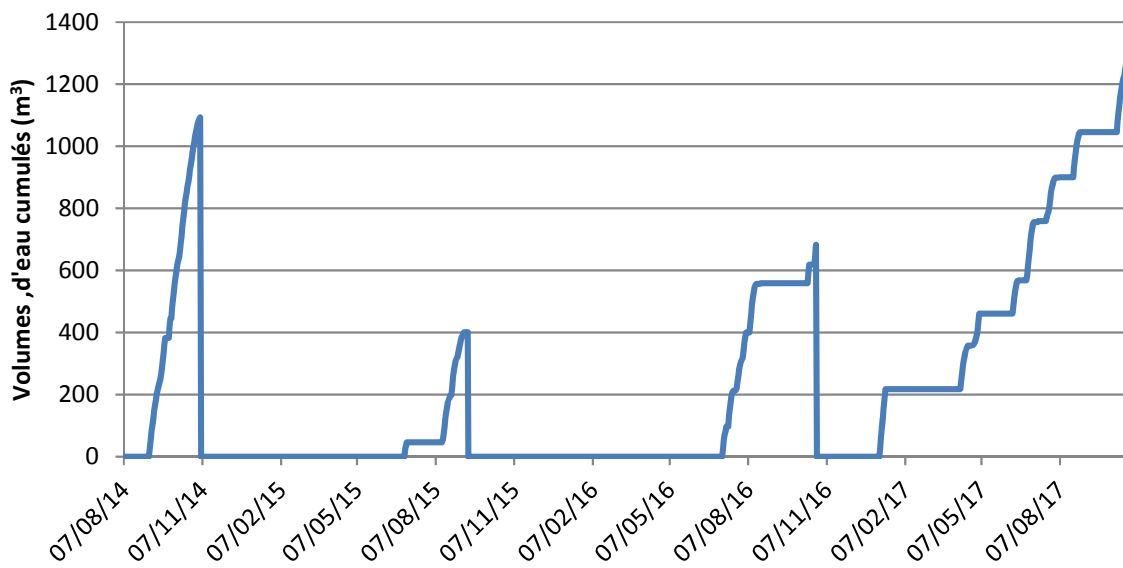


Figure 41 : Débits et volumes participant au soutien d'étéage

4. Conclusion : de l'implémentation progressive des flux vers la validation du modèle

Notre site d'étude est la tourbière du Col du Luitel. Située à 1200 m d'altitude, elle est sous l'influence d'un climat frais et humide avec 1233 mm de pluies reçues en moyenne par an et une température moyenne annuelle de 5,68°C. Sa surface est de 10 hectares et elle se situe dans un bassin versant de 555 hectares, divisés en plusieurs sous-bassins versants qui l'approvisionnent en eaux de pluies ruisselées. Si nous nous référons à la typologie selon les sources d'approvisionnement en eau dominantes, cette tourbière est de type ombrotrophe et partiellement minérotrophe. Les zones minérotrophes sont celles qui bordent les deux ruisseaux qui traversent la tourbière, au Sud la source Pezanti, et au centre, Fontfroide. Le principal exutoire de la tourbière est le ruisseau de Fontfroide qui sépare deux zones ombrotrophes, soit deux cuvettes remplies de tourbe dont le socle se situe, au maximum, à environ 10 m de profondeur. Ces informations nous permettent de déduire le fonctionnement hydrologique du site et de reprendre le bilan hydrologique établi plus haut. En vue d'une modélisation, les différents flux ont été ainsi identifiés, quant aux réservoirs, nous en avons distingué 3 : le secteur au Nord de Fontfroide, et les secteurs au Sud-Ouest et au Sud-Est. Le schéma suivant propose une synthèse visuelle des flux et des réservoirs constitutifs de notre modèle abouti :

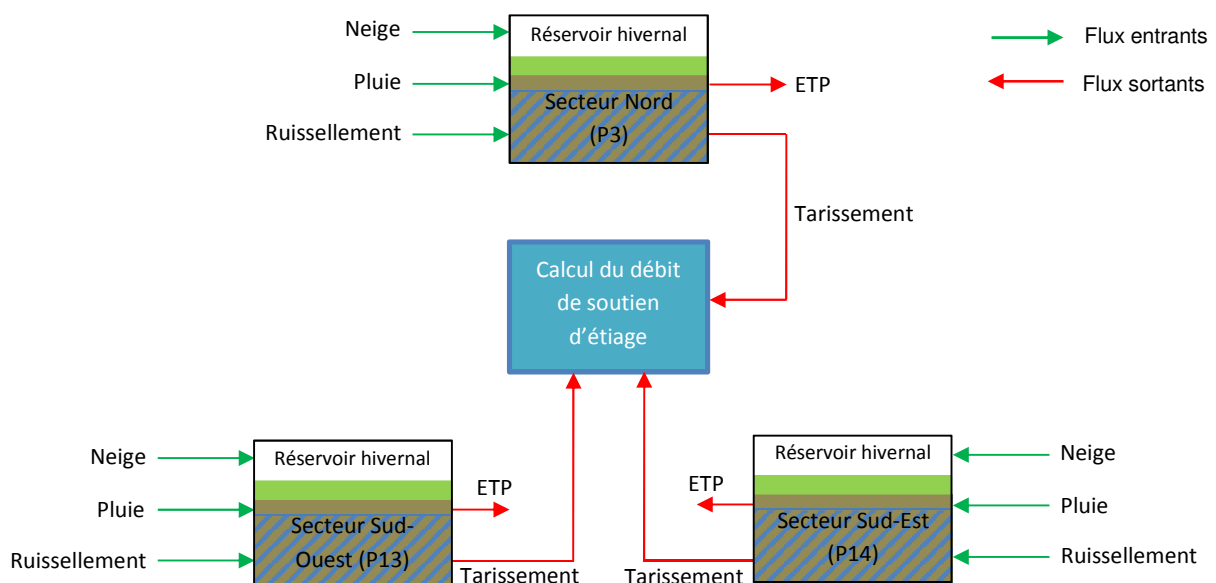


Figure 42 : Schéma de synthèse du modèle réalisé : flux et réservoirs

L'état de l'art réalisé dans notre seconde partie nous permet également d'extraire des valeurs issues de la littérature scientifique afin de modéliser l'hydrodynamisme de la tourbière et ainsi de simuler les écoulements. La construction de notre modèle s'appuie de plus sur les données hydrologiques et météorologiques dont nous disposons et qui nous

permettent la modélisation de trois cycles hydrologiques correspondant à trois années civiles (mi 2014 à fin 2017). L'hydrologie du site est connue grâce à un réseau de 20 piézomètres dont 6 équipés de sondes mini-diver permettant des relevés horaires. Les aspects météorologiques du site sont évalués grâce à la station dont la tourbière est équipée et qui mesure, entre autres, la pluie et la température de l'air et calcule l'ETP. Un pluviomètre chauffant situé plus au Sud nous apporte également des données sur les précipitations sous forme neigeuse. Notre méthode de construction du modèle consiste à implémenter progressivement les différents flux à l'aide de Vensim. ArcGis a également été utile pour créer la carte piézométrique de la tourbière et pour calculer les sous-bassins versants et ainsi évaluer les ruissellements. Le premier objectif de ce modèle est de simuler les variations des niveaux de nappe des trois secteurs que nous avons retenus. La simulation est comparée aux variations établies par les sondes des piézomètres 3, 13 et 14. Nous considérons que ces piézomètres sont représentatifs respectivement des secteurs Nord, Sud-Ouest et Sud-Est étant donné qu'ils se corrèlent bien avec ceux que chacun de ces secteurs comprennent. Le comportement de ces piézomètres est donc interpolé à une surface afin de permettre une évaluation quantitative. La simulation des niveaux de nappe sur nos trois secteurs se corrèle finalement bien avec l'observation. Le coefficient étant à chaque fois supérieur à 0,8, nous considérons que notre modèle peut être validé. Nous créons ainsi dans Vensim une « boîte » de calcul dans laquelle sont dirigés les écoulements sortants de nos trois réservoirs. Cette boîte calcule des débits de soutien d'étiage qui sont fonction de la surface modélisée et des variations de hauteur de nappe simulés. Le calcul n'est actif qu'à partir d'un certain seuil déterminé d'une part, par la décomposition graphique de l'hydrogramme de crue qui nous a permis d'évaluer le lit d'étiage de Fontfroide à partir des écoulements de base et d'autre part, par la mise en corrélation du lit d'étiage de Fontfroide avec les niveaux de nappes dans la tourbière. Notre calcul fait apparaître trois périodes d'étiages estivales et une hivernale. En termes quantitatif, c'est la valeur de 0,38 L/s qui peut être retenue, il s'agit de la valeur de débit de soutien d'étiage journalière maximale parmi toutes celles obtenues dans la période que nous avons simulée.

Partie IV

-

Discussion : mise en perspective des résultats obtenus et réflexion méthodologique

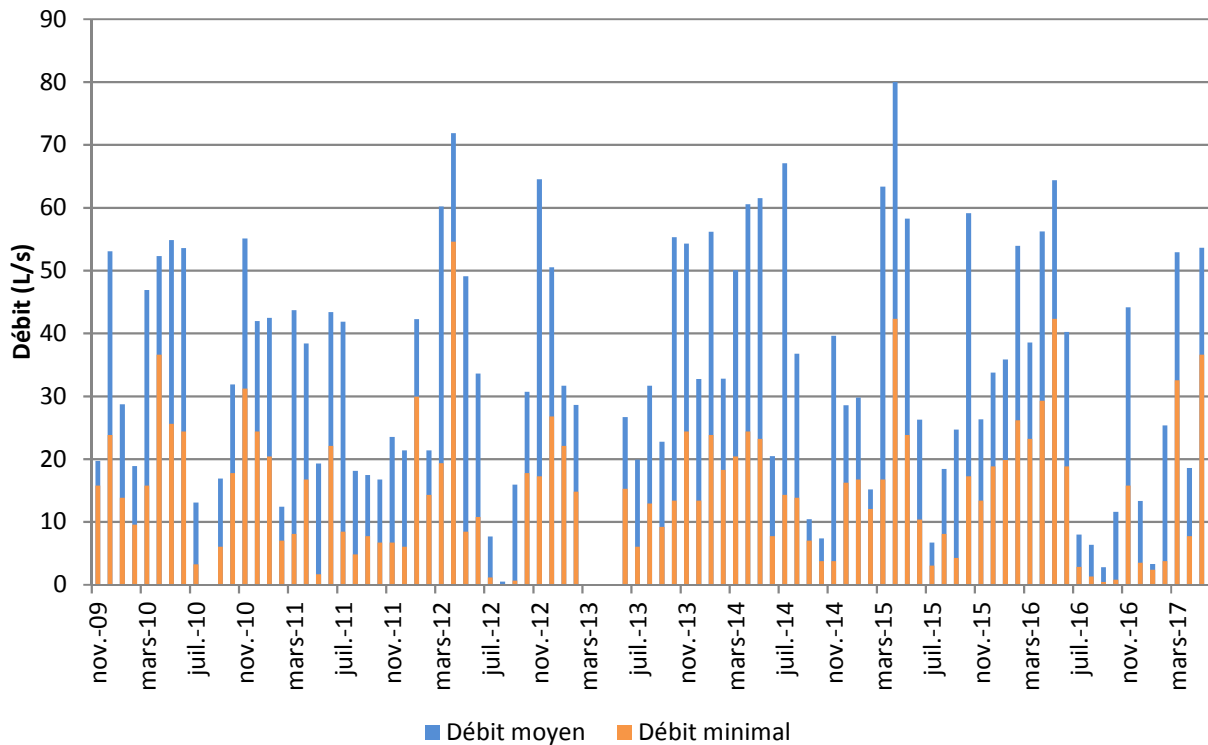
Les résultats obtenus sont interprétés dans cette dernière partie, nous proposons ici un retour réflexif sur notre expérience. Nous observons ainsi les valeurs de débits moyens et minimaux de Fontfroide, à des pas de temps mensuels et journaliers, de manière à évaluer ce que représentent nos débits de soutien d'étiage calculés. Nous voyons également dans quelle mesure il est possible d'interpréter ces résultats à d'autres échelles de temps et d'espace. Puis nous proposons une réflexion critique de notre travail de modélisation, en observant les limites imposées par la simplification inhérente à notre démarche et en suggérant néanmoins des pistes d'amélioration pour notre modèle, et même des suggestions de nouvelles approches ou études à conduire en fonction de ce que nous avons ici retenu. Enfin, la fiabilité de nos résultats étant tributaire des données environnementales alimentant le modèle, nous rentrons plus dans le détail quant à la manière dont nous avons traité ces données. Ici ressortent donc certaines limites, quelques facteurs d'imprécision et les choix méthodologiques qui en découlent.

1. Interprétation et contextualisation des débits de soutien d'étiage évalués

1.1. Comparaison des débits de soutien d'étiage et des débits de Fontfroide sur la période d'étude

Pour juger de ce que représentent les débits de soutien d'étiage que nous venons d'évaluer, il est utile de connaître les tendances de débit qui caractérisent Fontfroide à l'exutoire. Le premier graphe de la figure ci-dessous permet d'observer ces tendances sur l'ensemble de la période pour laquelle nous possédons des données, soit de novembre 2009 à mai 2017. Certains mois ne sont pas représentés au cours de cette période, faute de données pour cause de défaillances techniques. Puis le second graphe se focalise sur notre période de simulation (avec quelques mois de 2017 en moins car notre série s'arrête). Nous proposons, à l'aide de ces deux graphes, d'observer une comparaison entre les débits moyens et minimaux mensuels.

- Comparaison des débits moyens et minimaux mensuels de novembre 2009 à mai 2017 :



- Comparaison des débits moyens et minimaux mensuels sur la période de simulation

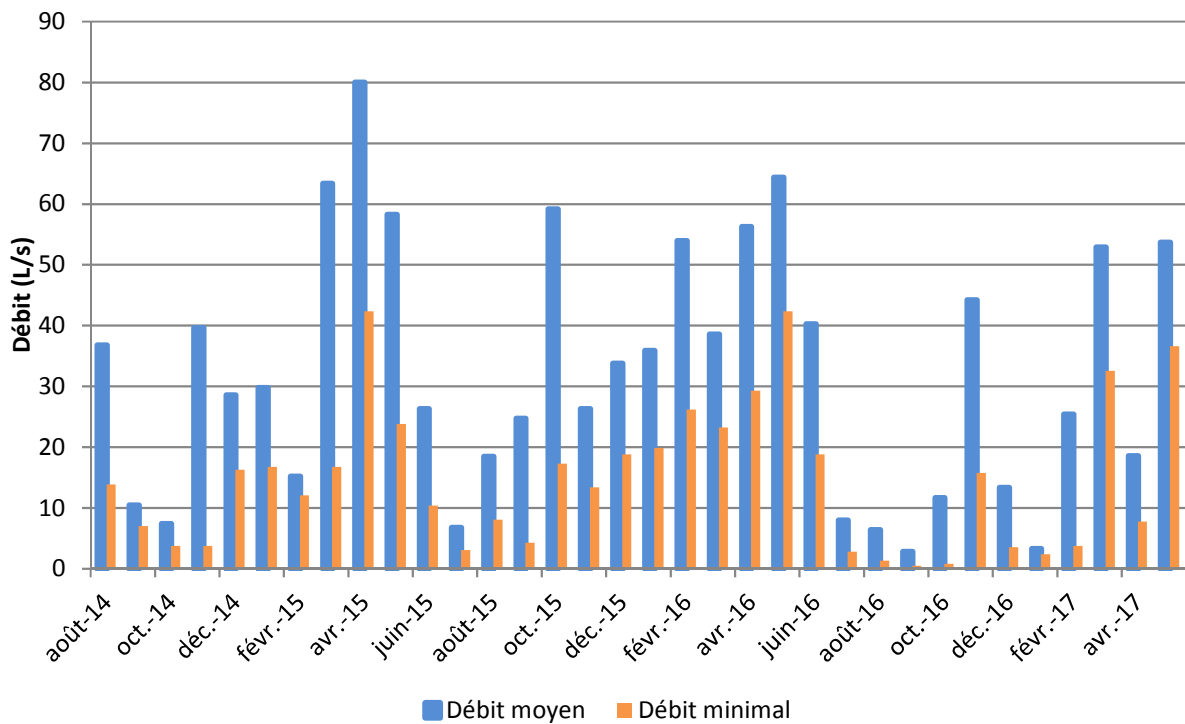
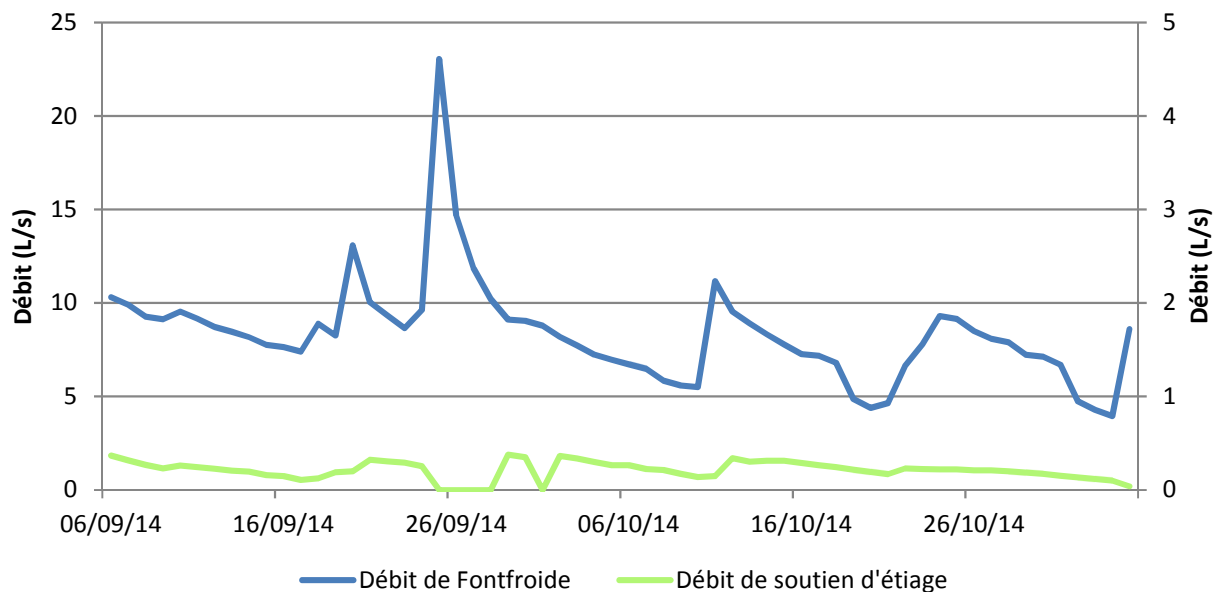


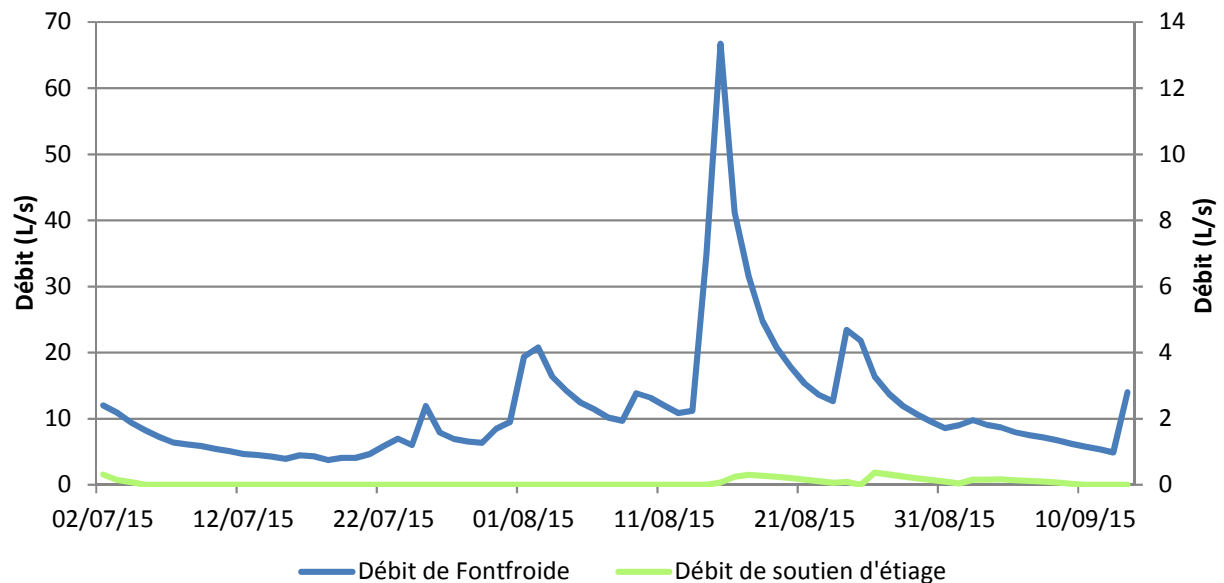
Figure 43 : Débits moyens et minimaux mensuels de Fontfroide

D'après ces graphiques nous remarquons que les débits moyens mensuels peuvent être relativement élevés (jusqu'à 80L/s en mars 2015). C'est d'ailleurs au printemps qu'apparaissent préférentiellement les débits moyens les plus élevés, cette période correspondant à la fonte des neiges. En période estivale, les débits moyens semblent au cours de certaines années se maintenir à des niveaux assez élevés (>20 L/s pour les étés 2011, 2013 et 2014) et au cours d'autres années accuser d'un étiage beaucoup plus sévère (<5 L/s pour les étés 2012 et 2016). C'est au cours de ces épisodes qu'il est particulièrement intéressant d'observer ce que représentent les débits de soutien d'étiage comparativement à des moyennes journalières de débit. Les graphiques suivants utilisent à cette fin une double échelle, l'échelle du débit de soutien d'étiage, à droite est 5 fois plus grande :

- Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'étiage, été 2014 :



- Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'étiage, été 2015 :



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

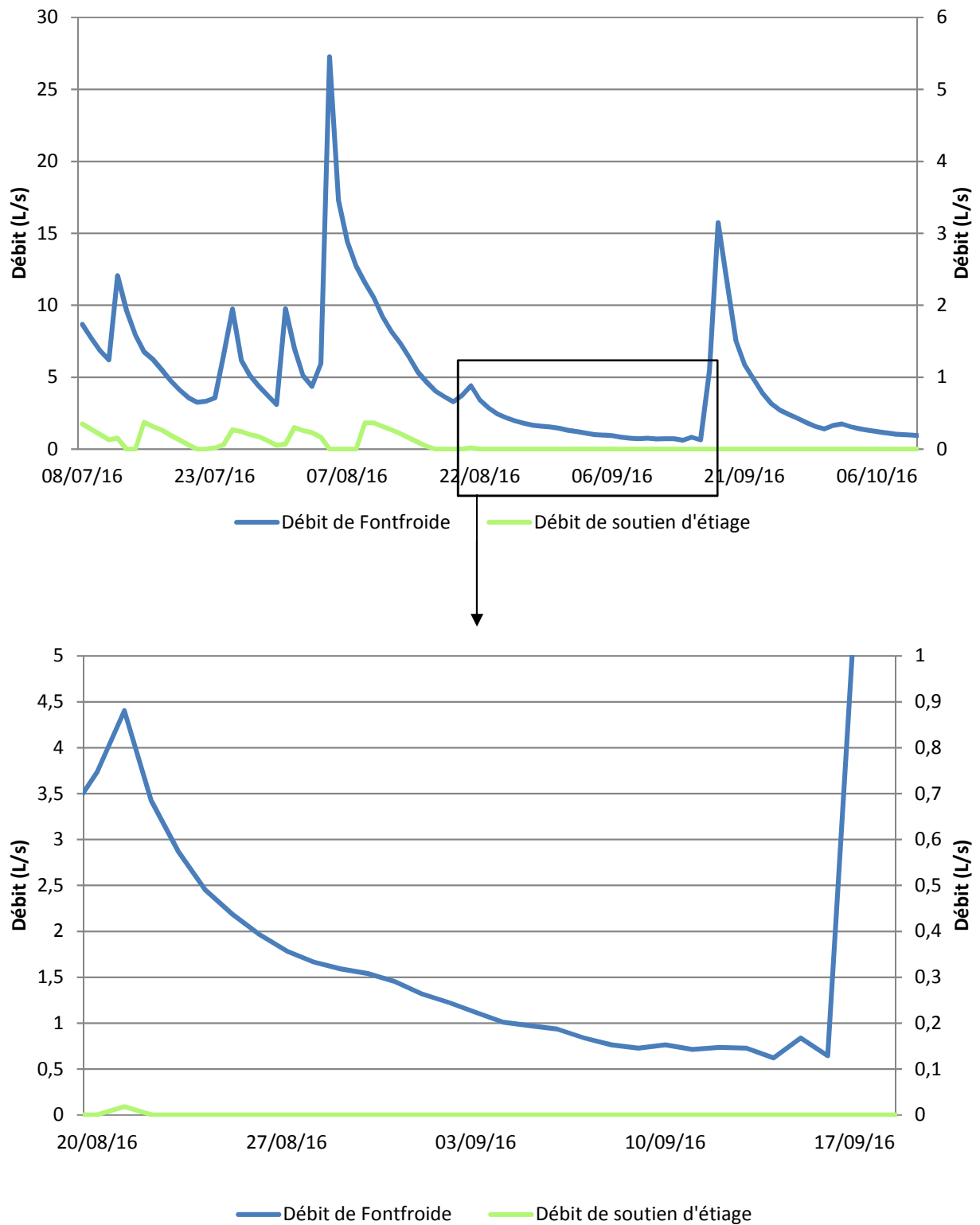


Figure 44 : Comparaisons entre les débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été

Ces graphiques montrent que la part des débits soutenant l'étiage est assez mince par rapport aux débits du cours d'eau. Nous remarquons par ailleurs que plus l'étiage est sévère, plus la proportion des débits soutenant l'étiage s'amointrit. Au mieux, d'après nos calculs, le débit de soutien d'étiage atteint 0.38 L/s, le débit moyen de Fontfroide correspondant est alors de 4.55 L/s. En l'occurrence, le débit de soutien d'étiage constitue environ 8% du débit moyen de Fontfroide. Notons pouvons également constater que ces écoulements ont un aspect déphasé puisqu'ils se maintiennent pendant plusieurs semaines après la décrue. Comparons maintenant les moyennes des débits de Fontfroide et celles des débits de soutien d'étiage sur les périodes retenues :

Période	Débit moyen de Fontfroide (L/s)	Débit moyen de soutien d'étiage (L/s)	Pourcentage
Été 2014	8.36	0.21	2,52 %
Été 2015	11.74	0.06	0.53 %
Été 2016	4.56	0.07	1.45 %

Tableau 14 : Comparaison des moyennes de débits de Fontfroide et de soutien d'étiage par période

Certes la quantité évaluée semble faible, mais les cumuls représentent par exemple 1100 m³ pour l'été 2014. Le graphique des volumes cumulés nous permet par ailleurs d'observer que le soutien d'étiage a généralement lieu en été, mais qu'il est également possible en période hivernale, c'est le cas au cours de l'hiver 2016-2017 dont nous avons dit qu'il s'est avéré exceptionnellement sec.

1.2. Mise en perspective temporelle : une évaluation des débits de soutien d'étiage par rapport au QMNA5 et au module interannuel ?

Les résultats que nous présentons doivent être considérés avec un certain recul. Ils sont issus d'une démarche de modélisation qui n'est, comme nous l'avons vu qu'une représentation simplifiée de la réalité. De plus, les résultats provenant, d'une part d'une modélisation, et d'autre part d'une évaluation hydrologique, dépendent bien souvent de la méthode employée par le modélisateur et l'hydrologue. Nous considérons donc que l'intérêt principal de cette étude réside peut-être surtout dans la démarche qui a été effectuée et dans le fait que celle-ci puisse servir à d'autres démarches plus poussées ou pour des sites plus complexes tels que celui de Frasne.

Notre méthode peut donc être discutée sur plusieurs points, notamment sur notre choix de caractérisation de l'étiage. Nous avons opté pour la définition du lit d'étiage à travers la décomposition de l'hydrogramme de crue de Fontfroide en période de sécheresse. En reprenant la figure 38 où nous décomposons cet hydrogramme, nous pouvons remarquer que les écoulements de subsurface (ou hypodermiques, ou à sous-saturation) approvisionnent tout de même le ruisseau de Fontfroide pendant une quinzaine de jour. Ces écoulements sont certes bien distincts des écoulements de base lent que nous avons cherché à mettre en avant dans le cadre de notre étude, mais il est néanmoins intéressant

d'observer qu'ils concourent certainement de manière substantielle aux débits de Fontfroide et présentent de plus l'intérêt de s'étirer dans le temps. Notre décomposition de l'hydrogramme s'appuie donc sur une méthode graphique qui fait ressortir les changements de tendance. Néanmoins dans le cadre de la problématique du soutien d'étiage et au vu de la durée des apports en eau, peut-être que les seuils à partir desquels nous considérons que les écoulements soutiennent l'étiage pourraient être remontés.

L'état de l'art sur la question du soutien d'étiage réalisé plus haut a fait ressortir l'intérêt du QMNA5 (débit mensuel minimal avec un temps de retour de 5 ans) pour évaluer l'étiage. Les quantiles correspondants sont évalués grâce à la loi log-normale, ou loi de Galton. Cela dit le ruisseau de Fontfroide n'a pas été l'objet d'un tel calcul. En effet, les données dont nous disposons ne nous permettent pas de réaliser une telle évaluation, la série n'étant pas assez longue, d'où notre choix méthodologique. Cependant, le QMNA5 représentant un débit mensuel sec de récurrence 5 ans, nous pouvons observer les tendances mensuelles et retenir le débit le plus faible afin de tenter une approximation de ce débit de référence par une méthode simple.

	Débits moyens en L/s				
	2011	2012	2014	2015	2016
Janvier	42.49	42.29	56.19	29.76	35.86
Février	12.42	21.4	32.77	15.15	53.91
Mars	43.71	60.2	50.08	63.35	38.53
Avril	38.41	71.85	60.55	80	56.24
Mai	19.3	49.08	61.51	58.23	64.35
Juin	43.39	33.61	20.45	26.29	40.23
Juillet	41.88	7.67	67.07	6.732	7.96
Août	18.13	0.52	36.77	18.42	6.37
Septembre	17.43	15.93	10.41	24.68	2.81
Octobre	16.74	30.72	7.37	59.12	11.62
Novembre	23.53	64.53	39.62	26.3	44.17
Décembre	21.38	50.52	28.54	33.75	13.31

Tableau 15 : Débits moyens mensuels de Fontfroide

Le débit mensuel minimum au cours des 5 années présentées est de 0.52 L/s. Cela dit, en comparaison des autres valeurs, ce débit semble exceptionnellement faible, peut-être s'agit-il d'un phénomène rare dont le temps de retour est supérieur à 5 ans. Au pas de temps journalier, ce débit n'est jamais atteint dans la période que nous avons modélisé. Le dernier graphique de la figure 42 montre néanmoins une période où le débit passe sous la barre des 1 L/s, mais nous pouvons observer que le débit contribuant au soutien d'étiage est infinitésimal. Ainsi l'étiage marqué du cours d'eau semble logiquement se corrélérer avec l'étiage de la zone humide qui l'approvisionne, d'où l'intérêt d'une éventuelle réflexion ultérieure qui intégrerait les apports bien avant les périodes d'étiage. Cela permettrait peut-être de savoir dans quelle mesure les zones humides préviennent l'étiage.

Tout comme le QMNA5, un calcul du module interannuel ne serait pas forcément significatif. Le module est généralement évalué sur une trentaine d'année, or, ici, nous ne pouvons nous

baser que sur cinq années complètes. Le tableau suivant établit les moyennes annuelles des débits de Fontfroide pour ces 5 années :

Année	Débit moyen annuel (L/s)	Méthode
2011	28.57	$Q_{\bar{M}A} = \frac{Q_{\bar{M},Janvier} \times 31 + \dots + Q_{\bar{M},Décembre} \times 31}{365}$
2012	37.89	
2014	39.40	
2015	36.96	
2016	31.11	

Tableau 16 : Débits moyens annuels de Fontfroide

Le module interannuel ainsi obtenu à partir de ces moyennes est de 34.79 L/s. Réaliser une moyenne est donc assez simple pour les débits de Fontfroide, mais moins évident pour les débits de soutien d'étiage en vue d'une comparaison. En effet, notre évaluation des débits de soutien d'étiage ne concerne que les périodes d'étiage, le tableau 14 nous paraît donc être la meilleure approche pour une appréciation qualitative. Il serait néanmoins intéressant d'utiliser les données collectées dans les années à venir afin de définir le QMNA5 et le module interannuel et d'observer ainsi les tendances. Cela paraît d'autant plus pertinent dans un contexte de réchauffement climatique et de par le fait que Fontfroide approvisionne un captage. L'étude de ce ruisseau et l'évaluation du service de soutien d'étiage de la tourbière du Col du Luitel présente donc également un intérêt pour la gestion des ressources en eau.

1.3. Mise en perspective spatiale : l'étiage dans le département de l'Isère

Si l'élargissement du contexte temporel de notre étude présente un intérêt certain d'un point de vue réflexif, il en va de même pour ce qui est du contexte spatial. Tenter de placer notre étude dans le contexte hydrologique plus large du département de l'Isère peut ainsi permettre d'obtenir d'autres points de comparaison et de prendre en compte quelques enjeux à plus large échelle.

Ainsi, concernant le QMNA5 dans la problématique de l'étiage, rien n'est spécifié pour le ruisseau de Fontfroide dans le SAGE Drac-Romanche, si ce n'est qu'un « *étiage trop sévère des cours d'eau superficiels (affluents du Drac [dont la Romanche, que Fontfroide rejoint]) [...] pourrait mettre en péril la ressource en eau potable de nombreuses communes et de l'agglomération grenobloise.* » (Agence MTDA, 2017). Cela ne fait que ressortir d'avantage l'intérêt du service de soutien d'étiage dans cette étude. Le QMNA5 a en revanche été évalué en quelques points sur le réseau hydrographique du département de l'Isère. La carte résultant de cette évaluation est quelque peu datée (2001), nous la proposons tout de même afin d'avoir une idée des ordres de grandeurs employés :

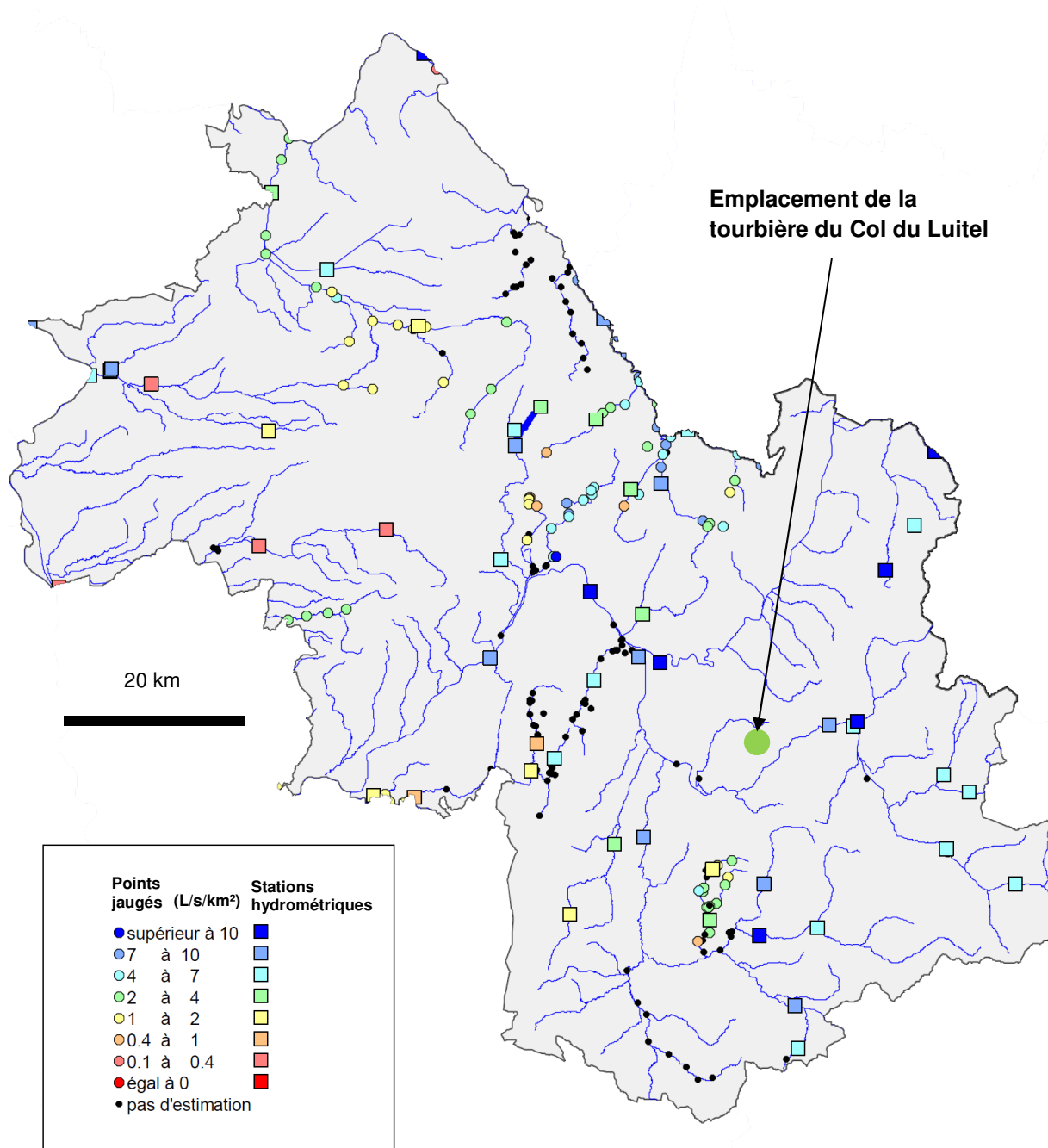


Figure 45 : Estimation des débits de référence d'étiage (QMNA5) (DIREN, 2001)

Notons que les ordres de grandeurs sont ici tout autres, puisque l'évaluation se fait en L/s/km², il s'agit de débits spécifiques exprimés par rapport à la surface du bassin versant.

Enfin, dans le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016 - 2021, quelques valeurs de Débits Objectifs d'Étiage (DOE) et Débits de CRise (DCR) sont avancés. Ces valeurs ont été définies pour des points considérés comme stratégiques. Ainsi le point le plus proche géographiquement de notre site d'étude est la confluence entre le Drac et l'Isère. Les valeurs sont les suivantes : pour le DOE, 12 m³/s (donc 12000 L/s) et pour le DCR, 9,8 m³/s (9800 L/s). Ces valeurs sont intéressantes puisqu'elles nous permettent de prendre conscience une fois de plus de

l'importance des ordres de grandeur. Au vu de ces valeurs, qui sont relatives à une échelle bien supérieure à celle de notre étude, celles que nous avons évaluées pour les débits de soutien d'étiage semblent d'autant plus faibles. C'est pourtant à cette échelle que la réflexion sur l'étiage et la gestion des ressources en eau est conduite. Notre évaluation de ce service ne prend donc réellement du sens qu'à l'échelle à laquelle elle a été réalisée. Un travail à plus grande échelle sur des cours d'eaux à forts enjeux poserait d'autres questions qui auraient par exemple trait au nombre de zones humides apportant une contribution et à leur fonctionnalité.

2. Le modèle hydrologique de la tourbière du Col du Luitel : une approche simplifiée mais perfectible

2.1. Trois pistes d'amélioration après analyse des courbes comparant la simulation et l'observation

Un modèle est une simplification de la réalité et l'approche conceptuelle que nous avons retenue est d'autant plus simplificatrice que les équations sur lesquelles elle repose sont peu complexes et que les aspects physiques sont partiellement omis. Néanmoins cette approche est satisfaisante pour une évaluation quantitative rapide et nous a permis d'aboutir ainsi à des résultats en assez peu de temps. La démarche peut tout de même être encore améliorée avec pour intérêt principal une meilleure compréhension des processus hydrologiques qui ont cours dans les tourbières.

Une première amélioration peut être suggérée pour la période hivernale :

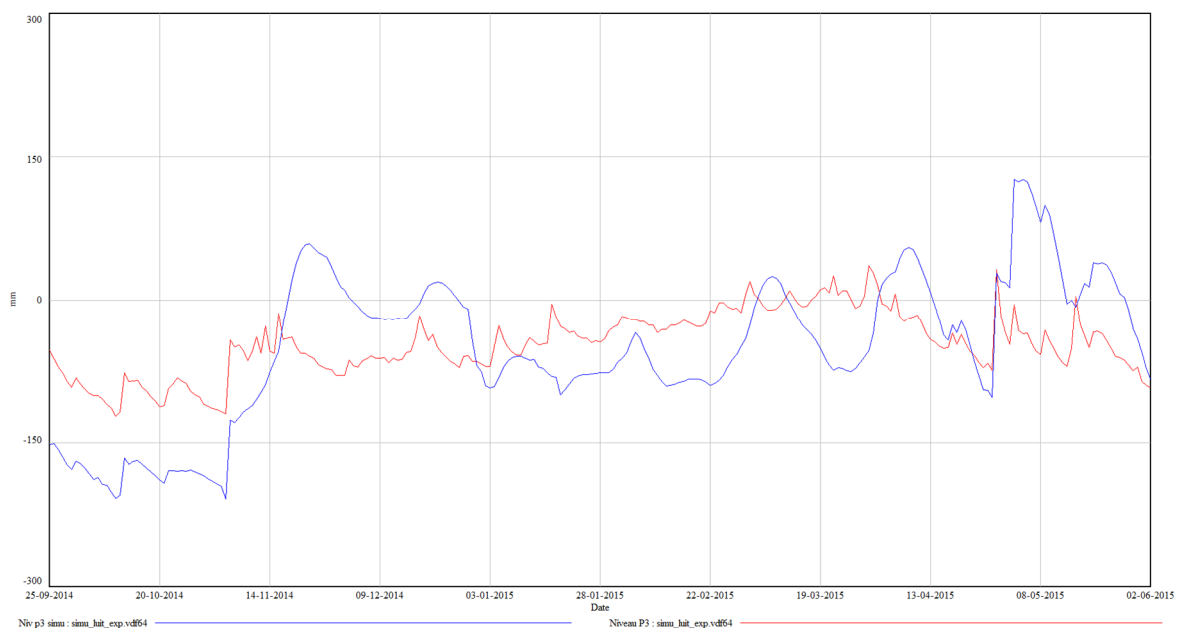
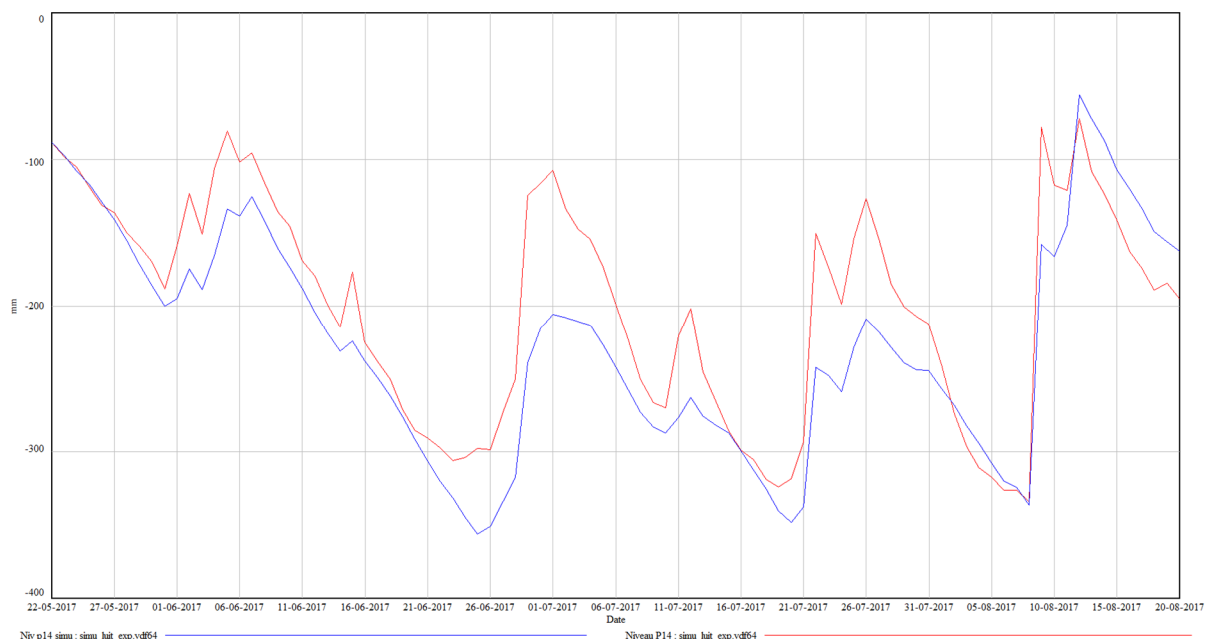


Figure 46 : Comparaison entre la simulation et l'observation de P3 en hiver

Le graphique montre que la simulation reproduit difficilement les tendances réelles. Nos premiers modèles, avant d'aboutir au modèle final et réalisés sans « réservoir hivernal », simulaient un cumul d'eau anormal pendant la période hivernale, si bien que les niveaux nappe passaient bien au-delà de la surface du sol. Ce résultat nous a permis de constater que les volumes d'eau provenant des précipitations ne semblaient plus pénétrer la tourbière dans leur totalité pendant l'hiver. Nous avons pu par ailleurs observer sur le terrain qu'une couche de neige assez épaisse (jusqu'à 1 m mesuré à l'aide de la perche à neige) occupait la surface de la tourbière en hiver. La fonte des neiges n'a lieu qu'au cours du mois d'avril, et les conséquences de cet événement semblent apparaître sur les variations de débit de Fontfroide. Nous en avons déduit que les volumes d'eau issus des précipitations restaient disponibles au-dessus de la tourbière, et l'approvisionnaient progressivement. Ce réservoir d'eaux hivernales que nous avons construit avait ainsi pour objectif de simuler le maintien de la nappe à un niveau proche de la surface, ce qui est caractéristique de la période hivernale. Quoique cette construction soit assez imprécise, elle est néanmoins suffisante pour obtenir un bon indice de corrélation. L'objectif était donc de trouver une méthode rapide pour reproduire le fonctionnement hydrologique de la tourbière en hiver de façon décente. Notre étude portant sur l'étiage, lequel survient plus volontiers au cours de l'été, il ne nous est pas apparu nécessaire de proposer un modèle plus fin pour cette période, qui est par ailleurs assez complexe à transcrire. Cet aspect n'est donc pas crucial, mais un perfectionnement serait intéressant, par exemple en établissant un ratio d'eau potentiellement disponible en fonction de la hauteur de neige et de programmer des apports depuis ces hauteurs en fonction des températures.

Les graphiques suivants nous permettent d'observer que la simulation peut parfois se rapprocher de très près de l'observation, comme elle peut également accuser de légers décrochages :



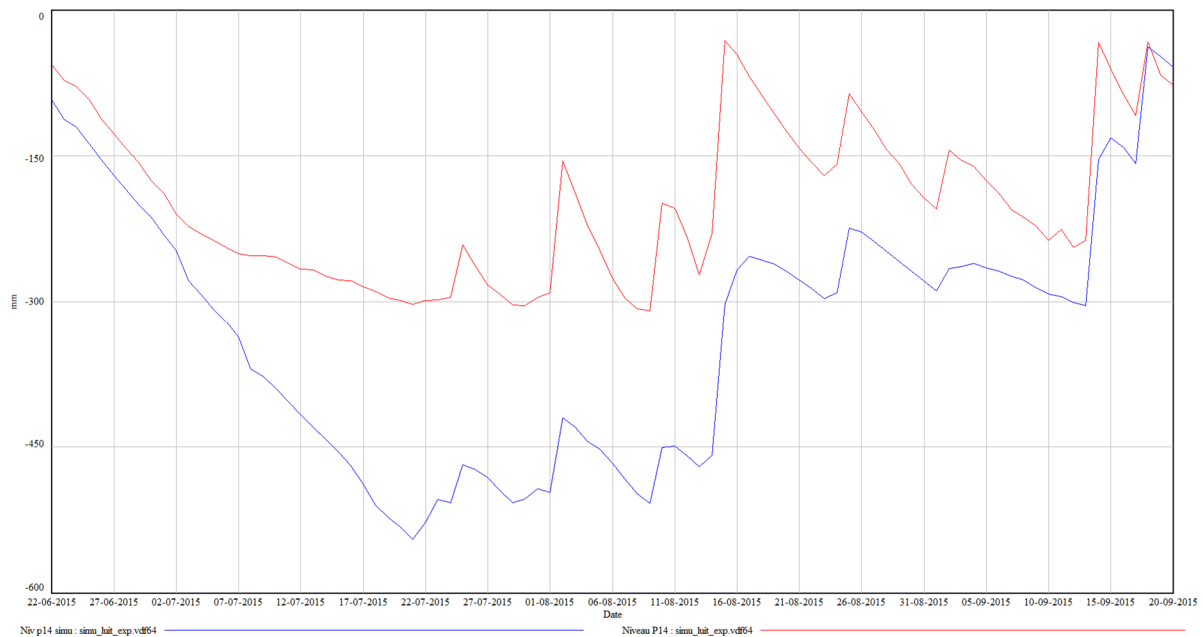


Figure 47 : Adéquation ou décrochage du modèle par rapport à la réalité

Ce décrochage montre que, pour la période sélectionnée, les écoulements ont été surévalués. Ici, nous suggérons une amélioration importante qui consisterait à scinder les réservoirs tourbeux en deux. En effet, notre étude a fait ressortir l'intérêt de la porosité efficace. Nous avons ainsi considéré que l'eau entrant dans notre système occupait les pores libres de l'acrotelme, qui représentent 40 % de son volume. Cela dit, la réalité est plus complexe puisqu'une partie de l'eau sert aussi à l'alimentation des végétaux et constitue ainsi un volume dit d'eau « liée ». Ce volume constitue une part des volumes d'eau reçus qui ne fait pas varier les niveaux de nappe puisqu'il est immobilisé. En perspective, il semblerait donc pertinent d'améliorer le présent modèle en créant un réservoir d'eau liée, c'est-à-dire une « réserve utile » dans lequel l'ETP serait puisé, et un réservoir d'eau libre.

Enfin notre modèle s'est construit à partir d'hypothèses, mais d'autres scénarios pourraient être construits en fonction de nouvelles hypothèses à tester (apport latéraux, pertes...).

2.2. Généralisation des constantes pour un système en réalité hétérogène

La simplification est nécessaire pour appréhender une réalité complexe et est par ailleurs tout à fait acceptable dans une certaine mesure. En l'occurrence, pour une évaluation telle que la nôtre, elle est appropriée. Cette simplification, inhérente aux modèles de type conceptuels, soulève néanmoins un questionnement scientifique. Nous avons par exemple admis pour ce travail une valeur de 0,4 pour la porosité efficace, considérant ainsi que l'acrotelme, sur toute sa hauteur, conservait la même porosité. Or en réalité cette valeur décroît très rapidement, et en seulement quelques centimètres de profondeur. La photographie suivante permet d'observer différents degrés de décomposition, et conséquemment la variabilité de la porosité :



Figure 48 : Carotte prélevée dans le secteur Nord au cours de notre campagne de carottage (Photo : Cubizolle)

Cette variabilité verticale de la porosité efficace rend la représentation des niveaux de nappe beaucoup plus complexe, car ils ont logiquement tendance à augmenter de moins en moins vite alors qu'ils se rapprochent de la surface où il y a moins de matière. La complexité provient donc du fait que la tourbière est un réservoir qui contient déjà de la matière et de porosité variable qui plus est. De ce fait, évaluer la quantité d'eau réelle qui sort de la tourbière en fonction des variations des hauteurs de nappe est complexe. De plus, l'acrotelme est défini comme la zone de fluctuation de nappe. Ainsi nous considérons que le fond de cette zone correspond au minimum du niveau de nappe relevé, la courbe de tarissement est ainsi calculée à l'aide de cette limite basse. Cela dit, il est possible que le minimum réel de l'acrotelme n'ait jamais été atteint et qu'il soit donc plus bas que ce qui a pu être observé. La calibration de la courbe de tarissement compose néanmoins avec cette part d'arbitraire. La structuration diplotelmique est donc contestable à plus d'un titre, des modèles plus complexes, notamment à base physique pourraient permettre de s'en émanciper.

Par ailleurs nos campagnes de terrains nous ont révélé d'autres facteurs de complexité et nous ont permis d'améliorer nos connaissances concernant le comportement de la nappe. Ainsi, au cours de notre campagne de carottage, Thomas Jolly a pu observer la présence d'horizons assainis dans le secteur Sud-Ouest. L'origine de ces formations est à mettre en lien avec le piétinement induit par l'activité pastorale ou bien avec le drainage. Ces faciès reminéralisés et compacts sont peu perméables et tendent ainsi à bloquer les remontées de nappes et donc à rompre la structure diplotelmique (Cholet et Magnon, 2010). La carotte S6³² prélevée par Thomas Jolly, qui montre la présence d'horizons assainis sur 30 centimètre en surface, est située juste à côté du piézomètre 13 choisi pour représenter le secteur Sud-Ouest. Il s'agit justement du seul piézomètre parmi les trois que nous avons choisi au niveau duquel la nappe reste systématiquement sous le niveau du sol.

Outre l'hétérogénéité verticale, une hétérogénéité horizontale apparaît également, et a aussi fait l'objet d'une simplification dans notre démarche. La construction de la courbe de tarissement de la tourbière nécessite par exemple de connaître la conductivité hydraulique. Nous avons ainsi retenu la valeur de $4,5 \times 10^{-4}$ m/s qui correspond aux tourbières à sphaigne (Porteret, 2008). Or nos campagnes de terrain nous ont permis d'observer que la texture, et donc la granulométrie et la conductivité hydraulique, de la tourbe variait d'un secteur à l'autre pour des profondeurs équivalentes. Déterminer le tarissement à également nécessité de simplifier la géométrie des surfaces. Nous avons ainsi considéré qu'il s'agissait de sections rectangulaires dans lesquelles les eaux s'écoulaient de manière uniforme et rectiligne. Or les eaux ne s'écoulent en réalité pas de façon aussi simple, ce que révèlent notre carte piézométrique et le constat du caractère anisotrope de la tourbe. Enfin, autre aspect dont

³² Voir Annexe G2

nous n'avons pas tenu compte, une différence des hauteurs de nappes est possible d'un point à l'autre d'une tourbière, cela s'explique par les conditions spécifiques des sols données par des degrés de décompositions divers ou bien affectés par un affaissement pour cause de drainage (Menberu, 2018).

2.3. Les tourbières, des systèmes évolutifs dans le temps

L'intérêt de l'approche dynamique des systèmes est de pouvoir tenir compte de l'évolutivité de la capacité de stockage d'une tourbière en fonction de la quantité d'eau préalablement stockée. De fait, il est important de ne pas confondre la capacité d'emmagasinage potentielle qui est importante grâce à de fortes valeurs de porosité, avec la capacité d'emmagasinage dynamique qui est plus ténue (Cubizolle et al., 2004). Nous avons en effet observé que la tourbière du Col du Luitel était en état de saturation pendant toute la période hivernale, période au cours de laquelle la capacité d'emmagasinage est donc très mince. De ce fait, la caractérisation du soutien d'étiage ne semble présenter de l'intérêt qu'au cours des périodes estivales, d'autant que c'est précisément au cours de ces périodes que les cours d'eau sont susceptibles d'atteindre l'étiage (d'où l'expression « lit d'été » utilisée comme synonyme de lit d'étiage). Pour autant, l'épisode de sécheresse hivernale que nous avons pu observer en 2016 - 2017 est particulièrement intéressant car il fait apparaître de façon inhabituelle un tarissement des réserves d'eau de la tourbière et qui dans notre modèle enclenche un calcul des débits de soutien d'étiage. À ce titre, la forme dessinée par la courbe d'évolution des niveaux de nappes relevés par la sonde installée sur P3 retient notre attention de par son allure d'exponentielle décroissante. Cette forme correspond bien à la courbe dessinée par la relation de Boussinesq (1877) que nous avons utilisée pour simuler la vidange du réservoir :

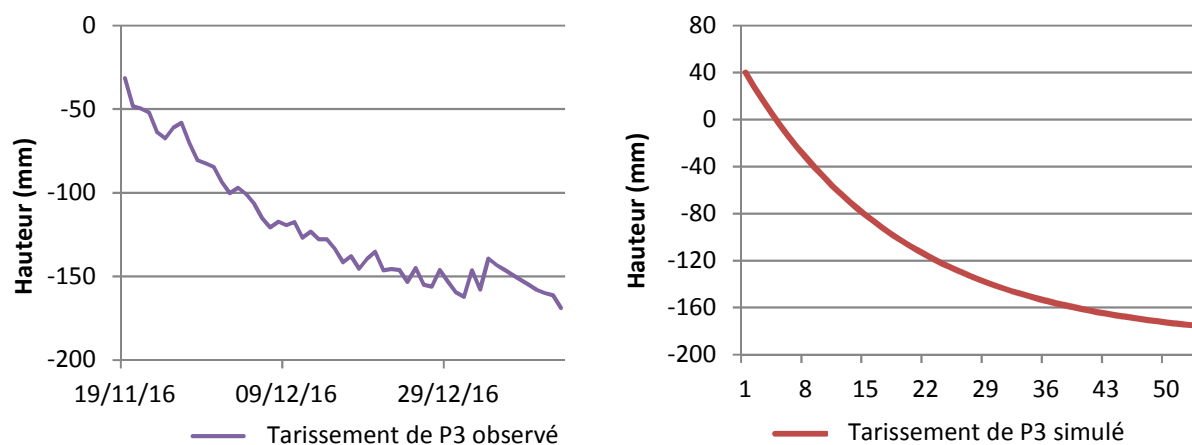


Figure 49 : Tarissement observé en hiver 2016 pour P3 et tarissement simulé avec la loi de Boussinesq

Cette sécheresse hivernale semble révéler, sur le graphique de gauche, un tarissement de la nappe qui pourrait être uniquement lié aux écoulements, étant donné qu'en hiver, du fait de la faible activité végétale, l'évapotranspiration est extrêmement faible, voire nulle (Ravatin, 2017). Cela pourrait expliquer la ressemblance avec le graphique de droite qui simule la

vidange du réservoir tourbeux selon ses écoulements sortants. En comparaison, le tarissement estival de la tourbière dessine des courbes beaucoup plus pentues et linéaires. Nous supposons que cet effet d'accentuation par rapport à la forme exponentielle est due à l'évapotranspiration qui est importante en été. Mais nous pouvons également considérer que l'allure exponentielle est liée à la vidange progressive du réservoir hivernal qui amortit le tarissement du réservoir tourbeux. Cela dit, les températures relevées pour cette période ne dépassent que rarement, et de très peu, la barre des 0°C, ce qui limite l'effet d'approvisionnement en eau par la fonte des neiges. Enfin, nous pouvons également remarquer que les durées de tarissement et l'amplitude des variations de niveau se superposent bien entre elles quand nous comparons les deux graphiques, quoique les variations soient plus amples sur le graphique de droite. Nous constatons ainsi une fois de plus que les écoulements pourraient être réajustés en vue d'une amélioration du modèle.

Outre la variabilité des capacités de stockage liée à la quantité d'eau préalablement stockée, il faut également souligner une variabilité liée à l'évolution de la géométrie de la tourbière dans le temps. Cet aspect-là est plus complexe à modéliser et n'a pas été intégré au modèle. La variabilité de la géométrie du réservoir est due au phénomène de respiration des tourbières (« mire breathing »). Il s'agit d'un mécanisme qui fait osciller la hauteur de la surface du sol des tourbières. Pendant les périodes humides, l'augmentation des niveaux de nappe induit l'augmentation de la hauteur de la surface du sol et des capacités d'emmagasinement potentiel des tourbières. En phase d'assèchement, le phénomène inverse se produit et les tourbières perdent de leur volume (Howie et Hebda, 2018). Il conviendrait donc d'intégrer ce mécanisme à la modélisation afin que les hauteurs de nappe soient réajustées en fonction de ces variations géométriques conditionnées par les variations climatiques. De plus la dynamique d'expansion ou de compression des sphaignes en fonction des hauteurs de nappe qui caractérise ce mécanisme, induit des variations de conductivité hydraulique en surface (Golubev, 2018).

Ce type de variabilité se manifeste donc particulièrement dans l'acrotelme, hydrauliquement actif. Nous avons par ailleurs déjà pu observer que le drainage induisait un assèchement, et donc l'oxydation et la minéralisation de la matière organique constituant l'acrotelme (Comont, 2006). Cette dégradation de la matière induit la réduction de la taille des pores de l'acrotelme, et de ce fait, un phénomène d'hystérèse peut être observé :

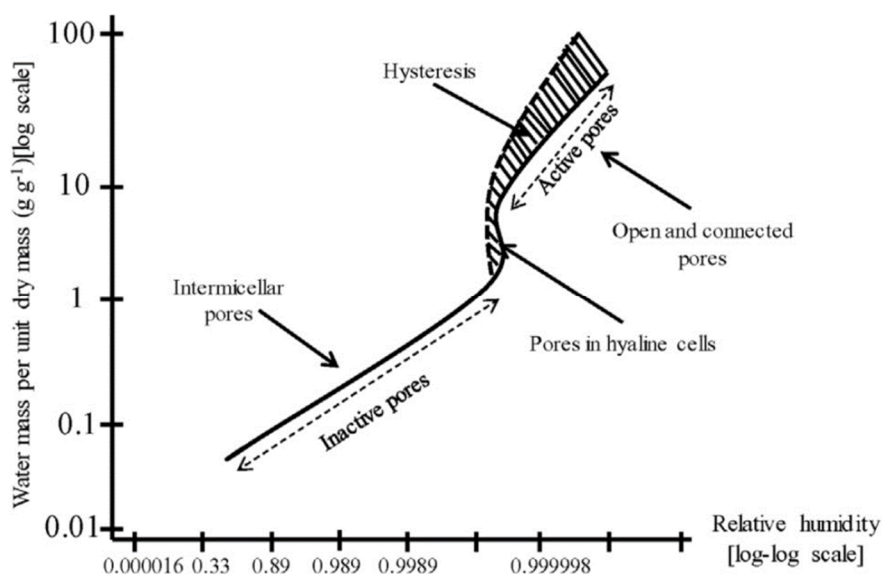


Figure 50 : Phénomène d'hystérèse apparaissant entre les phases d'humidification et d'assèchement (Razanezhad, 2016)

Comme l'indique ce graphique, le profil de déshydratation se distingue du profil de réhumidification. Ainsi l'assèchement modifie les propriétés hydrodynamiques de la tourbe. Outre la problématique de l'évolutivité du système, une question de conservation peut donc également se poser. La production d'un modèle conceptuel visant à simuler, et ainsi à prévoir, l'altération des fonctions des tourbières en fonction de la fréquence de phénomènes d'assèchement pourrait constituer une perspective d'étude. D'ailleurs l'assèchement peut avoir deux causes principales : d'une part le drainage qui préoccupe les gestionnaires et motive des travaux de restauration par le comblement des fossés de drainage (c'est le cas au Luitel et à Frasne), et d'autre part le réchauffement climatique. Coupler une évaluation économique des fonctions des zones humides, comme cela a été réalisé dans le cadre du bassin Adour-Garonne (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2009), avec une évaluation de leur altération à l'aide de modèles climatologiques, pourrait constituer une étude fort intéressante et certainement utile.

Enfin, outre les facteurs de dégradation, l'évolutivité du système peut également être liée à des facteurs de résilience telle que la relance de la turfigenèse que Thomas Jolly (2018) a d'ailleurs pu constater sur le site du Luitel et mis en avant dans ses travaux.

3. L'utilisation des données environnementales pour effectuer une modélisation : méthodologie et limites

3.1. Sélections des données et agencement

La construction d'un modèle tel que celui que nous avons réalisé est tributaire de la solidité du jeu de donnée environnemental utilisé. La première étape concernant le traitement des données consiste à rechercher une durée de simulation pour laquelle toutes les séries utilisées sont complètes, ou suffisamment complètes. Ainsi notre démarche a principalement été influencée par la période de mesure couverte par les sondes piézométriques. Certes les piézomètres manuels ont été relevés depuis 2004 et couvrent donc une période large, néanmoins le fait que les relevés soient espacés à chaque fois d'une semaine et qu'ils ne soient réalisés qu'au cours de l'été limite les possibilités de modélisation. Ces données ont toutefois apporté des informations utiles avant d'engager la modélisation. Elles nous ont par exemple permis d'établir des corrélations entre les piézomètres afin de savoir dans quelle mesure le comportement d'un piézomètre automatique pouvait être interpolé à l'entièreté d'une surface. De même certaines données hydrométéorologiques qui n'ont pas été rentrées dans le modèle n'ont pas été négligées pour autant. Elles ont été utilisées pour apporter une information sur des tendances ou des comportements et favoriser ainsi la construction des hypothèses qui précèdent la modélisation. Par exemple, nous n'avons pas utilisé les hauteurs d'eau du ruisseau de Fontfroide pour la modélisation. Pourtant ces données nous ont permis de caractériser les phénomènes d'étiage pour ce cours d'eau en déduisant son lit d'été. Une fois de plus, la mise en corrélation des données est importante car elle permet de comprendre le système.

À ce titre d'ailleurs, nous avons mis en avant la réactivité immédiate de la nappe aux précipitations à l'aide de nos données. Cette observation nous a permis de savoir rapidement dans quelle mesure nous aurions à tenir compte du coefficient d'infiltration. Théoriquement, ce constat était attendu, car la conductivité hydraulique de l'acrotelme est élevée et donc les eaux s'infiltrent rapidement. Une vérification est néanmoins utile et justifie d'ailleurs l'intérêt du pas de temps journalier. Ce pas de temps étant pertinent, les données des piézomètres équipés d'une sonde mini diver ont ainsi été nécessaires. Ces sondes prenant des mesures à un pas de temps horaire, les données recueillies ont ainsi dû être adaptées. Notre choix a été de ne retenir que les niveaux de nappe relevés à 0H00 chaque jour, car un cumul des précipitations a déjà été effectué dans les fichiers dont nous disposons, et ce cumul est calculé pour chaque journée à 0H00. Cela dit, Vensim opère ses calculs de telle manière que les flux conditionnent le niveau de nappe simulé avec un décalage d'un jour par rapport à l'observation (Fleury, 2005). La logique du logiciel est la suivante : les données de flux du jour J déterminent le niveau du jour J+1. La conception du fichier excel contenant les données agencées pour être exploitées par Vensim doit donc tenir compte de cette spécificité si le modélisateur souhaite observer une bonne superposition des tendances simulées et observées.

Enfin, concernant les piézomètres, les données dont nous disposons ne sont pas tout à fait brutes, elles ont déjà fait l'objet d'un traitement. Les sondes piézométriques mesurent en réalité la pression de la nappe et les hauteurs d'eau sont déduites d'après ces pressions et selon une méthode de conversion spécifique. À ce sujet, comme nous l'avons relevé, la hauteur du sol est variable, mais en plus de cela, il n'est pas toujours évident de la situer même sur le terrain. Faut-il considérer que le niveau du sol correspond au sommet de la végétation ? Ou bien s'agit-il du début du niveau tourbeux ? La mise en œuvre du modèle nécessite pourtant de faire un choix. Les données dont nous disposons donnaient une hauteur d'eau relative au plan de mesure que nous avons par la suite converti en hauteur d'eau relative à la surface du sol en soustrayant à ces valeurs la longueur du fil soutenant la sonde défilquée de la hauteur du tube dépassant le sol.



Figure 51 : Relevage des sondes piézométriques

Le constat de la présence d'horizons assainis nous a également amené à réajuster la hauteur de la surface du sol dans le secteur Sud-Ouest pour construire la courbe de tarissement. Cela montre d'ailleurs le lien entre l'analyse des données disponibles et l'ajustement des campagnes scientifiques en fonction des besoins déduits de cette analyse. Bien définir l'objectif d'une étude et bien connaître les données disponibles est nécessaire pour déterminer quelles nouvelles données pourraient être acquises et faire l'objet de campagnes scientifiques telles que celles que nous présentons dans la série d'annexes G. C'est ainsi par exemple que les résultats donnés par la géochimie permettront de connaître la provenance des flux et donc de clarifier le fonctionnement hydrologique de la tourbière. Ces résultats pourront également aider à déterminer la manière dont les sondes solinst seront replacées en vue d'acquérir de nouvelles informations pour approfondir l'étude du site.

Enfin certaines données utilisées dans le modèle pourraient être employées d'une façon différente pour une prochaine approche modélisatrice. Par exemple, notre première hypothèse quand nous avons constaté que nos premiers modèles cumulaient de l'eau excédentaire en hiver a été que durant cette période, les eaux stagnaient en surface à cause de leur viscosité plus élevée en cette période. La viscosité des eaux augmente effectivement quand la chaleur diminue, et nous avons supposé que cela rendait leur pénétration dans la tourbière plus difficile. Le constat de la présence d'un manteau neigeux recouvrant la tourbière pendant toute la période hivernale nous a cela dit amenés à une explication plus évidente. Néanmoins la variabilité des dynamiques d'écoulement en fonction des températures demeure un fait, les données de températures pourraient ainsi être utilisées pour développer cet aspect dans une modélisation plus complexe. La loi de Poiseuille pourrait par exemple être utilisée dans cette perspective puisqu'elle établit une relation entre la viscosité d'un fluide et débit d'écoulement.

3.2. Fiabilité des données : marges d'imprécision, potentielles défaillances techniques et substitution de données

Les données que nous avons utilisées ont été collectées à l'aide d'une série de capteurs et de sondes. Pour l'hydrologie de la tourbière, 6 sondes telles que celles qui apparaissent en figure 51 ont permis de récolter les données, et concernant les aspects météorologiques, c'est la station installée sur le site et un pluviomètre chauffant installé plus au Sud qui ont recueilli les valeurs dont nous disposons.



Figure 52 : La station météorologique de la tourbière du Col du Luitel

Le tableau suivant énumère ces capteurs et donne leur marge d'imprécision (connue grâce aux fiches techniques des différents capteurs disponibles sur les sites internet des constructeurs) :

Capteurs	Marque	Référence produit	Précision
Capteur de température (°C) & humidité relative de l'air (%) à 1,5 m du sol & abri solaire passif	Campbell Scientific Inc.	CS215	±0,3°C (à 25°C) ±0,4°C (5°C à 40°C) ±0,9°C (-40°C à +70°C)
Baromètre : pression atmosphérique (hPa)	Setra	CS100	±0,5 hPa (+20°C) ±1,0 hPa (0°C à 40°C) ±1,5 hPa (-20°C à +50°C) ±2,0 hPa (-40°C à +60°C)
Pluviomètre 400cm ² : quantité de pluie (mm)	Précis Mécanique	3029	±5% jusqu'à 150mm/h
Anémomètre/Girouette : mesure de la vitesse (m/s) & direction du vent (°/Nord) par ultrasons, à 2,3 m de hauteur	Gill	WindSonic	±2% à 12m/s
Radiamètre : rayonnement solaire global incident (W/m ²)	Apogée	CS300	±5%
Radiamètre : rayonnement solaire net (W/m ²)	Kipp & Zonen	NR Lite 2	Non renseignée
Mesure de hauteur de neige par ultrasons (m)	Campbell Scientific Inc.	SR50	±1 cm
6 Capteurs de pression installés dans piézomètres manuels existants : niveau de la nappe	Schlumberger Water Services	Mini Diver	± 0,5 cm (0-10 m)
Pluviomètre Précis Mécanique 1000 cm ² chauffant : quantité de précipitation (pluie et neige) (mm)	Précis Mécanique exploitation	3030 avec réchauffage	Non renseignée

Tableau 17 : Précision des capteurs installés sur la tourbière du Col du Luitel

Les marges d'imprécision prises séparément semblent somme toute assez minimes. Néanmoins le cumul de l'imprécision des capteurs peut donner des marges bien plus conséquentes. Mais cela n'est pas forcément problématique dans une démarche simplificatrice telle que la nôtre. En revanche les défaillances techniques (pannes d'alimentation, capteurs hors service...) peuvent être plus contraignantes car elles nous laissent des vides de données à combler. Le problème étant qu'il suffit que les données d'un seul paramètre manquent sur une certaine durée pour que la modélisation soit significativement faussée sur la durée où s'étend le vide de données, et ce malgré la complétude des autres données.

Concernant l'ETP par exemple, nous manquons de données pendant plusieurs mois au cours de l'année 2016, ce qui est véritablement problématique pour la construction de notre modèle, puisqu'en période estivale, ces valeurs sont élevées et influencent fortement les variations des niveaux de nappe. Certaines hypothèses postulent même que les variations du niveau hydrostatique seraient dans une très large part dus à l'évapotranspiration (Wastiaux, 2008), ce qui rend d'autant plus problématique cette carence. Laisser un vide pour ces données fausserait donc trop le bilan hydrologique pour que la simulation ait du sens. Nous disposons cependant des valeurs d'ETP calculées par le modèle Safran-ISBA, qui se corrèlent par ailleurs bien avec les valeurs calculées par la centrale :

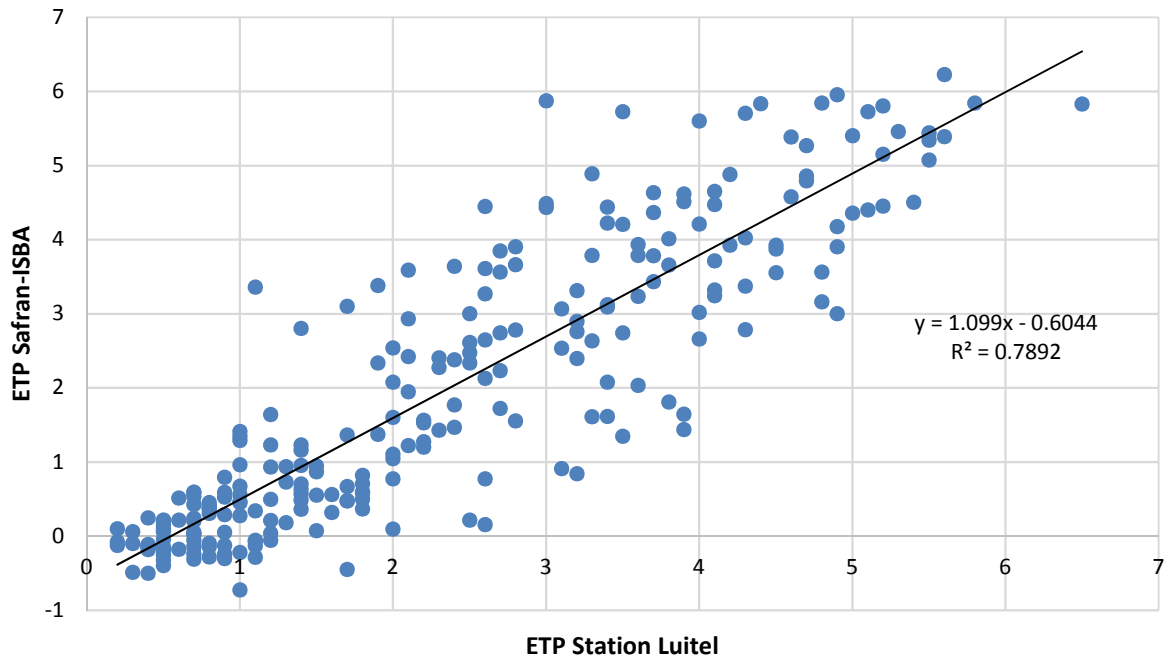


Figure 53 : Corrélation ETP Safran-ISBA - Station du Luitel

Pas ailleurs L'ETP est un paramètre qui est plus sujet à des imprécisions que les autres parce que cette valeur est calculée à partir de plusieurs paramètres mesurés. Il suffit donc qu'un seul de ces paramètres soit mal mesuré pour que le calcul soit faussé et que des valeurs aberrantes apparaissent sur le cumul. À titre d'exemple, nous pouvons observer sur l'extrait des relevés de la station météo suivant qu'une mesure de l'évaporation solaire (E_a) n'a pas été prise (« ##### »), rendant conséquemment impossible le calcul de l'ETP avec la formule de Penman (dont les termes que nous avons énoncés plus haut apparaissent en tête du tableau) :

Rn [MJ/m ² /j]	e_s [hPa]	e_a [hPa]	E_a [kg/m ² /j]	Δ [hPa/°K]	L [MJ/kg]	γ [hPa/°K]	ETP [kg/m ² /j]	Calcul CR10X	Ecart	ETP [mm]	Cumul ETP [mm]
20.247	17.30	14.00	1.11	1.112	2.47	0.58	5.77			0.0601	491.8
19.049	18.96	14.95	1.32	1.205	2.46	0.58	5.64			0.0588	491.9
18.184	20.72	15.62	1.63	1.303	2.46	0.58	5.61			0.0584	491.9
14.327	20.78	15.85	1.64	1.306	2.46	0.58	4.53			0.0472	492.0
26.641	22.80	14.42	2.66	1.417	2.45	0.59	8.46			0.0881	492.1
31.583	26.53	13.17	4.85	1.617	2.45	0.59	10.76			0.1120	492.2
33.538	28.39	12.77	6.26	1.716	2.45	0.59	11.81			0.1230	492.3
35.606	29.49	12.68	6.33	1.774	2.44	0.59	12.52			0.1304	492.4
38.881	29.74	13.50	#####	1.787	2.44	0.59	#####			#####	#VALEUR!
35.141	29.92	13.63	5.51	1.796	2.44	0.59	12.19			0.1270	#VALEUR!
23.121	27.75	13.32	5.35	1.682	2.45	0.59	8.39			0.0874	#VALEUR!
29.666	27.05	13.21	5.17	1.645	2.45	0.59	10.29			0.1072	#VALEUR!

Figure 54 : Extrait des paramètres mesurés par la station météo où un paramètre mal mesuré fausse le calcul de l'ETP

Les données pluviométriques comportent également quelques vides. Généralement, la démarche la plus adéquate est d'extrapoler les valeurs issues d'une station adjacente. En

l'occurrence, les données de Chamrousse ont été utilisées, mais la corrélation est toutefois beaucoup moins bonne que dans le cas précédent :

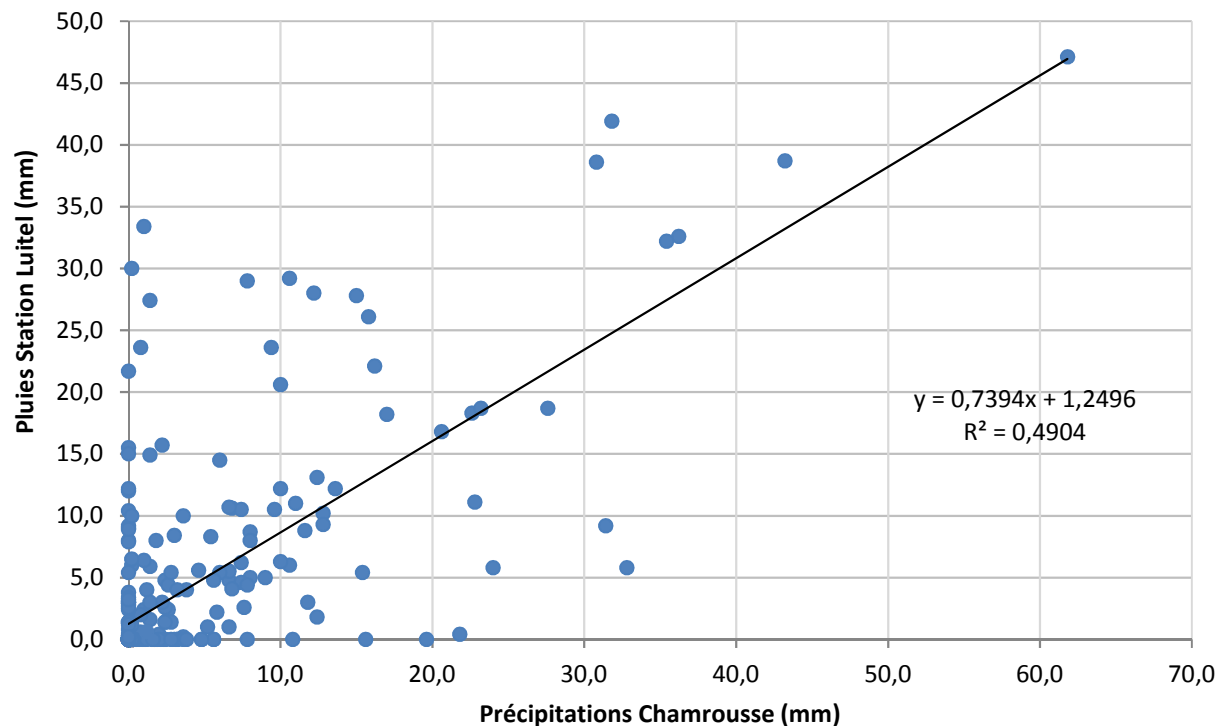


Figure 55 : Corrélation entre les pluies mesurées au Luitel et les précipitations de Chamrousse

Fort heureusement, les données pluviométriques ne nous manquaient que pour une dizaine de jours (sur 1177 simulés), l'utilisation ponctuelle des données de Chamrousse n'a ainsi pas affecté significativement nos résultats finaux.

Les données nous ont également manquées pour le piézomètre 14 sur 23 jours. Une démarche de reconstitution assez approximative serait possible en cherchant avec quel autre piézomètre le piézomètre 14 se corrèle le mieux afin de retranscrire les tendances de manière graphique. Néanmoins, comme il ne s'agit que d'une carence de 23 jours sur 1177, et que nous utilisons les données de P14 uniquement pour la vérification du modèle, nous avons choisi de laisser Vensim faire une interpolation pour combler le vide.

Cette possibilité de combler les vides permet de construire un modèle cohérent malgré les carences de données, d'autant que si les données substituées se corrélaient bien avec les données d'origine, l'imprécision du modèle est limitée et sa validation est plus aisée. La substitution est surtout utile pour ne pas passer à côté des tendances, c'est-à-dire qu'elle permet au moins de donner aux courbes de la simulation l'allure de celles de l'observation. Et elle peut être intéressante pour surmonter certaines limites, qui sont possibles même pour un jeu de données solide et complet comme le nôtre. Finalement, un travail basé sur des données environnementales implique la mise en relation des données entre elles sur un même site d'étude pour permettre l'interpolation, mais également avec d'autres données similaires issues d'autres sites afin de permettre l'extrapolation.

3.3. L'ETP, une valeur calculée à ajuster en fonction de la végétation

L'évapotranspiration est l'un des phénomènes qui mériteraient le plus d'être étudié afin d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques appliquées aux zones humides (Whitfield, 2009). La mesure de l'évapotranspiration est plus complexe que celle d'autres paramètres tels que la pluie, car elle nécessite d'être calculée à l'aide de plusieurs relevés. La formule utilisée en l'occurrence est celle de Penman que nous avons citée plus haut et qui permet de déterminer une valeur d'évapotranspiration potentielle (ETP). Le calcul de l'ETP appliqué à une tourbière est, par simplification, le même que celui appliqué à une nappe d'eau libre. Cette simplification se justifie par le fait que les tourbières soient des milieux saturés en eau lors de la majeure partie de l'année. L'eau étant la plupart du temps au niveau, voire au-dessus, de la surface, cette approche considère que l'ETP peut être assimilé à l'évapotranspiration réelle (ETR) (Laurent, 2007). Au Luitel, les tests réalisés en 2006 pour mettre en œuvre le calcul de l'évapotranspiration ont permis de montrer la bonne corrélation entre l'ETP et l'ETR :

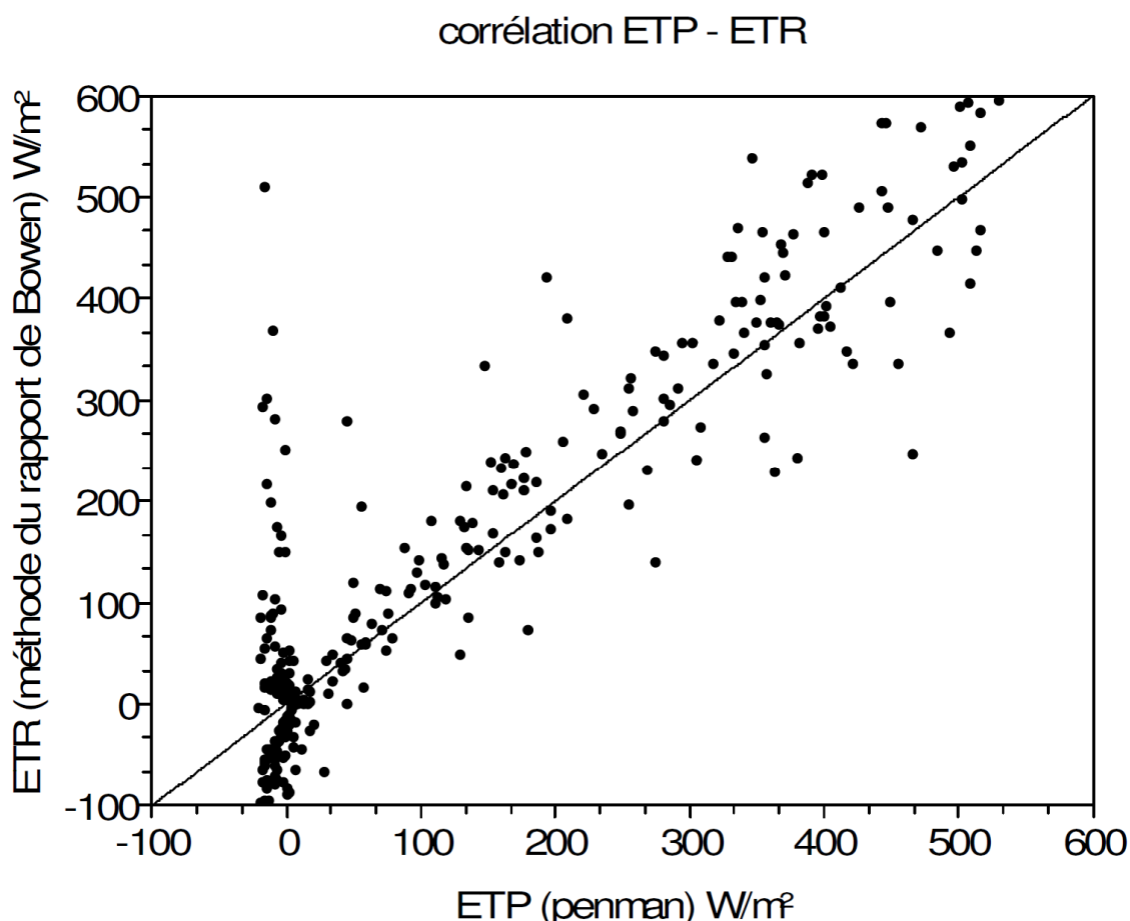


Figure 56 : Corrélation entre l'ETP et l'ETR (Cohard, 2007)

Les points qui dessinent une droite verticale correspondent à une dérive du calcul des valeurs d'ETR, la méthode appliquée étant mise en défaut pendant la période nocturne (Cohard, 2007).

La littérature scientifique montre que les valeurs d'ETP ainsi calculées correspondent bien aux valeurs d'ETR des tourbières. En revanche la comparaison entre l'ETP calculé selon cette méthode et l'ETR d'une forêt fait ressortir des valeurs d'ETR considérablement plus élevées (Wastiaux, 2008). Il semblerait donc que ces calculs doivent être ajustés en fonction du type de végétation présent sur le secteur concerné. Sur la tourbière du Col du Luitel, le secteur Sud-Est est caractérisé par un prébois de pins à crochets, tandis que le secteur Sud-Ouest est recouvert par une forêt de pins à crochets. En observant les données piézométriques, il apparaît que les battements de nappe sont légèrement plus amples dans le secteur Sud-Ouest (P13) :

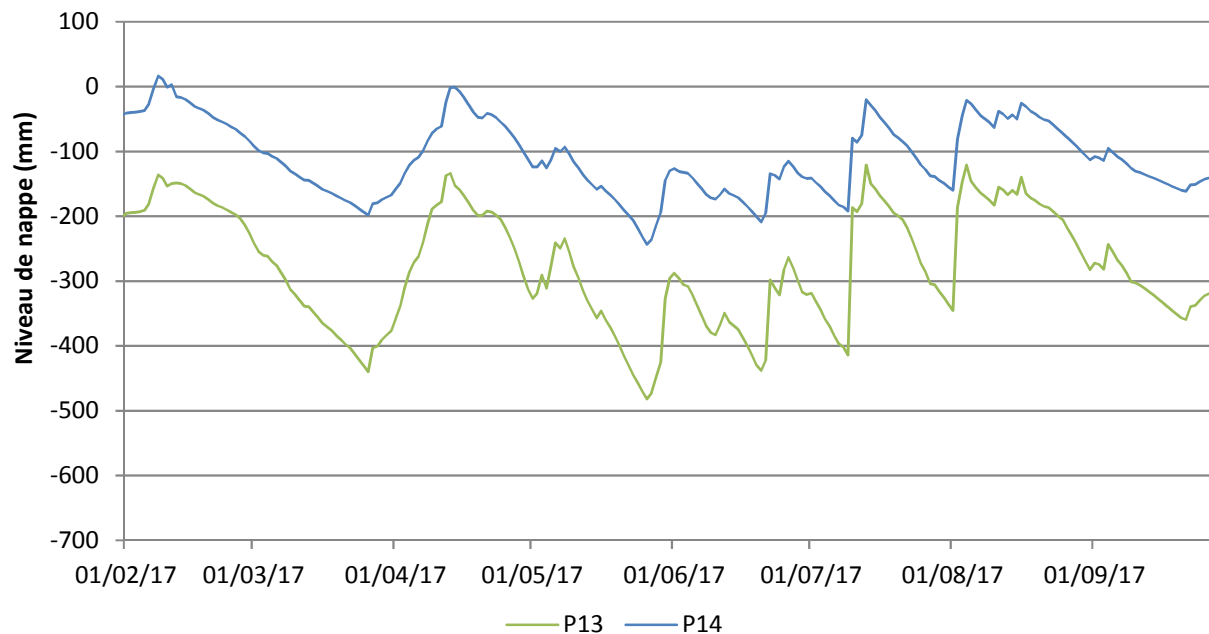


Figure 57 : Comparaison des niveaux de nappe de P13 et de P14

Nous supposons que cette différence est due à la forêt de pins qui draine d'avantage d'eau et plus en profondeur. Par ailleurs, nous avons pu observer sur le terrain que les sphaignes blanchissaient avec la hausse des températures. Ce blanchissement atteste en fait d'une insuffisance d'eau dans le réservoir tourbeux pour permettre une alimentation correcte de ces espèces végétales. Les sphaignes semblent en effet être découplées de la nappe quand la profondeur de celle-ci est à plus de 20 cm sous la surface, elles ne dépendent alors plus que des conditions atmosphériques (Whitfield et al., 2009). Les sphaignes ne puisent pas de l'eau aussi profondément que les arbres et sont donc plus rapidement en état de stress hydrique. La baisse des niveaux de nappes peut donc avoir pour effet d'amortir l'évapotranspiration (Bourgault, 2016). Il serait ainsi possible d'envisager un modèle dans lequel les valeurs d'ETP calculées seraient soumises à un effet de seuil qui s'enclencherait selon la hauteur de la nappe par rapport à la profondeur à laquelle les plantes sont capables de puiser de l'eau. Cette piste serait intéressante à suivre, car en réduisant la proportion de l'évapotranspiration, la part des écoulements prendrait plus d'importance. Dans ce cas les valeurs de débits de soutien d'été pourraient éventuellement être revues avec une très légère hausse. D'où, une fois de plus, l'intérêt de poursuivre nos travaux en développant de nouveaux scénarios.

4. Conclusion : des résultats significatifs dans un contexte local et obtenus par une approche simplificatrice et perfectible

Les valeurs que notre modèle nous a permis d'obtenir sont soumises à comparaisons afin de mieux comprendre ce qu'elles représentent. La première comparaison est réalisée entre les débits moyens journaliers de soutien d'étiage et les débits moyens journaliers de Fontfroide pendant les trois périodes d'étiage estivales que notre modèle a fait ressortir. Pour l'été 2014, les débits de soutien d'étiage représentent 2,52 % de ceux de Fontfroide, pour l'été 2015, 0,53 % et pour l'été 2016, 1,45 %. Il est par ailleurs notable que quantitativement, les débits de soutien d'étiage s'amenuisent alors que les niveaux de Fontfroide baissent. La sécheresse prévenant la possibilité de réplétion des réservoirs tourbeux, ceux-ci se tarissent naturellement et n'apportent qu'une quantité de plus en plus faible d'eau. La comparaison de nos valeurs peut également être faite avec d'autres débits, ce qui nous permet par ailleurs de proposer un recul réflexif sur nos résultats et notre méthode. Le QMNA5 est généralement utilisé afin d'apprécier l'étiage, néanmoins notre série de données, trop courte, rend son évaluation mal aisée et peu pertinente. La comparaison de nos résultats avec le module interannuel ne nous semble également intéressante qu'à titre indicatif. De plus, notre évaluation ne saurait faire sens qu'à l'échelle à laquelle notre travail a été réalisé. Certes des débits d'étiage sont évalués dans le contexte départemental, et les enjeux du soutien d'étiage ressortent dans le SAGE du bassin versant Drac-Romanche, mais les ordres de grandeurs sont tout autres à cette échelle et empêchent toute comparaison. En outre, l'analyse de nos résultats nous permet également d'envisager des pistes d'améliorations qui pourront être utilement mises en œuvre afin de consolider ceux-ci, et surtout, afin de mieux traduire en système la réalité saisie d'après l'observation. Nos courbes de comparaison entre la simulation et l'observation montrent que le fonctionnement hydrologique de la tourbière en période hivernale pourrait être transcrit de manière plus fine. Le réservoir d'eau hivernal à vidange lente que nous avons mis en place nous a néanmoins permis de modéliser rapidement un mécanisme complexe. Ses imprécisions ne nuisent pas à nos résultats puisque nous évaluons l'étiage pour la période estivale. Le modèle semble, pour certaines périodes, se rapprocher de très près de la réalité, tandis que pour d'autres il accuse d'un léger décrochage. Dans ce dernier cas, les écoulements nous semblent avoir été surévalués et la simulation serait probablement meilleure si les réservoirs tourbeux étaient scindés en deux : un réservoir d'eau utile où l'ETP serait puisé, et un réservoir d'eau libre où les écoulements auraient lieu. Notre démarche est cela dit basée sur des simplifications qui sont acceptées dans une certaine mesure. Pour permettre la mise en œuvre de notre modèle, des valeurs de porosité efficace ou de conductivité hydraulique uniques ont ainsi été affectées à l'ensemble des différentes aires modélisées. Cela dit, notre travail de terrain nous a permis de faire le constat de la complexité du site et des processus qui l'animent. À titre d'exemple, Thomas Jolly a pu mettre en avant certains indices de résiliences, tels que la relance de la turfigenèse, ou certaines traces de dégradations, telles que la présence d'histosols assainis qui affectent le comportement hydrologique du site. De plus la géométrie des aires modélisées où les écoulements ont lieu a dû être simplifiée pour être traduite sous forme de sections rectangulaires. La géométrie est en réalité plus complexe, d'autant qu'elle est variable avec l'effet de respiration des tourbières que nous n'avons pas pris en compte. Ces

facteurs de complexité sont certes occultés par le modèle mais sont tout de même considérés pour les éclairages intéressants qu'ils apportent sur la fonctionnalité du site. Ils justifient par ailleurs la nécessité de la démarche itérative qui permet la construction progressive du modèle. Ils montrent également l'intérêt d'une itération entre la théorisation du fonctionnement hydrologique et des observations de terrains plus concrètes qui sont en l'occurrence relatives à l'approche de Thomas Jolly. La construction de notre modèle est enfin très largement tributaire des données dont nous disposons, d'autant que le modèle est conditionné par la manière dont nous traitons ces données. Il nous a ainsi fallu réorganiser ces données sur un pas de temps journalier, qui est celui de Vensim, et également combler certains vides liés à des défaillances techniques. Le modèle Safran-ISBA a ainsi pu être utilisé pour remplacer des valeurs d'ETP absentes, d'autant que la corrélation des valeurs de ce modèle avec celles calculées par la centrale installée dans la station du Luitel est tout à fait correcte. Quant à la pluie, les données de la station de Chamrousse, adjacente, située à 5 kilomètres, ont été utilisées en cas de manque de données. Fort heureusement, ces manques se sont limités à moins d'une dizaine de jours car les données de la station de Chamrousse ne se corrélaient pas très bien avec celles du Luitel. Certaines données n'ont pas été utilisées dans Vensim, mais ont tout de même servi à élaborer notre approche. La mise en corrélation des piézomètres d'un même secteur nous a par exemple permis de savoir dans quelle mesure tel piézomètre pouvait être représentatif du comportement de la nappe sur une aire d'étude et l'analyse des hydrogrammes de Fontfroide nous a permis de déduire le lit d'étiage. Corréler les données est donc à la fois utile pour combler les vides par extrapolation, ou pour généraliser une tendance ponctuelle sur une aire par interpolation. L'imprécision liée à la mesure des données peut également être un facteur limitant la qualité des résultats. Les capteurs ont des marges d'imprécisions qui paraissent faibles prises séparément. En revanche leur cumul, lié à la mise en relation mathématique des divers paramètres mesurés au sein d'une formule déterminant les variations des niveaux des réservoirs, est susceptible de donner une marge assez importante. Cela dit cette imprécision ne nous semble compromettre qu'assez peu une démarche aussi simplificatrice que la nôtre. Un autre facteur d'imprécision provient de l'élaboration du calcul de l'ETP qui repose justement sur une relation mathématique, en l'occurrence la formule de Penman, entre plusieurs paramètres mesurés par la station météorologique. Le calcul de la centrale est cela dit extrêmement proche de l'ETR. Néanmoins, ces valeurs devraient peut-être être pondérées en fonction de type de végétation. L'observation des données piézométriques révèle d'ailleurs des battements de nappes plus importants dans le secteur de la pinède que dans celui du prébois ou de la dépression à Scheuchzérie, et pour cause, il y a fort à parier que les arbres drainent d'avantage d'eau et plus en profondeur grâce à leurs racines. D'ailleurs les variations des hauteurs de nappe sont susceptibles de soumettre l'évapotranspiration à un effet de seuil, qui correspond à la profondeur à laquelle les espèces végétales sont capables de puiser de l'eau et ainsi d'enclencher le phénomène d'évapotranspiration.

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

Conclusion générale : quelle évaluation pour quelles perspectives ?

Le présent mémoire propose une évaluation quantitative des débits de soutien d'étiage fournis par la tourbière du Col du Luitel à son exutoire grâce à la modélisation informatique. Nos recherches s'inscrivent ainsi dans celles du projet ZABR / AE-RMC dont l'intitulé est le suivant : « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de tête de bassin versant dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône ». L'objet de ces recherches est de préciser le rôle de soutien d'étiage des zones humides qui est de plus en plus nuancé par la littérature scientifique.

Nous avons ainsi réalisé un état de l'art de trois thématiques fondamentales afin de bien cerner le sujet : les zones humides, en particulier les tourbières, le soutien d'étiage et la modélisation. Nous retenons des zones humides qu'il s'agit de milieux divers et fragiles dont protection est justifiée par les services écosystémiques qu'elles rendent aux sociétés et à la valeur socio-économique de ces services. Plusieurs typologies permettent de cerner rapidement des catégories de zones humides selon divers aspects. Notre intérêt s'est porté plus particulièrement sur les quatre aspects suivants : l'écologie, la pédologie, l'hydrologie et la fonctionnalité. Ces aspects entretiennent entre eux un lien étroit et doivent être bien appréhendés dans l'optique d'une modélisation. Notre étude s'est plus particulièrement intéressée aux tourbières car elles représentent l'essentiel des zones humides de tête de bassin versant. Les typologies d'intérêt pour appréhender ces milieux sont celles qui les classent en fonction de leur origine et de leur source dominante d'approvisionnement en eau. Concernant le soutien d'étiage, nous retenons qu'il s'agit d'une notion empruntée à l'hydraulique et à laquelle on se réfère dans le cadre de la gestion quantitative des ressources en eau. La mesure de soutien d'étiage la plus connue est le lâcher de barrage. Néanmoins, le fait que ce service puisse être assumé naturellement peut susciter un intérêt pour des raisons économiques. Enfin nous avons pu retenir de la modélisation informatique qu'il s'agit d'une approche simplificatrice découlant de la pensée systémique, pensée qui vise à représenter la réalité via la mise en interrelation d'éléments qui constituent ainsi un ensemble cohérent, en d'autres termes un système. Parmi les nombreuses approches possibles, c'est la réalisation d'un modèle « conceptuel », ou « paramétrique », ou encore « réservoir » qui a été retenue. Cette approche permet la construction rapide de modèles permettant de simuler le fonctionnement d'un système à l'aide d'équations simplifiées. Les éléments de ce langage de modélisation, ou blocs de construction, ne sont qu'au nombre de quatre, il s'agit des variables d'état (ou réservoirs), des flux, des variables auxiliaires et du canal d'information.

Le système que nous avons cherché à représenter est la tourbière du Col du Luitel et son bassin versant. Cette tourbière fait partie de la Réserve Naturelle du Luitel, elle se situe en Isère, à 25 km au Sud-Est de Grenoble. Sa superficie est de 10 hectares, et le bassin versant dans lequel elle s'inscrit est de 555 hectares. La tourbière du Col du Luitel est comprise dans le massif de la chaîne de Belledonne et culmine à environ 1260 m. Elle est sous l'influence

d'un climat frais et humide de type à la fois océanique et montagnard. Sa morphologie peut se résumer à deux cuvettes d'une profondeur maximale d'environ 10 mètres remplies de tourbe et séparées par un exutoire, le ruisseau de Fonfroide. Au Sud, un ruisseau nommé source Pezanti constitue un exutoire secondaire. Pour ce qui est des origines de cette tourbière, elle est qualifiée de limnogène, c'est-à-dire qu'elle s'est constituée suite à l'atterrissement progressif des pièces d'eau. Et en ce qui concerne sa source d'approvisionnement dominante en eau, elle est qualifiée d'ombrotrophe, donc alimentée par des eaux de pluie, et partiellement minérotrophe, donc alimentée par des eaux chargées en minéraux provenant de la source Pezanti et de Fonfroide. Enfin cette tourbière est bien instrumentée, elle est en effet équipée d'une station météorologique et d'un réseau de 20 piézomètres, dont 6 sont équipés de sondes mini-divers. Ce sont les données issues de cette instrumentation qui nous ont permis de construire notre modèle. Ce modèle, qui couvre une période de 3 ans (2014 - 2017), a été construit grâce à Vensim qui permet de simuler et d'analyser les systèmes modélisés. Nous avons également eu recours à ArcGis, notamment pour le calcul des sous bassins versants et la création d'une carte piézométrique. L'objet de notre modèle a été dans un premier temps de simuler au mieux les variations des niveaux de nappe. Notre méthode a consisté en l'implémentation progressive des flux qui conditionnent les niveaux des réservoirs où sont simulées les variations des hauteurs d'eau. Notre modèle se constitue ainsi de trois réservoirs représentant le Nord de la tourbière, le Sud-Ouest et le Sud-Est. Le comportement de la nappe de ces secteurs a été assimilé à celui des piézomètres 3, 13 et 14 que nous avons considérés comme étant représentatifs, étant donné qu'ils se corrèlent bien avec les autres piézomètres de leur secteur. Concernant les flux, les données de pluies et d'ETP recueillies par la station ont été ramenées à un pas de temps journalier avant d'être implémentés. Le ruissellement a pu être estimé grâce aux calculs de surfaces sous ArcGis et à l'application d'un coefficient de ruissellement issu de la littérature scientifique. Le flux neigeux a été implémenté d'une façon spécifique, les données issues du pluviomètre chauffant du Luitel ont été utilisées pour alimenter un réservoir d'hiver qui se vidange lentement dans la tourbière, de manière à reproduire le manteau neigeux qui recouvre le site de décembre à avril. Enfin les écoulements sortants ont été simulés grâce à l'équation de Boussinesq (1877) qui graphiquement prend la forme d'une exponentielle qui reflète le tarissement d'un réservoir poreux. L'hydrodynamisme du système a également été simulé à l'aide des valeurs de porosité efficace et de conductivité hydraulique issues de la littérature scientifique. Les variations des niveaux de nappes simulées pour chaque secteur ont ensuite été comparées avec les données piézométriques. L'indice de corrélation que nous avons obtenu étant supérieur à 0.8, nous avons pu considérer que le modèle pouvait être validé et qu'ainsi nous pouvions procéder à l'évaluation des débits de soutien d'étiage. Le calcul permettant cette évaluation a été réalisé à partir des écoulements sortant des trois réservoirs et seulement lorsqu'un certain seuil qui représente l'étiage était franchi. D'après ces calculs, nous avons pu retenir qu'au mieux, le débit moyen journalier de soutien d'étiage s'élève à 0.38 L/s.

Pour interpréter nos résultats, nous avons proposé une comparaison des débits moyen journaliers de soutien d'étiage avec les débits moyen journaliers de Fontfroide, car cette comparaison nous paraît être la plus pertinente. Pour trois périodes d'étiage, survenant au cours des étés des trois années simulées, les pourcentages obtenus sont faibles, dans l'ordre chronologique : 2,52 %, 0,53 % et 1,45 %. L'étiage est généralement déterminé par le QMNA5, mais la longueur temporelle de notre série de données ne nous permet pas d'évaluer ce débit de référence de manière satisfaisante. Le même raisonnement est

applicable au module interannuel, cela dit nous l'avons tout de même proposé à titre indicatif. Notre méthode d'évaluation de l'étiage s'est donc appuyée sur la définition du lit d'étiage du ruisseau de Fontfroide afin de déterminer le moment auquel ce ruisseau n'était plus alimenté que par des écoulements de base. L'observation de l'état de charge des réservoirs tourbeux à ce moment-là nous a permis de déterminer des seuils à partir desquels nous pourrions considérer que la tourbière soutien l'étiage. Les débits que notre modèle a calculés ne semblent faire sens qu'à l'échelle locale. En effet, des enjeux liés à l'étiage apparaissent à l'échelle du département mais les ordres de grandeurs sont tout autres, l'étiage étant évalué pour des cours d'eau dont les débits sont bien plus conséquents que ceux de Fontfroide et qui supportent les activités humaines de façon beaucoup plus large. Nous suggérons également quelques pistes d'amélioration de notre travail qui pourraient permettre d'affiner les résultats et la compréhension de l'hydrosystème modélisé sur le plan fonctionnel. Ces améliorations concernent le réservoir neigeux qui certes reproduit les tendances réelles de façon satisfaisante pour notre démarche, mais qui en dehors du cadre donné par nos objectifs, qui concernent particulièrement la période estivale, est finalement assez imprécis. Il serait également intéressant de décomposer les réservoirs tourbeux en deux, l'un contiendrait les eaux utiles, ou liées, qui alimentent la végétation et dans lesquels l'évapotranspiration serait puisée, et l'autre les eaux libres qui traduiraient plus directement les variations des niveaux de nappe. L'évolutivité des systèmes tourbeux n'a également pas été prise en compte, les mécanismes de respiration des tourbières pourraient par exemple être intégrés, d'autant qu'ils font varier les niveaux du sol. Par ailleurs, cette notion d'évolutivité nous permet de remarquer que d'autres modélisations plus ambitieuses pourraient être suggérées. Elles intègreraient par exemple les facteurs de dégradations tels que le drainage ou le réchauffement climatique et seraient mises en lien avec une évaluation économique, de sorte que l'altération des fonctions puisse être simulée et ses conséquences évaluées économiquement. Enfin, une dernière limite à notre méthode provient des données. Celles-ci sont parfois incomplètes, une substitution est alors nécessaire, à partir de données issues d'autres stations ou bien de modèles climatologiques. Les données mesurées comprennent de plus un facteur d'imprécision lié au capteurs. Et enfin, parmi ces données, l'ETP résulte d'un calcul effectué par la centrale intégrée à la station du Luitel, néanmoins ces valeurs manquent d'être ajustées en fonction des secteurs et de la végétation qui les caractérise. Tous ces éléments font par ailleurs ressortir que notre modèle s'est finalement construit en admettant un certain nombre d'hypothèses. Une perspective intéressante pour la suite serait de construire de nouveaux scénarios permettant de tester de nouvelles hypothèses (pertes souterraines, apports souterrains ou latéraux...)

Il ressort donc de notre étude quelques résultats dont nous espérons qu'ils pourront faire avancer la connaissance des zones humides, mais qui sont toutefois à interpréter avec un certain recul de par le fait qu'ils découlent d'un choix méthodologique qui nous est apparu pertinent mais qui n'a pas pour autant vocation d'absolu. Nous nous sommes en effet attachés à montrer que le travail avec des données environnementales induisait nécessairement des biais et un certain nombre d'incertitudes. Certes ces incertitudes peuvent être jugées comme acceptables dans notre démarche simplificatrice mais elles engagent tout de même à une certaine prudence quant à l'utilisation de nos résultats. L'intérêt de ce travail réside donc peut-être surtout dans la démarche qui nous a permis d'aboutir aux résultats que nous avons présentés, et le fait qu'elle puisse servir pour d'autres études plus complexes. Cela pourrait éventuellement être le cas pour le site de Frasné, dans le Jura, qui fait également partie des sites retenus comme références dans le cadre du projet

ZABR / AE-RMC. Il s'agit en l'occurrence d'un complexe tourbeux installé dans une dépression comblée par des formations glaciaires. Le site comprend 37 tourbières pour une surface d'environ 1057 hectares. Notre démarche pourrait ainsi servir de base pour une modélisation d'un système plus grand et plus composite tel que celui de Frasné. Enfin, de manière plus générale, les aspects réflexifs et les choix méthodologiques qui ont été ici développés pourront peut-être contribuer à avancer dans la connaissance scientifique en servant de points d'appuis pour d'autres démarches interdisciplinaires. A ce propos, l'argumentaire de conservation des zones humides par la mise en exergue de leur valeur socio-économique nous apparaît comme une occasion de concilier l'écologie et l'économie. La racine oikos, « maison », sur laquelle ces deux termes sont construits, nous démontre d'ailleurs qu'elles sont fondamentalement liées. La modélisation et le systémisme dont cette démarche procède offrent des perspectives d'interdisciplinarité radicale qu'il pourrait être intéressant d'exploiter afin de faire converger ces deux aspects cruciaux pour l'équilibre de nos sociétés.

Bibliographie

Notre bibliographie est classée en 4 thématiques. D'abord tout ce qui a trait aux zones humides de façon générale, puis les documents concernant les tourbières, ensuite les documents en lien avec la modélisation et enfin les documents qui concernent le Luitel.

- **Zones humides :**

AFES, 2008. Référentiel Pédologique 2008, Baize D., Girard M.-C. (coord.), Éditions Quae, Versailles. 432 p.

AGENCE DE L'EAU ADOUR-GARONNE, 2009. Évaluation économique des zones humides. 10p.

AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE, 2002. Les fonctions des zones humides. 25p.

ACREMAN M.-C., MILLER F., 2006. Hydrological impact assessment of wetlands. 31p.

BERNARD G., 2016. Panorama des services écosystémiques des tourbières en France. Quels enjeux pour la préservation et la restauration de ces milieux naturels ? Pôle-relais Tourbières – Fédération des Conservatoires d'espaces naturels. 47p.

BISSARDON M., GUIBAL L., RAMEAU J.-C. (dir.), 1997. Corine Biotopes. Version originale. Types d'habitats français. 175p.

GILVEAR D.-J., MCINNES R.-J., 1994. Wetland hydrological vulnerability and the use of classification procedures: a Scottish case study. *Journal of Environmental Management*, 42, 403-414.

GILVEAR D.-J., BRADLEY C., 2009. Hydrological dynamics II : groundwater and hydrological connectivity. In *The Wetlands Handbook* (eds E. Maltby & T. Barker), pp. 169-193. Wiley-Blackwell, Chichester, UK

GRAILLOT D., PARAN F., RE 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. 235p.

HOWIE S.-A., HEBDA R.-J., 2018. Bog surface oscillation (mire breathing): A useful measure in raised bog restoration. *Hydrological Processes*. ;32:1518–1530.

LOUVEL-GLASER J., GAUDILLAT V., 2015. Correspondances entre les classifications d'habitat CORINE Biotopes et EUNIS. 119p.

LOUVEL-GLASER J., GAUDILLAT V., PONCET L. (dir.), 2013. EUNIS. Classification des habitats. Traduction française. Habitats terrestres et d'eau douce. 302p.

MEDDE, GIS Sol, 2013. Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. 63p.

POLLET E., 2009. Vademecum des sols hydromorphes. Aide à l'identification des zones humides par les sols. 37p.

SMITH R-D., NOBLE C-V., BERKOWITZ J-F., 2013. Hydrogeomorphic (HGM) Approach to Assessing Wetland Functions: Guidelines for Developing Guidebooks (Version 2). Wetlands Regulatory Assistance Program, US Army Corps of Engineers, 182p.

US EPA, 2015. Connectivity of Streams and Wetlands to Downstream Waters: A Review and Synthesis of the Scientific Evidence (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-14/475F

- **Tourbières :**

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

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.

BOURGAULT M-A., LAROCQUE M., GARNEAU M., 2016. Quantification of peatland water storage capacity using the water table fluctuation method. *Hydrological Processes.* 41p.

CHOLET J., MAGNON G., 2010. Tourbières des montagnes françaises - Nouveaux éléments de connaissance de réflexion et de gestion. Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels, Pôle-relais tourbière. 188p.

COMONT L., 2006. Étude des processus de stockage de la matière organique et de régénération des tourbières dégradées après exploitation : sites du Russey (Jura français), de la Chaux d'Abel (Jura suisse) et de Baupte (Cotentin, France). *Géochimie. Université d'Orléans. Français.* 228p.

CUBIZOLLE H., SACCA C., TOURMAN A., PORTERET J., THÉBAUD G., 2004. Les tourbières du haut bassin versant de la Loire (Massif central oriental) », *Noréis*, 192, 95-115.

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

FRANCEZ A.J., 2000. La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum, de la sphaigne à l'effet de serre. *Année Biologique*, (39): 205-270.

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*, Vol. 29, 1, 23-35, 14p.

GOLUBEV V., WHITTINGTON P., 2018. Effects of volume change on the unsaturated hydraulic conductivity of Sphagnum moss, *Journal of Hydrology*, Volume 559, Pages 884-894.

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

INGRAM, H. A., 1978, Soil layers in mires : function and terminology. *Journal of Soil Science*, 29: 224-227.

LANDRY J., ROCHEFORT L., 2001. Le drainage des tourbières : impacts et techniques de remouillage. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec, 2011. 53 p.

MANNEVILLE O., 2001. La diversité des tourbières en France et leur prise en compte dans les politiques de conservation. 7p.

MANNEVILLE O., VERGNE V., VILLEPOUX O., 2006. Le Monde des tourbières et des marais. 2ème éd. : Delachaux et Niestlé, 320 p.

MENBERU M-W., 2018. Hydrology of peat-dominated headwater catchments. Theories and empirical analysis of the impacts of anthropogenic disturbance. University of Oulu Graduate School; University of Oulu, Faculty of Technology. Acta Univ. Oul. C 661.

PORTERET J., 2008 Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif Central. *Geography*. Université Jean Monnet - Saint-Etienne. French. 431p.

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

REZANEZHAD F., PRICE J-S., QUINTON W-L., LENNARTZ B., MILOJEVIC T., VAN CAPPELLEN P., 2016. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology* n°429, 75–84, 10p.

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

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

WHITFIELD P-H., ST-HILAIRE A., VAN DER KAMP G., 2009. Improving hydrological previsions in peatlands. 12p.

- **Hydrologie :**

AGENCE DE L'EAU RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE, SDAGE 2016-2021. 512p.

AGENCE MTDA, 2017. Évaluation environnementale du SAGE Drac-Romanche. 213p.

BARNES B. S., 1939. The structure of discharge-recession curves, *Eos Trans. AGU*, 20(4), 721-725.

BEN AMOR M-F., 2010. Étude de la protection de la commune de BOUARFA (Blida) contre les inondations, *Projet de fin d'étude, ingéniorat, ENSH, BLIDA, Algérie*.

BOURON G., 2013. Mécanismes et effets de la fonte des accumulations neigeuses sur le fonctionnement hydrologique du Lignon du Forez, Massif Central, France. *Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*. 449p.

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

BRODIE R-S., HOSTELTER S., 2005). A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. 13p.

DEWANDEL B., LACHASSAGNE P., BAKALOWICZ M., WENG Ph., AL-MALKI A., 2002. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs, Application to the Oman ophiolite hardrock aquifer, *Journal of hydrology*, 274, 248-269.

DIREN, 2001. Les débits d'étiage en Rhône-Alpes. 14p.

LANG C., GILLE E., 2006. Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Norois*, 201, 31-43.

OMM, 2012. Guide des pratiques hydrologiques. Volume I. Hydrologie – de la mesure à l'information hydrologique. 322p. *Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques. Sixième édition*. 328p.

OMM, 2014. Guide des pratiques hydrologiques. Volume II. Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques. Sixième édition. 328p.

SIE, 2017. Glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques. 682p.

MUSY A., HIGY C., REYNARD E., 2014, *Hydrologie 1 - Une science de la nature, une gestion sociétale*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 489 p.

- **Modélisation :**

BRADLEY C., 1996. Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire. *Journal of Hydrology - J HYDROL.* 185. 87-114.

CABALLERO Y., 2001. Modélisation des écoulements d'origine pluvio-nivo-glaciaire en contexte de haute montagne tropicale : application à la haute vallée du Zongo (Bolivie). *Montpellier : ISTEEM*, (24), 244 p.

DE ROSNAY J., 1975. *Le microscope. Vers une vision globale*. Seuil. 296p.

DEATON M-L., WINEBRAKE J-J. 2000. *Dynamic modeling of environmental systems*, Springer-Verlag Publication, New York, USA.

- DIMITROV D-D., BHATTI J-S., GRANT R-F., 2014. The transition zones (ecotone) between boreal forests and peatlands : Modelling water table along a transition zone between upland blackspruce forest and poor forested fen in central Saskatchewan. 14p.
- ELSHORBAGY A., JUTLA A., KELLS J., 2007. Simulation of the hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics, *Hydrological Sciences Journal*, 52:3, 538-562.
- FLEURY P., 2005. Sources sous-marines et aquifères karstiques côtiers méditerranéens. Fonctionnement et caractérisation. Sciences de l'environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2005. Français.
- FORRESTER J-W., 1984. Principes des Systèmes. 3ème édition. Presses Universitaires de Lyon.
- GARCIA F., 2016. Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. *Hydrologie*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. Français.
- GARCIA J-M., 2017. System dynamics. Theory and exercices. New edition. 294p.
- GNOUMA R., 2006. Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron. 445p.
- GRAILLOT D., PARAN F., 2011. Organisation des systèmes naturels et anthropiques. Cours électif. 143p.
- HREICHE A., 2003. Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen. *Hydrologie*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. Français.
- KESHTA N., ELSHORBAGY A., CAREY S., 2009. A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- KONG A SIOU L., 2011. Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). *Hydrologie*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. Français. 231p.
- LEWIS C., ALBERTSON J., ZI T., XU X., KIELY G., 2013. How does afforestation affect the hydrology of a blanket peatland? A modelling study. *Hydrological Processes*. 12p.
- MIRCHI A., 2013). System dynamics modeling as a quantitative-qualitative framework for sustainable water resources management: insights for water quality policy in the great lakes region. 207p.
- PROVITOLLO D., 2006. La dynamique des systèmes selon J.W. Forrester. *Hypergeo*, Libergéo. 4p.
- SKYTTNER L., 1996. General system theory. Ideas and application. 472p.

VAN LOON A-H., SCHOT P-P., GRIFFIOEN K., BIERKENS M-F-P., BATELAAN O., WASSEN M-J., Throughflow as a determining factor for habitat contiguity in a near-natural fen, *Journal of Hydrology*, Volume 379, Issues 1–2, 2009, Pages 30-40.

VENTANA SYSTEMS INC., 1998. VENSIM®. Ventana Simulation Environment. Reference Manual. Harward.

VON BERTALANFFY L., 1993, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Paris.

- **Tourbière du Luitel :**

BARFÉTY J-C. et al., 1972. Carte géologique détaillée de la France à 1/50.000°, feuille VIZILLE, 1° édition (lever partiel) B.R.G.M., Orléans.

BIJU-DUVAL J., 1983. Examen des sources du versant Sud du Col Luitel. 5p.

BIJU-DUVAL J., 1994. Traçage du 01/08/94 sur les sources Manquat. Buissonnière et les Bits. 4p.

BIJU-DUVAL J., 2001. Observations réalisées sur des captages à l'occasion des traçages dans les ruisseaux de Rambert et de Fontfroide. 5p.

COHARD J-M., BETOUX R., 2007. Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du Luitel, Rapport intermédiaire N°3 : Mesures d'évapotranspiration. LTHE Grenoble, 6p.

DESPLANQUE C., 2011. Plan de Gestion 2011-2020. Plan de Gestion. 113p.

DESPLANQUE C., GARAMBOIS S., 2010. Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière ombrotrophe du Luitel au moyen de méthodes géophysiques. *Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald*, n° 15, pp. 305-3015.

GARAMBOIS S., 2008 Tourbière ombrotrophe du Col Luitel, Caractérisation géologique et hydrologique 3D de la tourbière : apports du GPR. Compléments géophysiques. Rapport de synthèse. 21p.

GARAMBOIS S., CLOAREC D., 2006. Acquisitions géophysiques au Lac Luitel. 14p.

GUÉDRON S., AMOUROUX D., SABATIER P., DESPLANQUES C., DEVELLE A-L. et al., 2016. A hundred year record of industrial and urban development in French Alps combining Hg accumulation rates and isotope composition in sediment archives from Lake Luitel. *Chemical Geology*, Elsevier, 431, pp.10--19.

GUITER F. et ali., 2015. La Réserve Naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la Nature. 22p.

HUSTACHE E., 2004. Étude hydrologique de la tourbière du Col, Réserve Naturelle Nationale Lac Luitel. 61p.

JOLLY T., 2018. Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la tourbière de la Réserve Naturelle Nationale du Lac Luitel. 167p.

LAURENT J-P., 2007 Tourbière ombrotrophe du col Luitel - Vers une caractérisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière : mesure des teneurs en eau, suivi du niveau de la nappe et estimation des flux. Rapport de synthèse 2007. S.I., LTHE Grenoble, 13 p.

MANNEVILLE C., 2016. Étude préalable aux travaux d'effacement des drains dans la réserve naturelle nationale du lac Luitel. Soutenance de mémoire.

RAVATIN M., 2017. Analyse hydro-climatique d'une tourbière acide à sphaignes, Réserve Naturelle du Lac Luitel. 97p.

SARROT-REYNAULD J., 1972. Hydrologie du massif de Chamrousse, Grenoble, Revue de Géographie Alpine, Tome 60, pp 445-452.

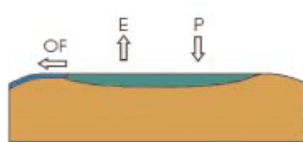
Annexes

Les annexes ici présentées ont toutes une référence dans le corps de notre document. Le groupement par lettres alphabétiques permet de faire ressortir des unités cohérentes et ainsi de favoriser la lecture.

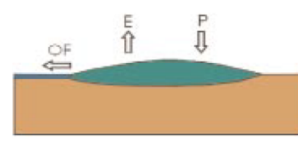
A1 : Les deux premiers niveaux de la typologie CORINE-Biotopes (INPN)

Niveau 1	Niveau 2
1. Habitats littoraux et halophile	11. Mers et océans 12. Bras de mer 13. Estuaires et rivières tidales (soumises à marées) 14. Vasières et bancs de sable sans végétations 15. Marais salés, prés salés (schorres), steppes salées et fourrés sur gypse 16. Dunes côtières et plages de sable 17. Plages de galets 18. Côtes rocheuses et falaises maritimes 19. Ilots, bancs rocheux et récifs
2. Milieux aquatiques non marins	21. Lagunes 22. Eaux douces stagnantes 23. Eaux stagnantes, saumâtres et salées 24. Eaux courantes
3. Landes, fruticées et prairies	31. Landes et fruticées 32. Fruticées sclérophylles 33. Phryganes 34. Steppes et prairies calcaires sèches 35. Prairies siliceuses sèches 36. Pelouses alpines et subalpines 37. Prairies humides et mégaphorbiaies 38. Prairies mésophiles
4. Forêts	41. Forêts caducifoliées 42. Forêts de conifères 43. Forêts mixtes 44. Forêts riveraines, forêts et fourrés très humides 45. Forêts sempervirentes non résineuses
5. Tourbières et marais	51. Tourbières hautes 52. Tourbières de couverture 53. Végétation de ceinture des bords des eaux 54. Bas-marais, tourbières de transition et sources
6. Rochers continentaux, éboulis et sables	61. Eboulis 62. Falaises continentales et rochers exposés 63. Neiges et glaces éternelles 64. Dunes sableuses continentales 65. Grottes 66. Communautés des sites volcaniques
8. Terres agricoles et paysages artificiels	81. Prairies améliorées 82. Cultures 83. Vergers, bosquets et plantations d'arbres 84. Alignements d'arbres, haies, petits bois, bocage, parcs, 85. Parcs urbains et grands jardins 86. Villes, villages et sites industriels 87. Terrains en friche et terrains vagues 88. Mines et passages souterrains 89. Lagunes et réservoirs industriels, canaux

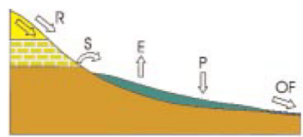
A2 : Description des types de zones humides en fonction des mécanismes de transfert d'eau et de la position topographique (D'après Acreman et Miller, 2006)



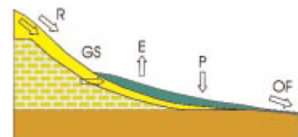
Upland flat area wetlands
Surface water-fed
Zones humides de hauts-plateaux
Alimentation en eaux de surface



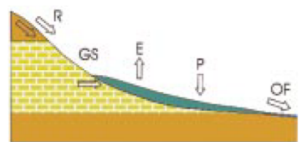
Lowland flat area wetlands
Surface water-fed
Zones humides de hauts-plateaux
Alimentation en eaux de surface



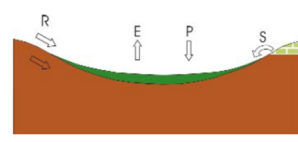
Slope wetlands
Surface water-fed
Zones humides de versant
Alimentation en eaux de surface



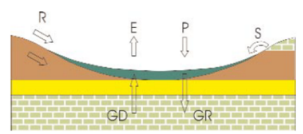
Slope wetlands
Surface and groundwater-fed
Zones humides de versant
Alimentation en eaux de surface et souterraines



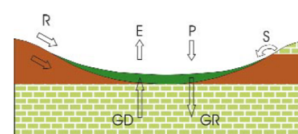
Slope wetlands
Ground water-fed
Zones humides de versant
Alimentation en eaux souterraines



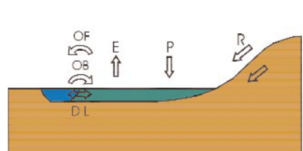
Depression wetlands
Surface water-fed
Zones humides de dépression
Alimentation en eaux de surface



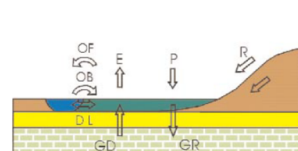
Depression wetlands
Surface and ground water-fed
Zones humides de dépression
Alimentation en eaux de surface et souterraines



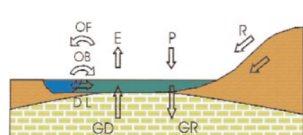
Depression wetlands
Ground water-fed
Zones humides de dépression
Alimentation en eaux souterraines



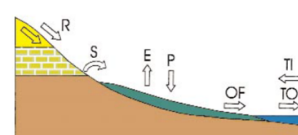
Valley bottom wetland
Surface water-fed
Zones humides de fond de vallée
Alimentation en eaux de surface



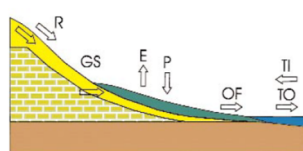
Valley bottom wetland
Surface and groundwater-fed
Zones humides de fond de vallée
Alimentation en eaux de surface et souterraines



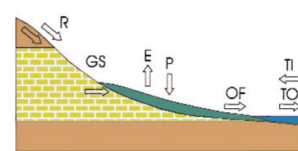
Valley bottom wetland
Groundwater-fed
Zones humides de fond de vallée
Alimentation en eaux souterraines



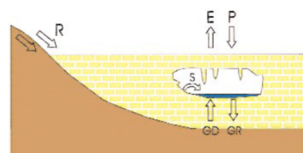
Coastal wetlands
Surface water-fed
Zones humides côtières
Alimentation en eaux de surface



Coastal wetlands
Surface and groundwater-fed
Zones humides côtières
Alimentation en eaux de surface et souterraines



Coastal wetlands
Groundwater-fed
Zones humides côtières
Alimentation en eaux souterraines



Underground wetlands
Groundwater-fed
Zones humides souterraines
Alimentation en eaux souterraines

Zone humide
 Eau
 Strate peu perméable

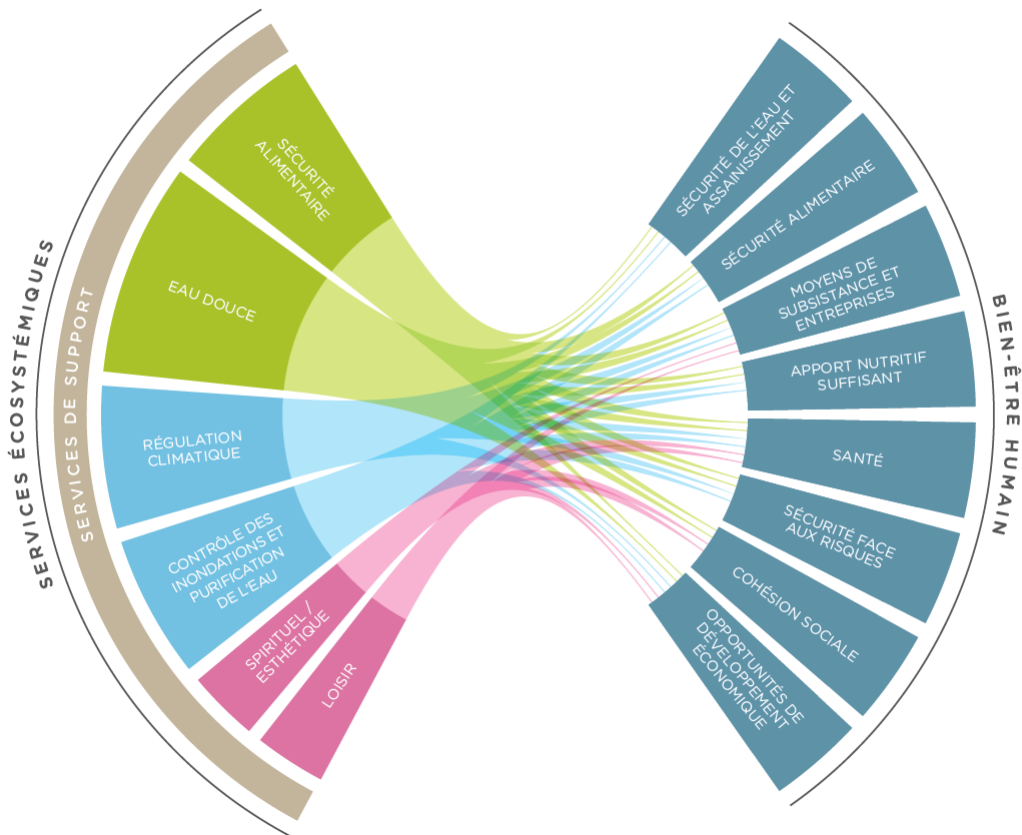
Strate semi-perméable
 Aquifère
 Niveau piézométrique

A3 : Tableau des profils pédologiques retenus par l'arrêté ministériel du 24 juin 2008

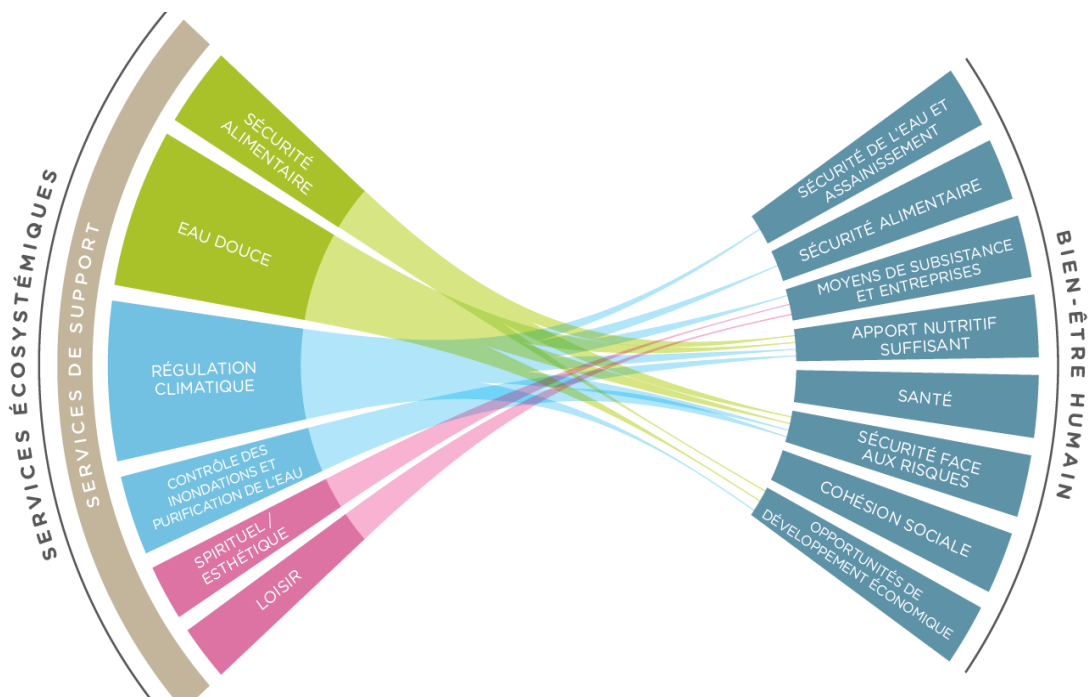
DÉNOMINATION SCIENTIFIQUE (“ Références ” du référentiel pédologique, Afes, Baize et Girard, 1995 et 2008)	ANCIENNES DÉNOMINATIONS (“ groupes ” ou “ sous-groupes ” de la CPCS, 1967)
HISTOSOLS (toutes références de).	Sols à tourbe fibreuse. Sols à tourbe semi-fibreuse. Sols à tourbe altérée.
REDUCTISOLS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

B1 : Liens entre services écosystémiques et bien-être humain (UICN)

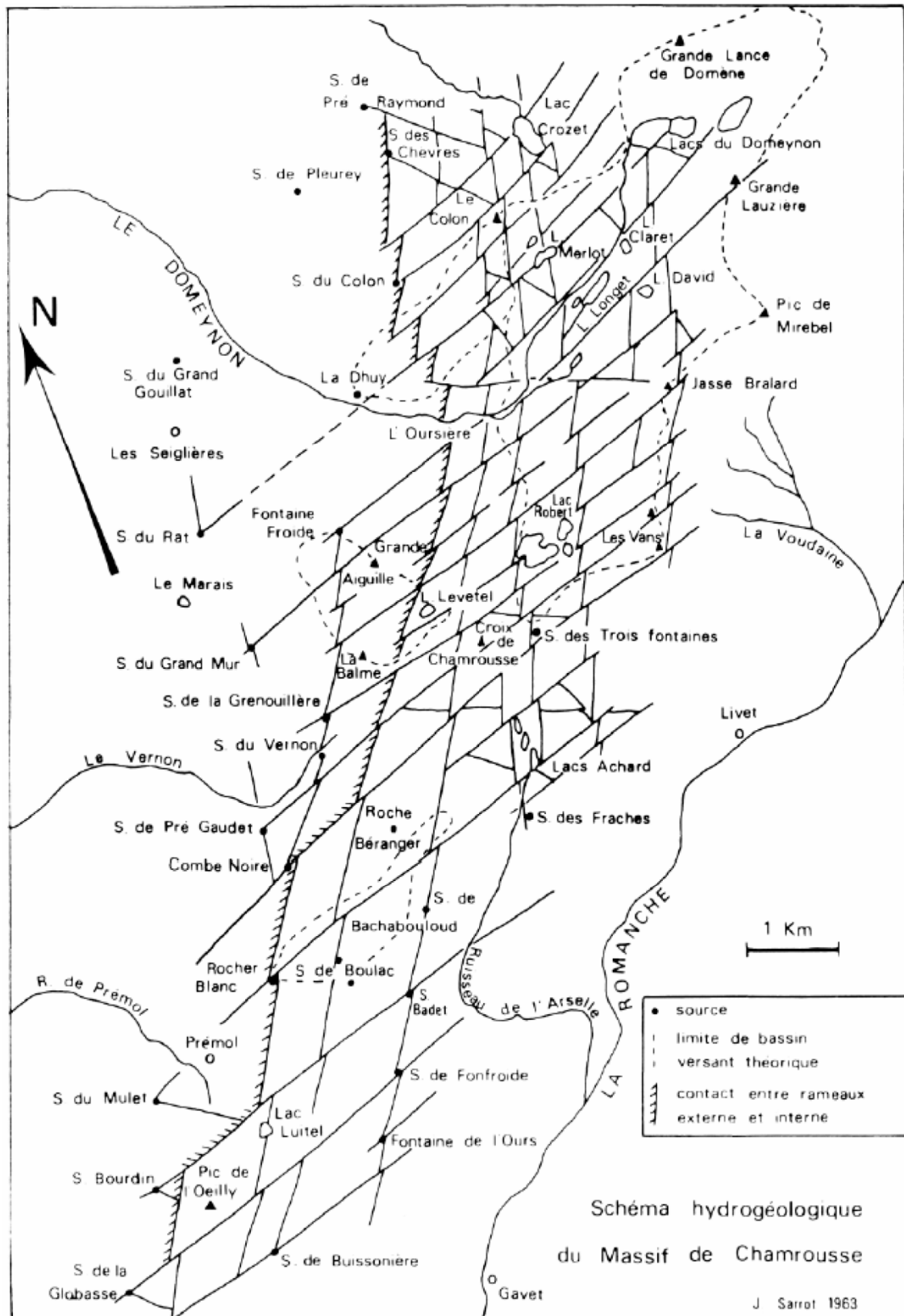
Ecosystème sain :



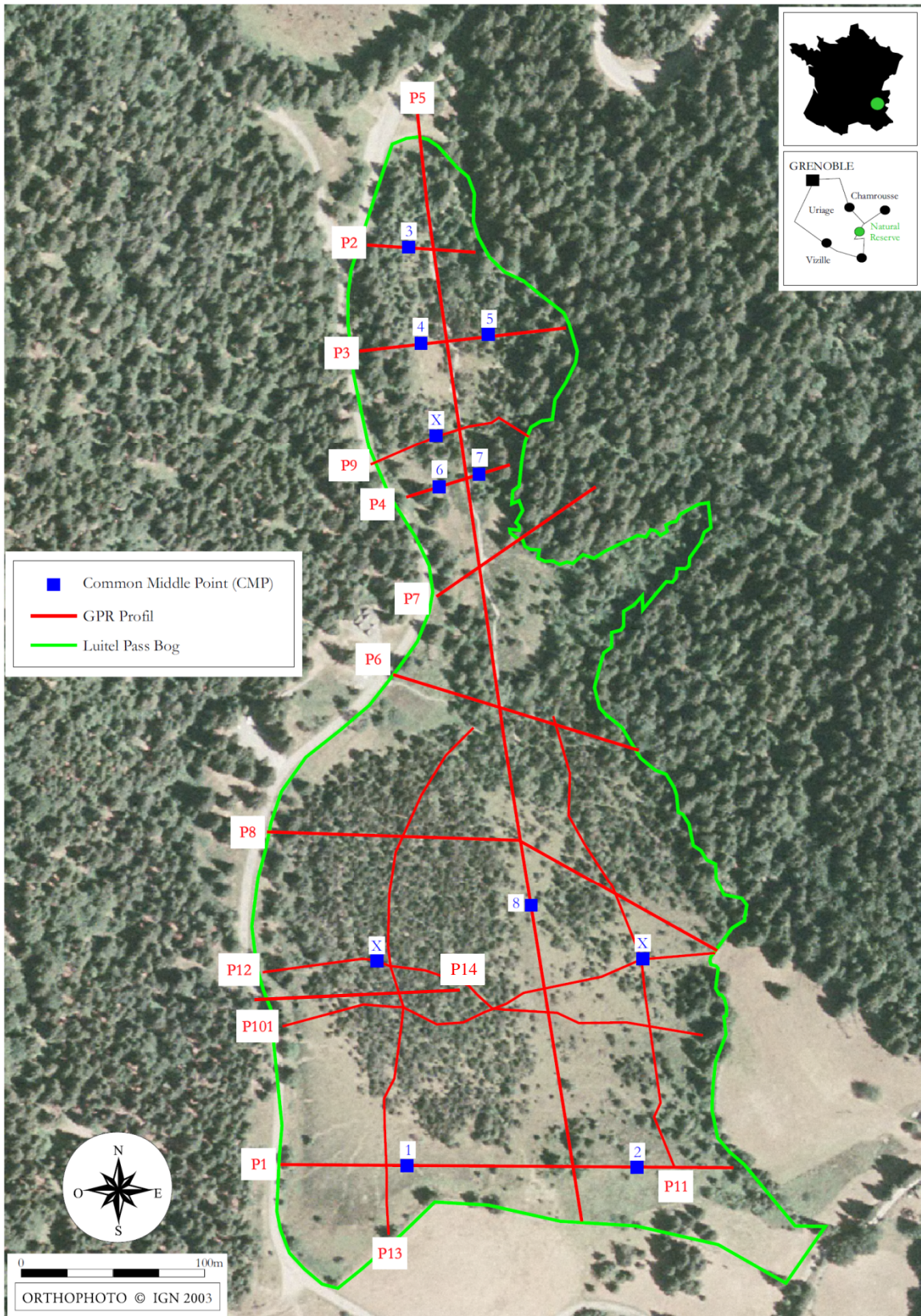
Ecosystème dégradé :



C1 : Le système de failles de la chaîne de Belledonne (Sarrot-Reynaud, 1972)



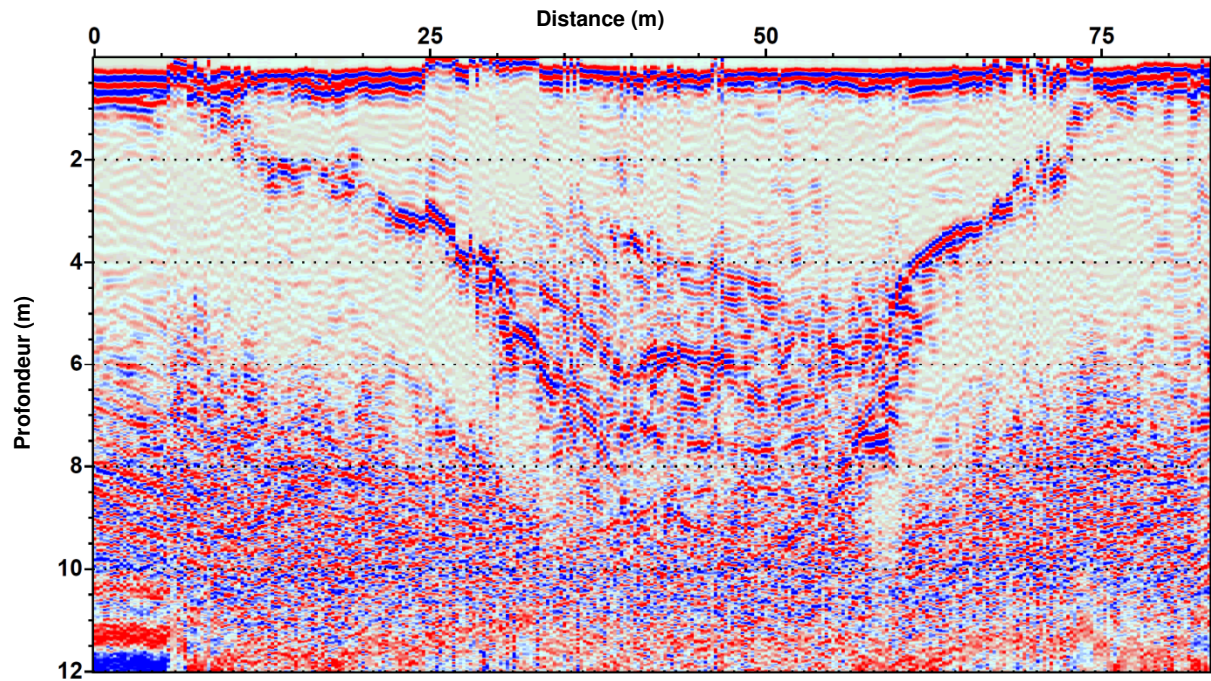
D1 : Carte des profils d'acquisitions géoradar (Garambois, 2008)



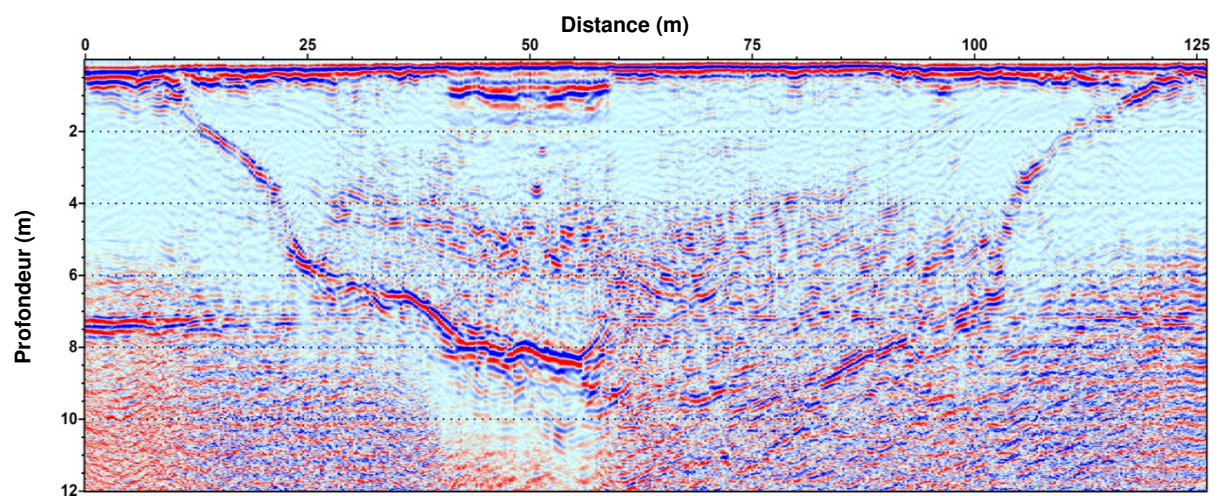
D2 : Profils géophysiques (Garambois, 2008)

Ces profils ont été acquis avec des antennes 50 et 100 MHz, sauf le P13 qui a été acquis avec une antenne 250 MHz.

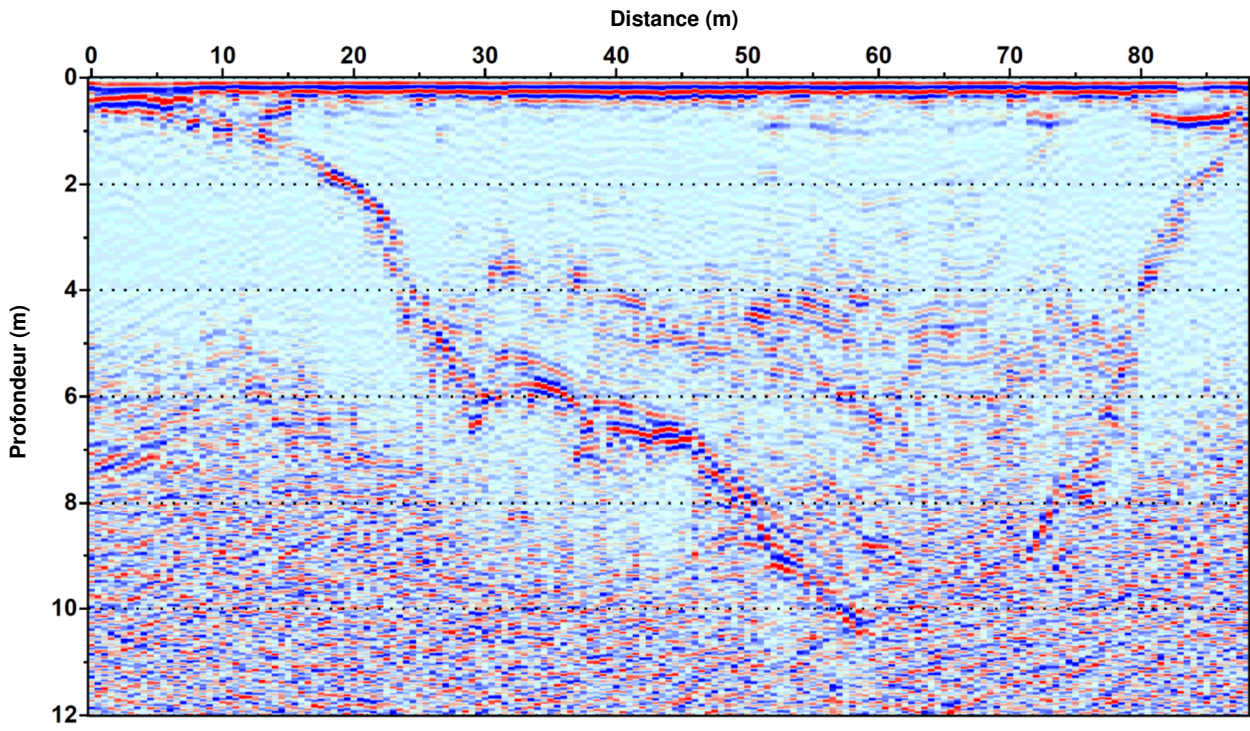
- **Profils transversaux :** Ces profils sont tous tracés en partant de l'Ouest vers l'Est. Et ils sont présentés successivement en commençant par le Nord :



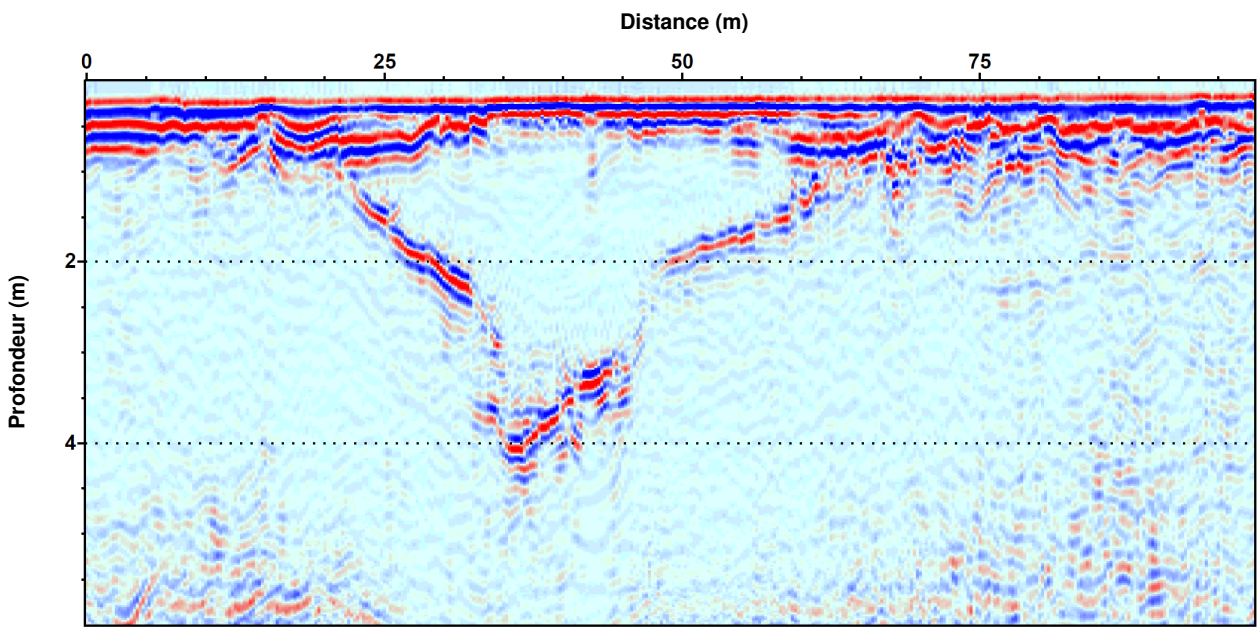
Profil P2



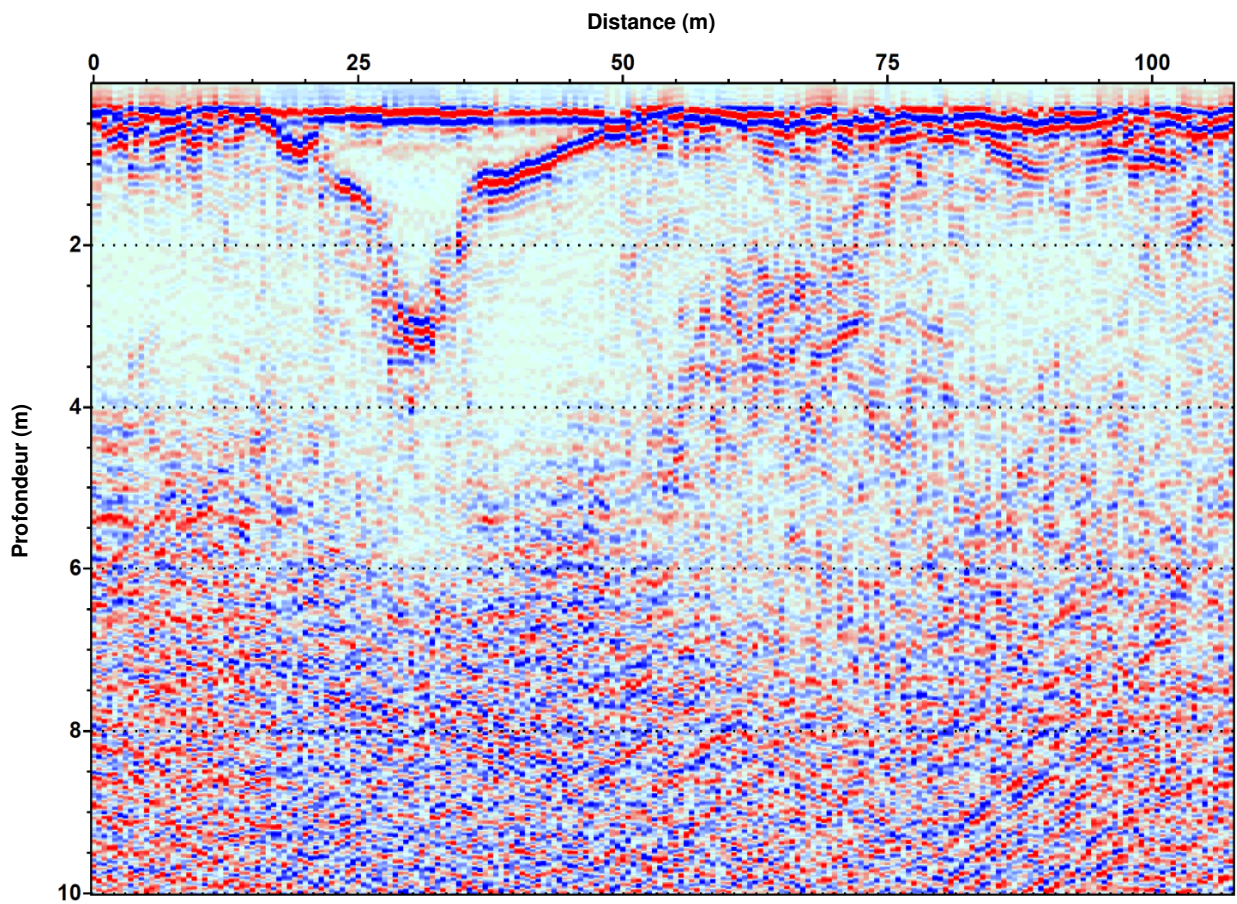
Profil P3



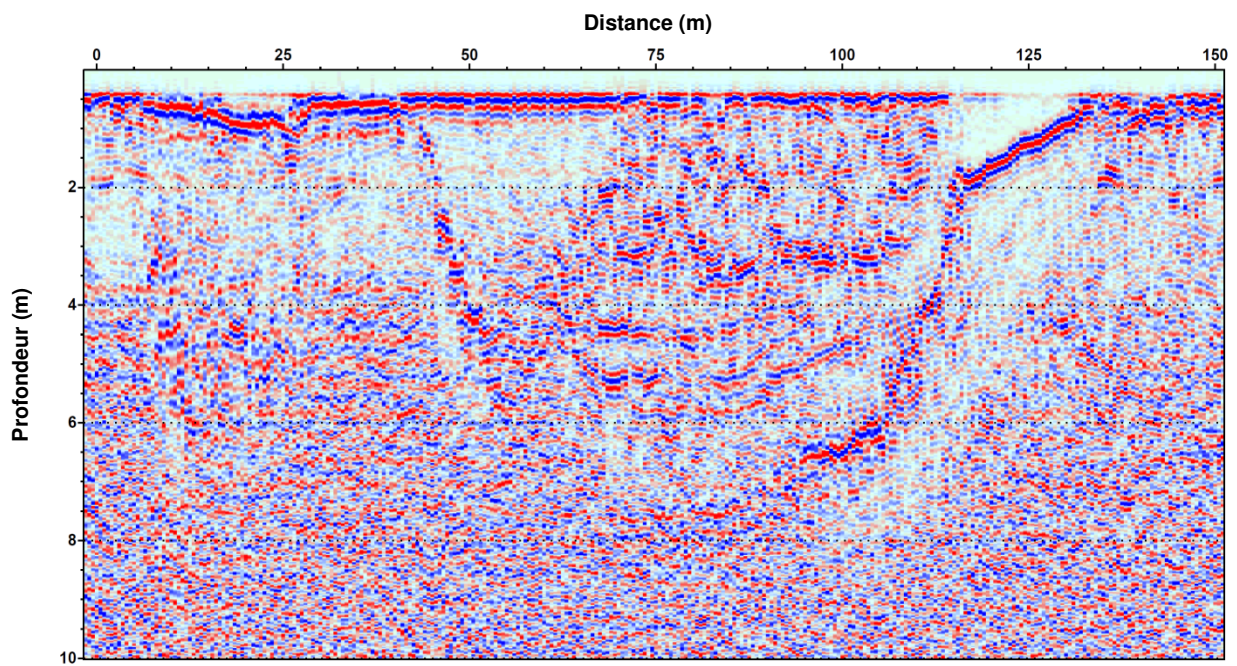
Profil P9



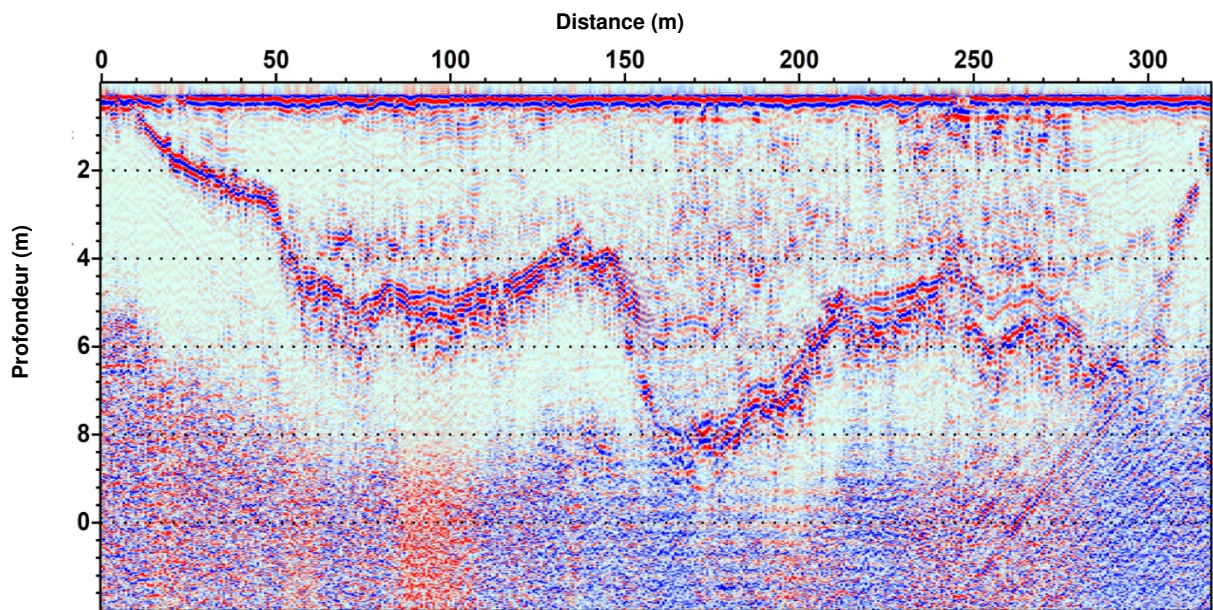
Profil P4



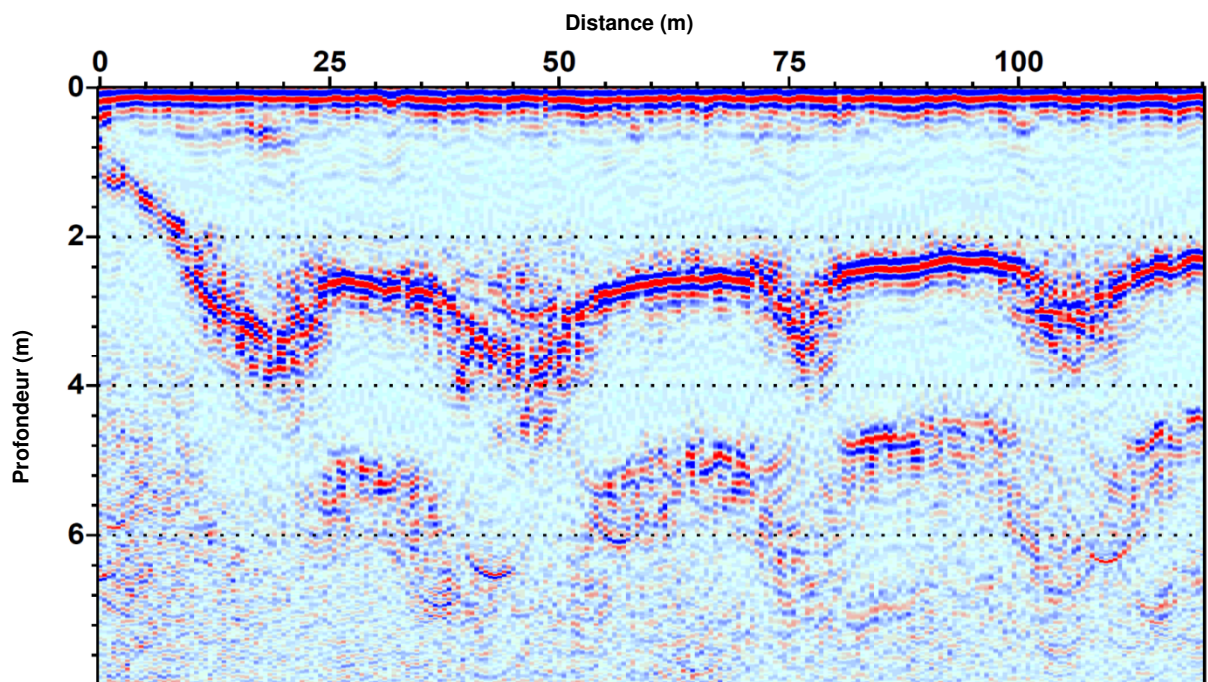
Profil P7



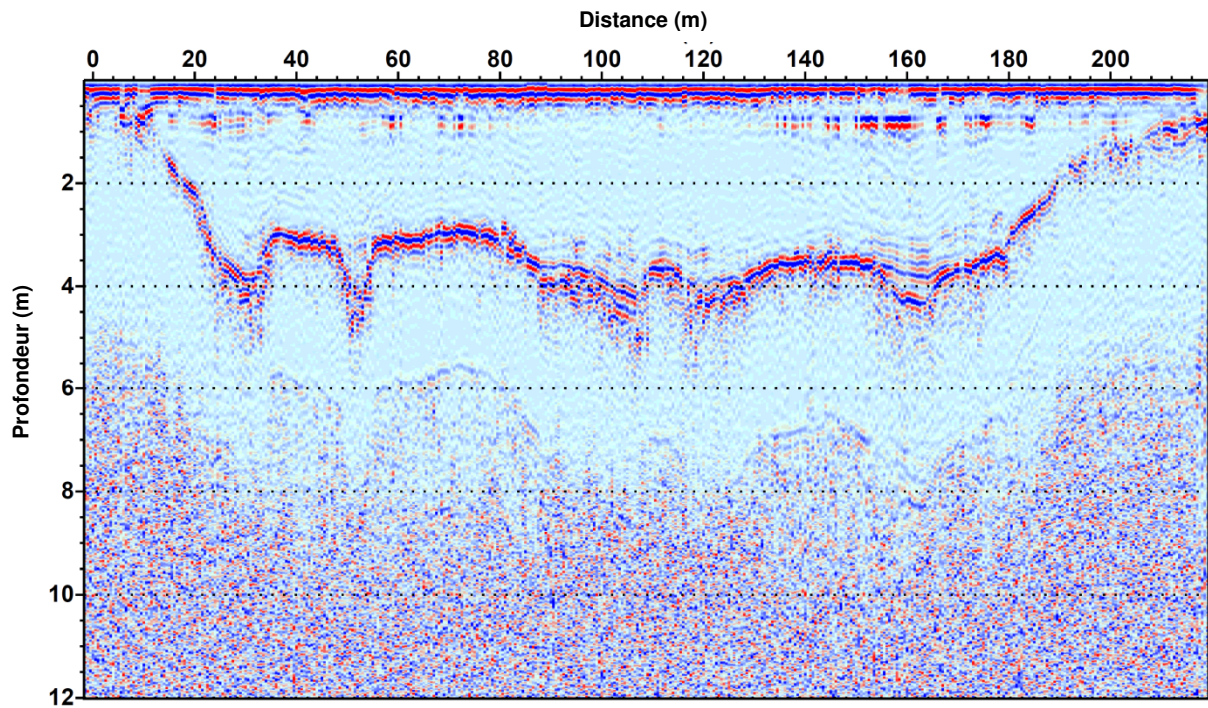
Profil P6



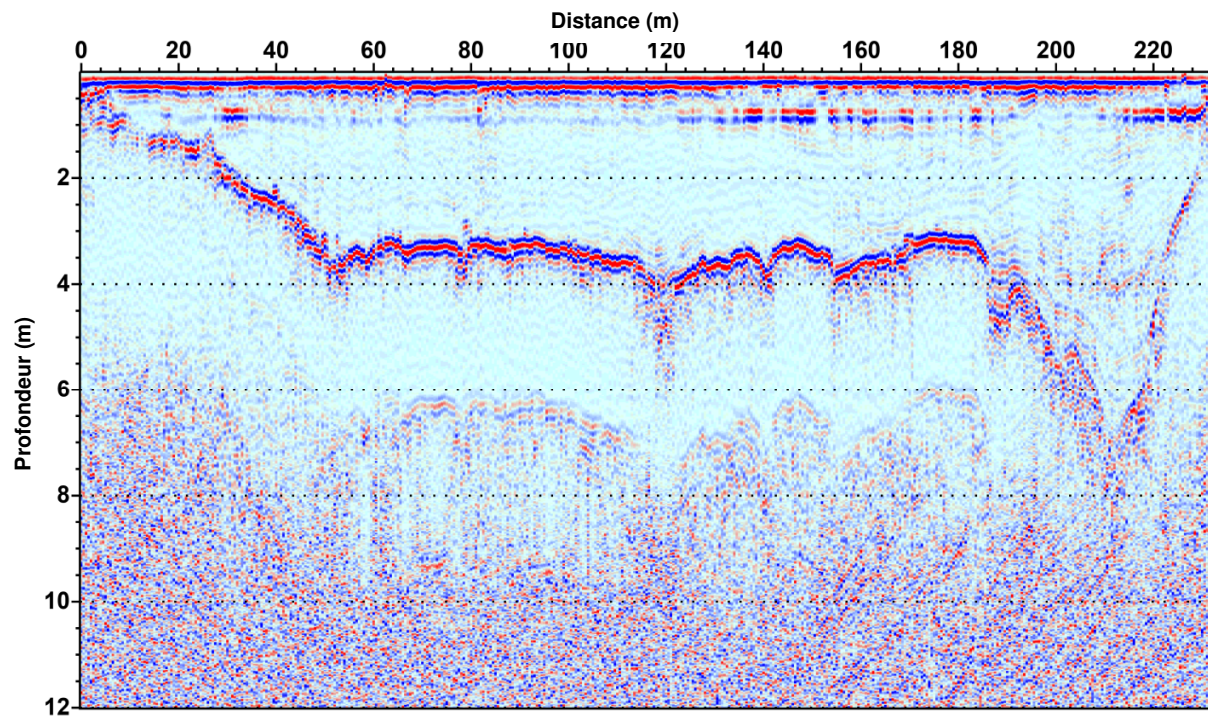
Profil P8



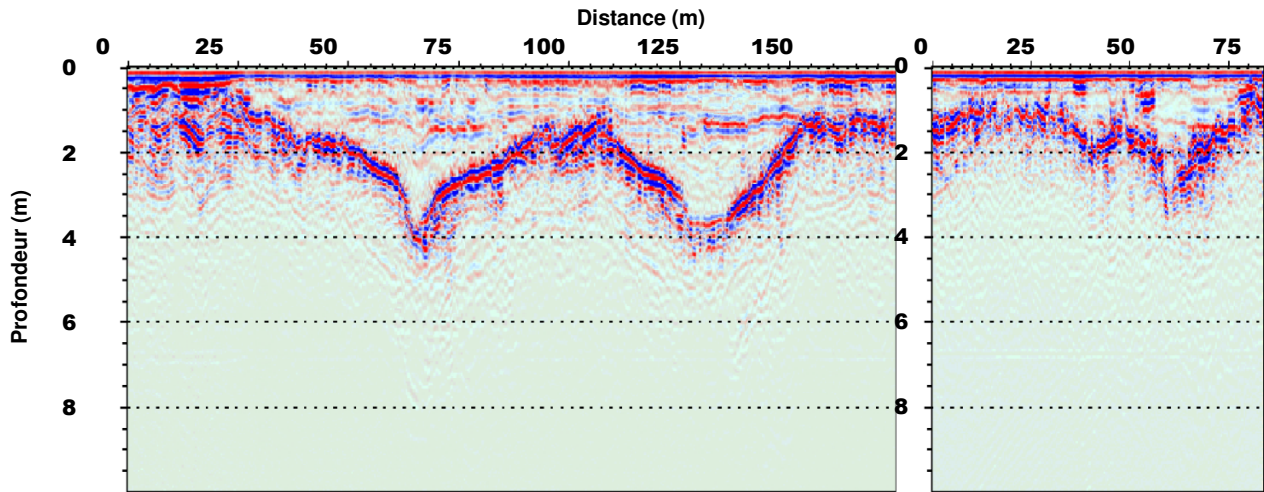
Profil P14



Profil P12

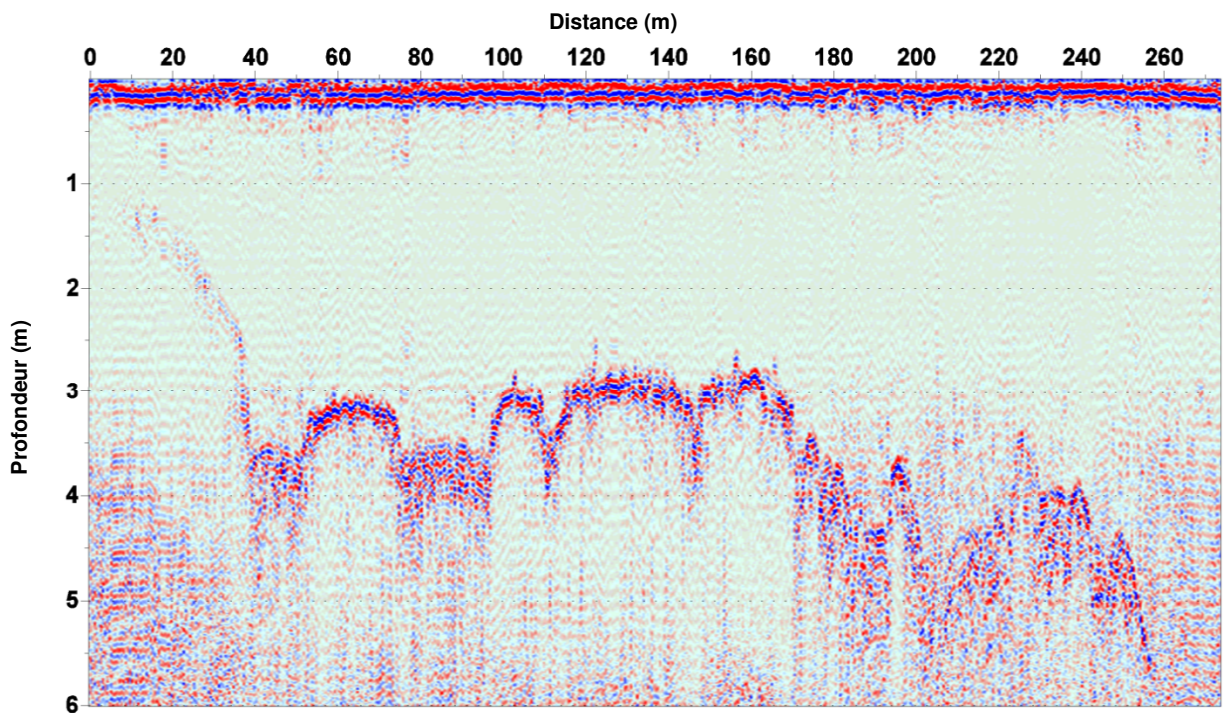


Profil P101

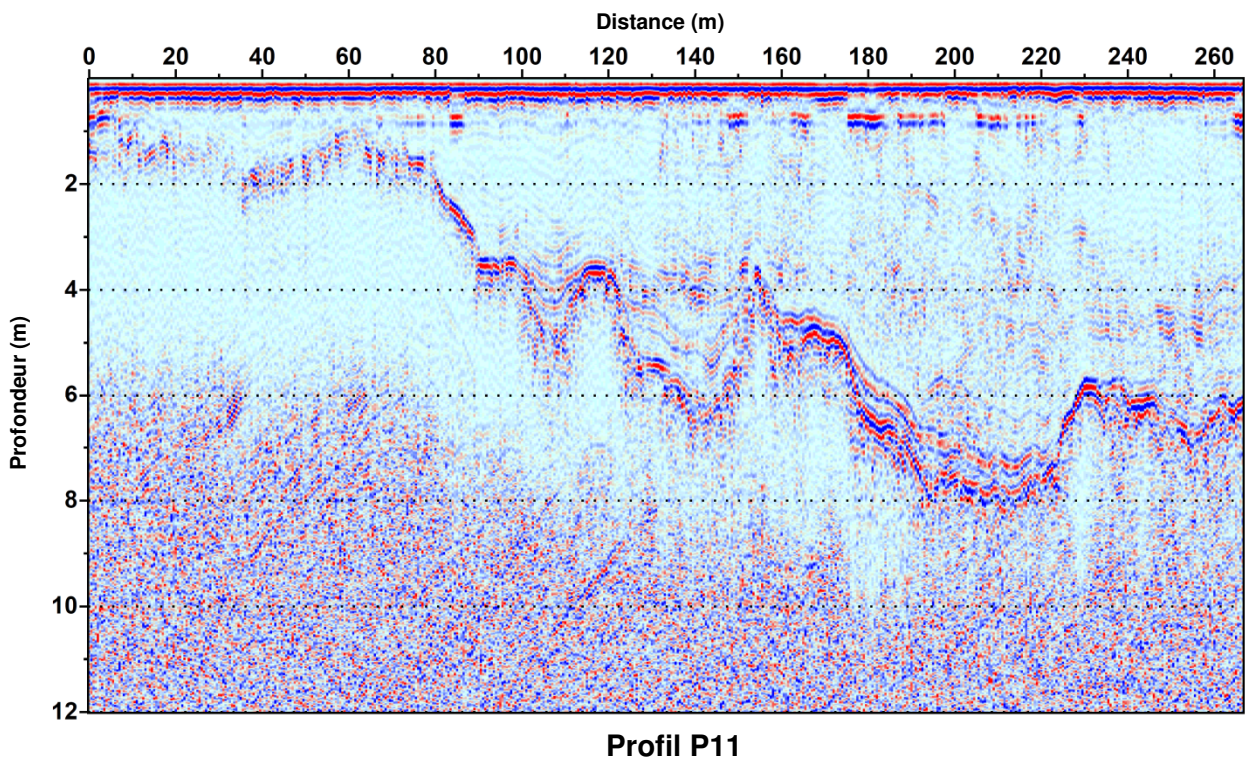
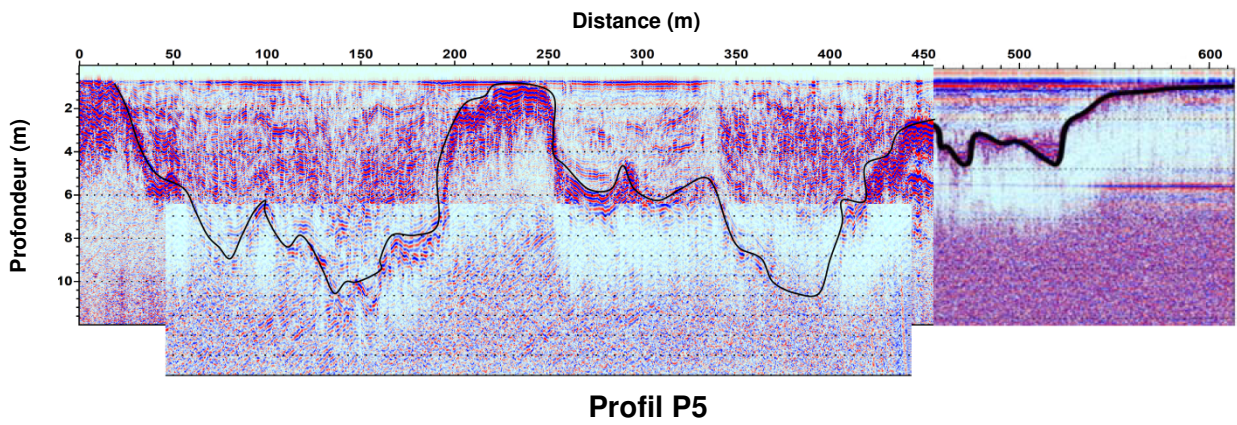


Profil P1

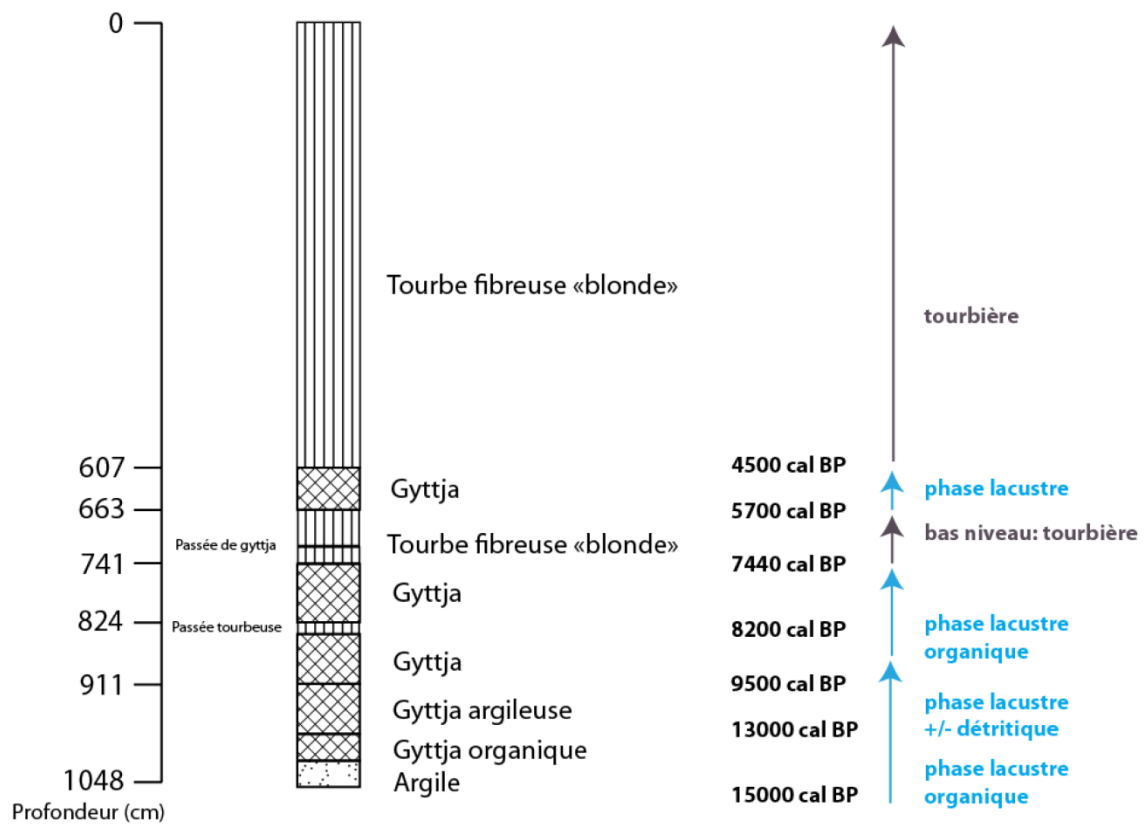
- **Profils longitudinaux :** Ces profils sont tracés du Nord au Sud (P5) et du Sud au nord (P11 & P13). Ils sont présentés en partant de l'Ouest vers l'Est



Profil P13



E1 : Lithologie synthétique des profils palustres prélevés à la tourbière du Col du Luitel en 2011 (Guiter et al., 2015)

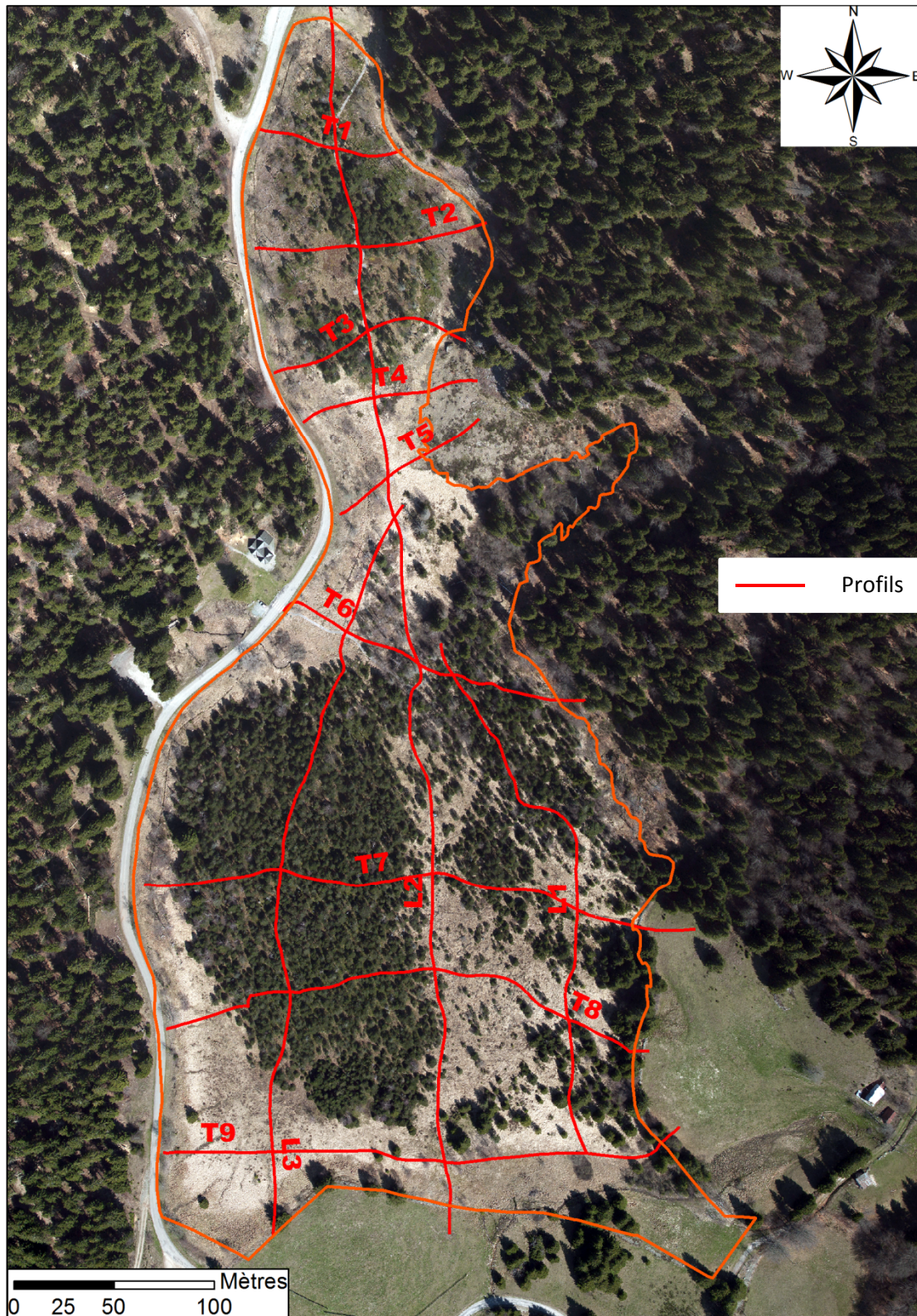


**F : Caractéristiques des piézomètres de la Tourbière du col du Luitel
(d'après Hustache 2004)**

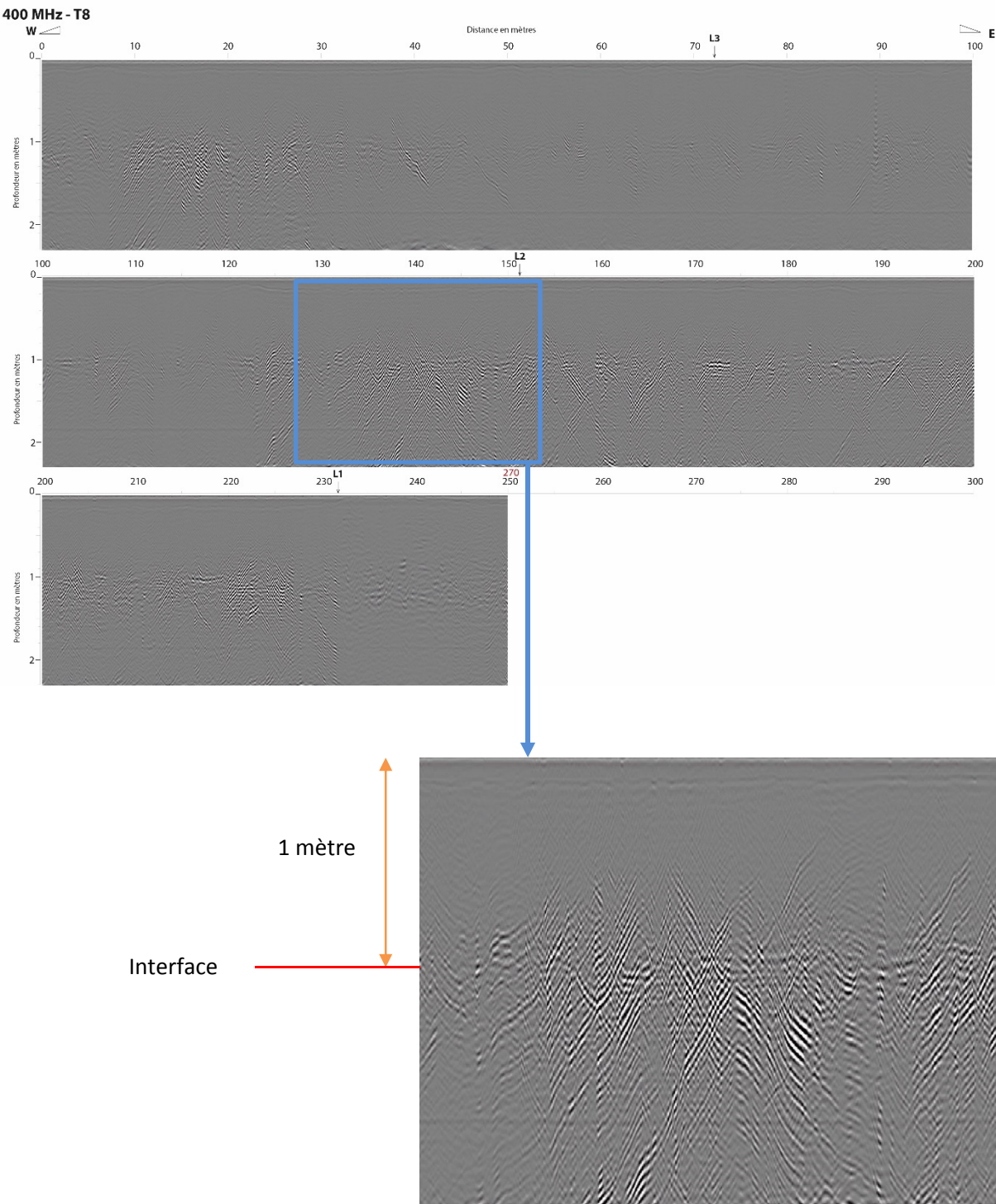
Piézomètre	Longueur totale (cm)	Partie hors sol (cm)	Partie enfouie (cm)	Niveau de crépinage (cm)
1	400	9	391	10/30-120/140-210/230-320/340
2	400	11	389	10/30-110/130-210/230-330/350
3	400	49	351	10/30-120/140-210/230-320/340
4	400	12	388	10/30-120/140-210/230-320/340
5	400	24	376	10/30-110/130-210/230-330/350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

G1 : Campagne géophysique (du 5 au 7 mars 2018)

L'objectif de cette campagne était d'améliorer la compréhension de la structure de la tourbière sur les premiers mètres. Nous avons pour cela repris les profils des Stéphane Garambois :

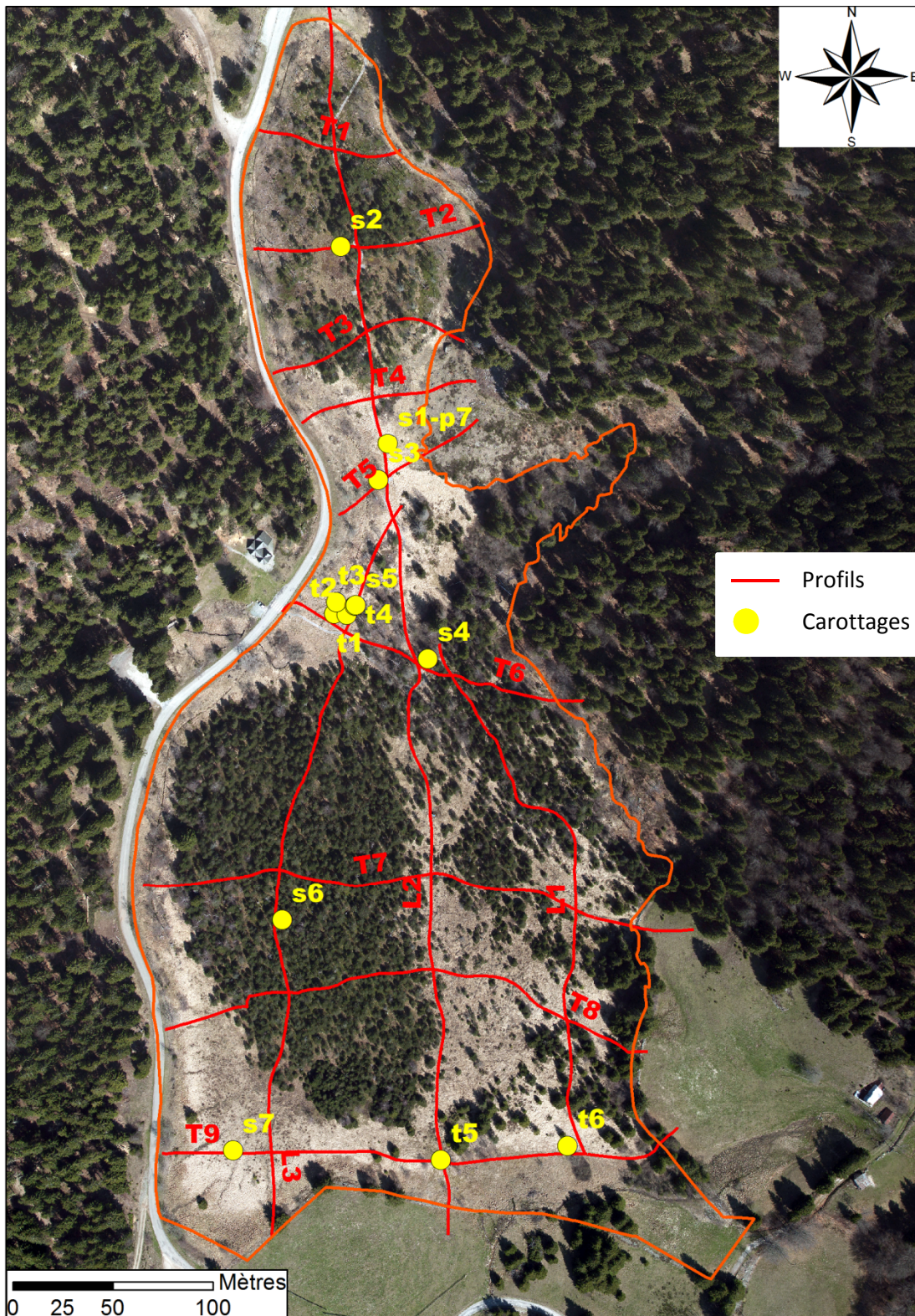


Les données acquises ont été traitées par Thierry Winiarski. Une analyse plus détaillée des résultats est encore nécessaire ainsi que leur mise en relation avec notre campagne de carottages. Toutefois, nous pouvons remarquer que les images obtenues font ressortir une interface à environ 1 mètre de profondeur :



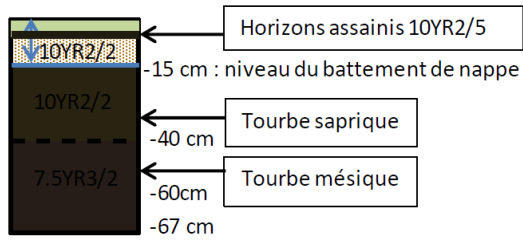
G2 : Campagne de carottage (du 25 au 26 avril 2018)

Afin de préciser les résultats obtenus par Thierry Winiarski, une campagne de carottage a été organisée. L'idée sous-jacente étant toujours de déterminer les interfaces superficielles dans la structure tourbeuse. Des carottes de tourbe ont été prélevées aux points suivants :

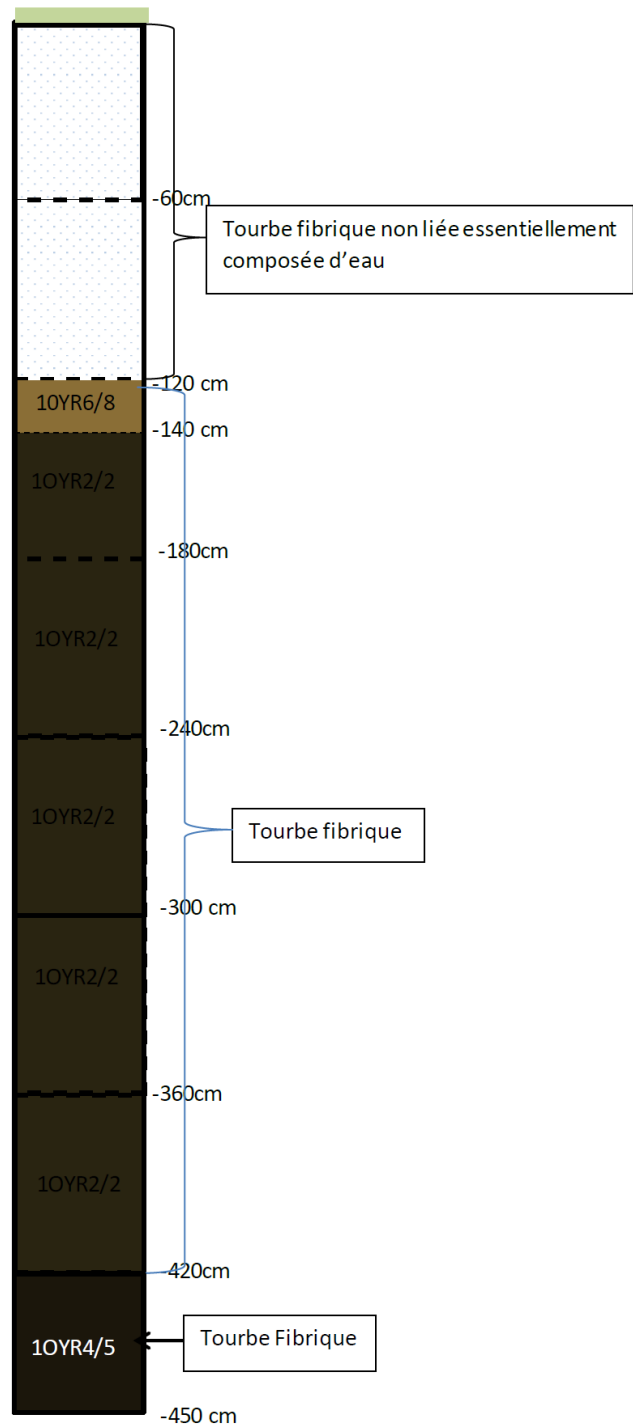


Quelques carottes ont été retenues pour une analyse plus poussée par Thomas Jolly, dont nous présentons les résultats :

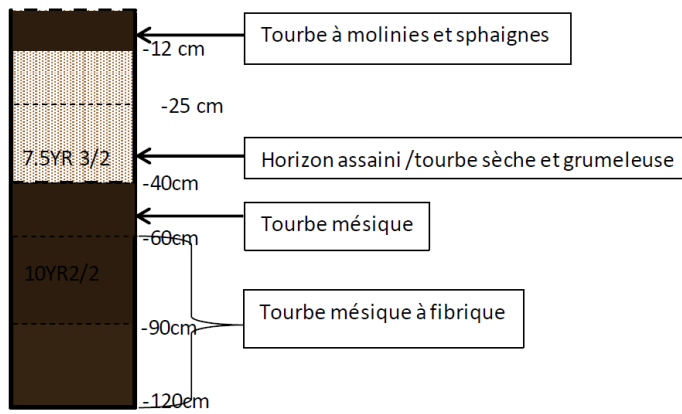
- S1 :



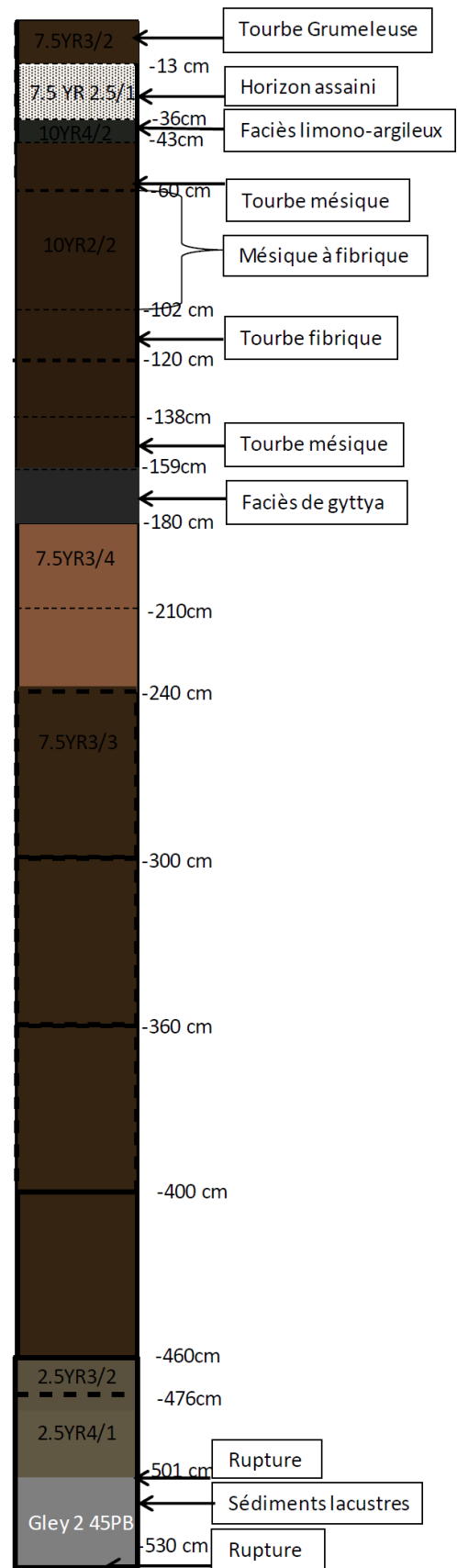
- S2 :



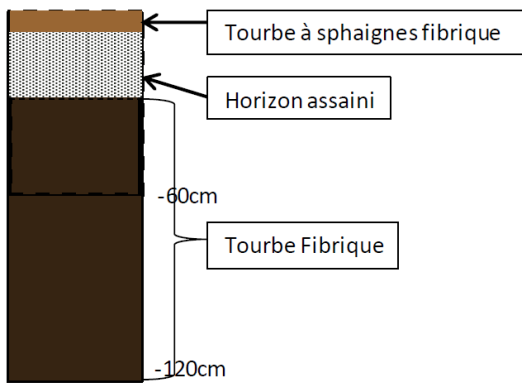
• S3 :



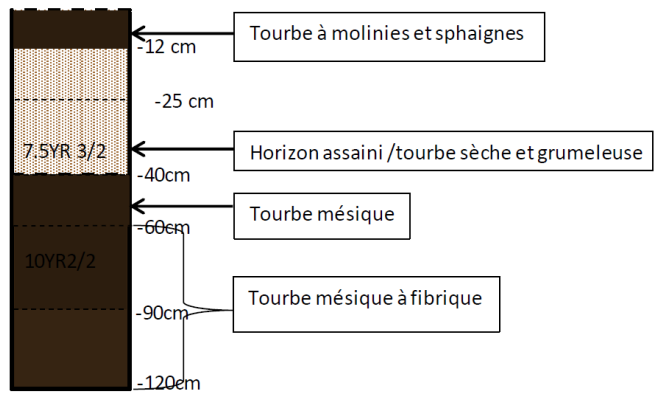
• S4 :



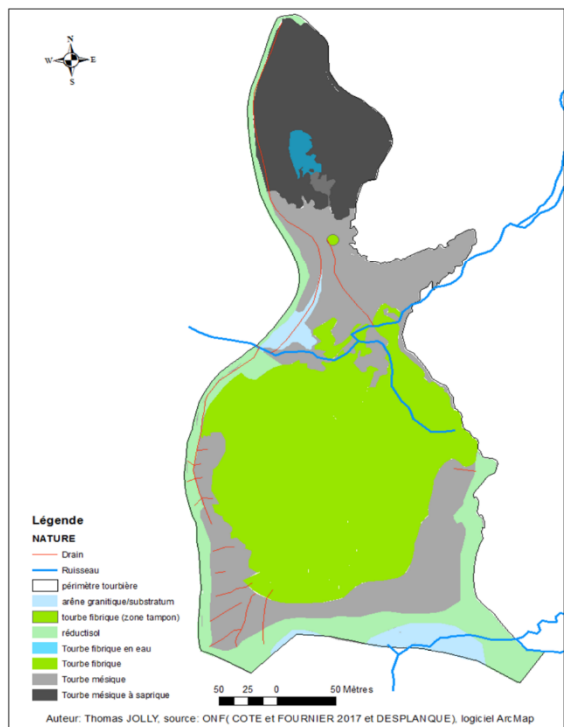
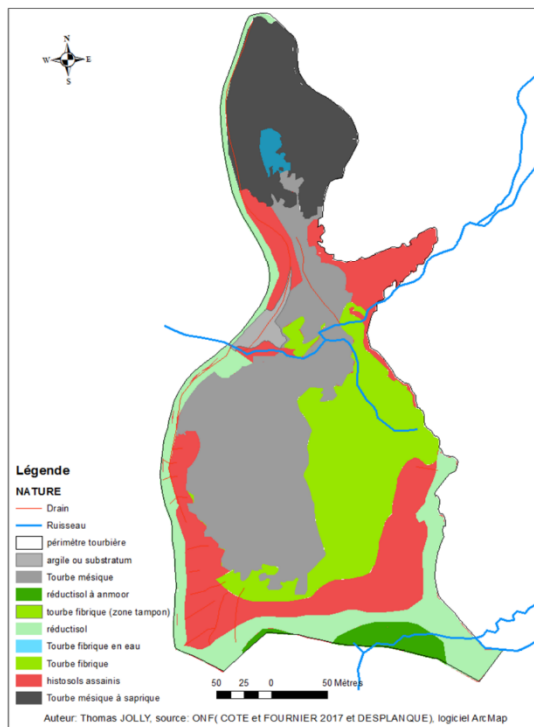
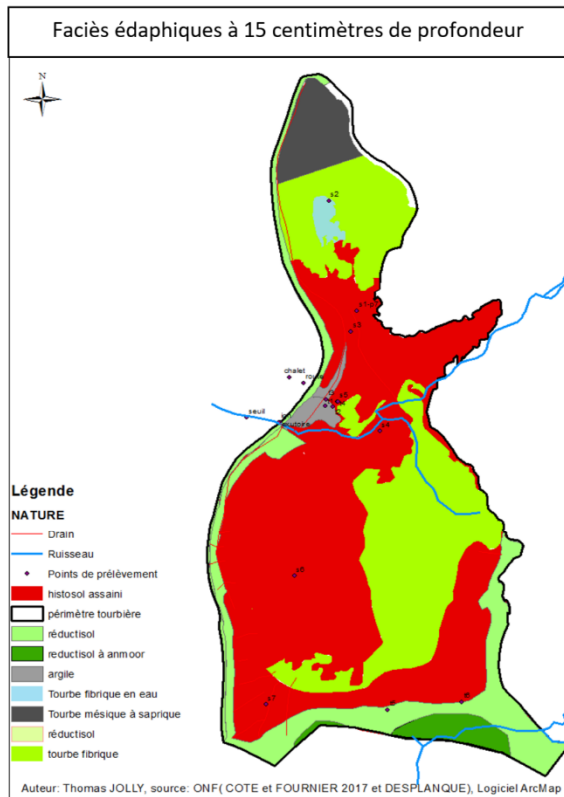
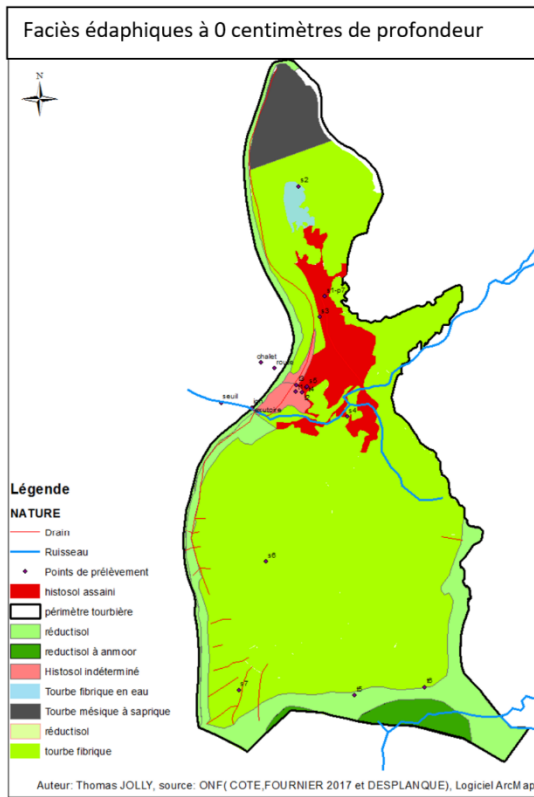
• S6 :



• S7 :



Suite à cette campagne, Thomas Jolly à pu élaborer une série de cartes représentant les faciès édaphiques :



Cette campagne a également été l'occasion pour nous d'installer deux seuils pour mesurer les débits amont et aval de Fontfroide. Notre équipe est ici à l'ouvrage...



...et le résultat est le suivant (cliché pris en juin) :



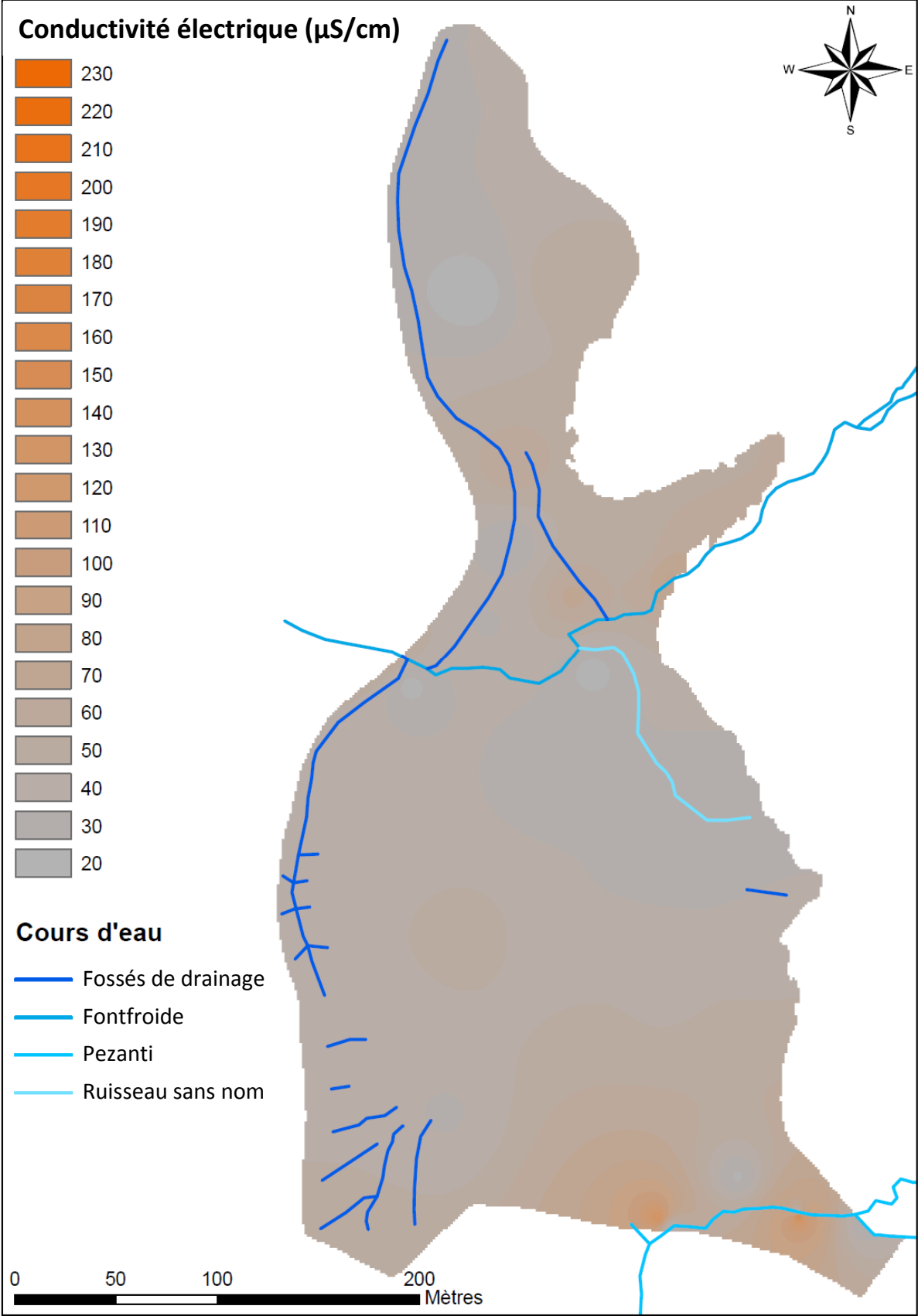
G3 : Campagne de géochimie (du 25 au 27 juin 2018)

Enfin, une campagne de géochimie a été organisée afin de d'analyser les eaux prélevées dans différents piézomètres, la photo ci-dessous montre notre méthode de prélèvement :

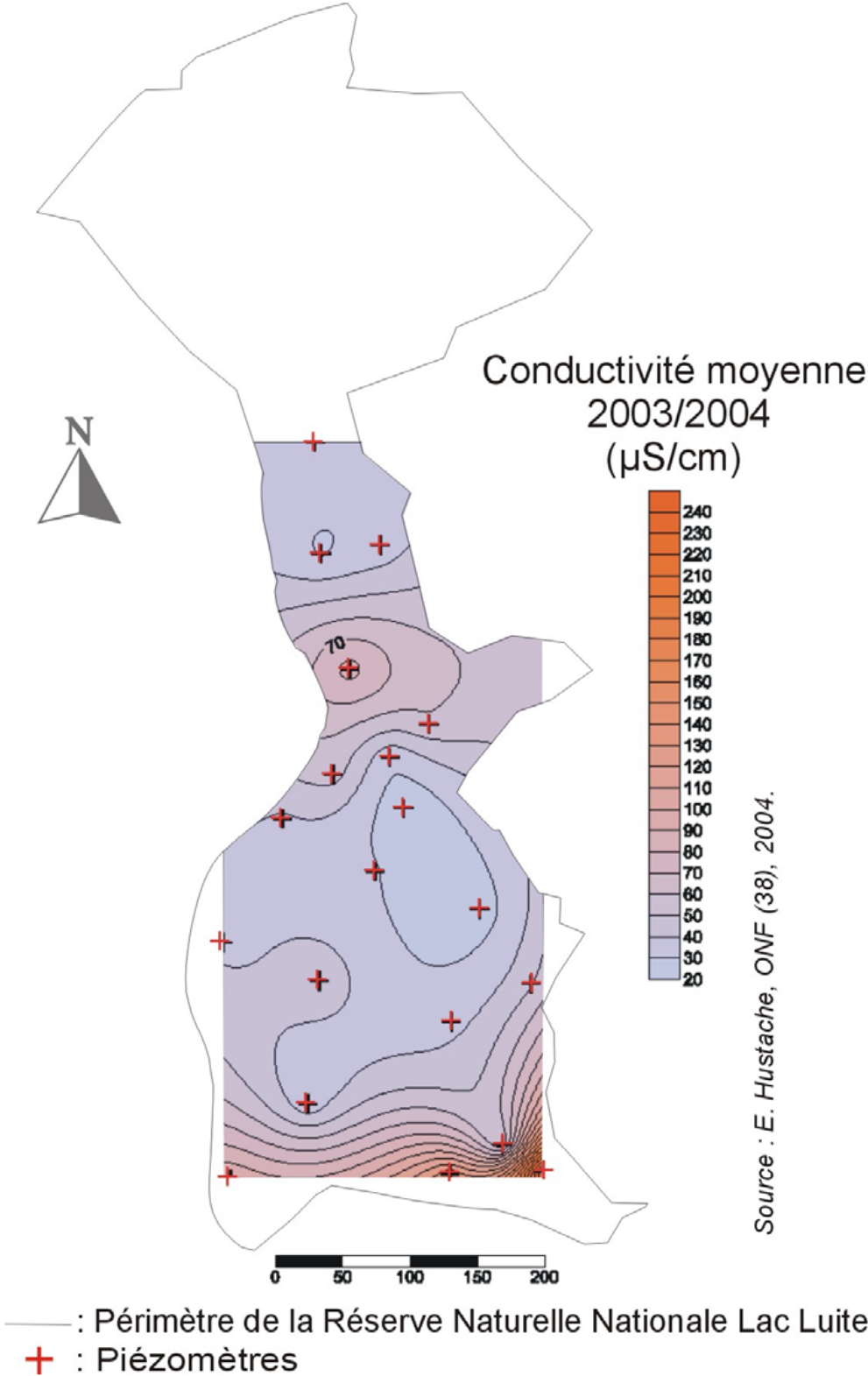


L'objet de cette campagne étant de déterminer la signature des eaux afin d'identifier leur provenance. Les analyses sont en cours de réalisation par Véronique Lavastre.

Néanmoins, à l'aide des données de conductivité électrique relevées in-situ, nous avons pu produire la carte suivante :



Cette carte nous permet de localiser les zones minérotrophes, qui correspondent bien aux zones qui bordent les ruisseaux. Il est par ailleurs intéressant de la comparer avec la carte réalisée par Hustache (2004) 14 ans plus tôt :



Résumé

Les recherches présentées dans ce mémoire s'inscrivent dans le projet porté par la Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence Rhône Méditerranée et Corse (AE-RMC) intitulé : « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de tête de bassin versant dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône ». Le service de soutien d'étiage des zones humides est couramment admis, il présente une valeur socio-économique qui motive la protection de ces milieux fragiles et menacés. Toutefois, l'importance de ce rôle est débattue au sein de la communauté scientifique. Afin d'apporter des éléments de réponses, nos recherches ont ciblé un site de référence, la tourbière du Col du Luitel (Isère). Un modèle de type réservoir a été construit à partir de Vensim pour simuler le comportement hydrologique de la tourbière. A partir de cette simulation de trois cycles hydrologiques complets, des débits de soutien d'étiage ont été calculés pour trois périodes estivales.

Mots clés : tourbières, hydrologie, soutien d'étiage, modèle conceptuel, Vensim, Luitel, ZABR

The researches contained in this paper are included in the project undertaken by the Zone Atelier du Bassin du Rhône (ZABR) and the Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (AE-RMC) entitled : "Study and understanding of the hydrologic and hydrogeologic role of wetlands at head of watershed in low-flow support of streams - References research in the very contrasted contexts of the Rhône basin". Low-flow support service provided by wetlands is commonly accepted, its socio-economical value encourages the protection of these fragile and threatened areas. Nevertheless, the significancy of this role is currently discussed within the scientific community. To bring some answers to this debate, our researches focused on a reference site, the Col du Luitel peatland (Isère). A reservoir model has been built with Vensim to simulate the hydrological functioning of the peatland. From this simulation of three complete hydrological cycles, low-flow support has been estimated for three summer periods.

Keywords : peatlands, hydrology, low-flow support, conceptual model, Vensim, Luitel, ZABR