

Équipe projet interdisciplinaire

UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne
Mines Alès LGEI
UMR CNRS 5023 LEHNA ENTPE
UMR CNRS 5600 ISTHME UJM
UMR CNRS 5276 LGL-TPE UJM
UMR CNRS 6249 Chrono-environnement UFC
ONF Aude
RNN Lac Luitel
RNR des Tourbières de Frasne-Bouverans



Comité de Restitution

Projets ZHTB – ZH Aude

Mardi 5 mars 2024

Villeurbanne (INRAe)

Frédéric Paron

Contact : frederic.paron@mines-stetienne.fr

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des Zones Humides de Têtes de Bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau [2016-2022].



(1) Contexte

ZABR¹ /AERMC²

- ❖ *Interactions eau souterraine / eau superficielle* :
 - besoins méthodologique + connaissance
- ❖ *Approche scientifique* : développement méthodologique
 - *Interdisciplinarité* : hydrologie, hydrogéologie, géologie, géophysique, géochimie, pédologie, imagerie, écologie souterraine, écologie végétale, modélisation, géomatique...
- ❖ *Approche opérationnelle* : outil, transfert de connaissance
 - *Validation et co-construction* : relecteurs, groupes de travail...

1 : Zone Atelier Bassin du Rhône

2 : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

(1) Contexte

Mieux comprendre interactions eau sout'/eau sup'

=

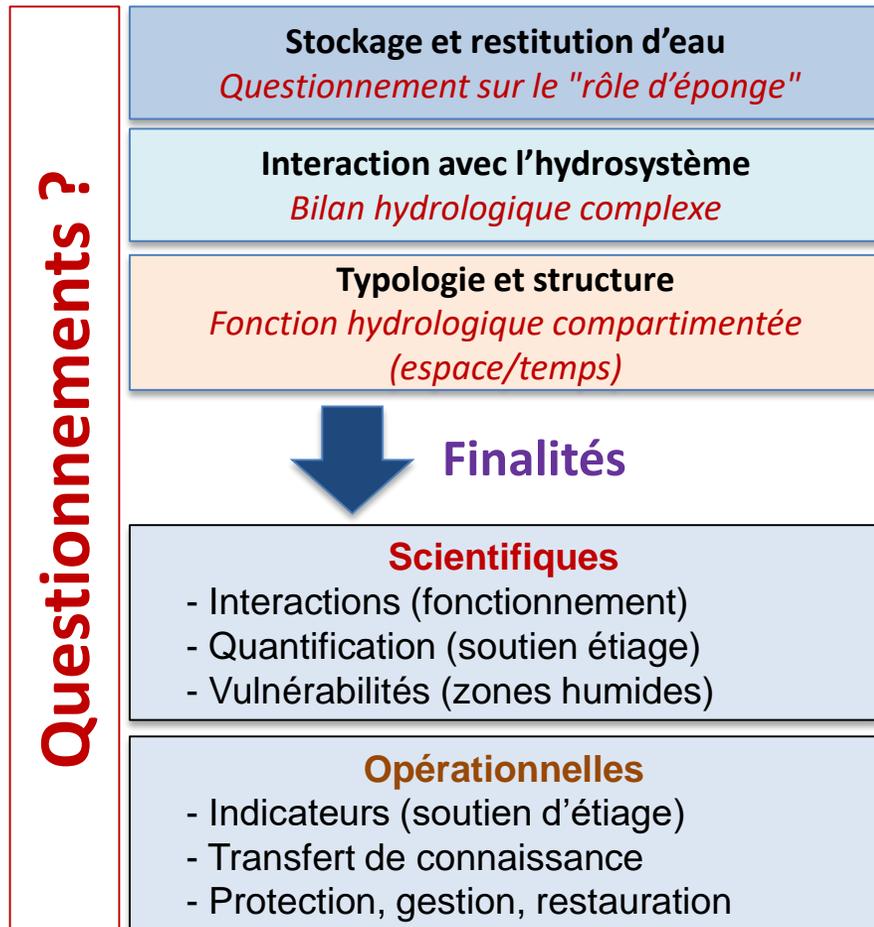
Mieux comprendre les échanges d'eau en ces 2 compartiments

- *Dans quel sens est orienté le flux d'eau (ex: nappe vers rivière, rivière vers nappe...)?*
- *Quelle est la quantité d'eau qui circule (ex: m³/s, m³/jour...)?*
- *D'où vient cette eau?*
- *Quels interactions avec d'autres éléments de l'hydrosystème (ex : lônes, contre-canaux, dérivations, zones humides...)?*
- *Quelles influences anthropiques (ex : pompages, barrages, seuils...)?*
- *Quels impacts des changements climatiques?*

(1) Contexte : projet ZHTB

Problématique et planification

Quel est le rôle des zones humides (**tourbières**) dans la fonction hydrologique de soutien d'étiage (service de régulation) ?



(1) Contexte : projet ZHTB

Méthodologie : personnes impliquées

- 1. Volet hydrologie** - F. Paran, D. Graillet, G. Artigue, F. Dujardin, A. Johannet, G. Bertrand, A. Lhosmot
(Y. Pascoletti, S. Pinel, H. Caldirak, J. Ré-Bahuaud)
 - *Suivi hydrologique*
 - *Analyse statistique, modélisation RN*
- 2. Volet géochimie** - V. Lavastre, G. Bertrand, A. Lhosmot
 - *Transfert et mélange d'eau*
- 3. Volet pédologie** - H. Cubizolle, A.M. Dendievel, F. Gallice, V. Lavastre (T. Jolly)
 - *Grande carotte du Luitel / Articulation avec le volet géophysique*
- 4. Volet géophysique** - T. Winiarski, F. Paran (T. Jolly)
 - *Géométrie et structure 3D*
- 5. Indicateurs de soutien d'étiage** - F. Paran, P.O. Mazagol, C. Sacca, J. Riquier (M. Bertrand, S. Sadkou)
 - *Du site au bassin versant*
- 6. Haute-Vallée de l'Aude (ONF 11) :** B. Laroque, C. Cocula, E. Ebrard, K. Thomassin, V. Parmain, C. Turlesque, M. Vion, S. Villarubias

(1) Contexte : projet ZHTB

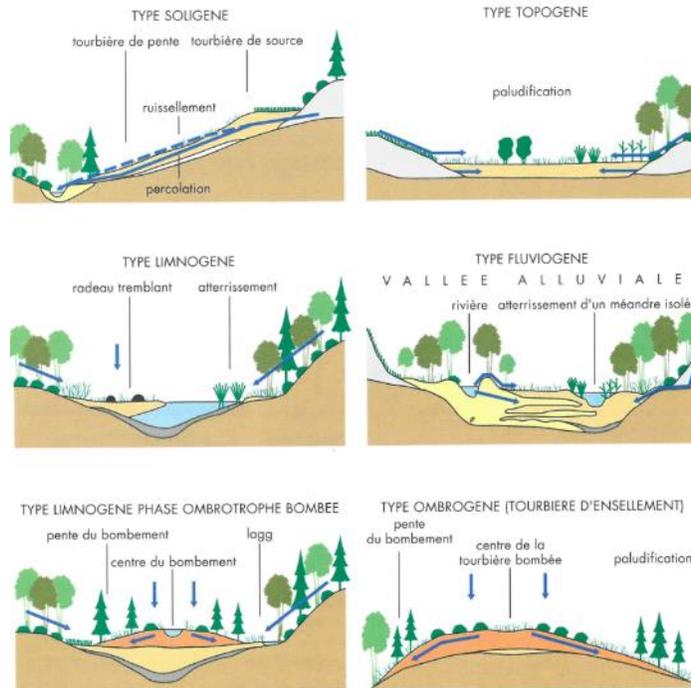
Typologie/types des zones humides

Il existe de nombreux types et typologies de zones humides

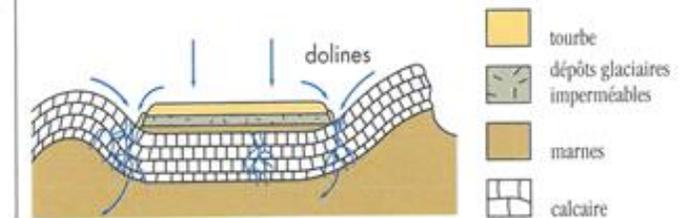
Ces typologies peuvent être fondées sur :

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

SCHÉMAS DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES PRINCIPAUX TYPES DE TOURBIÈRES
(d'après G. M. STEINER). Les flèches indiquent les mouvements latéraux ou verticaux de l'eau.

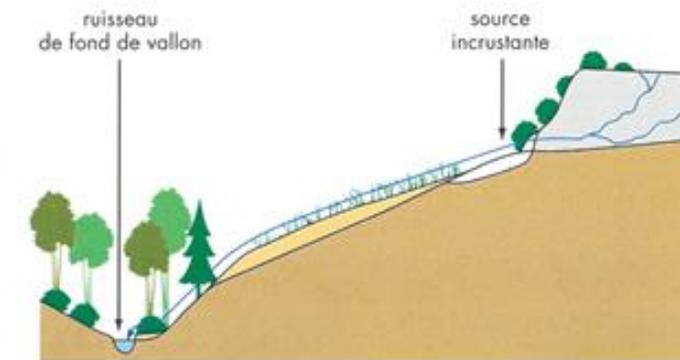


FORMATION D'UNE TOURBIÈRE BOMBÉE ACIDE DANS LE CONTEXTE KARSTIQUE DU JURA
(d'après J.M. GOBAT).



ORIGINE D'UN MARAIS TUFEUX AU CONTACT D'UN CALCAIRE KARSTIFIÉ ET D'UN NIVEAU IMPERMÉABLE.
LES BIOTOPES SONT DE PLUS EN PLUS TOURBEUX, QUAND ON S'ÉLOIGNE DE LA SOURCE.
(d'après G.M. STEINER)

Sources tufeuses et tufière de Rolampont (Haute-Marne) ; l'eau très calcaire dépose du tuf le long des abrupts et sous forme d'escaliers grâce à l'activité de diverses mousses, dont *Cratoneuron commutatum*.



Fonctionnement hydrologique des tourbières – extraits (Manneville et al., 1999)

Contenu

Plan de la présentation

(1) Contexte

- Interactions eau sout'/eau sup'
- Problématique et objectifs
- Équipe projet

(2) Sites d'étude

Luitel, Frasne, Haute Vallée de l'Aude

(3) à (7) Tourbières : Projet ZHTB

- Développement méthodologique
- Outils et principes
- Principaux résultats
- Synthèse
- Indicateurs

(8) Conclusion et perspectives

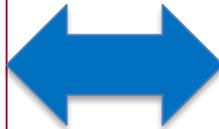
Annexes :

- Auteurs et contributeurs
- Références bibliographiques

Contexte hydrogéologique :

Zones humides (tourbières) de tête de bassin versant

- Interactions eau souterraine/eau superficielle/**tourbière**
(Luitel, Frasne, Haute-vallée de l'Aude)
- Zones stratégiques pour l'alimentation des cours d'eau à l'étiage



(2) Sites d'étude : du site au bassin versant

Frasne, Luitel, haute-vallée de l'Aude

- **Tourbière de Luitel (Isère)**



Office National des Forêts



- **Tourbière de Frasne (Doubs)**

Lien : projet SoHUMID
BRGM/AFB



- **Autres sites** : Tourbière de Praubert (74), Marais de Vaux (01), Tourbière de Montselgues (07)

Carole Desplanque

Geneviève Magnon
Elodie Mehl



- **Zones humides de la haute-vallée de l'Aude (massif du Madrès)**



Échelle du bassin versant

Benoit Larroque

Échelle du site

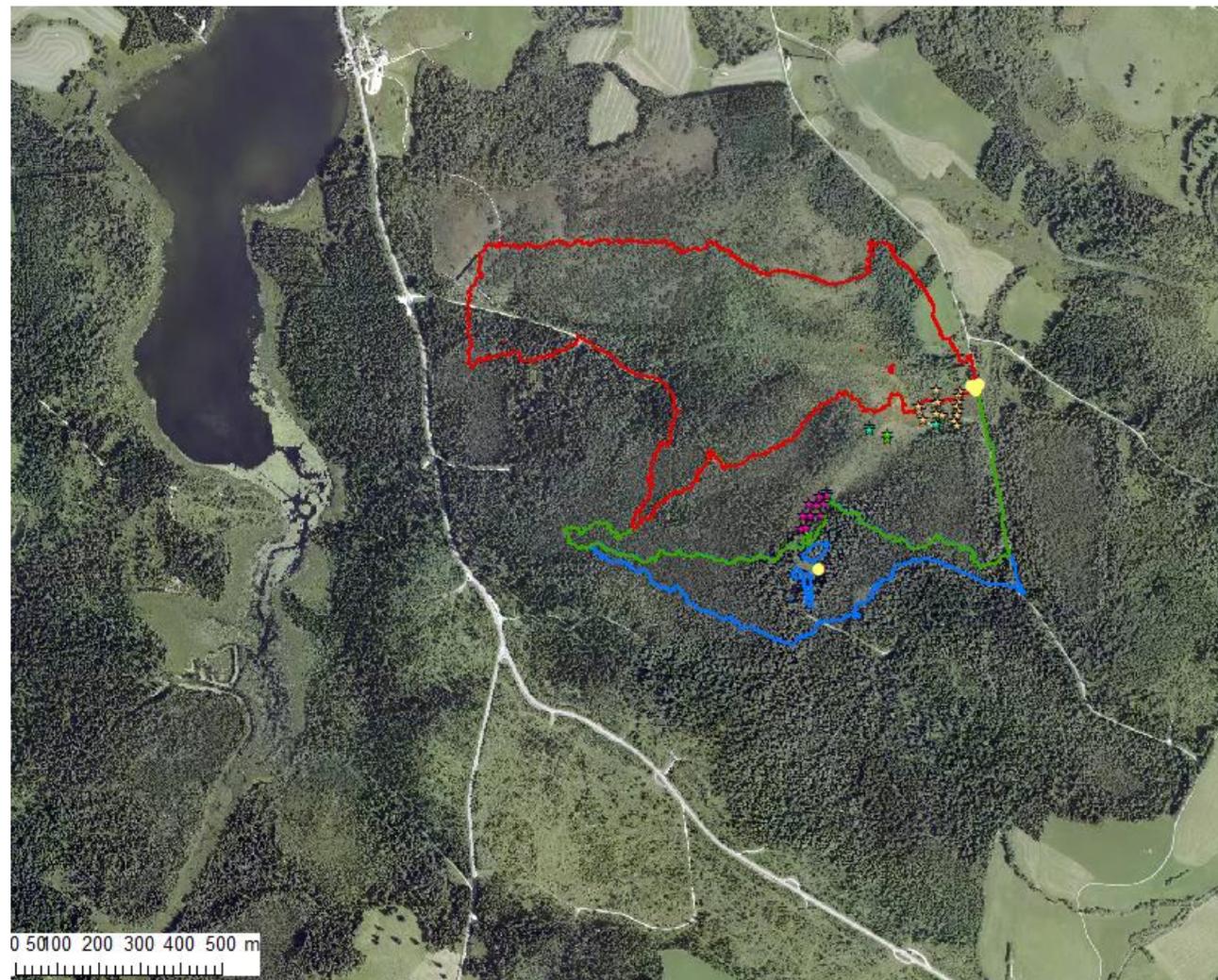
(2) Tourbière de Frasne-Bouverans

Échelle du site

- **Localisation** : 60 km au sud de Besançon
- **Altitude** : 850 m
- **Age** : 7 000 ans au moins
- **Surface** : 230 ha
- **Épaisseur** : 1 à 7 m
- **Types de milieu** : tourbière bombée, tourbière de pente, bas-marais, tourbière boisées et milieux annexes
- **Géologie** : calcaire (karst), glaciaire

Frasne

- Intégration dans le plan de gestion de la réserve
- Partage de données : météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau) et géophysiques
- Instrumentation complémentaire :
 - 3 sondes CTD à l'exutoire principal pérenne
 - 1 sonde CTD au Creux au Lard



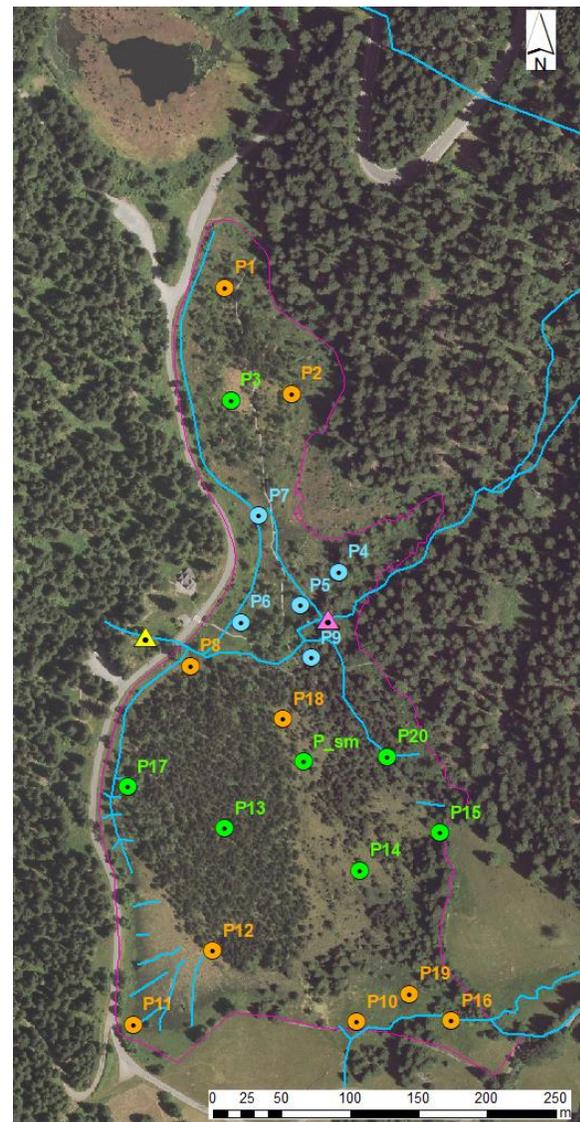
(2) Tourbière du Luitel

Échelle du site

Luitel :

- Autorisation préfectorale
- Partage et acquisition de données : météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau), géophysiques, géochimiques, pédologiques
- Instrumentation complémentaire :
 - 2 seuils jaugés amont et aval faibles débits (sondes CTD) + 1 existant forts débits + 1 ruisseau du lac
 - 5 sondes en piézomètres + 7 existantes

- **Localisation** : 20 km au sud-est de Grenoble
- **Altitude** : 1 250 m
- **Age** : 12 000 ans
- **Surface** : 10 ha
- **Épaisseur** : 1 à 10 m
- **Type de milieu** : tourbière bombée, tourbière boisée, radeaux flottants et milieux annexes
- **Géologie** : métamorphique, glaciaire



(2) Zones humides – Haute Vallée de l'Aude

Échelle du bassin versant

Échelle du bassin versant

Bassin versant Pountarrou

1 sous-bassin versant pilote avec ZH (**rouge pointillés**)

1 sous-bassin versant témoin sans ZH (**vert pointillés**)

- 2 H-Flume¹ (débitmètres) aux exutoires
- Pluviomètre²



3



1

Échelle de la zone humide

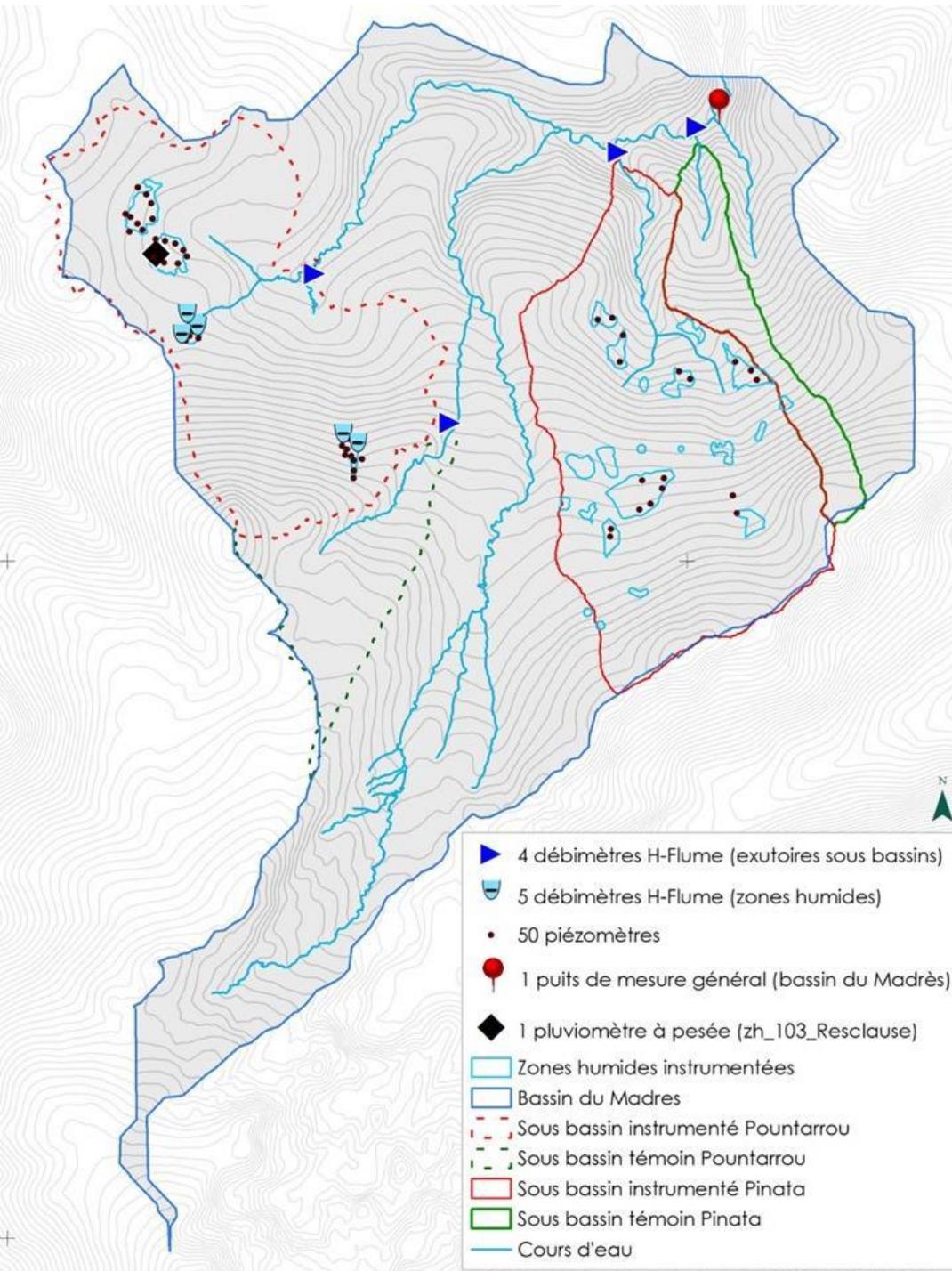
Bassin versant Pountarrou

4 ZH instrumentées (**contours bleus**)

- 32 Piézomètres³ dans les zones humides
- 5 H-Flume (débitmètres) aux exutoires



2



→ soutien d'étiage

→ atténuation des crues

(3) Volet hydrologique

Questionnements et méthodes/outils

- > Quels sont les flux d'eau entrant et sortant du réservoir tourbeux ?
- > Quelle est la variation du niveau d'eau dans le réservoir tourbeux ?
- > Quel est le fonctionnement hydrologique du réservoir tourbeux ?

--> Instrumentation pour l'acquisition de chroniques de données

--> pluviométrie, température, hauteur d'eau...

--> Transformation hauteur / débit

--> seuil jaugé, courbe de tarage...

--> Bilans hydrologiques

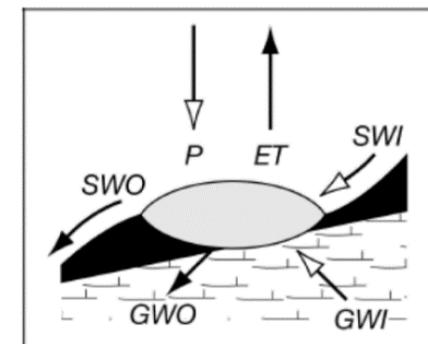
--> entrées d'eau vs sorties d'eau

--> Analyses statistiques

--> débit classé, corrélation, autocorrélation, corrélation croisée...

--> Modélisation

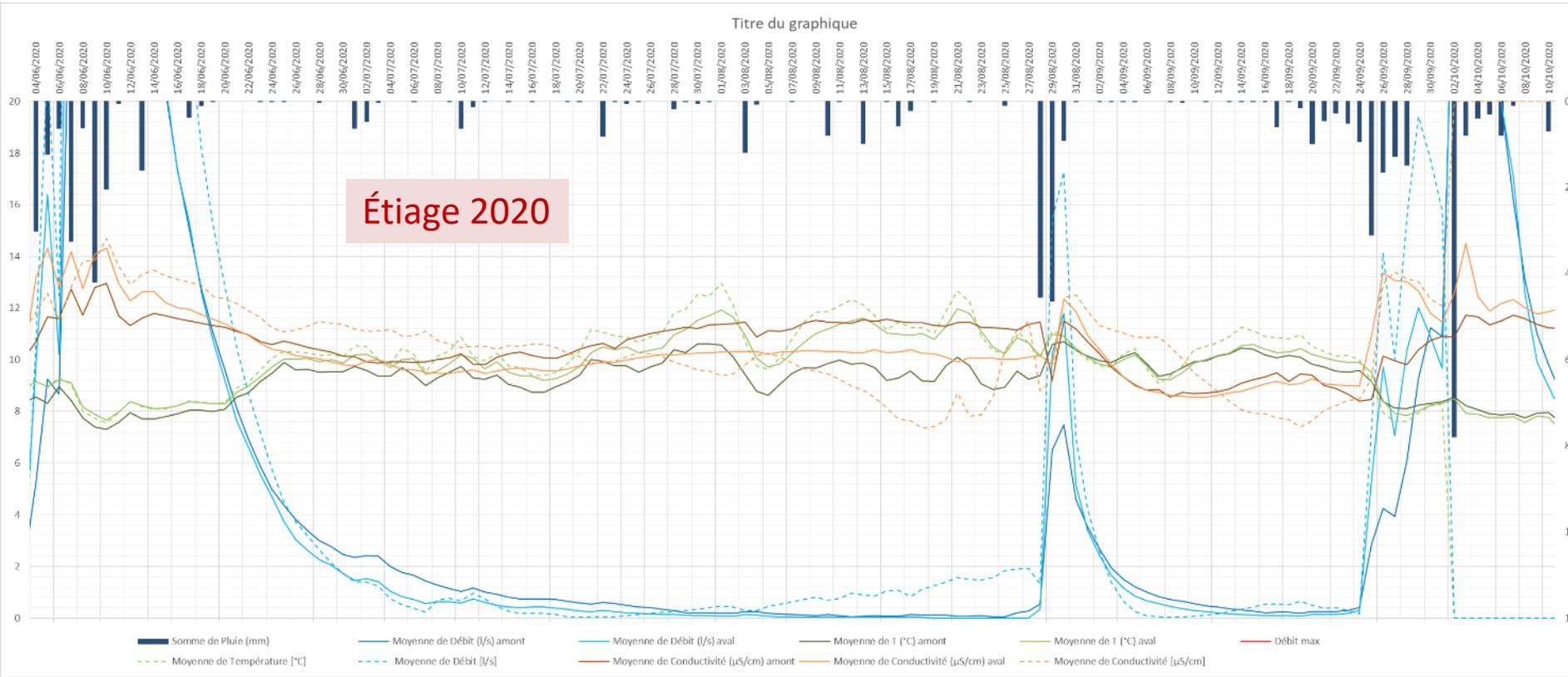
--> réseau de neurones, modèle réservoir (ex: KarstMod)



Gilvear et Bradley,
2009

(3) Volet hydrologique

Acquisition de données et chroniques (ex : Luitel)



Ruisseau de Fontfroide amont

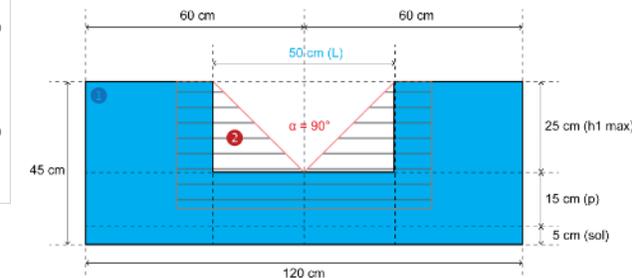
- Pluviométrie
- Conductivité électrique
- Température

Formule de Thomson :

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

Avec :

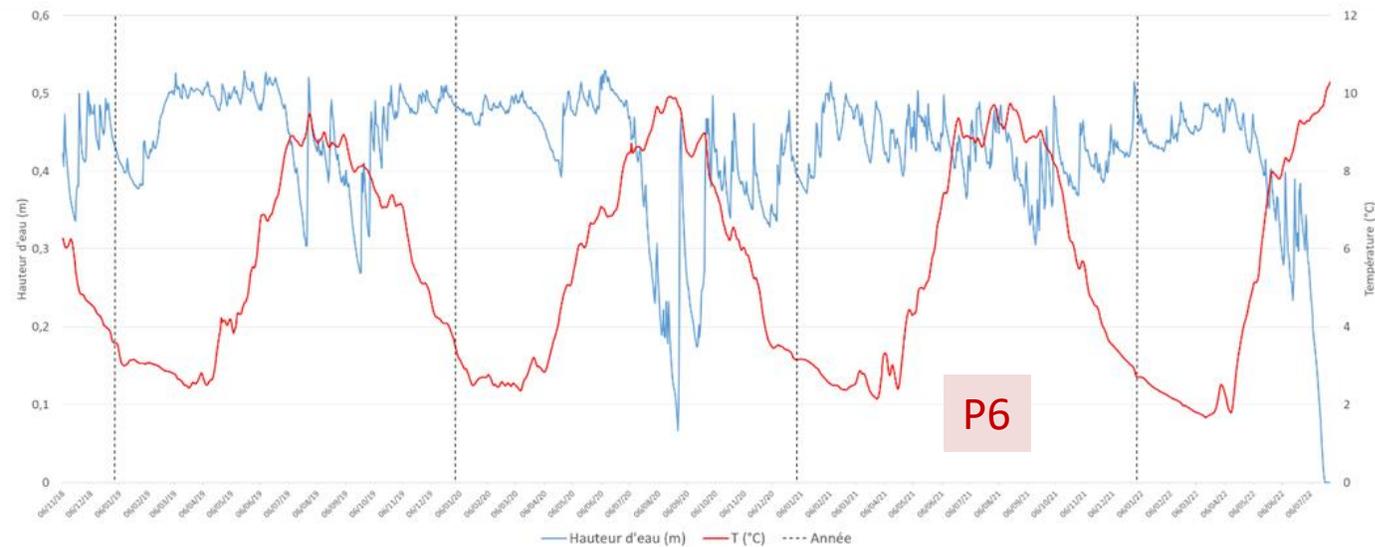
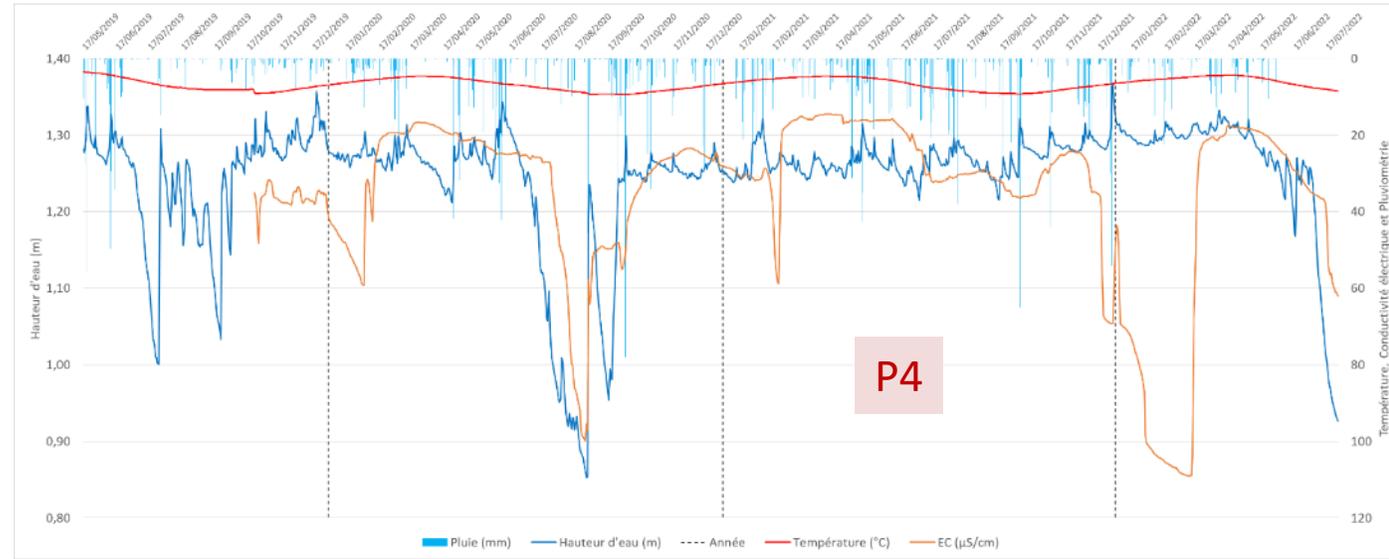
- Q : débit en m³/s
- h : hauteur d'eau en m



(3) Volet hydrologique

Acquisition de données et chroniques (ex : Luitel)

Chronique de données du piézomètre P4
Pression, température, conductivité électrique
(17 mai 2019 au 27 juillet 2022)



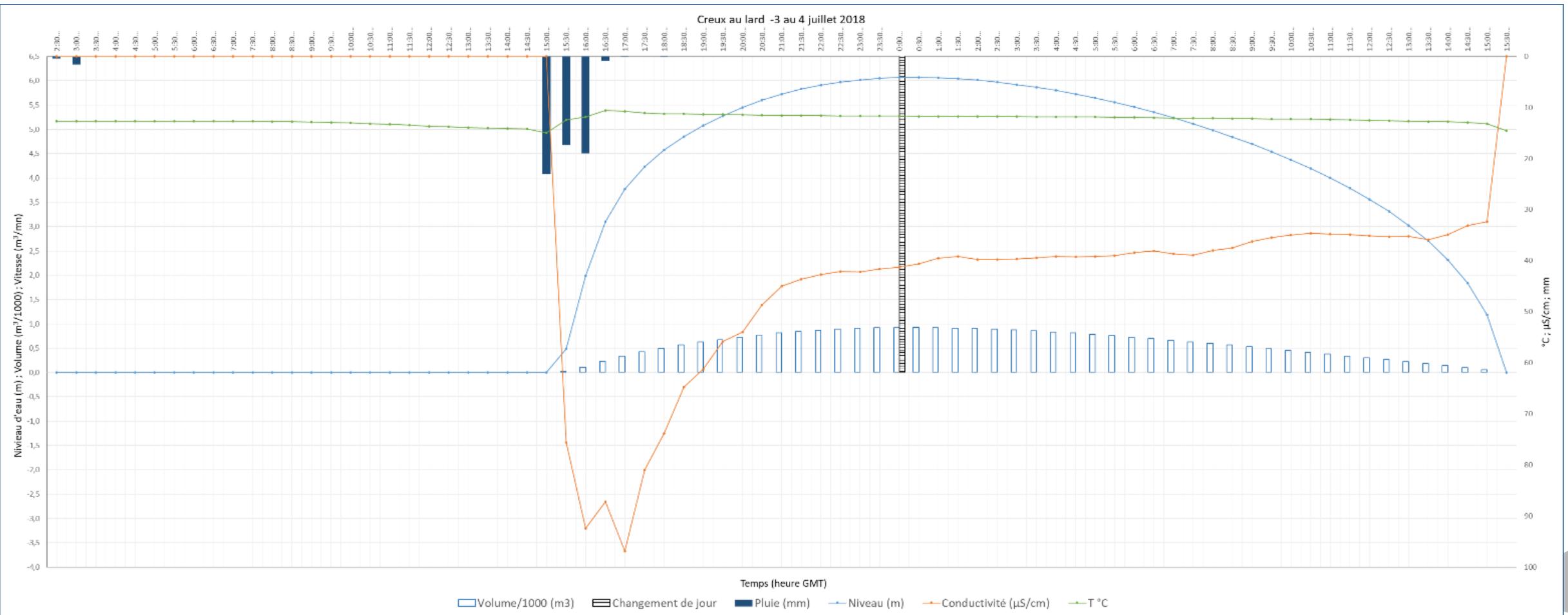
Chronique de données du piézomètre P6
Pression et température
(6 novembre 2018 au 27 juillet 2022)



(3) Volet hydrologique

Acquisition de données et chroniques (ex : Frasne)

Doline du Creux au lard : 3 au 4 juillet 2018

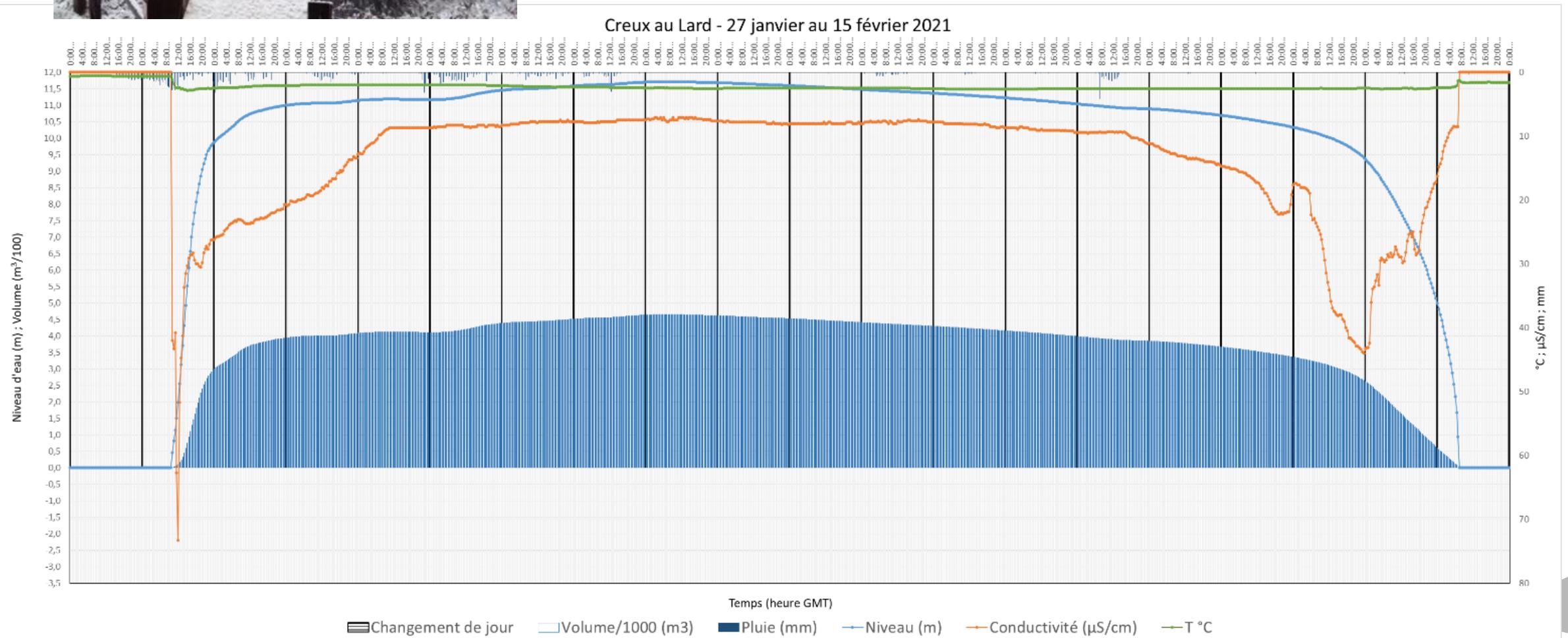




(3) Volet hydrologique

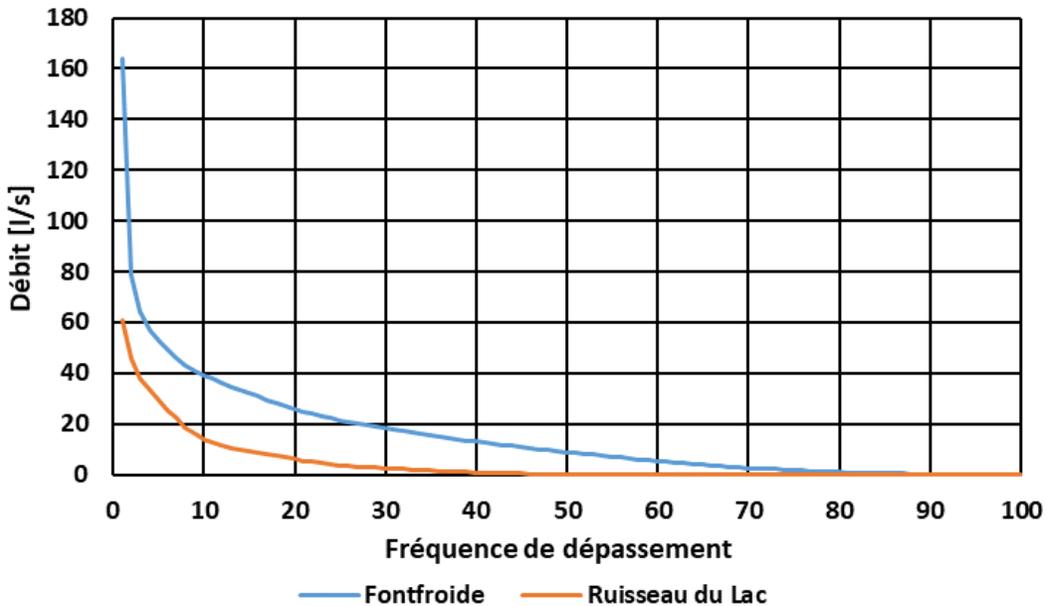
Acquisition de données et chroniques (ex : Frasne)

Doline du Creux au lard : 27 janvier au 15 février 2021

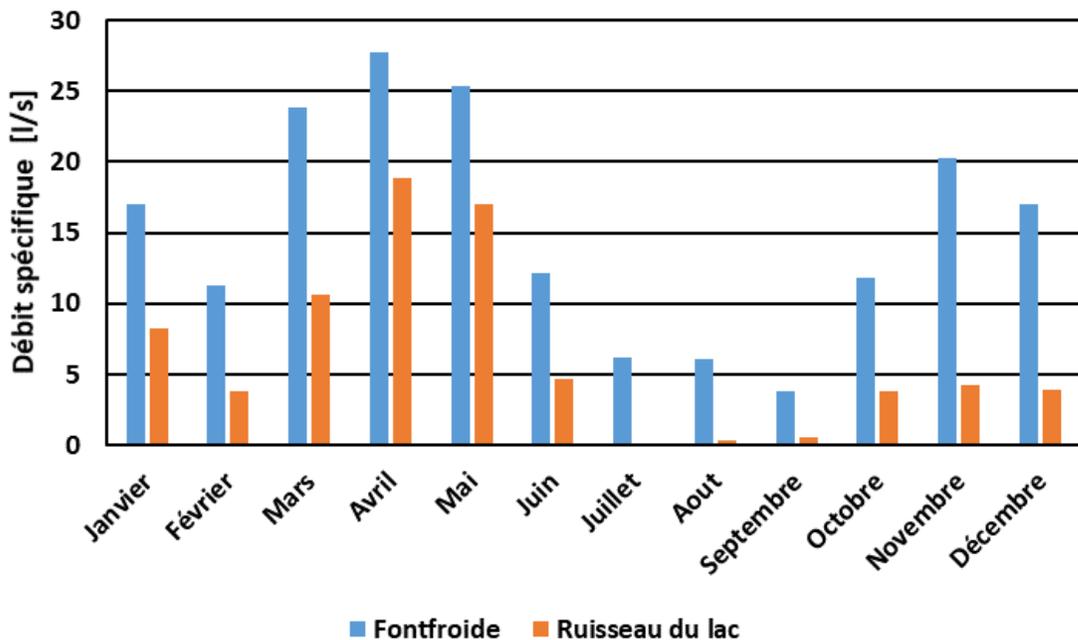


(3) Volet hydrologique

Exemple d'analyse statistique (ex: Luitel)



Comparaison du régime hydrologique de 2 ruisseaux



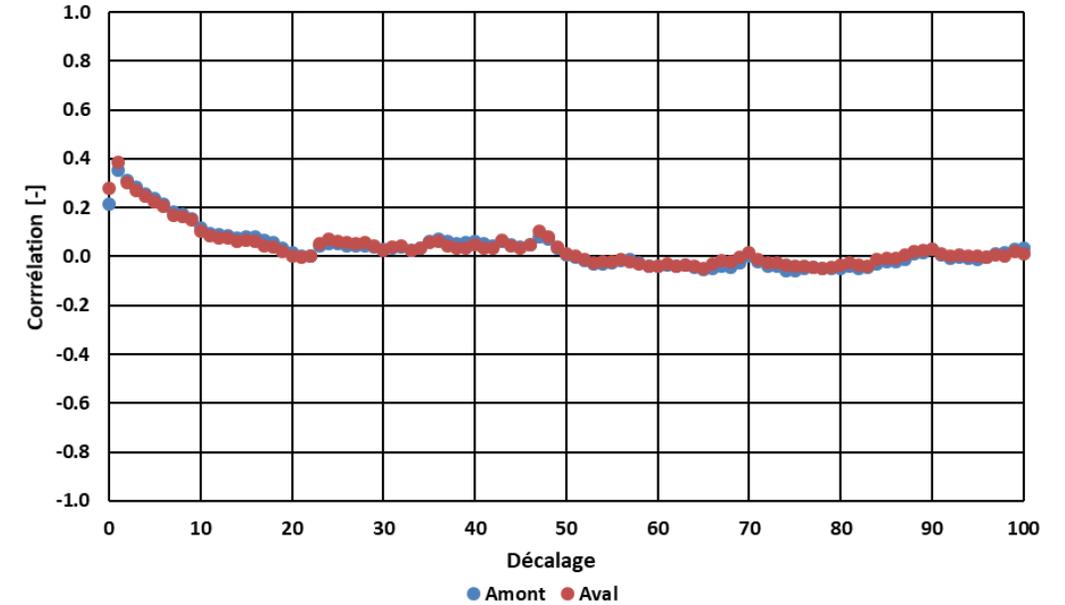
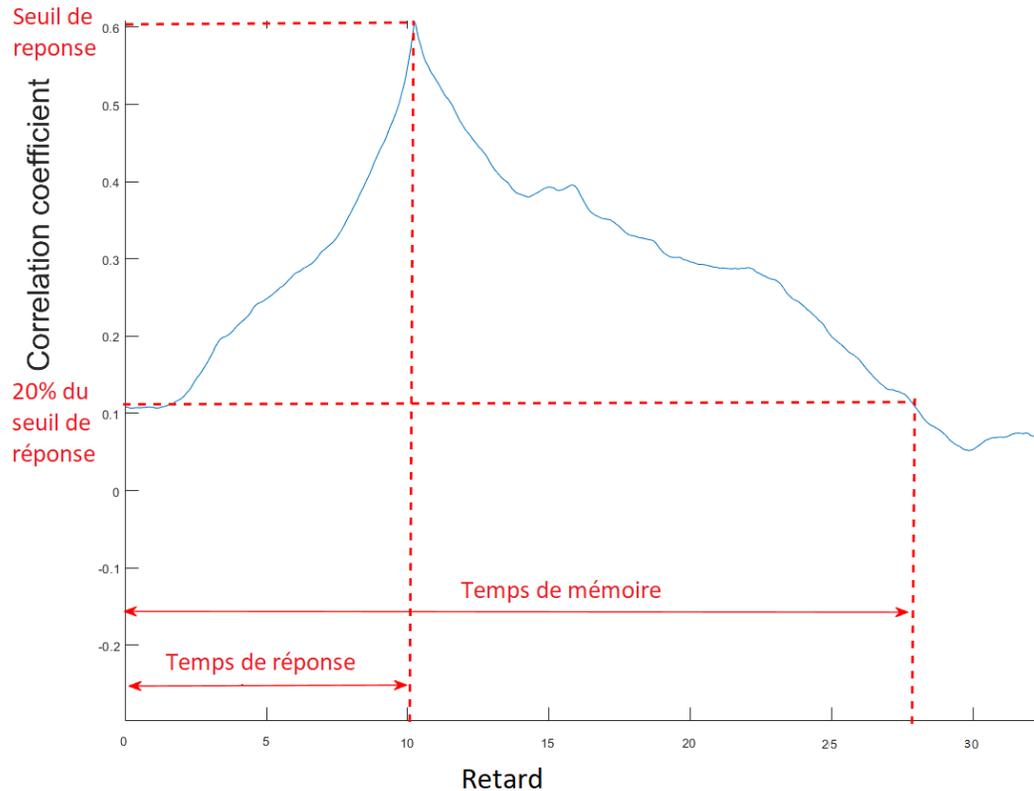
Nom	Variable	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Ruisseau du Lac	Hauteur	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Ruisseau du Lac	Température	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Ruisseau du Lac	Conductivité	Red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

Des traitements statistiques pour aller plus loin dans l'analyse du jeu de données

(3) Volet hydrologique

Exemple d'analyse statistique (ex: Luitel)

Analyse du temps de réponse et du temps de mémoire

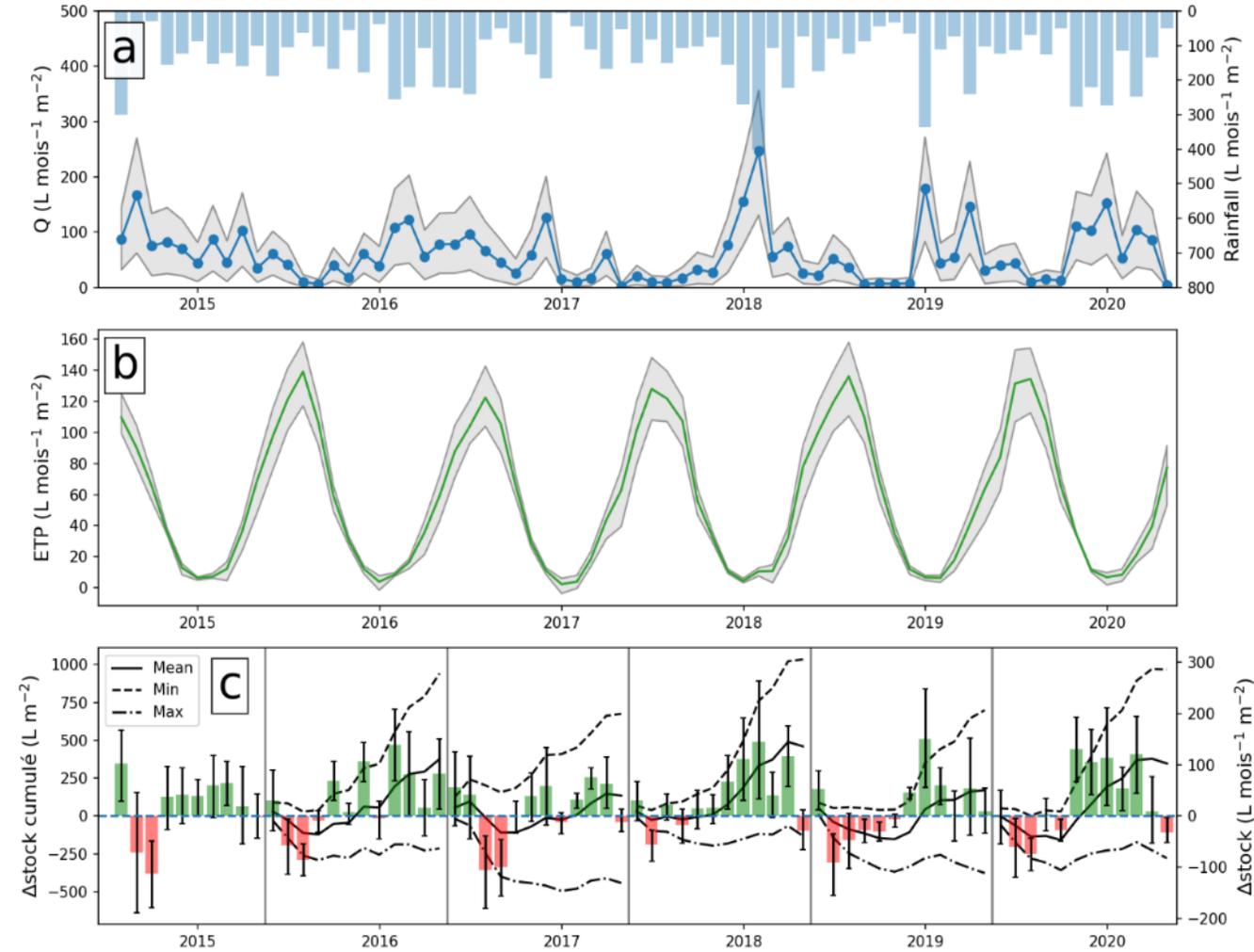


Corrélation pluie/débit - ruisseau de Fontfroide (amont et aval)

- temps de réponse : 1 jour
- effet mémoire : 7 jours

(3) Volet hydrologique

Exemple de bilan hydrologique (ex: Frasne)



- Excédentaire en hiver / déficitaire en été

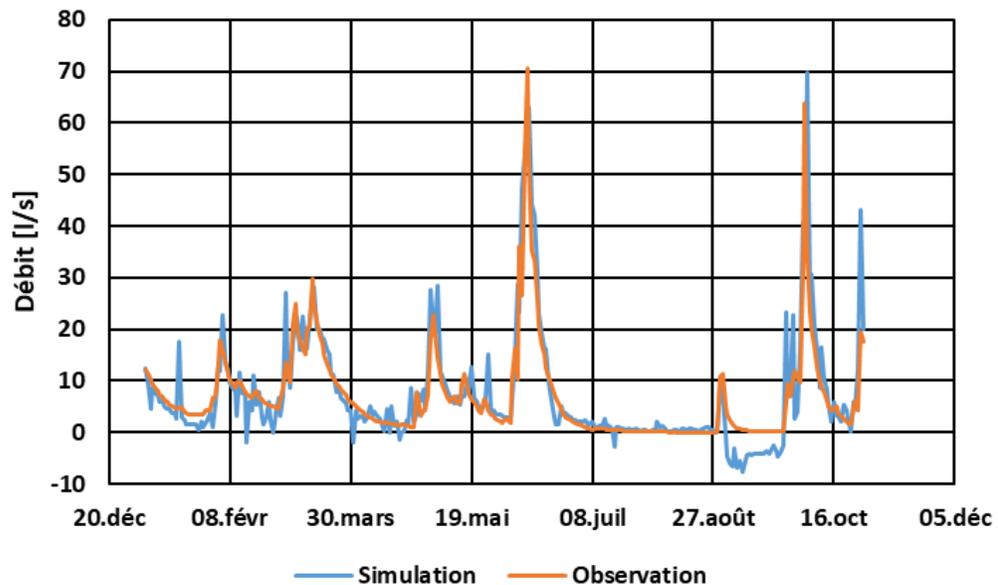
- Importance de l'interception précipitation par la végétation ou (pertes ?)

- Bilan déséquilibrer (apports souterrains ?)

→ modèle conceptuel

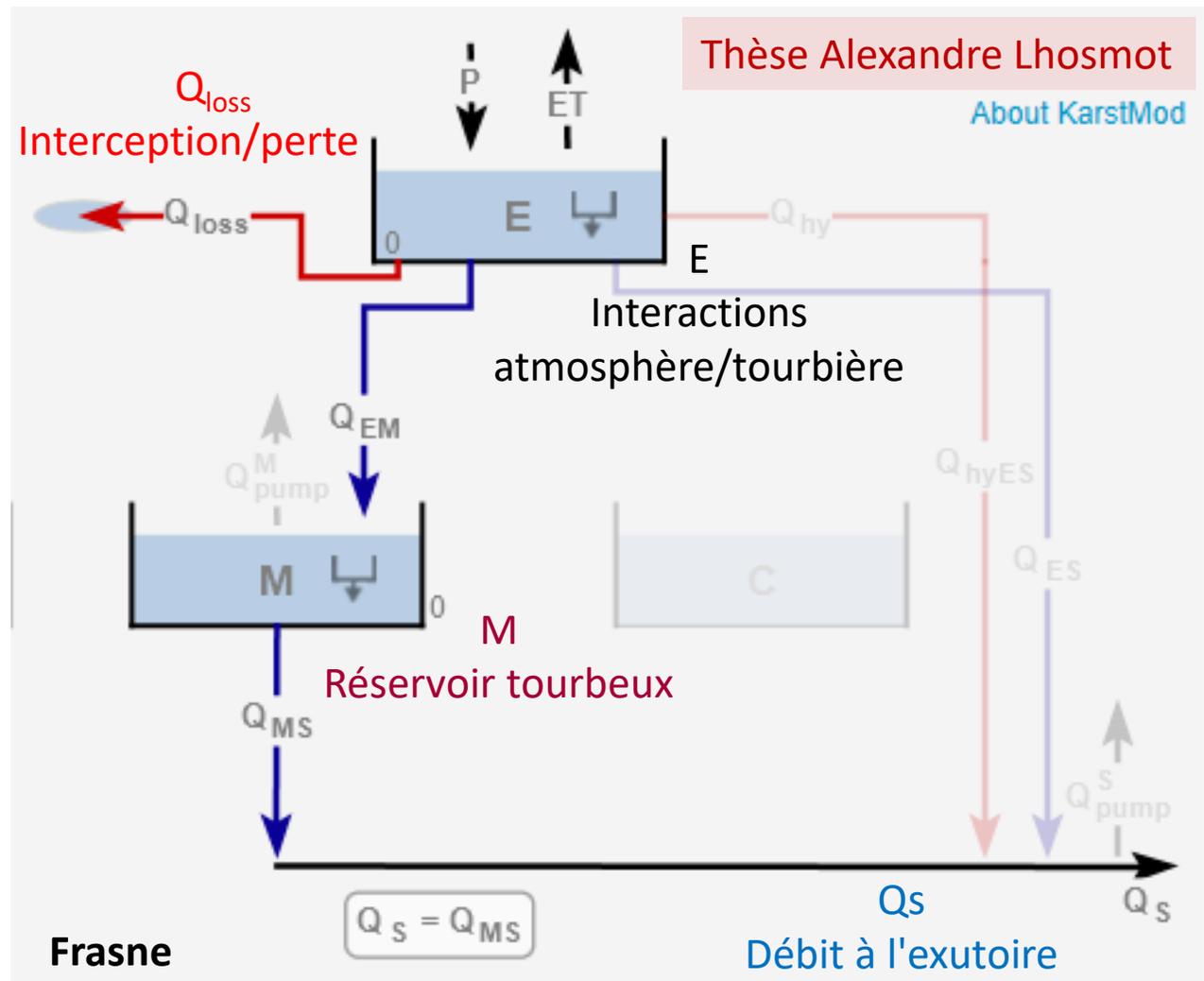
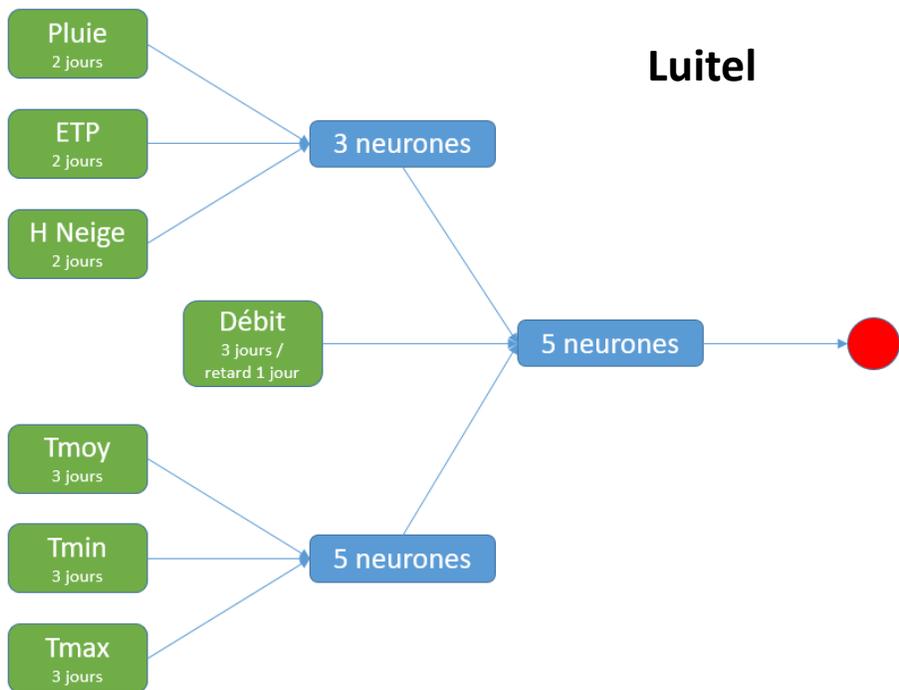
→ modélisation (Karstmod)

Thèse Alexandre Lhosmot



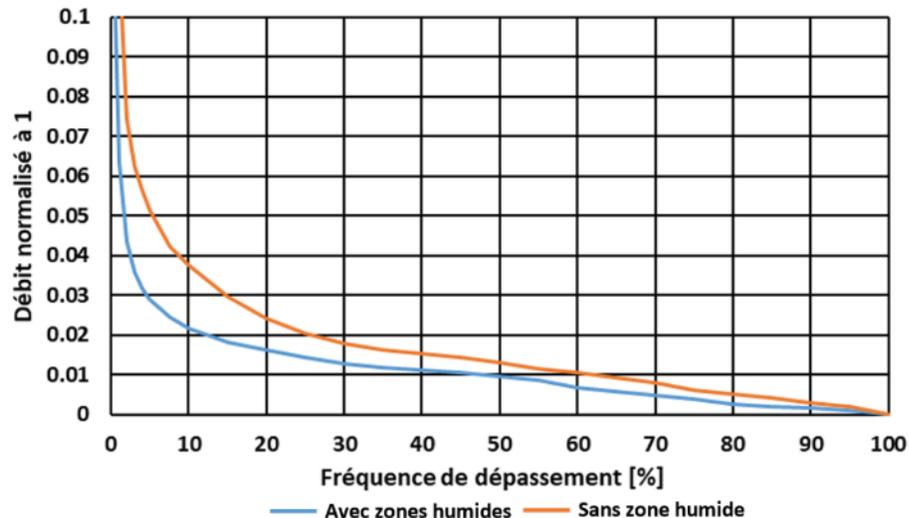
(3) Volet hydrologique

Modélisation (ex: Luitel et Frasne)



(3) Volet hydrologique

Exemple de résultats : haute-vallée de l'Aude

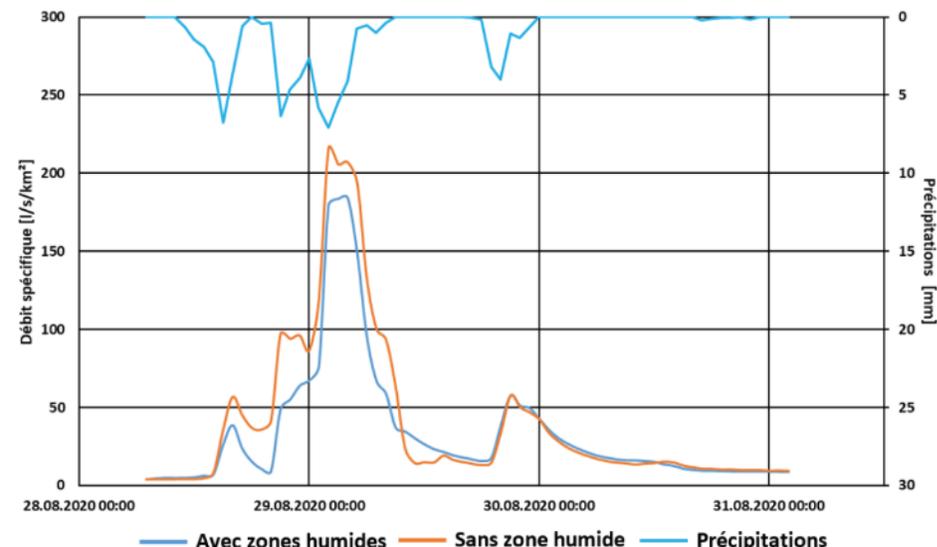


2018	O	N	D										
Débit Pountarrou Instrumenté	Indisponible	Indisponible	Indisponible										
Débit Pountarrou Témoin	Indisponible	Indisponible	Indisponible										
Précipitations	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible										
Température	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible										
2019	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Débit Pountarrou Instrumenté	Indisponible												
Débit Pountarrou Témoin	Indisponible												
Précipitations	Disponible												
Température	Disponible												
2020	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Débit Pountarrou Instrumenté	Disponible	Disponible	Disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible
Débit Pountarrou Témoin	Disponible	Disponible	Disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Indisponible							
Précipitations	Disponible												
Température	Disponible												
2021	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Débit Pountarrou Instrumenté	Disponible												
Débit Pountarrou Témoin	Disponible												
Précipitations	Disponible												
Température	Disponible												
2022	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Débit Pountarrou Instrumenté	Disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Indisponible	Indisponible								
Débit Pountarrou Témoin	Disponible	Partiellement disponible	Partiellement disponible	Indisponible	Indisponible								
Précipitations	Disponible												
Température	Disponible												

Sensibilité élevée à l'évapotranspiration

=

vulnérabilité des ZH face à une augmentation des températures liée au changement climatique ?



- Zones humides majorent l'évapotranspiration
- ZH écrêtent les tout premiers écoulements liées aux crues estivales en se rechargeant

(4) Volet géochimie

Questionnement et méthodes/outils

--> Quelle est l'origine des eaux alimentant le réservoir tourbeux ?

--> Prélèvement d'eau (souterraine et superficielle) à différentes saisons pour analyse physico-chimique et isotopique

--> espèces dissoutes majeures (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) [influence des interactions eaux–roches (des apports atmosphériques, anthropiques)] :
information sur le chemin des eaux et les mélanges

--> isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène de la molécule H_2O ($d^{18}O$ et dD) :
traceurs qualitatifs de l'origine (temporelle et spatiale) des précipitations alimentant les masses d'eau étudiées

(4) Volet géochimie

Acquisition de données (ex: Frasne)

Prélèvements géochimie – Frasne Juillet 2019

Version 2 : lundi 8 juillet 2019

Pluviomètre (zone SNO)	
Voir échantillons Guillaume Bertrand	
Cours d'eau	
n = 5	Options n = 4
Exutoire principal (sonde Catherine + emse)	Affluent exutoire aval (hors tourbière) n°1
Affluent 1 exutoire principal aval (sonde emse)	Affluent exutoire amont (hors tourbière) n°2
Affluent 2 exutoire principal aval (sonde emse)	Cours d'eau sud amont n°5
Affluent 1 exutoire principal amont n°3	Cours d'eau sud aval n°6
Affluent 2 exutoire principal amont n°4	
Piézomètres	
	Propositions n = 11
Tourbière vivante (18 piézo) et	Flutes de pan : tv1, tv2, tv3 ou tv8, A, B ou tv4, tv5, tv6
Zone SNO (4 piézo) et	Flute de pan : C et D
Bas-marais (16 piézo) et	Bm18, E, bm13, bm7, bm2, carottage (★)
Résurgences	
n = 2	
Creux au Lard : suintement à mi-hauteur	Tourbière boisée : Source
Excavations (zones de travaux de comblement des fossés) + tourbière vivante	
n = 4	
Grande excavation n°3	Tourbière vivante n°1
Petites excavations n°2 et n°4	
Fossés à tourbes	
n = 1	
Tourbière bombée (intérieure) n°1	Options n = 1
	Tourbière bombée (bordure est) n°2
Fossés	
n = 5	
Exutoires tourbière bombée n°1, n°2, n°3	Amont fossés zone ouest n°4, n°5
Signature extérieure ?	
1. Étang de Frasne	6. Source Bouchard
2. Étang Lucien	7. Source carrée
3. Étang du moulin	
4. Étang Vanthier	
5. Étang Berthelot	

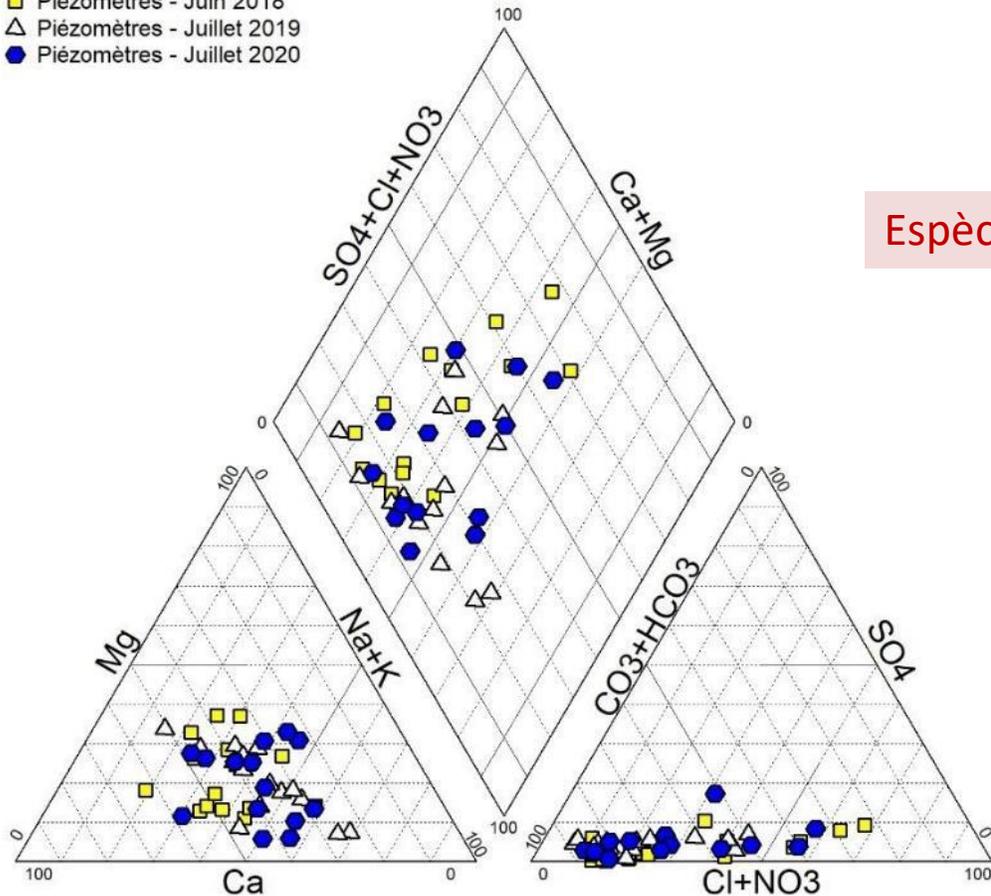
28 échantillons + 5 en options (33 max)

(4) Volet géochimie

Analyse des données d'analyse (ex: Luitel)

Distribution des eaux de la tourbière dans un diagramme de Piper

- Piézomètres - Juin 2018
- △ Piézomètres - Juillet 2019
- Piézomètres - Juillet 2020



Espèces dissoutes majeures

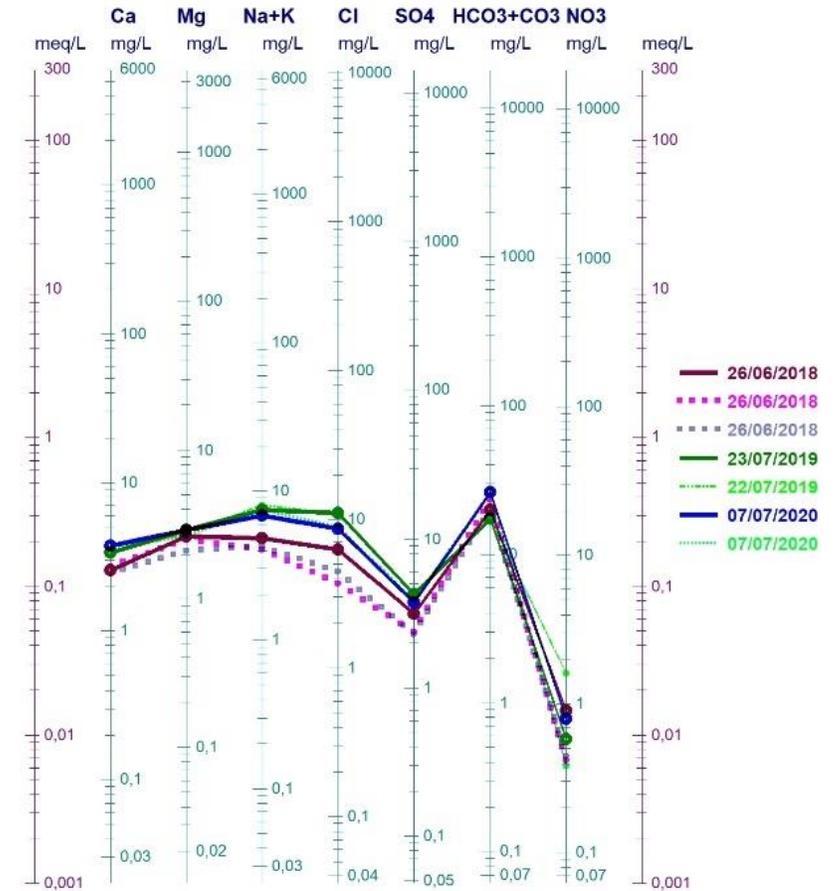
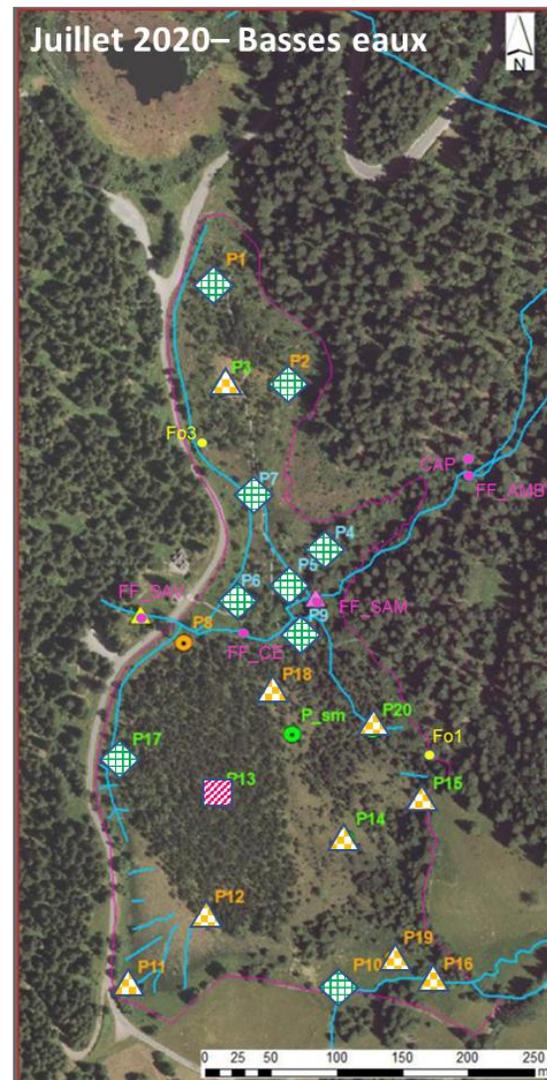
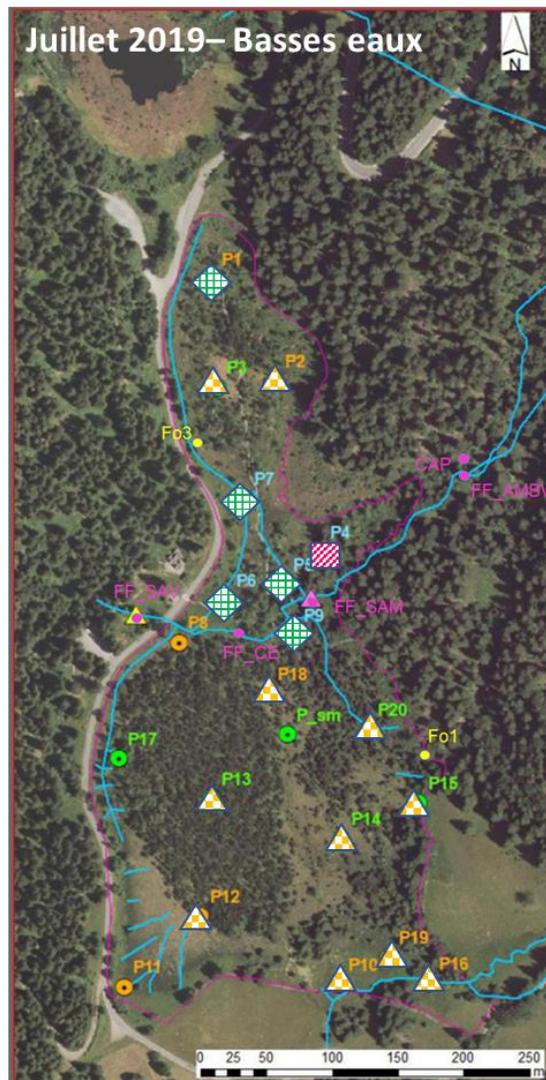
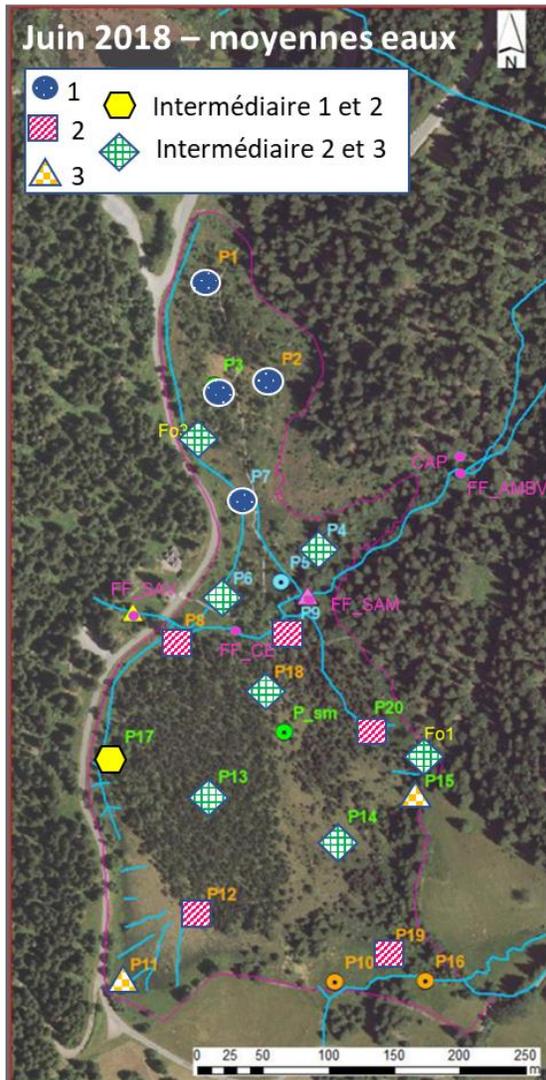


Diagramme de Schoeller, comparaison des tendances (captage et amont Fontfroide)

Trait plein = captage ; traits pointillés = Fontfroide)

(4) Volet géochimie

Interprétation des résultats (ex :Luitel)



Espèces dissoutes majeures

Rond bleu = masse d'eau n°1
influence processus interaction eau-roche négligeable

Carré rose = masse d'eau n°2
faible influence interaction eau-roche

Triangle jaune = masse d'eau n°3
influence interaction eau-roche modérée

Hexagone jaune = Intermédiaire 1 et 2

Losange vert = Intermédiaire 2 et 3

(5) Volets géophysique et pédologie

Questionnement et méthode/outils

--> Quelles sont la géométrie et la structure 3D du réservoir tourbeux dans lequel circulent et sont stockées les eaux ?

--> Acquisition de profils (radargrammes) par GPR (Ground penetrating radar)



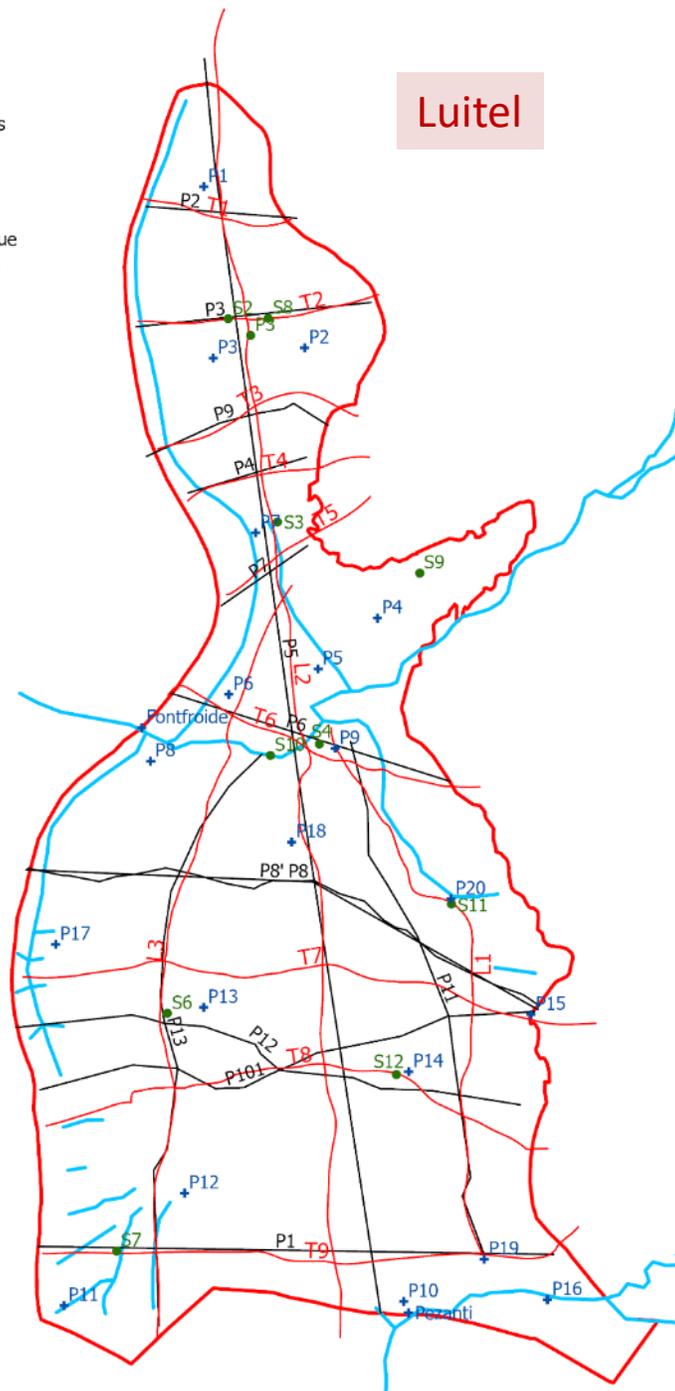
--> Validation par des sondages (interface tourbe substratum : géométrie)

--> Validation par des carottages (interfaces dans la tourbe : structure)



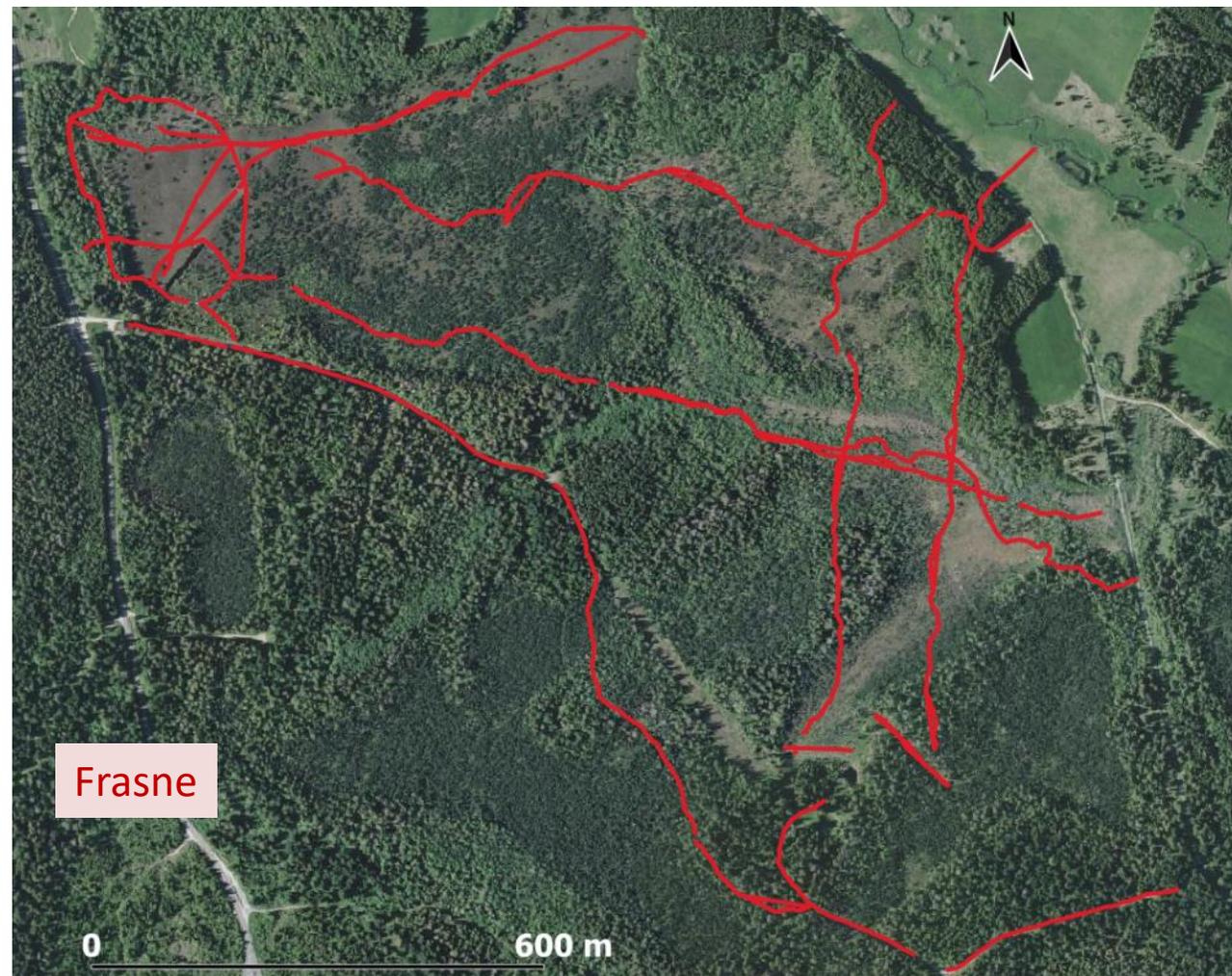
Légende

- + Piézomètres
- Carottes pédologiques 2018-2019
- Radargrammes 2018
- Radargrammes 2008
- Réseau hydrographique
- Limite de la tourbière du col



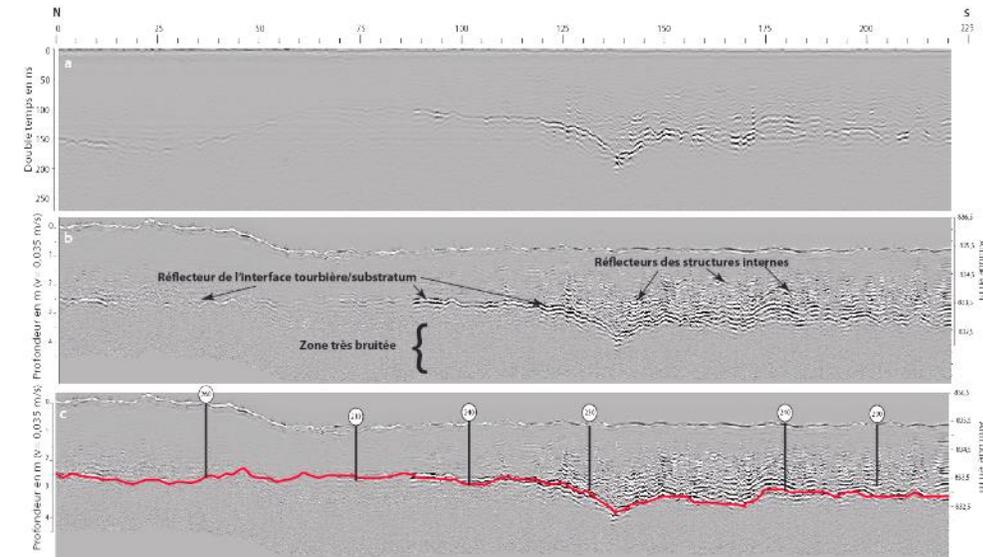
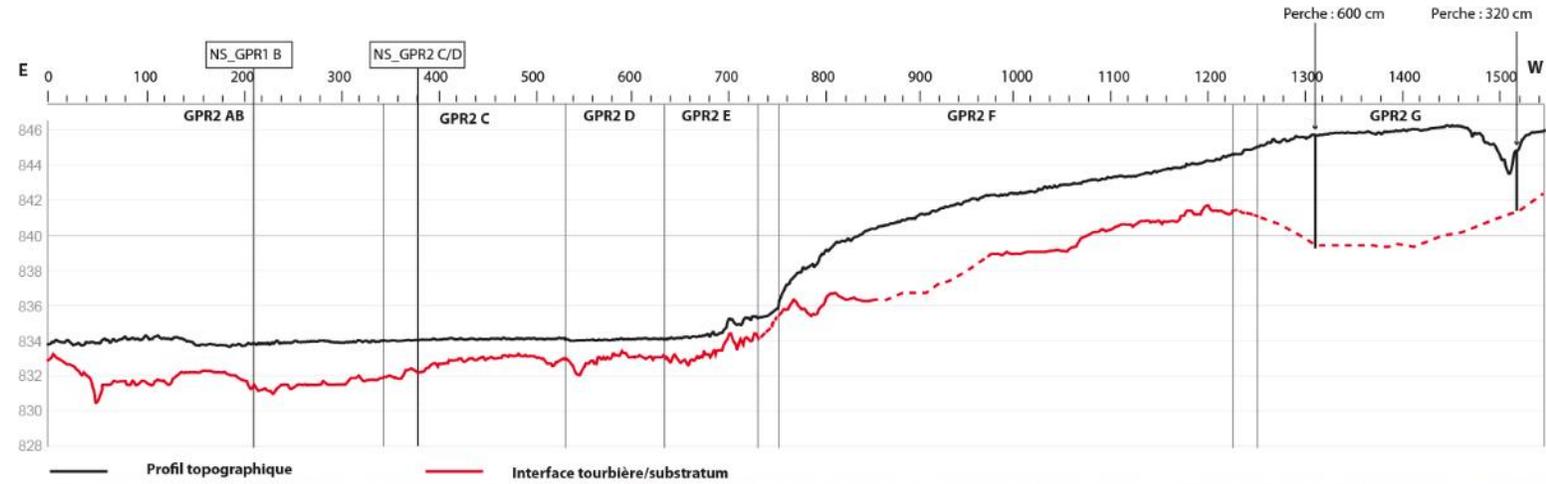
(5) Volets géophysique et pédologie

Acquisition de données (ex : Luitel et Frasne)



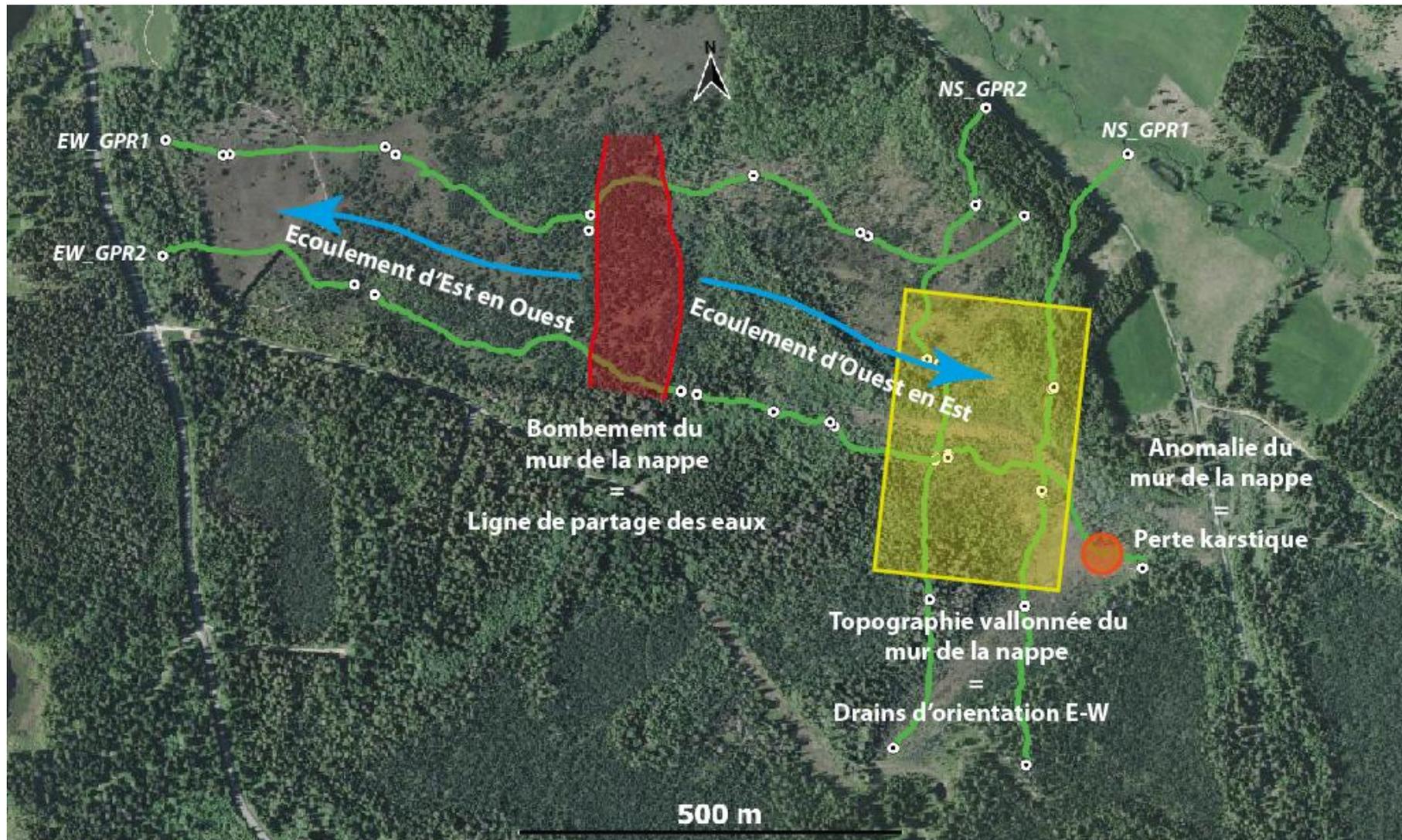
(5) Volets géophysique et pédologie

Traitement des données (ex : Frasne)



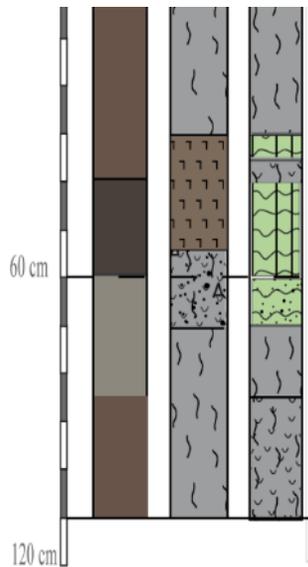
(5) Volets géophysique et pédologie

Interprétation des résultats (ex : Frasne)



(5) Volets géophysique et pédologie

Interprétation des résultats (ex : Luitel)



Légende

Code Munsel

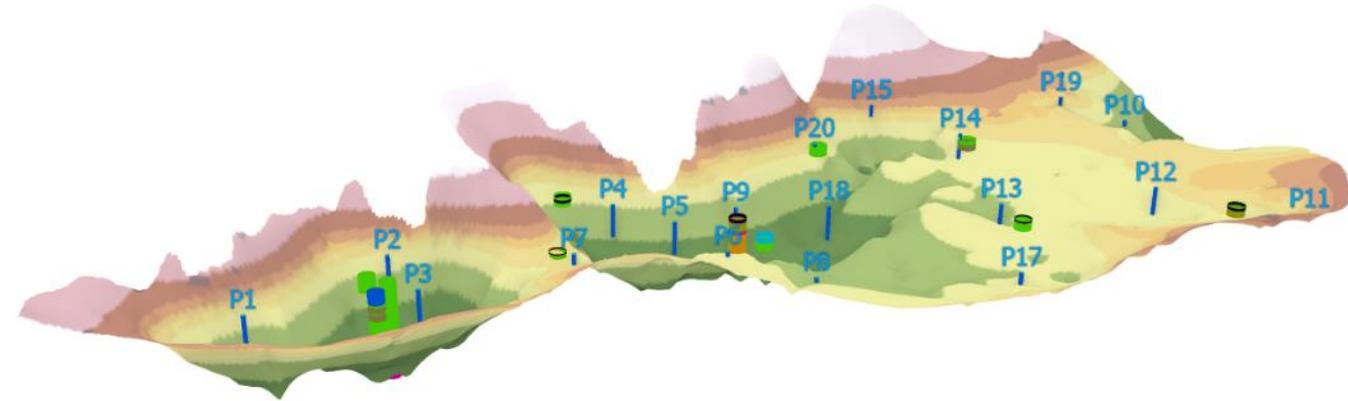
	5YR 3/2
	2.5YR2.5/1
	5YR5/1
	5YR3/2

Stratigraphie

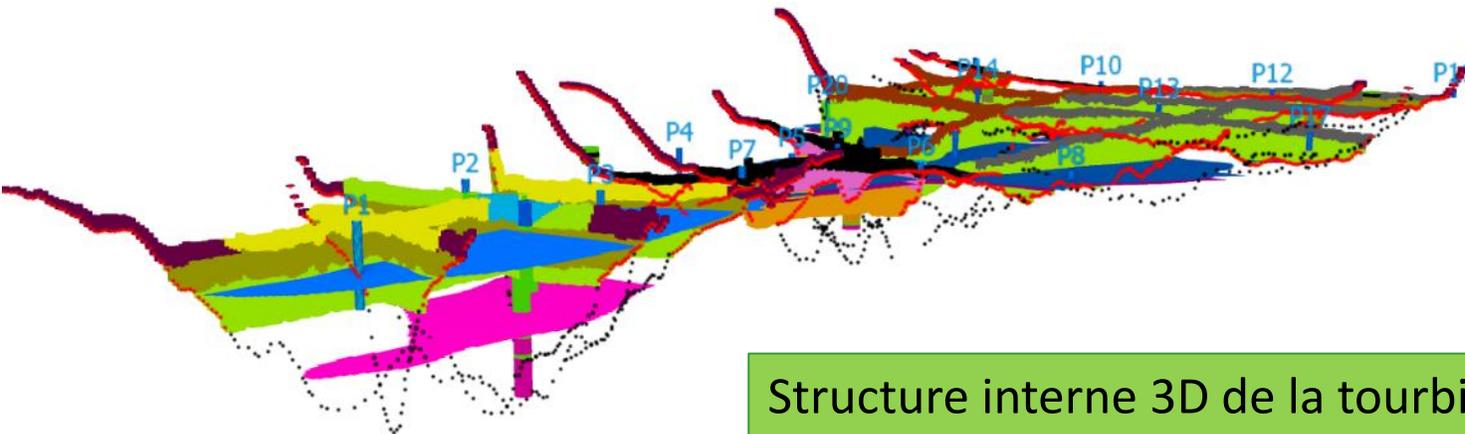
	Végétation de surface
	Tourbe fibrique
	Horizon assaini
	Tourbe mésique

Texture précise

	Tourbe fibrique
	Tourbe mésique à fibrique
	Tourbe fibrique à mixte
	Tourbe mésique à saprique



Géométrie 3D de la tourbière du Luitel



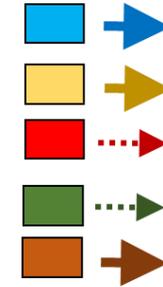
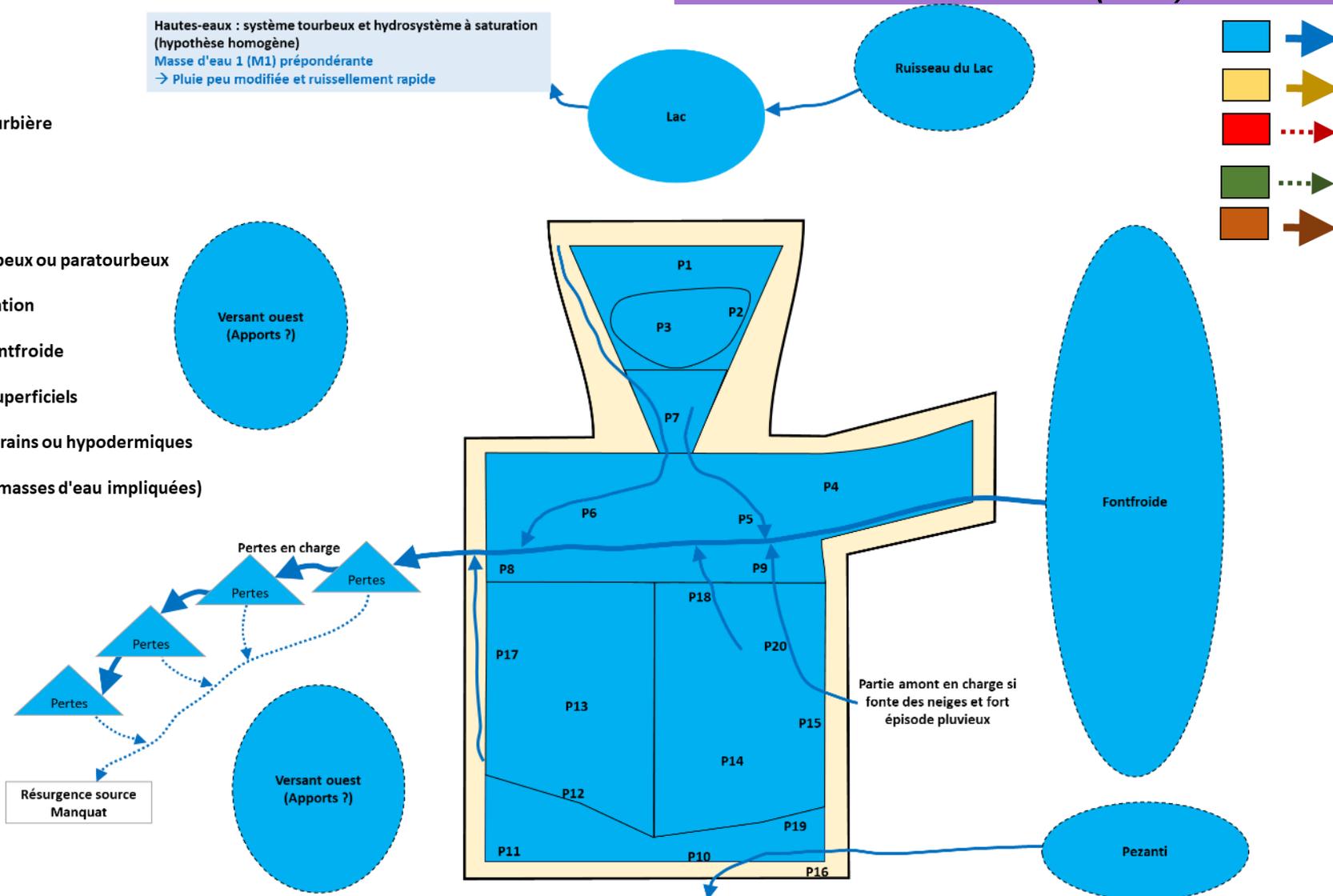
Structure interne 3D de la tourbière du Luitel

(6) Synthèse des résultats

Tourbière de Luitel (1/3)

Hautes-eaux : système tourbeux et hydrosystème à saturation
(hypothèse homogène)
Masse d'eau 1 (M1) prépondérante
→ Pluie peu modifiée et ruissellement rapide

-  Limite de la tourbière
-  Lac du Luitel
-  Pertes
-  Réservoir tourbeux ou paratourbeux
-  Aire d'alimentation
-  Ruisseau de Fontfroide
-  Écoulements superficiels
-  Apports souterrains ou hypodermiques
- Code Couleur (masses d'eau impliquées)

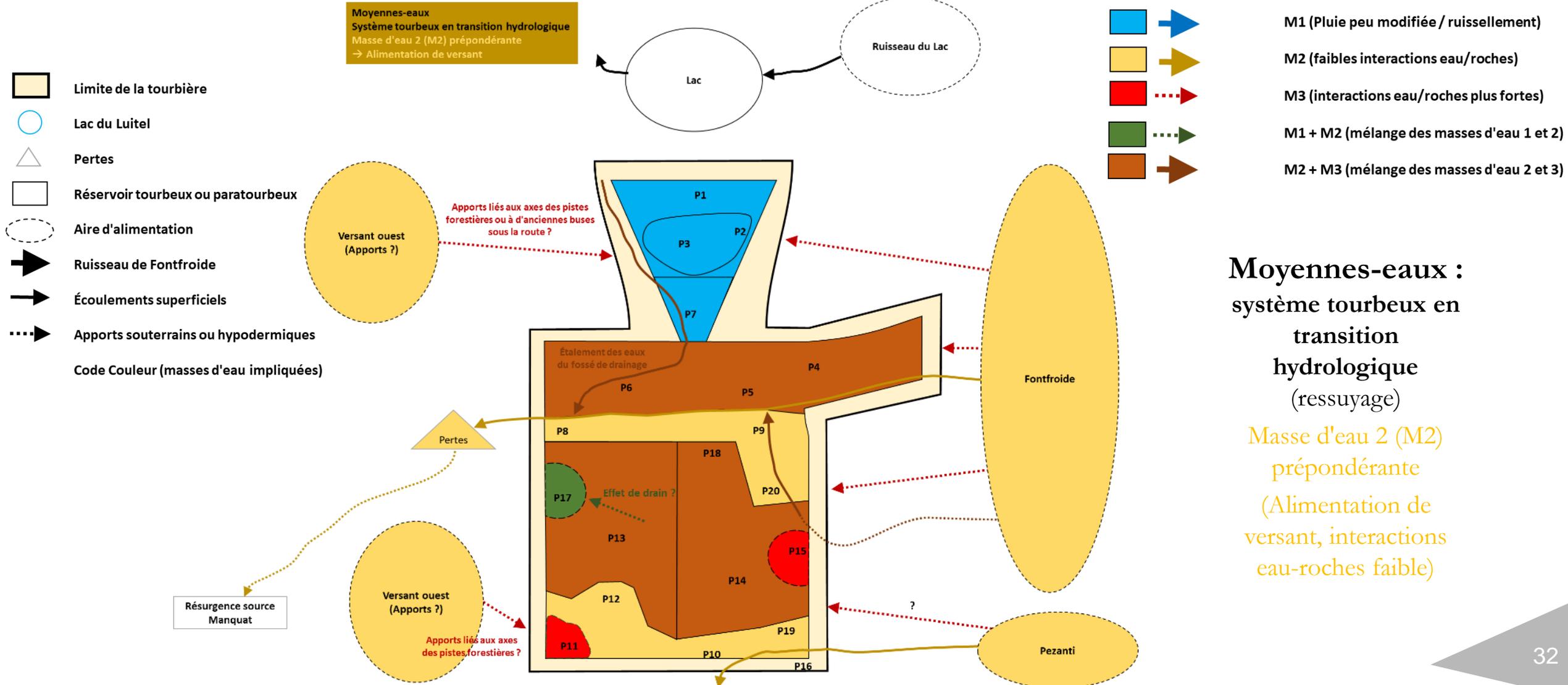


- M1 (Pluie peu modifiée / ruissellement)
- M2 (faibles interactions eau/roches)
- M3 (interactions eau/roches plus fortes)
- M1 + M2 (mélange des masses d'eau 1 et 2)
- M2 + M3 (mélange des masses d'eau 2 et 3)

Hautes-eaux :
système tourbeux
et hydrosystème à
saturation
(hypothèse
homogène)
Masse d'eau 1 (M1)
prépondérante
(Pluie peu modifiée
et ruissellement
rapide)

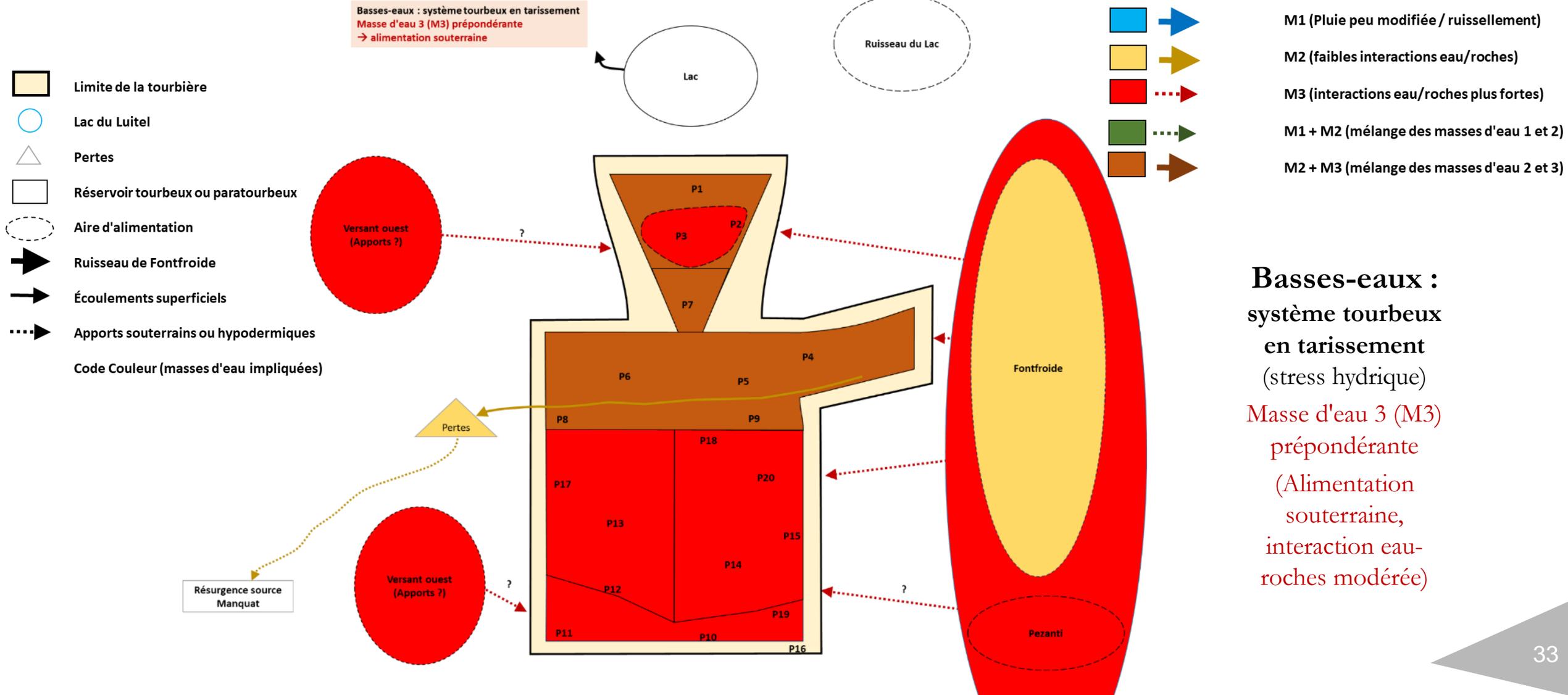
(6) Synthèse des résultats

Tourbière de Luitel (2/3)



(6) Synthèse des résultats

Tourbière de Luitel (3/3)

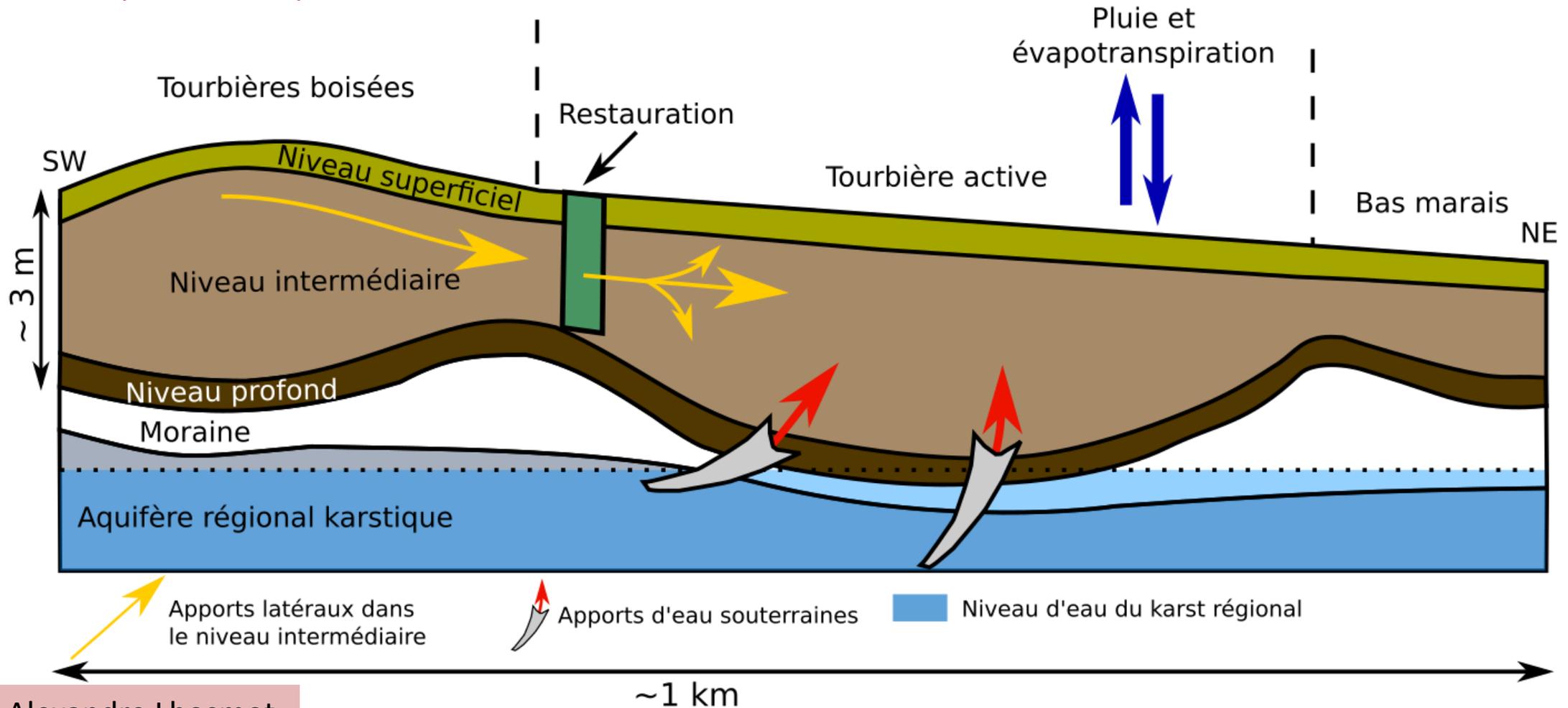


Basses-eaux :
système tourbeux
en tarissement
(stress hydrique)
Masse d'eau 3 (M3)
prépondérante
(Alimentation
souterraine,
interaction eau-
roches modérée)

(6) Synthèse des résultats

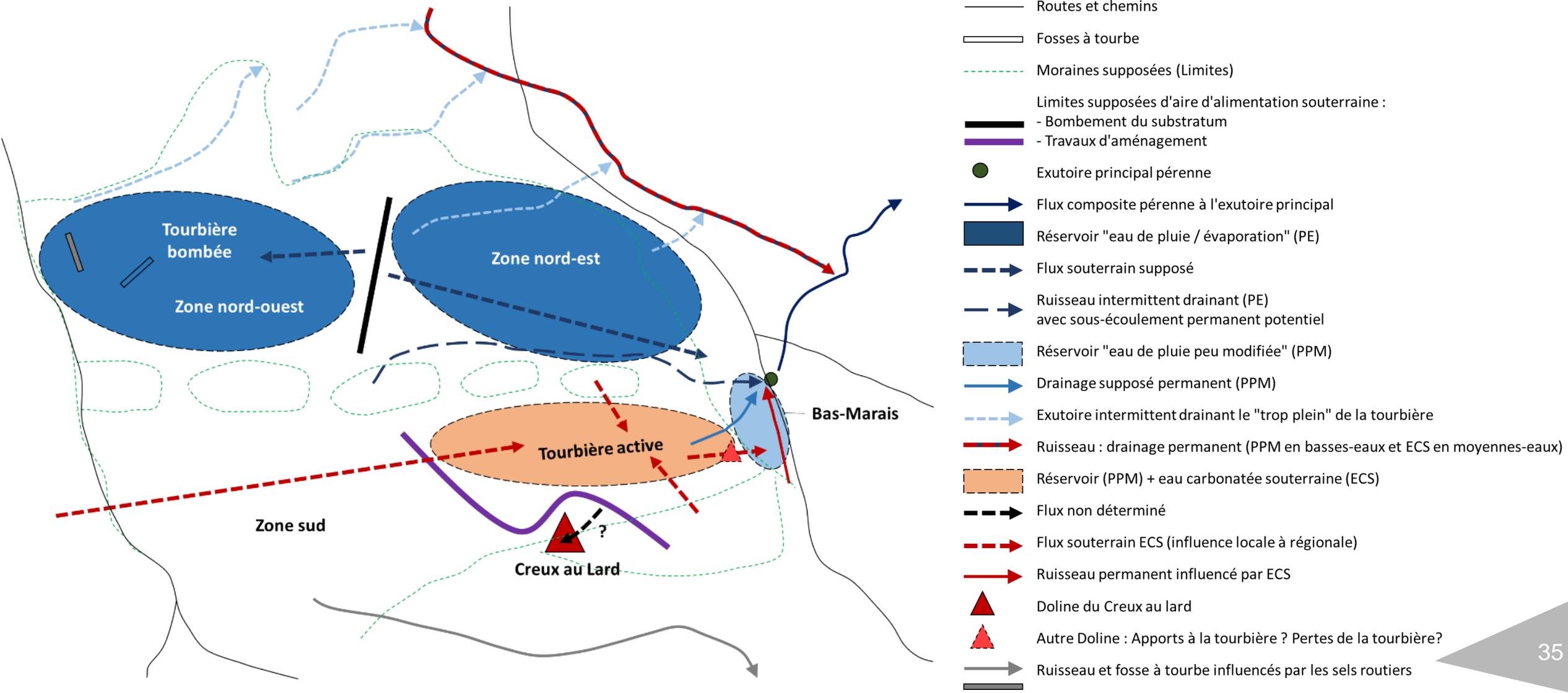
Tourbière de Frasne (1/2)

Schéma conceptuel en coupe du fonctionnement de la tourbière active



(6) Synthèse des résultats

Tourbière de Frasne (2/2)



(6) Synthèse des résultats

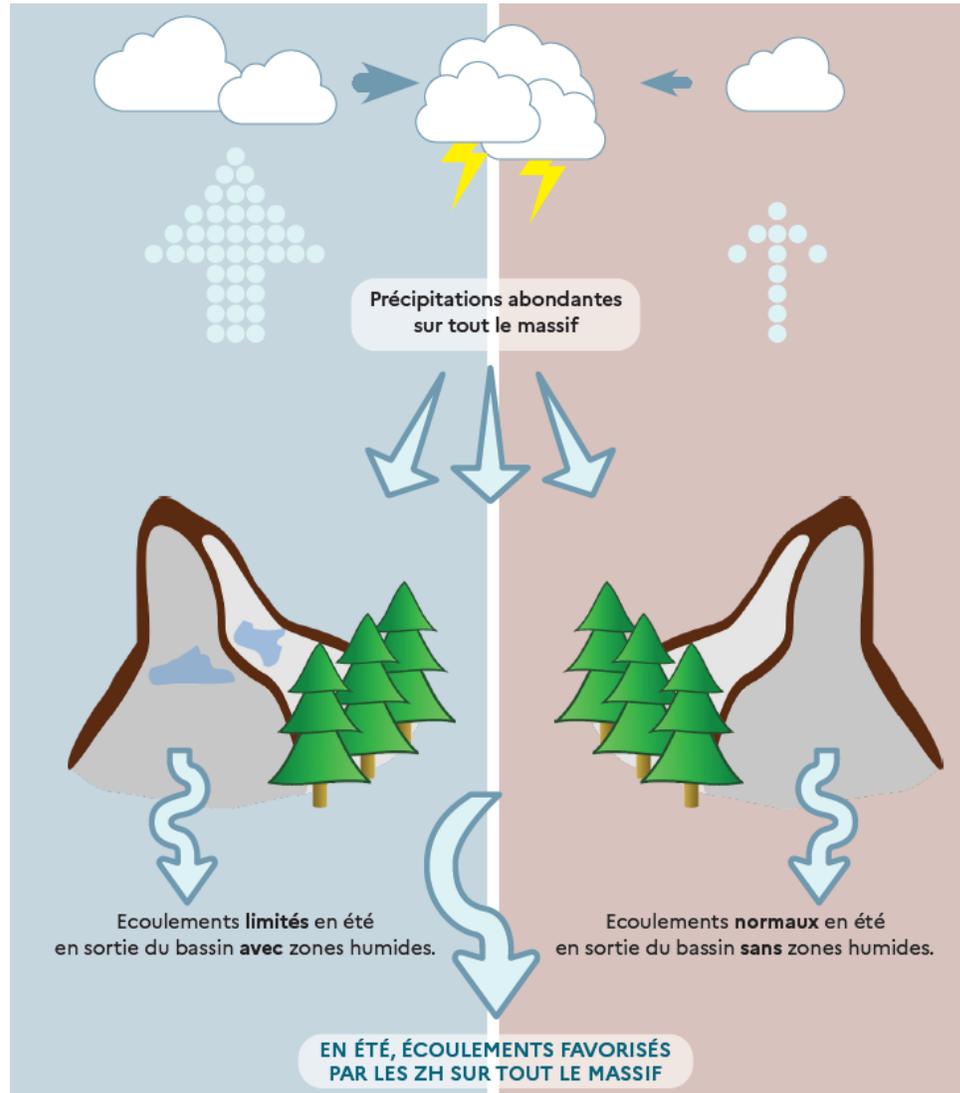
Haute-vallée de l'Aude

Bassin versant
**AVEC ZONES
HUMIDES**

Bassin versant
**SANS ZONE
HUMIDE**

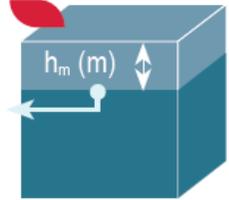
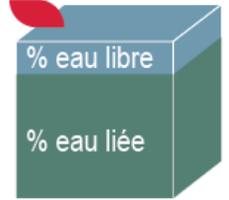
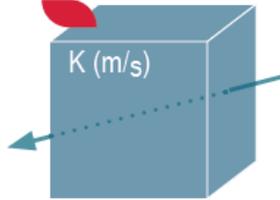
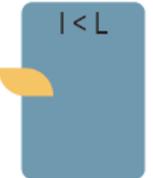
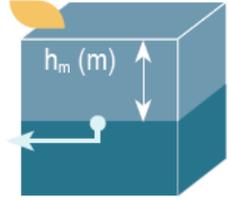
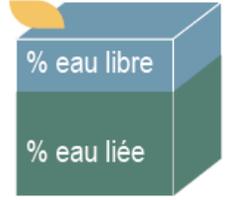
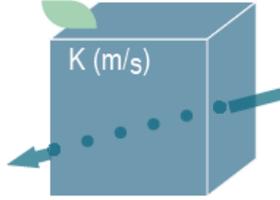
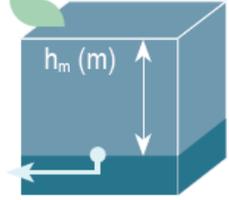
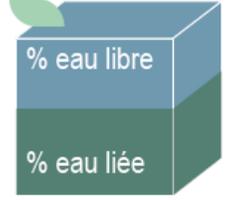
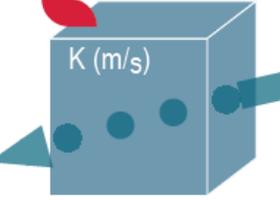
Forte contribution au
cycle local de l'eau

Faible contribution au
cycle local de l'eau



(7) Indicateurs de soutien d'étiage A l'échelle du site tourbeux

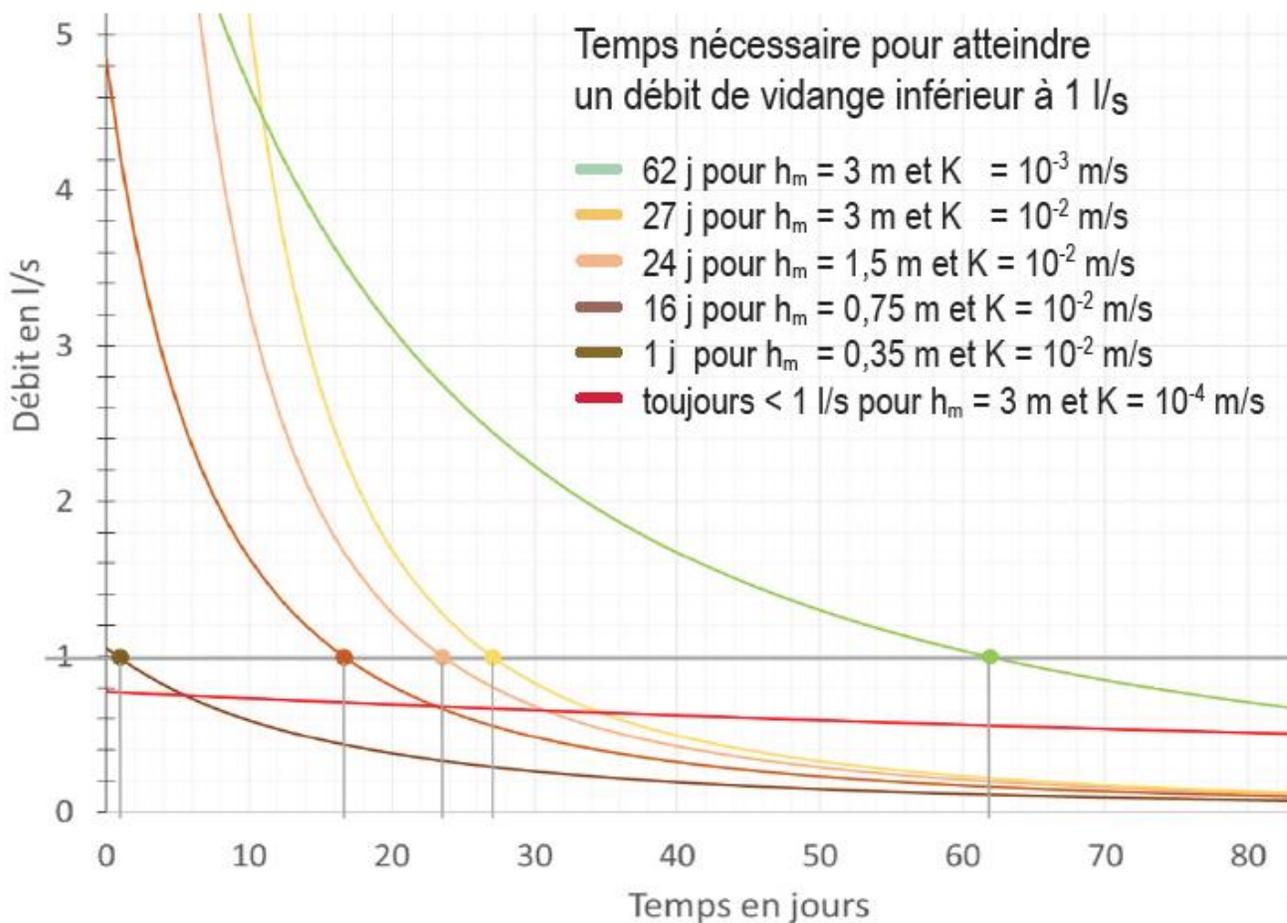
Quelques éléments de définition : **5 paramètres utilisés dans l'équation de Boussinesq**

Différents potentiels pour chaque variable	Géométrie du réservoir		Propriétés hydrodynamiques du réservoir	
	Surface et forme $I \times L$: surface (ha) I/L : ratio de forme	Hauteur d'eau au-dessus du niveau de l'exutoire h_m : charge hydraulique (m)	Déstockage par gravité Φ : Porosité efficace (eau libre, %) [vs eau liée non déstockable, %]	Facilité avec laquelle un flux liquide traverse le réservoir K : conductivité hydraulique (m/s)
faible				
moyen				
fort				

(7) Indicateurs de soutien d'étiage

A l'échelle du site tourbeux

Interprétation : cas des zones humides du Massif du Madrès (haute-vallée de l'Aude)



Combinaisons de paramètres peu favorables au soutien d'étiage :

- **petite surface** (souvent inférieure à 10 ha)
- longueur > largeur (**forme allongée** dans le sens de la pente et de l'écoulement)
- faible charge hydraulique (**épaisseur** mouillée de **moins de 1 m**)
- une **conductivité hydraulique faible** voire très faible (< 10⁻⁴ m/s voire moins).

(7) Indicateurs de soutien d'étiage

A l'échelle du bassin versant

3 indicateurs pour le potentiel de **stockage d'eau**

1. Humidité des sols



2. Pente local et aval de la ZH



3. Convergence des flux vers les ZH



4 indicateurs pour le potentiel de **connectivité avec le réseau hydrographique**

1. Distance verticale vers l'écoulement aval (dv)



2. Distance le long de la pente vers l'écoulement aval (dp)



3. Ratio dv/dp

-  fort : proximité des cours d'eau, présence de replats
-  faible : plus forte pente

4. Ratio distance au crête / distance à l'exutoire du bassin versant



(8) Conclusion et perspectives

Soutien d'étiage ? Soutien de tourbière ?

Luitel

Pas de soutien d'étiage de la tourbière au ruisseau de Fontfroide

Au contraire, la tourbière est soutenue à l'étiage par des eaux souterraines

Soutien d'étiage assuré par des eaux souterraines

Frasne

Soutien d'étiage potentiel assuré par 2 réservoirs tourbeux (tourbière active et cœur de tourbière soumis à l'évaporation)

Soutien de la tourbière et soutien d'étiage assurés par des eaux souterraines (karst, moraine)

Haute-vallée de l'Aude

Pas de Soutien d'étiage

Écrêtage de crue après une période sécheresse

Importance des zones humides pour les précipitations à l'échelle du bassin versant

Pour les 3 sites

Variabilité spatiale et temporelle des masses d'eau prépondérantes pour l'alimentation des tourbières et des cours d'eau

Fonctionnement hydrologique intègre : compartiments complexe tourbeux + hydrosystème local voire régional (bassin versant, aire d'alimentation, climat, karst/réseau de failles)

Forte dépendance aux précipitations et à l'ETP

Préconisations de gestion de complexes tourbeux

Protéger les impluvium superficiels et souterrains en lien avec les cours d'eau et les zones humides

Favoriser les entrées d'eau régulières et durables (saturation 9 mois)

Limiter les sorties d'eau (comblement des fossés, barrière hydraulique, seuils...)

Maintenir l'ambiance microclimatique locale

Maintenir (restaurer) les connexions hydrauliques amont locales à régionales

(8) Conclusion et perspectives

Retour d'expérience et perspectives

Retour d'expérience

- > intérêt instrumentation à long terme
- > intérêt approche interdisciplinaire
- > Intérêt approche BV (les zones humides ne fonctionnent pas en vase clos)
- > variabilité spatio-temporelle
- > interaction gestionnaire/chercheur et jeu d'acteurs bienveillant
- > apports pour la restauration
- > apports pour la gestion
- ...

Perspectives

- > faire connaître les travaux effectués
- > boucler les bilans hydrologiques (pertes et apports diffus, ETP, interception des pluies)
- > mieux connaître la paléo-histoire et la paléo-hydrologie
- > mieux connaître les vulnérabilités / résilience (notamment liées aux changements climatiques)
- > mieux évaluer les fonctions et services écosystémiques (notamment liés au cycle du carbone)
- > continuer les travaux de modélisation (effet CC)
- ...

Ne pas juger l'utilité des zones humides uniquement sur leur capacité de soutien d'étiage et uniquement sur des arguments hydrologiques !

Quelques images du projet ZHTB

...



*GPR by night au Luitel
(C. Desplanque, mars 2018)*



*Relevé de sonde
(C. Desplanque, 11-2019)*



*GPR à Frasne
(G. Magnon, Janvier 2019)*



*Relevé de sonde
(C. Desplanque, 11-2019)*



*Géochimie au Luitel
(C. Desplanque, juillet 2019)*





Une école de l'IMT

Merci
de votre attention





Annexes

Annexe 1.

Auteurs et contributeurs

ZHTB

Auteurs :

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

Contact : frederic.paran@mines-stetienne.fr

Comité de pilotage :

- AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Julie Jeanpert, Émilie Lunaud, Martin Pignon, Nadine Bosc-Bossut, Joël Hervo, Lionel Perrin, Cécile Zys
- CEN : Delphine Danancher, Jérôme Porteret

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

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

Annexe 2.

Références bibliographiques

Projet ZHTB

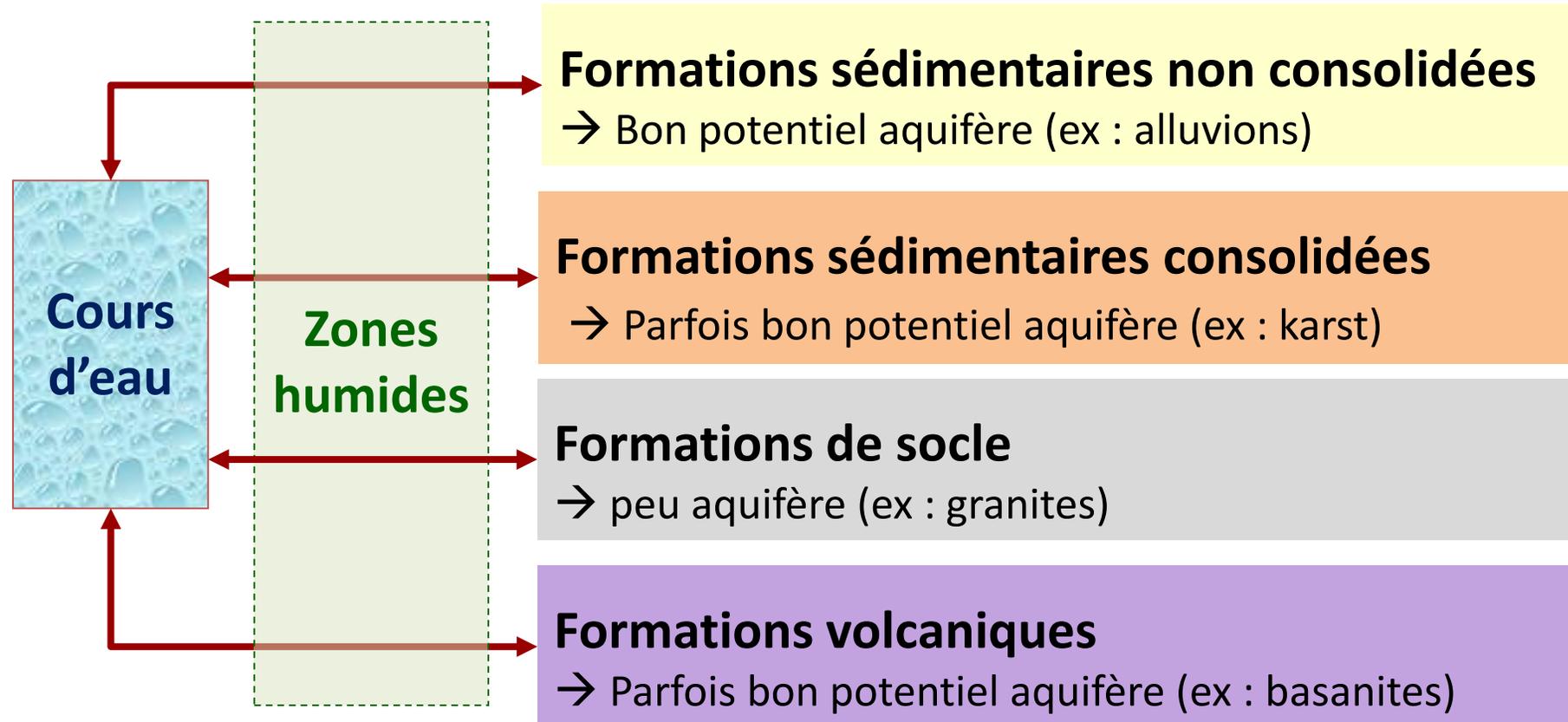
- Paran F., Ré-Bahuaud J., Graillot D. (2017) *Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau. Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône. Rapport phase 1.* Zabr, AE-RMC, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Étienne.
- Paran F., Pascoletti Y., Graillot D., Dujardin F., Artigue G., Pinel S., Caldirak H., Johannet A., Winiarski T., Cubizolle H., Jolly T., Mazagol P.M., Sacca C., Riquier J., Lavastre V., Chevet J., Cocula C., Ebrard E., Laroque B. (2019) *Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau – Mise en œuvre sur les sites de Luitel et Frasne. Rapport phase 2.* Zabr, AE-RMC, 183p + annexes.
- Paran F., Graillot D., Dujardin F., Gallice F., Ré-Bahuaud J., Pascoletti Y., Sadkou S., Artigue G., Pinel S., Caldirak H., Johannet A., Winiarski T., Dendievel A.M., Cubizolle H., Jolly H., Mazagol P.O., Sacca C., Riquier J., Bertrand M., Lavastre V., Chevet J., Bertrand G., Lhosmot A., Cocula C., Ebrard E., Thomassin K., Turlesque C., Laroque B., Vion M., Villarubias S., Desplanque C., Magnon G. (2022) *Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des Zones Humides de Têtes de Bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau – Recherche d'indicateurs du soutien d'étiage.* Rapport phase 3. Zabr, AE-RMC, 325p + annexes.
- ONF Aude (2023) *Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude.* Synthèse des phases 1 à 3, Mines Saint-Étienne, IMT Mines Alès. AE-RMC, CD Aude.



Diapo Bonus

Contexte

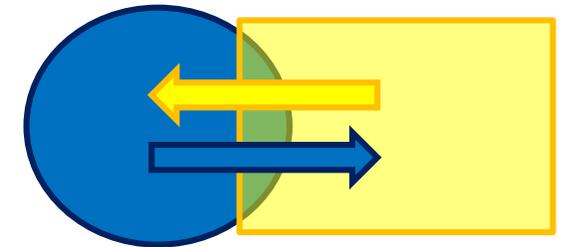
Interactions eau souterraine / eau superficielle



Interface

=

Limite commune à deux systèmes permettant les échanges (flux d'eau)



Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

Types d'habitats français Corine-biotopes – extraits (Bissardon et al., 1997)

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

Types d'habitats Eunis – extraits (Louvel et al., 2013)

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

Contexte : projet ZHTB

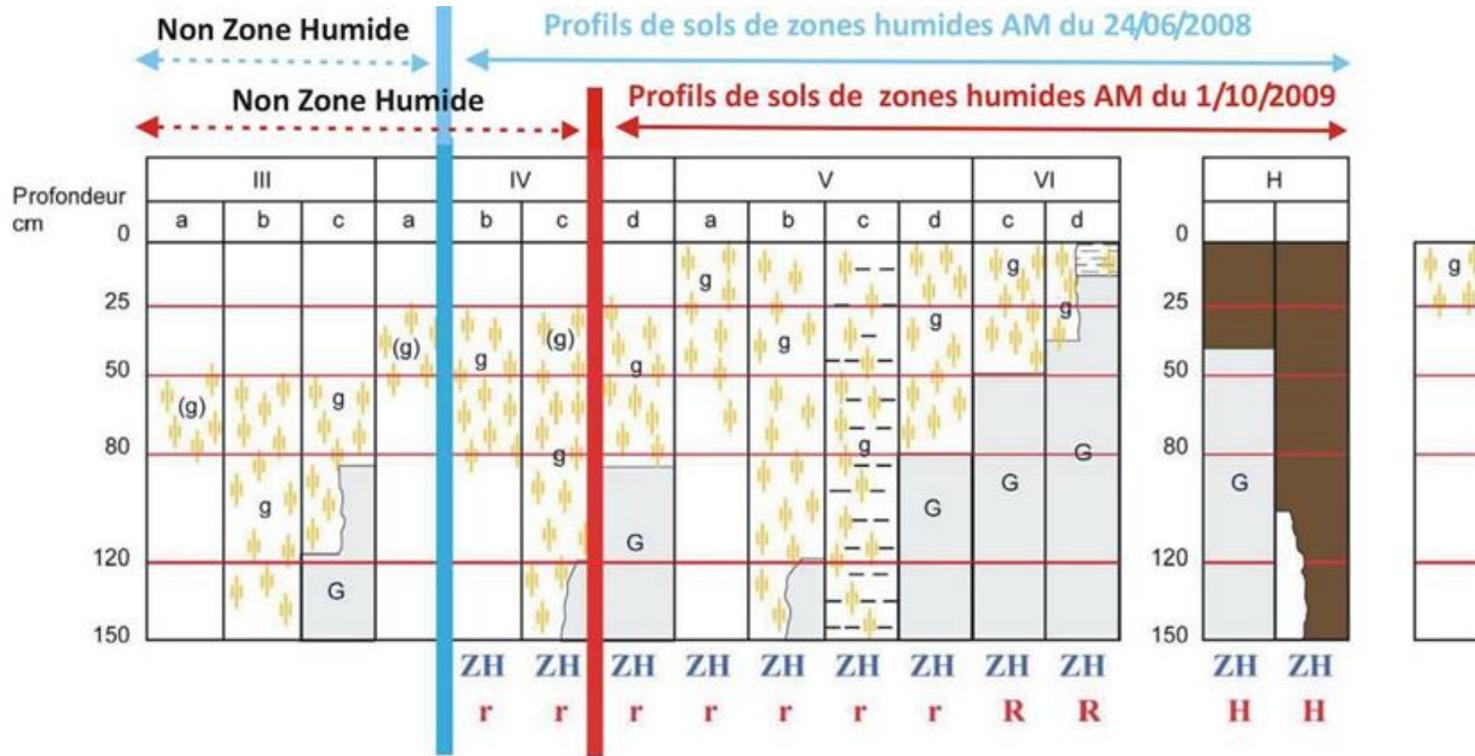
Typologie des zones humides

	Types Sdage	Définition RMC	Sous-types	Sous-type Rhomeo	Corine Biotope et *Land Cover*
Eaux marines					
1	Grands estuaires	Larges embouchures de fleuve dans les eaux marines, soumises à l'action des marées (< à 6m)			*5.2.2 Estuaires* 11 Mers et océans 12 Bras de mer, baies et détroits 13 Estuaires et rivières tidales 14 Vasières et bancs de sable sans végétation 15 Marais salés, prés salés, steppes salées 16 Dunes marines et plages de sable
2	Baies et estuaires moyens-plats	Embouchures de cours d'eau dans les eaux marines où l'influence de la marée n'est pas prépondérante, deltas	Vasières Herbiers, récifs Prés-salés		17 Plages de galets 21 Lagunes 23 Eaux stagnantes, saumâtres et salées 53 Végétation de ceinture de bord des eaux *5.2.1 Lagunes littorales*
3	Marais et lagunes côtiers	Milieu littoral saumâtre à faible renouvellement des eaux et au fonctionnement globalement naturel	Marais Prés-salés Lagunes Arrières-dunes Sansouires Roselières	3.1 Lagunes 3.2 Péri-lagunaire 3.3 Péri-lagunaire avec apport d'eau	89 Lagunes et réservoirs industriels, canaux *4.2.2 Marais salants*
4	Marais saumâtres aménagés	Milieu littoral saumâtre à faible renouvellement des eaux et au fonctionnement profondément artificialisé	Marais salants Bassins aquacoles		
Eaux courantes					
5 et 6	Bordures de cours d'eau et plaines alluviales	Ensemble des zones humides du lit majeur du cours d'eau	Grèves nues ou végétalisées Annexes fluviales Ripisylves Prairies inondables		24 Eaux courantes 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 44 Forêts et fourrés alluviaux très humides 53 Végétation de ceinture de bord des eaux
Eaux stagnantes					
7	Zones humides de bas-fonds en tête de bassin	Zones humides de tête de bassin alimentées par les eaux de ruissellement et les eaux de pluie	Tourbières Milieux fontinaux Prairies humides Prairies tourbeuses Pozzines	7.1 Zone humide d'altitude 7.2 Tourbière acide 7.3 Tourbière alcaline 7.4 Zone humide de pente et source 7.5 Zone humide de combe et bordure de ruisseaux	36 Pelouses alpines et subalpines 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 51 Tourbières bombées à communautés très acides 52 Tourbières de couverture 54 Bas-marais, tourbières de transition et sources *4.1.2 Tourbières*
8	Régions d'étangs	Système de plans d'eau peu profonds d'origine anthropique	Étangs isolés		22 Eaux douces stagnantes (lacs, étangs et mares)

Typologie Sdage des zones humides appliquée au bassin RMC – extraits (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2000 et Collectif RhoMéO, 2014)

Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides



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



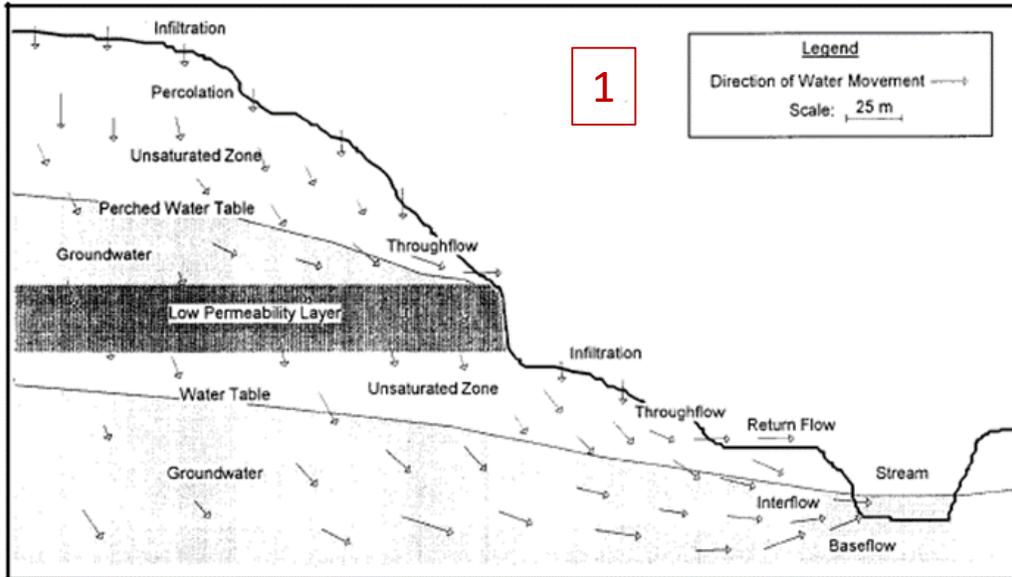
Morphologie des sols correspondant à des "zones humides" (ZH)

- (g) caractère rédoxique peu marqué (pseudogley peu marqué)
- g caractère rédoxique marqué (pseudogley marqué)
- G horizon rédoxique (gley)
- H Histosols R Réductisols
- r Rédoxisols (rattachements simples et rattachements doubles)

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

Contexte : projet ZHTB

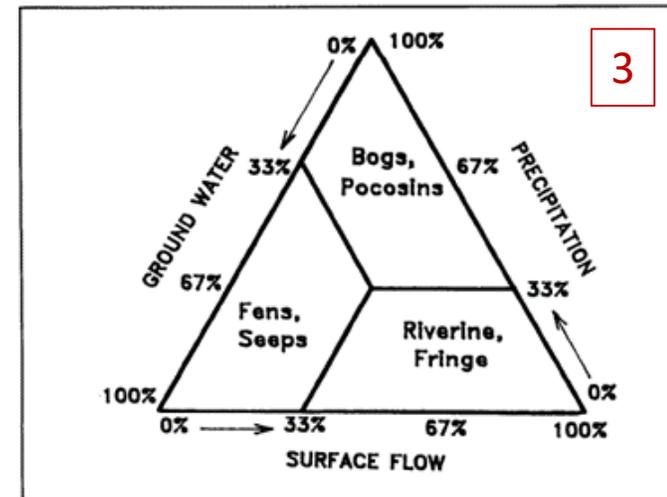
Typologie des zones humides



1. Sources d'alimentation en eau potentielles des zones humides (Smith et al., 1995)
2. Origine de l'alimentation en eau et hydrodynamique pour les 7 types de la classification hydrogéomorphologique (Smith et al., 2013)
3. Contribution relative des sources d'alimentation en eau des zones humides (Brinson, 1993)

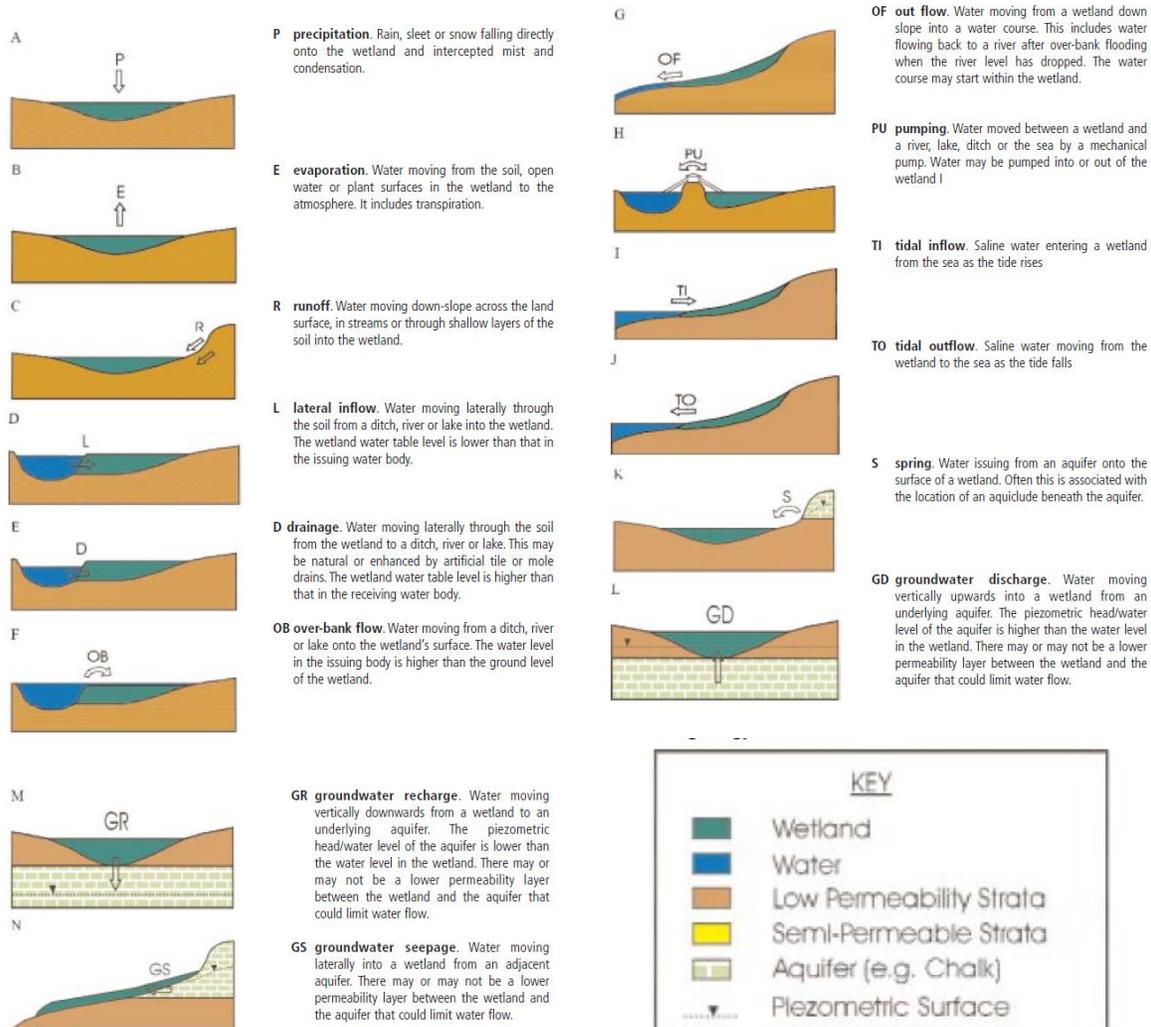
Hydrogeomorphic Classification Factors			Potential Wetland Subclasses	
Geomorphic Setting	Water Source	Hydrodynamics	Eastern USA	Western USA/Alaska
Depression	Groundwater or interflow	Vertical fluctuation	Prairie pothole marshes, Carolina bays	Vernal pools
Fringe (tidal)	Ocean	Bidirectional, horizontal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

2



Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides



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

Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

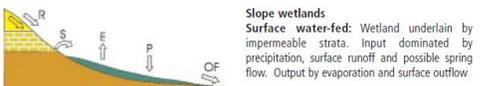
2



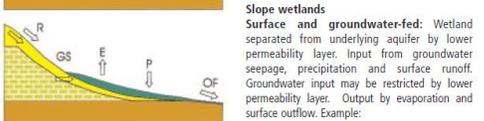
Upland flat area wetlands
Surface water-fed: Upland flat area wetlands. Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by precipitation. Output by evaporation and surface outflow. Example: upland blanket bogs.



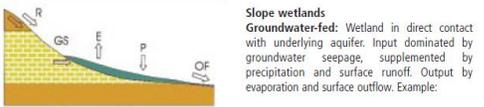
Lowland flat area wetlands
Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by precipitation. Output by evaporation and surface outflow. Example: rain-fed domed mires.



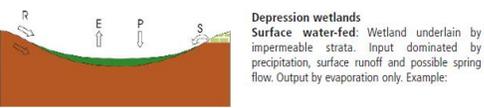
Slope wetlands
Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by precipitation, surface runoff and possible spring flow. Output by evaporation and surface outflow.



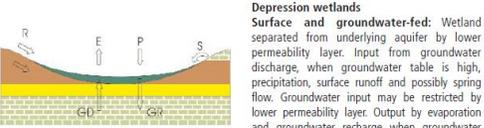
Slope wetlands
Surface and groundwater-fed: Wetland separated from underlying aquifer by lower permeability layer. Input from groundwater seepage, precipitation and surface runoff. Groundwater input may be restricted by lower permeability layer. Output by evaporation and surface outflow. Example:



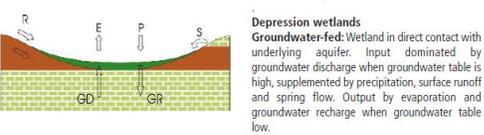
Slope wetlands
Groundwater-fed: Wetland in direct contact with underlying aquifer. Input dominated by groundwater seepage, supplemented by precipitation and surface runoff. Output by evaporation and surface outflow. Example:



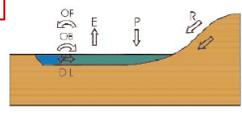
Depression wetlands
Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by precipitation, surface runoff and possible spring flow. Output by evaporation only. Example:



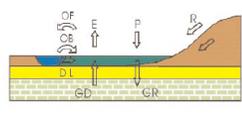
Depression wetlands
Surface and groundwater-fed: Wetland separated from underlying aquifer by lower permeability layer. Input from groundwater discharge, when groundwater table is high, precipitation, surface runoff and possibly spring flow. Groundwater input may be restricted by lower permeability layer. Output by evaporation and groundwater recharge when groundwater table low. Example:



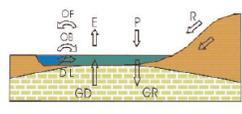
Depression wetlands
Groundwater-fed: Wetland in direct contact with underlying aquifer. Input dominated by groundwater discharge when groundwater table is high, supplemented by precipitation, surface runoff and spring flow. Output by evaporation and groundwater recharge when groundwater table low.



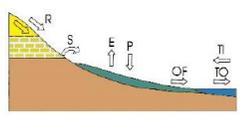
Valley bottom wetland
Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by over-bank flow and lateral flow, supplemented by precipitation and surface runoff. Output by drainage, surface outflow and evaporation. Inflows and outflows are controlled largely by water level in the river or lake. Example: alluvial floodplains.



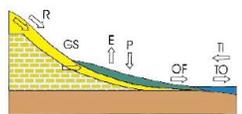
Valley bottom wetland
Surface and groundwater-fed: Wetland separated from underlying aquifer by lower permeability layer. Input from over-bank flow and groundwater discharge, supplemented by runoff and precipitation. Groundwater flow may be restricted by intervening low permeability layer. Output by drainage, surface outflow, evaporation and groundwater recharge. Example: floodplains on sandy substrate.



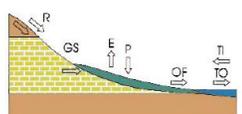
Valley bottom wetland
Groundwater-fed: Wetland in direct contact with underlying aquifer. Input dominated by over-bank flow and groundwater discharge, when groundwater table is high, supplemented by runoff and precipitation. Output by drainage, surface outflow and evaporation. Example: floodplains in karst systems.



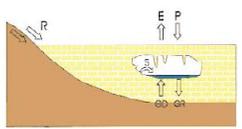
Coastal wetlands
Surface water-fed: Wetland underlain by impermeable strata. Input dominated by tidal flow, precipitation, surface runoff and possible spring flow. Output by evaporation and surface outflow.



Coastal wetlands
Surface and groundwater-fed: Wetland separated from underlying aquifer by lower permeability layer. Input from tidal flow, groundwater seepage, precipitation and surface runoff. Groundwater input may be restricted by lower permeability layer. Output by evaporation and surface outflow. Example:



Coastal wetlands
Groundwater-fed: Wetland in direct contact with underlying aquifer. Input dominated by groundwater seepage and tidal flow, supplemented by precipitation and surface runoff. Output by evaporation and surface outflow. Example:



Underground wetlands
Groundwater-fed: Wetlands formed with solution caves in permeable rocks. Input dominated by spring flow and groundwater discharge. Output by groundwater recharge. Example:

1

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

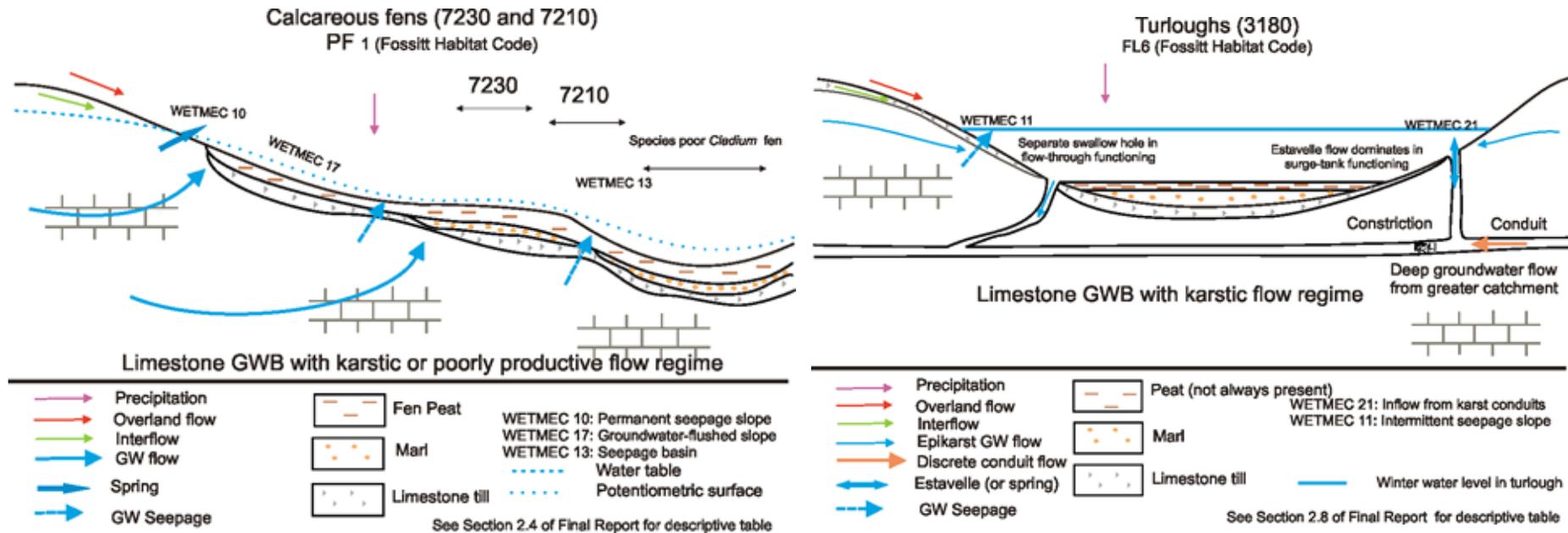
1. Typologie topographique des zones humides (Acreman et Miller, 2006)

2. Description des différents types de zones humides (Acreman et Miller, 2006)

Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

Typologie des milieux terrestres sous dépendance des eaux souterraines en Irlande, coupes transversales – extraits (Kimberley et Coxon, 2011)



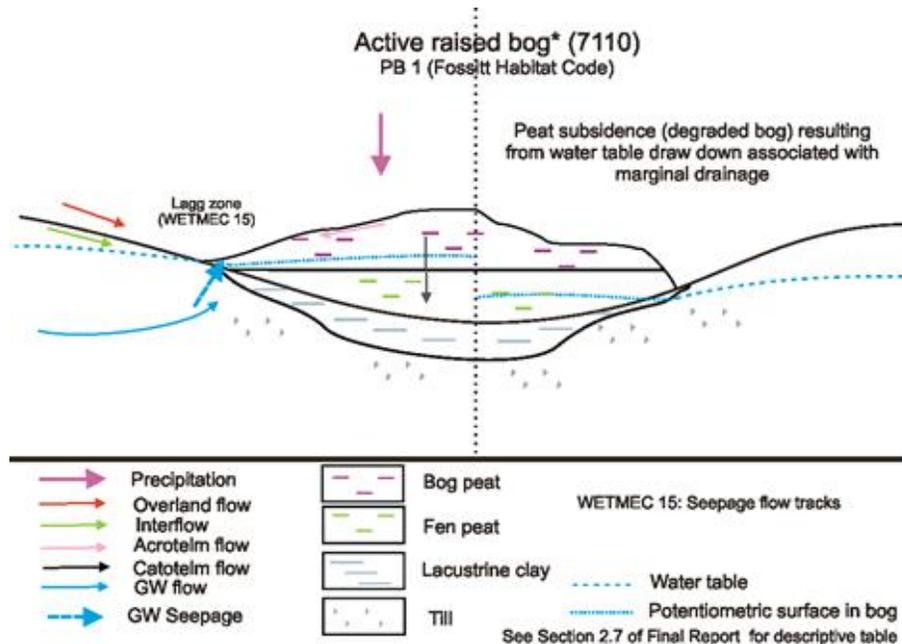
Bas-marais alcalin et calcaire

Turloughs (lacs temporaires)

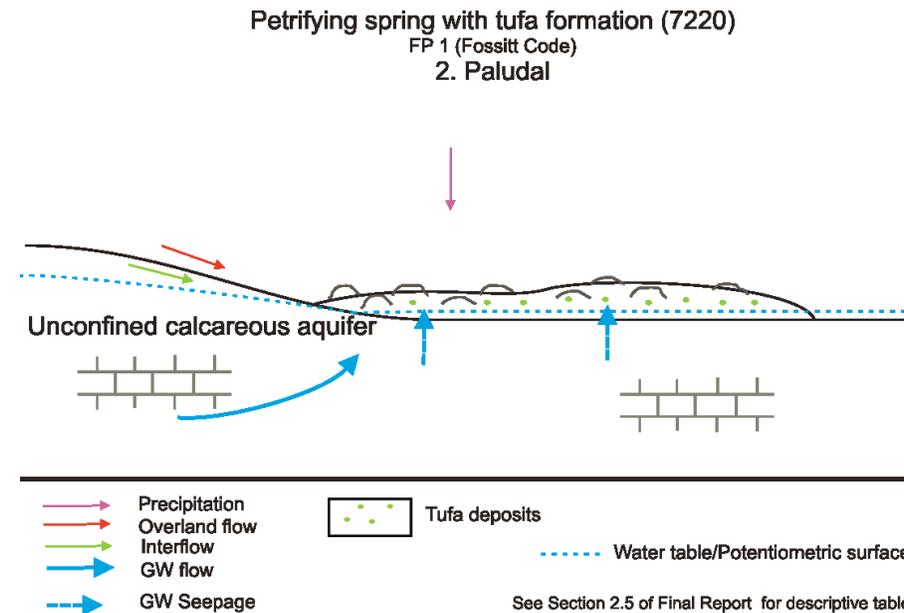
Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

Typologie des milieux terrestres sous dépendance des eaux souterraines en Irlande, coupes transversales – extraits (Kimberley et Coxon, 2011)



Tourbière active



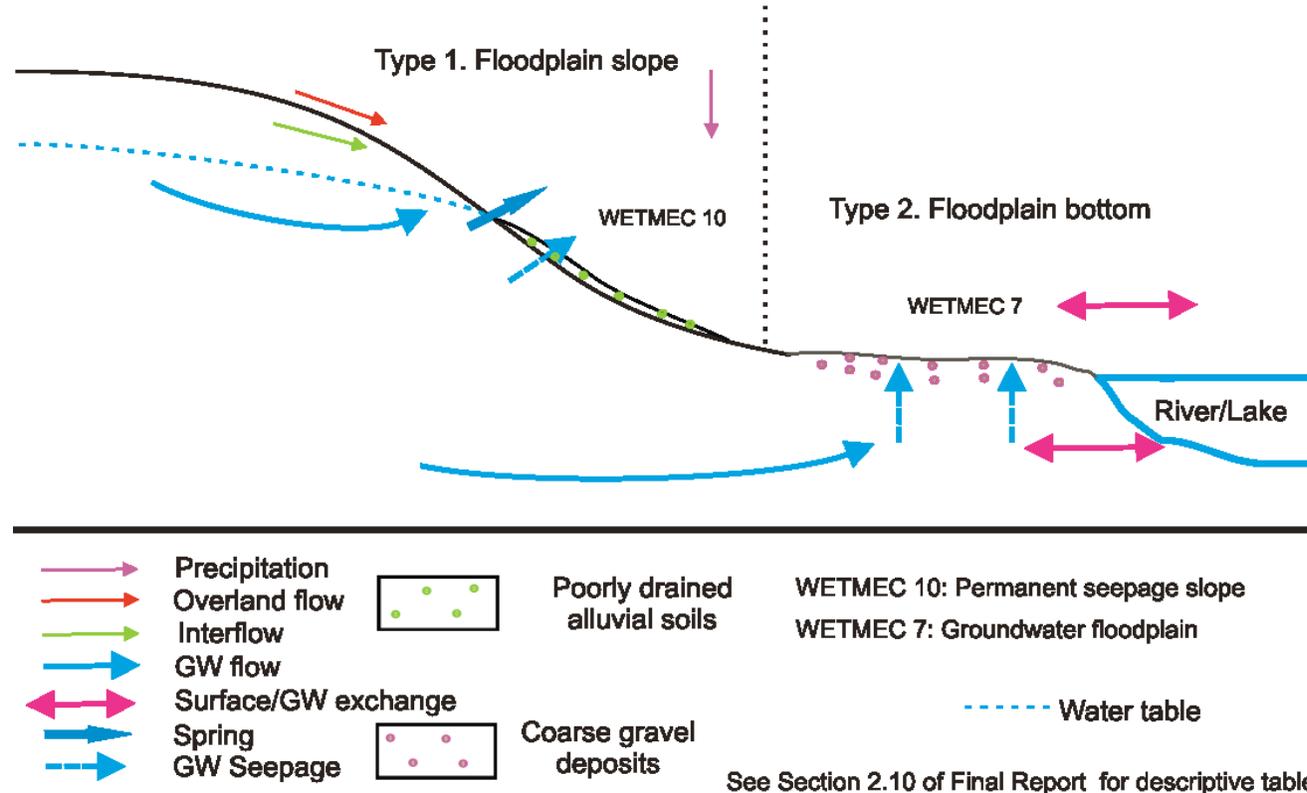
Source pétrifiante et formation tufeuse (type paludéen)

Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

Typologie des milieux terrestres sous dépendance des eaux souterraines en Irlande, coupes transversales – extraits (Kimberley et Coxon, 2011)

Alluvial forests with *Alnus glutinosa* and *Fraxinus excelsior* (91EO)
WN 4 (Fossitt Habitat Code)

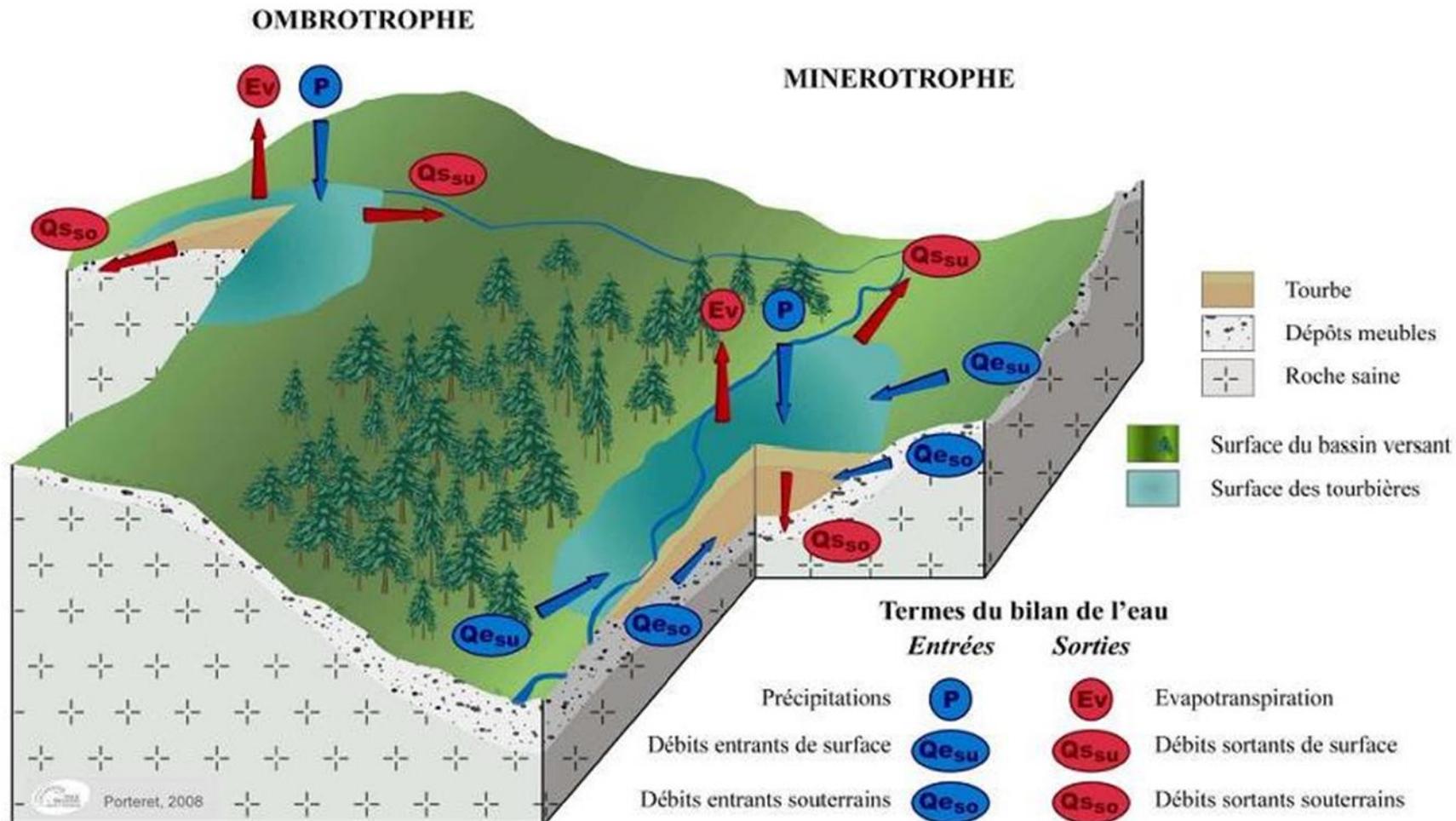


Forêt alluviale

Contexte : projet ZHTB

Typologie des zones humides

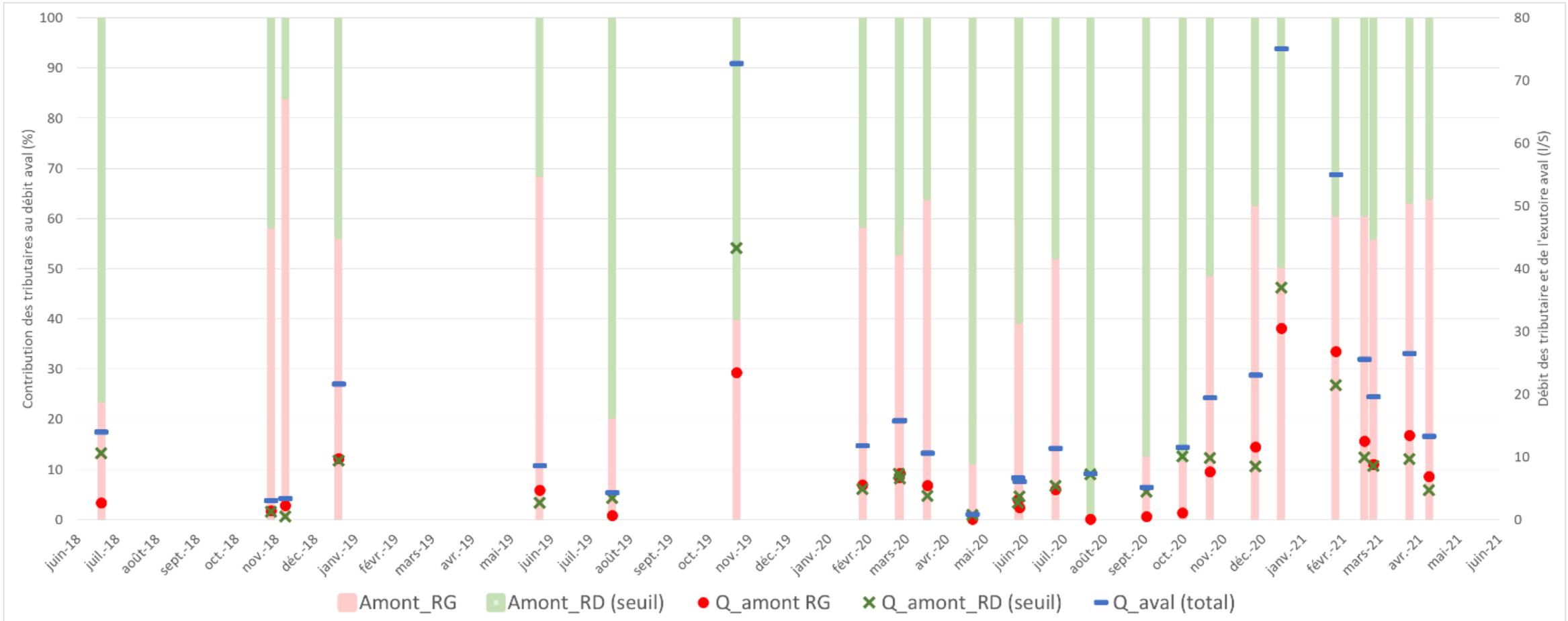
Échanges d'eau à l'interface nappes/tourbières/rivières [Porteret, 2008]



Volet hydrologique

Acquisition de données et chroniques (ex : Frasne)

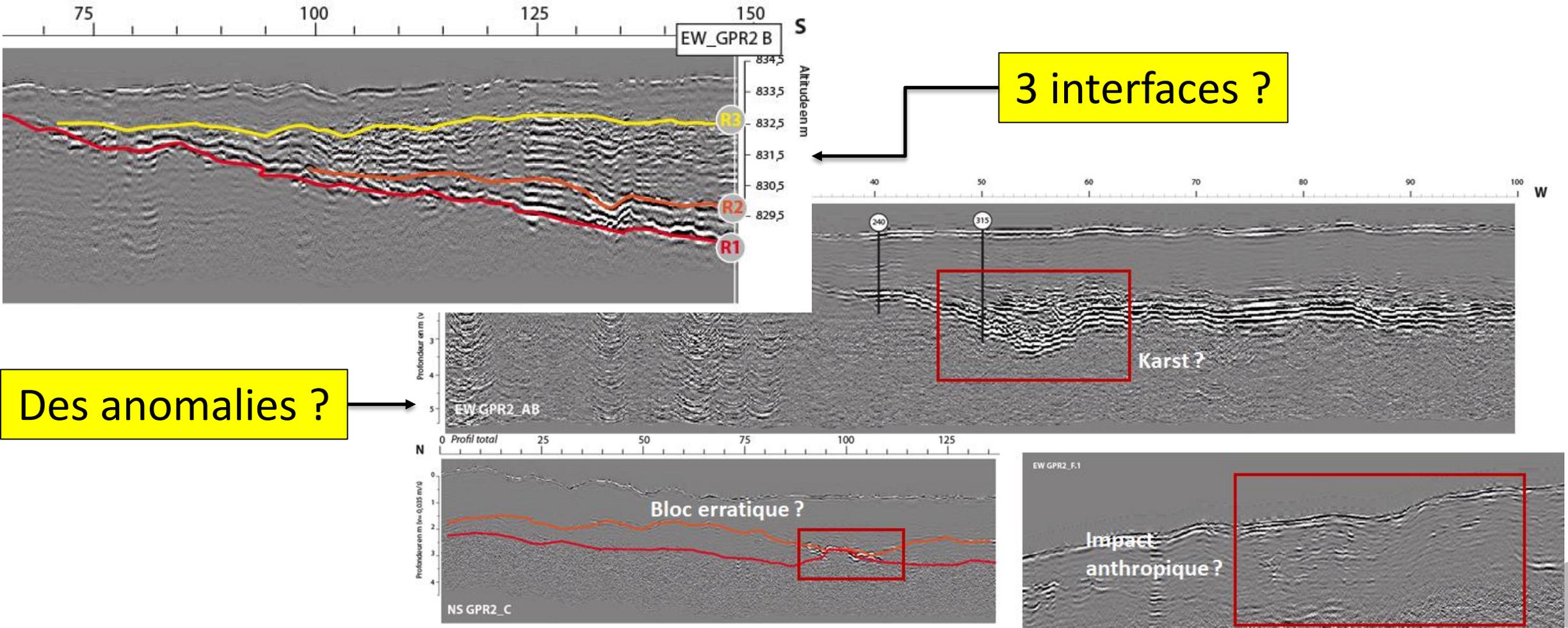
Origine des eaux à l'exutoire



Volets géophysique et pédologie

Interprétation des résultats (ex : Frasne)

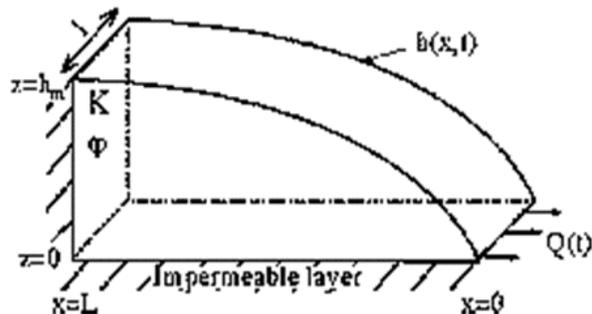
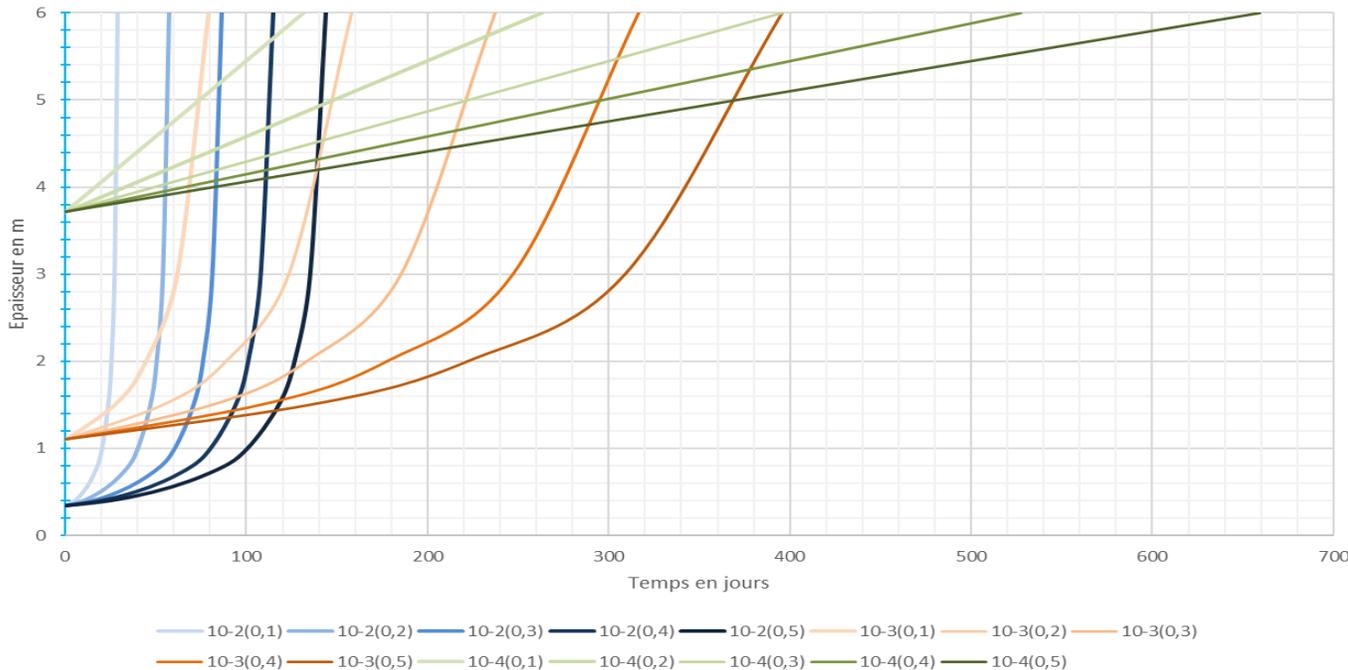
Aller plus loin dans la connaissance de la géométrie et de la structure de la tourbière



Indicateurs de soutien d'étiage A l'échelle du site tourbeux

In Dewandel et al., 2002

Temps de vidange pour des combinaisons de perméabilité et porosité efficace (rapport $l/L=1$; seuil= 1 l/s et surface= 10 hectares)



$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$$

where

$$Q_0 = 0.862Kl \frac{h_m^2}{L}$$

and

$$\alpha = \frac{1.115Kh_m}{\phi L^2}$$

- L : longueur (m)
- l : largeur (m)
- h_m : côte au dessus de l'exutoire, hauteur mouillée (m)
- K : conductivité hydraulique (m/s)
- Q_0 : débit initial (m³/s)
- Φ : porosité efficace

Conclusion

Apports scientifiques

Interactions eau souterraine/eau superficielle : intérêt scientifique

- **Développement de méthodologies interdisciplinaires**
- **Importance de l'approche interdisciplinaire :**
 - les résultats convergents permettent d'asseoir le diagnostic
 - les résultats divergents permettent de souligner les incertitudes ou des comportements spécifiques (ex : phénomènes se déroulant à des échelles différentes).
- **Meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des hydrosystèmes à différentes échelles** (flux principaux, origine des eaux, influence saisonnière, influence anthropiques, ...).

Conclusion

Apports opérationnels

Interactions eau souterraine/eau superficielle : intérêt opérationnel

- **Biodiversité et fonctions de régulation hydrologique**
→ soutien d'étéage et tamponnage thermique en période estivale, maintien des zones humides...
- **Alimentation en eau potable**
→ recherche de zones de réserves stratégiques
- **Aspects sanitaires**
→ transfert de pollution
- **Réglementation**
→ irrigation, débit objectif d'étéage
- **Services écosystémiques**
→ stockage de carbone, autoépuration, soutien d'étéage...
- **Changements globaux dont changement climatique**
→ maintien des zones humides, capacité de soutien d'étéage des aquifères...

Aller plus loin dans la connaissance de la géométrie et de la structure de la tourbière

→ 1 stage de Master 2 prévu pour 2024

Caractérisation 3D de la géométrie et de la structure interne de la tourbière de Frasne fondée sur l'interprétation croisée de données géophysiques et de données de terrain

- Valider et compléter les résultats par des investigations de terrains
- Interpréter les données de terrain au regard des données existantes
- Renseigner la base de données de l'inventaire des tourbières de Franche-Comté du CEN
- Construire en 3D la géométrie et la structure interne de la tourbière de Frasne
- Interpréter les résultats : fonctionnement hydrologique de la tourbière et de sa gestion

Perspective

Transfert de connaissance

Un support méthodologique

Fondements : projet échanges karst/rivière (2014-2022)

- valoriser la méthodologie mise au point sur la Cèze
- mettre à profit l'expérience acquise sur la Cèze
- adapter et transposer la méthodologie à d'autres rivières traversant des plateaux calcaires

https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2022-05/support_methodo_karst_riviere_vf.pdf

Concept et objectif du guide :

- comprendre le karst
- connaître et quantifier les échanges karst/rivière
- étudier et analyser les échanges karst/rivière
- quels outils ?
- comment utiliser et mettre en œuvre ces outils

Destinataires :

Bureaux d'études, Syndicats, Collectivités...



CONNAÎTRE ET QUANTIFIER
LES ÉCHANGES HYDRAULIQUES
KARST / RIVIÈRE

Recommandations méthodologiques

Retour d'expérience d'études menées
sur les gorges de la Cèze (30)