



Une école de l'IMT



Solutions fondées sur la nature, nature des services : du concept aux applications
20 et 21 octobre 2020



Projet ZHTB

Zones Humides, soutien d'étiage, Tête de Bassin
Interactions ZH/ESO/ESU (2016-2021)

Frédéric Paron

Contact : frederic.paron@mines-stetienne.fr

Stage M2 :
Salma Sadkou

Quantification et estimation des services rendus par les tourbières en termes de soutien des cours d'eau à l'étiage



Contexte et problématique

Interactions Eso/Esu/ZH

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



Stockage et restitution d'eau

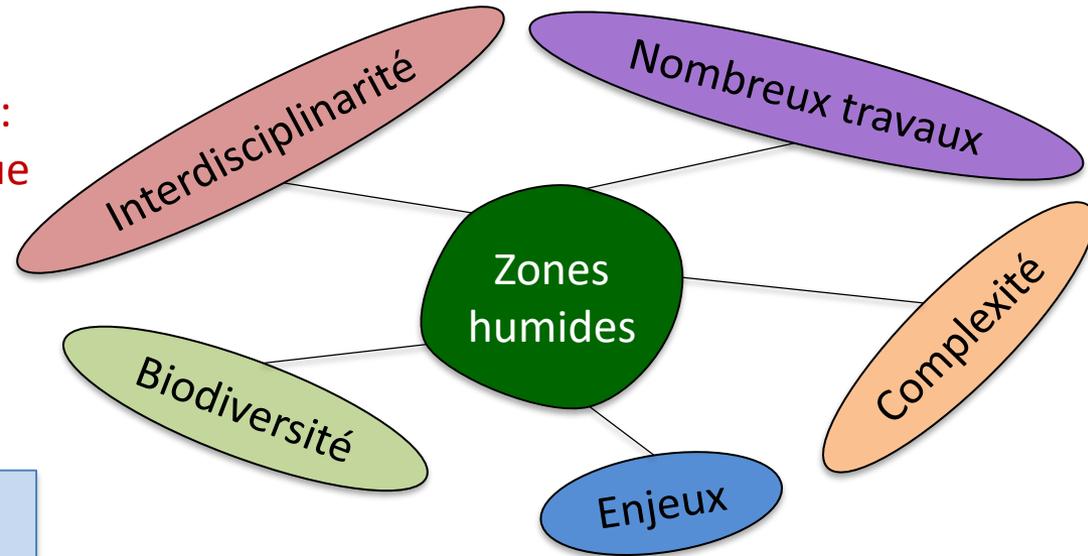
Questionnement sur le "rôle d'éponge"

Interaction avec l'hydrosystème

Bilan hydrologique complexe

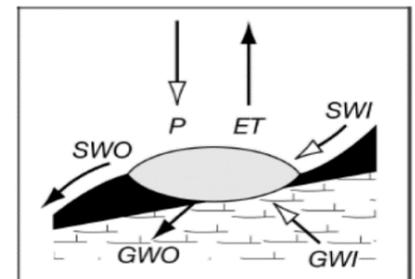
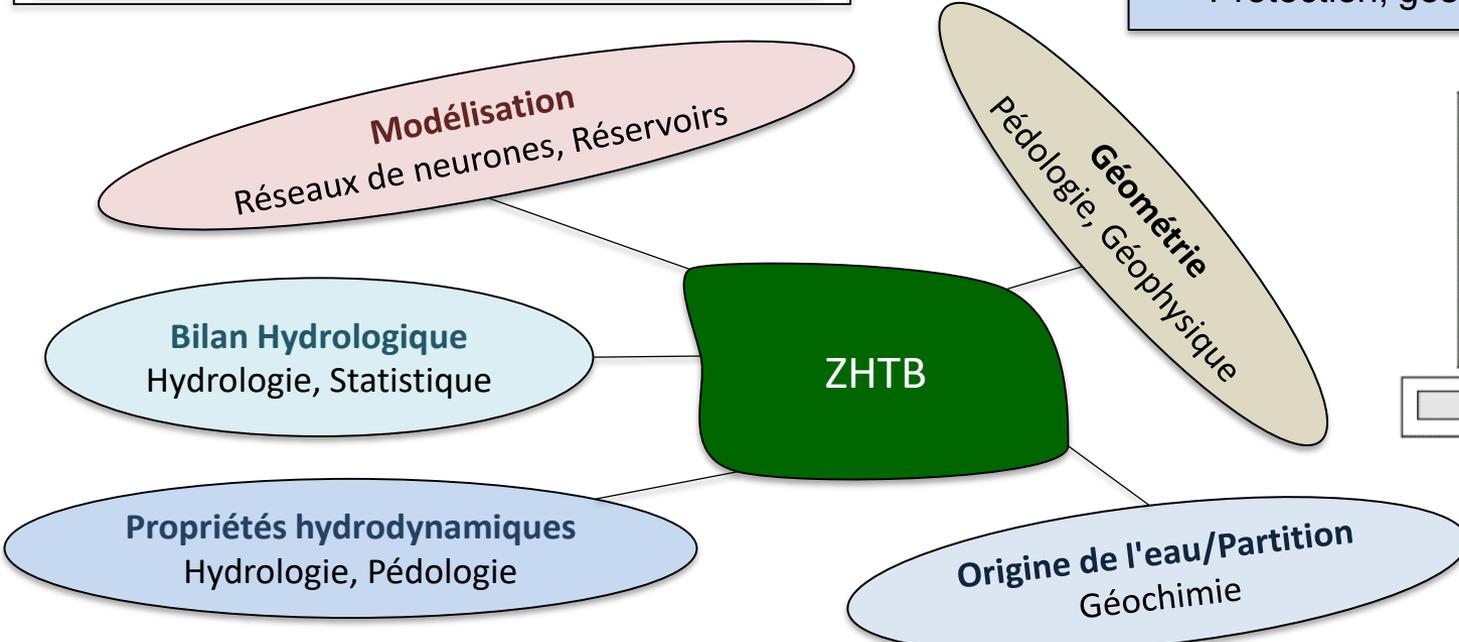
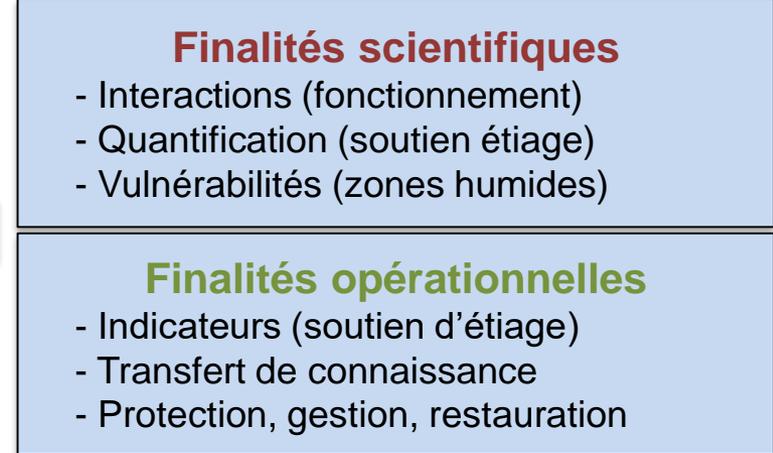
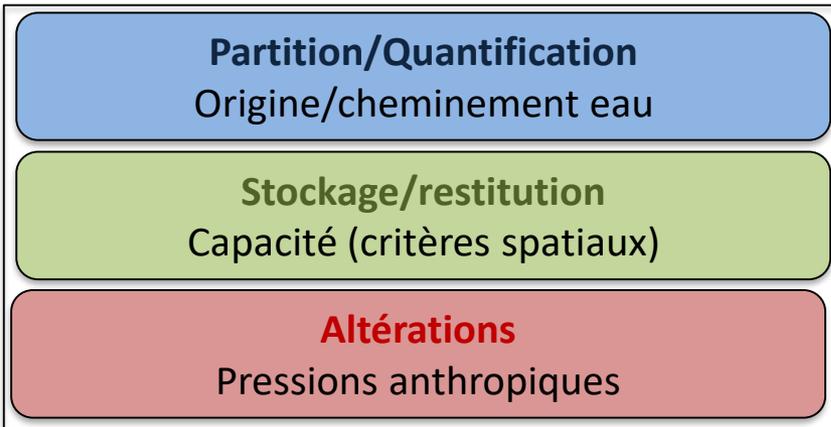
Typologie et structure

Fonction hydrologique compartimentée (espace/temps)



Objectifs et méthodologie

Approche interdisciplinaire



Gilvear et Bradley, 2009

Terrains d'étude

Site de Luitel – premiers résultats

- Réponse et effet mémoire

Réserves souterraines (effet mémoire long)
Effet des pluies court

- Comportements hydrologiques

5 types pour Fontfroide
3 types d'écoulement dans la tourbière

- Sectorisation et structure du Luitel

3 réservoirs principaux
5 secteurs géochimiques
Structure 3D

- Soutien d'étiage

Indices de l'existence d'un soutien d'étiage
Soutien d'étiage modélisé faible (0,06 à 0,21 l/s)

- Question suspens

Rôle des zones périphériques ?
Apports souterrains ?
Transfert d'eau, mélange, délais ?

← Premiers résultats

- Tourbière de Luitel (Isère)



Tourbière boisée
(C. Desplanque)



Accès
strictement réglementé



- Tourbière de Frasne (Doubs)

Lien : projet SoHUMID
BRGM/AFB



Tourbière "vivante"

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

Finalité opérationnelle

Indicateurs de potentiel de soutien d'étiage

Tourbière de tête de bassin versant idéale ?

*Stockage d'eau de pluie
et transfert vers un cours d'eau (exutoire)*

- 1) pas d'apport souterrain, pas de cours d'eau entrant mais un exutoire clairement identifié
- 2) pluviométrie abondante et faible ETP
- 3) grand volume de tourbière au-dessus de la cote de l'exutoire (zone hydrologiquement active)
- 4) conductivité hydraulique intermédiaire dans la zone hydrologiquement active associée à une faible pente du substratum et forte porosité efficace
- 5) conductivité hydraulique forte en surface pour faciliter l'infiltration de la pluie lorsque la tourbière n'est pas saturée en eau
- 6) très faible pente de surface et présence de végétation susceptible de ralentir le ruissellement
- 7) présence de milieux humides annexes en connexion avec la tourbière (zone tampon)

A l'échelle du site

- paramètres clefs et gammes de valeurs
- importance relative des critères (hiérarchisation)
- critères de stockage et de restitution
- modélisation : ZH simplifiées théoriques

- typologie des zones humides
- jeu d'abaques sur les paramètres clefs
- scénarios climatiques (évolution du potentiel)

A l'échelle du bassin versant

- identification des variables clefs
- analyse multicritère voire classification des zones humides, machine learning

A suivre...

Spécificités des tourbières

Indicateurs de soutien d'étiage

- Anisotropie verticale :

→ degré d'humification

Indice de Von Post : H1 = peu décomposé
 H10 = très décomposé

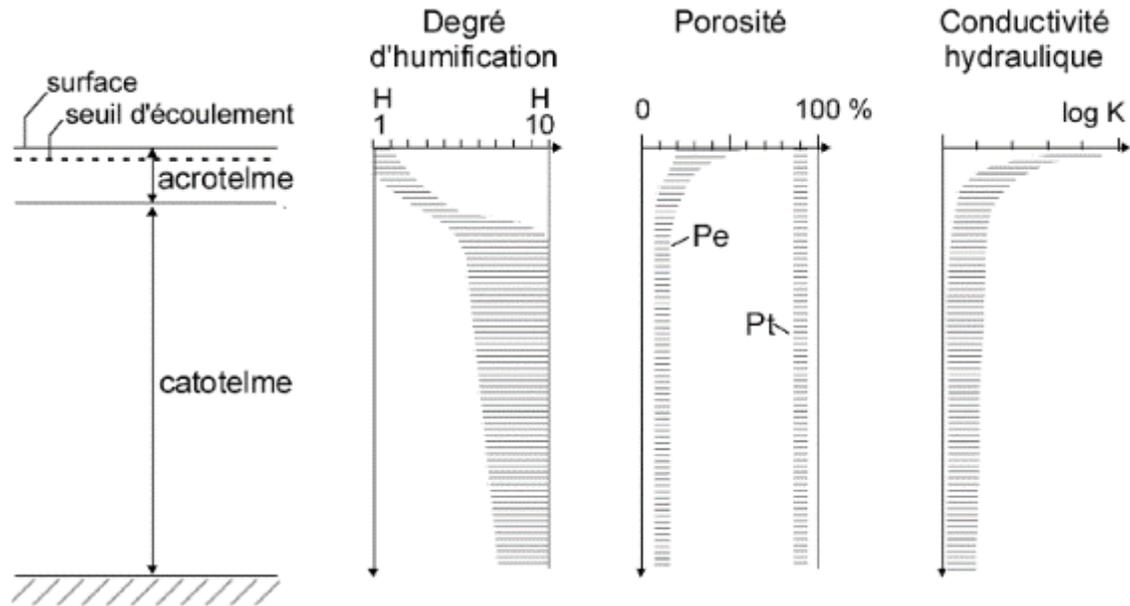
- Forte humification :

→ diminution circulation de l'eau

- Structure diplotelmique :

→ Acrotelme = couche peu épaisse

→ Catotelme = couche épaisse



In Wastiaux, 2008

Équation de vidange : Boussinesq (1903)

Indicateurs de soutien d'étiage

• Équation quadratique de débit

Hypothèses : exutoire fixe où se trouve une couche horizontale imperméable, sans évapotranspiration, fuite ou remplissage

L : longueur (m)

l : largeur (m)

h_m : cote au dessus de l'exutoire, hauteur mouillée (m)

K : conductivité hydraulique (m/s)

Q_0 : débit initial (m³/s)

Φ : porosité efficace

+ Équation adaptée aux réservoirs peu profonds et intégrant des paramètres physiques

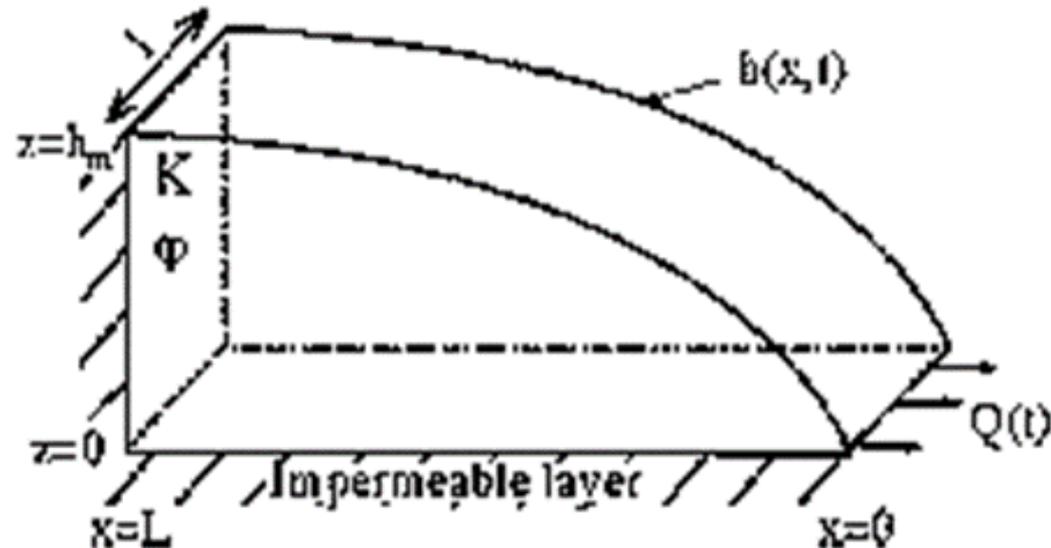
$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$$

where

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

and

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



In Dewandel et al., 2002

Simplification, gammes de valeurs, niveaux Indicateurs de soutien d'étiage

- Tourbière à structure et propriétés hydrodynamique **homogènes**
- Géométrie simplifiée avec **1 seul réservoir** (parallélépipède rectangle ou cube)
- **Pas d'apport d'eau** (ex : pluie, ruisseau) **ou de perte** (ex : ETP, ruisseau)
- Cas d'une tourbière à **saturation**
- **Pas de perturbation anthropique** (ex : fossé)

Paramètre	Gamme/Situation	Niveaux
K (m/s)	10^{-6} à 10^{-2}	10^{-6} - 10^{-5} - 10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2}
l/L	1/10 à 10	1/10 - 1/5 - ½ - 1 - 2 - 5 - 10
h_m (m)	0,2 à 6	0,2 - 0,35 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,5 - 2 - 3 - 6
Φ (-)	0,1 à 0,5	0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5
Surface (ha)	1 à 100	1 - 10 - 100

Jeu d'abaques

Indicateurs de soutien d'étiage

Nom de l'abaque	Remarque	Nombre
Débit initial (l/s)	$hm = f(Q_0)$ Les courbes intègrent les variation de K et l/L	1
Temps (t) en jours avant division de débit par 2, 5, 10 et 50	$hm = f(t)$ Les courbes intègrent les variations de K et Φ Jeu d'abaques : l/L x surface	42
Temps (t) de vidange en jours	$hm = f(t)$ 3 seuils (l/s) : 0,01 ; 0,1 ; 1 l/s Les courbes intègrent les variations de K et Φ Jeu d'abaques : l/L x surface	62
Courbes de tarissement	$Qt = f(t)$ Les courbes intègrent les variations de K et hm Jeu d'abaques : rapport l/L x surface x Φ	63

! 4050 configurations possibles !

Seuils de débits

Indicateurs de soutien d'étiage

Rapport I/L	K (m/s)	hm (m)
0,1	10^{-3}	0,2
	10^{-4}	0,2 – 1
	10^{-5}	0,2 – 3
	10^{-6}	0,2 – 6
0,2	10^{-3}	0,2
	10^{-4}	0,2 - 0,75
	10^{-5}	0,2 – 2
	10^{-6}	0,2 – 6
0,5	10^{-4}	0,2-0,35
	10^{-5}	0,2 – 1,5
	10^{-6}	0,2 – 3
1	10^{-4}	0,2-0,35
	10^{-5}	0,2-1
	10^{-6}	0,2- 3
2	10^{-4}	0,2
	10^{-5}	0,2- 0,75
	10^{-6}	0,2-1
5	10^{-6}	0,2 – 1
	10^{-5}	0,2 – 0,35
10	10^{-6}	0,2-1
	10^{-5}	0,2

- Seuils de débits :

→ 1l/s ? = besoins de 576 personnes pour 1 jour (avec 150litres/jour/habitant)

→ 0,1 l/s ?

→ 0,01l/s ?

- Cas où $Q_0 < 0,01\text{l/s}$:

- Augmentation du rapport I/L

- Perméabilité (K) est souvent faible

- Charge hydraulique (h_m) est faible

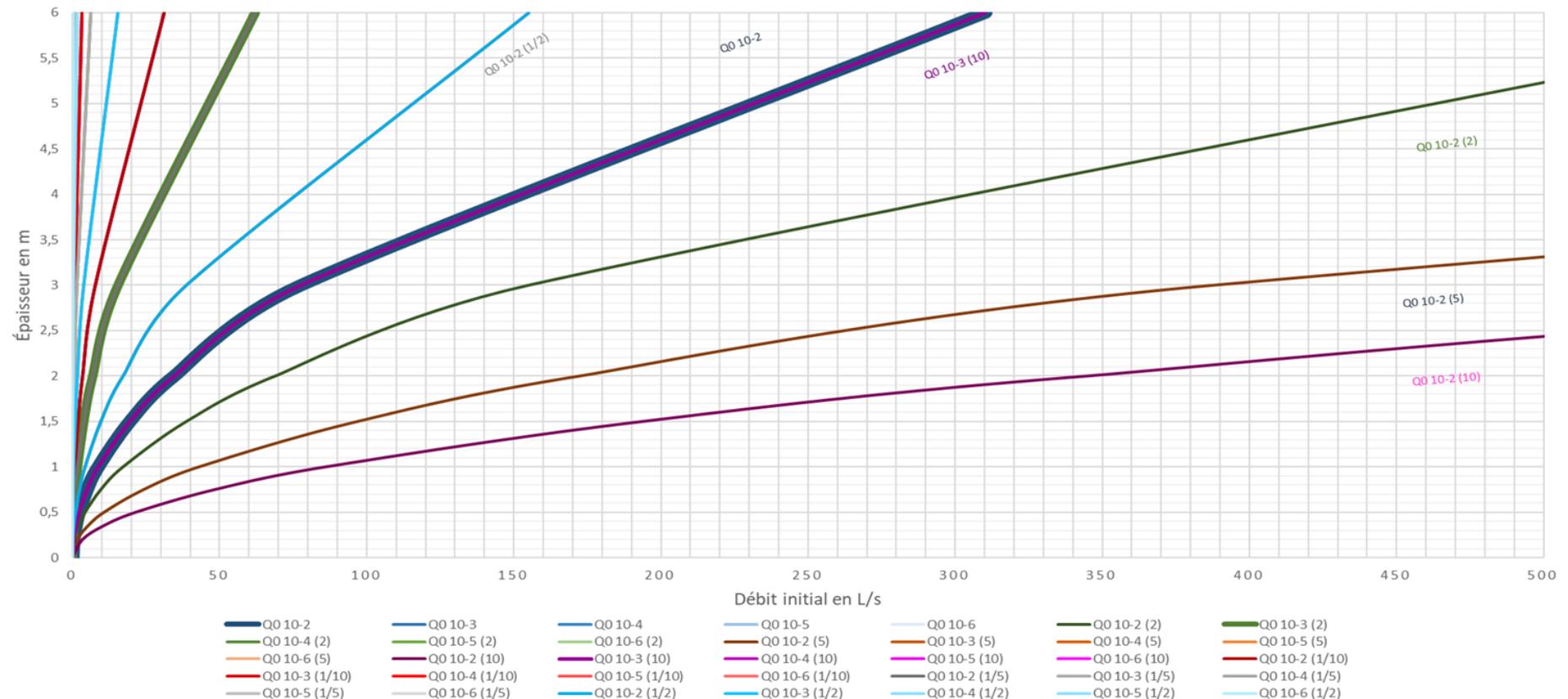
Abaque : débit initial (Q_0)

Indicateurs de soutien d'étiage

- ↑ de l'épaisseur mouillée (H_m),
- ↑ du rapport l/L
- ↑ de la perméabilité (K)

↑ débit initial (Q_0) avec :

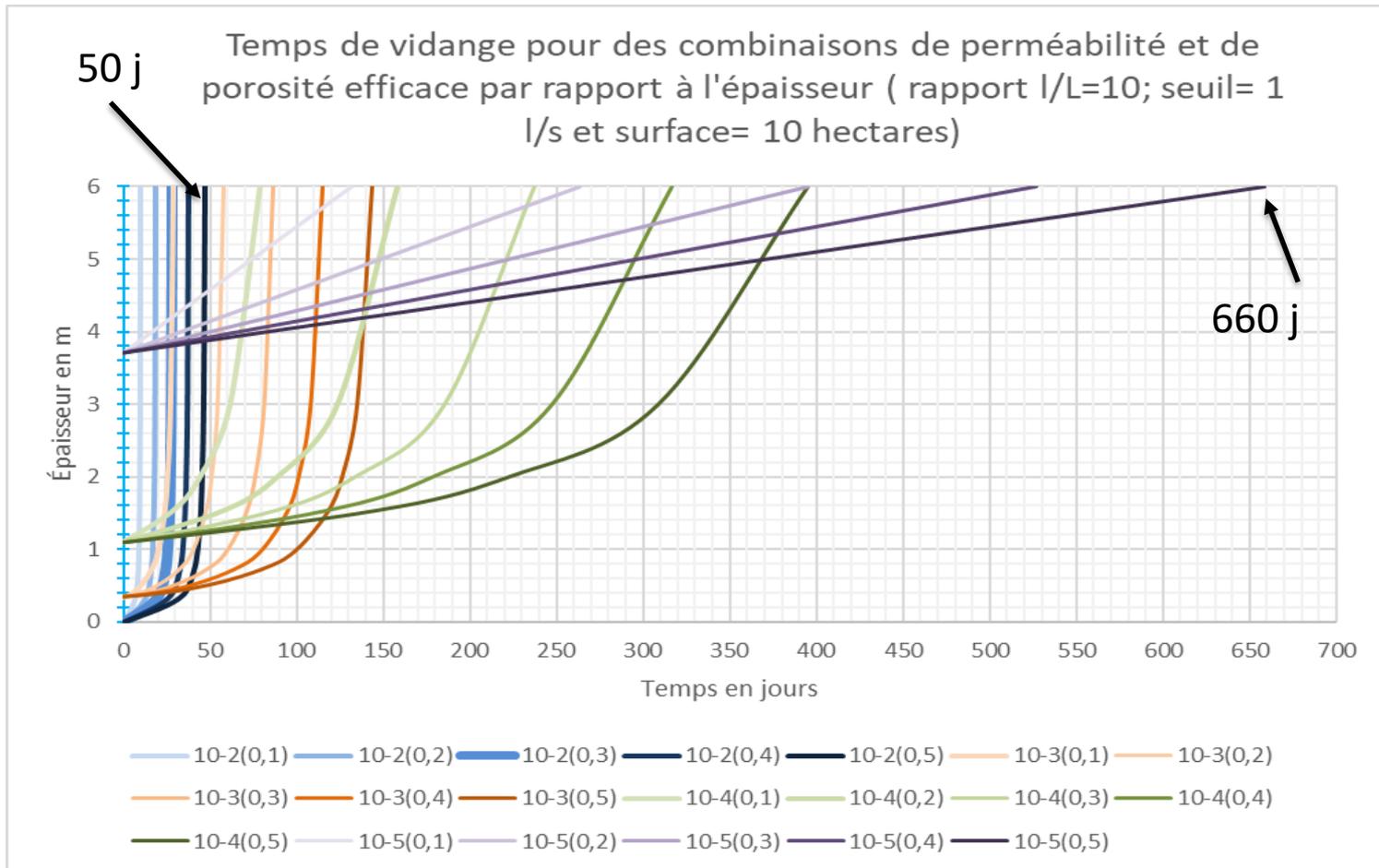
Valeurs de débit initial en fonction de l'épaisseur pour des combinaisons de perméabilité et de rapport l/L (entre parenthèses)



Abaque : temps de vidange

Indicateurs de soutien d'étiage

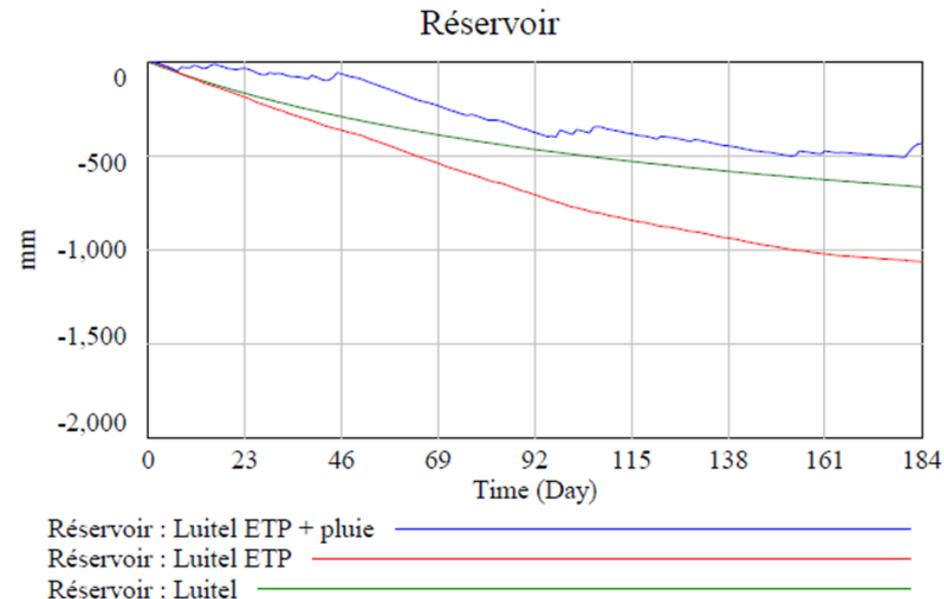
- \uparrow perméabilité (K) : \downarrow temps de vidange
- \uparrow épaisseur (h_m) : \uparrow temps de vidange
- \uparrow porosité efficace (Φ) : \uparrow temps de vidange (au sein d'une même perméabilité)



Conclusions

Tourbières : un soutien d'étiage ?

- **Oui**, plusieurs configurations théoriques permettent un bon potentiel de soutien d'étiage, **mais** ces configurations existent elles sur le terrain ?
- L'étude des combinaisons de paramètres montrent des **potentiels de soutien d'étiage très contrastés**
- Faibles perméabilités de tourbières → **signal de fond hydrologique ?**
- **Contextualiser spatialement le potentiel** : besoin, demande... ?





Conclusions... ... et perspectives

- **Configurations favorables :**

→ paramètres avec des valeurs intermédiaires

→ mais autres configurations possibles

→ la perméabilité a impact significatif sur le potentiel

- **Configurations défavorables :**

→ cas où la perméabilité est très faible

Nb :

→ La porosité efficace stabilise le débit

→ La surface est aussi importante que l'épaisseur mouillée

- **Perspectives :**

→ Confronter les abaques avec la réalité

→ Inclure ETP (sink term) et pluie (source terme) dans l'équation de vidange

→ Intégrer l'anisotropie horizontale dans le modèle

Terrains d'étude

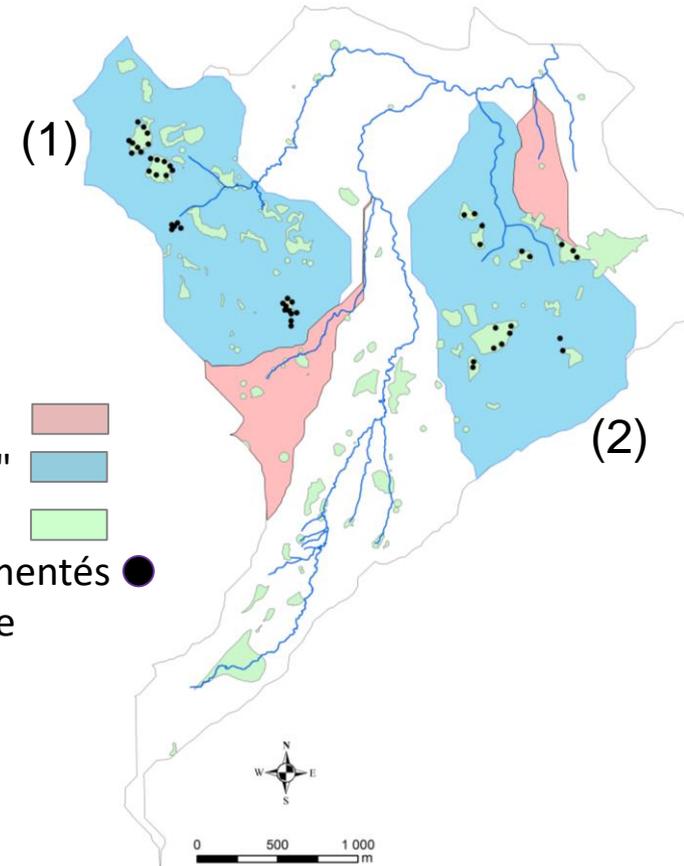
Bassin versant

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



Office National des Forêts

Échelle du bassin versant



2 couples de BV :

- "témoins" 

- "expérimentaux" 

Zones Humides 

Piézomètres instrumentés 

Stations de jaugeage

Station météo

- Étude fonctionnelle de ZH (1)
- Étude du déphasage du signal pluie/débit (2)
- Bilan hydrologique à différentes échelles
- Modélisation



Merci
de votre attention



Quelques images

...

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



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



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



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



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



Tourbière de Luitel (38)

Description rapide

- **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



**Accès
strictement réglementé
par la réserve naturelle**

- **Flux entrant** : pluie (principalement), apports de versant, eau souterraine (par le fond ? latéral ?)
- **Flux sortant** : cours d'eau et ETP, eau souterraine (recharge ?)
- **Failles** : pertes
- **Aménagements/usage** : fossés de drainage, prés communs
- **Données disponibles et instrumentation**
 - Météo depuis 2006
 - Piézomètres : relevé estival depuis 2002 ; 6 capteurs de pression depuis 2013
 - Jaugeage exutoire : depuis 2013
 - LIDAR
 - ...
- **Soutien logistique / scientifique**
- **Accès facile**

Tourbière de Frasne (25)

Description rapide

- **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

- **Flux entrant** : pluie (principalement), eau souterraine (par le fond ? latéral ?)
- **Flux sortant** : cours d'eau et ETP, eau souterraine (recharge ?)
- **Doline** : capacitif (émissif ?)
- **Aménagements/usage** : fossés (drainage, exploitation de tourbe), fossés comblés
- **Données disponibles et instrumentation**
 - Météo depuis 2008
 - Piézomètres : 24 manuels (2004, 2014) ; 12 automatiques (2014)
 - Jaugeage exutoire : depuis 2014
 - LIDAR
 - ...



**Accès
strictement règlementé
par la réserve naturelle**

**Soutien logistique / scientifique
Accès facile**

Organisation

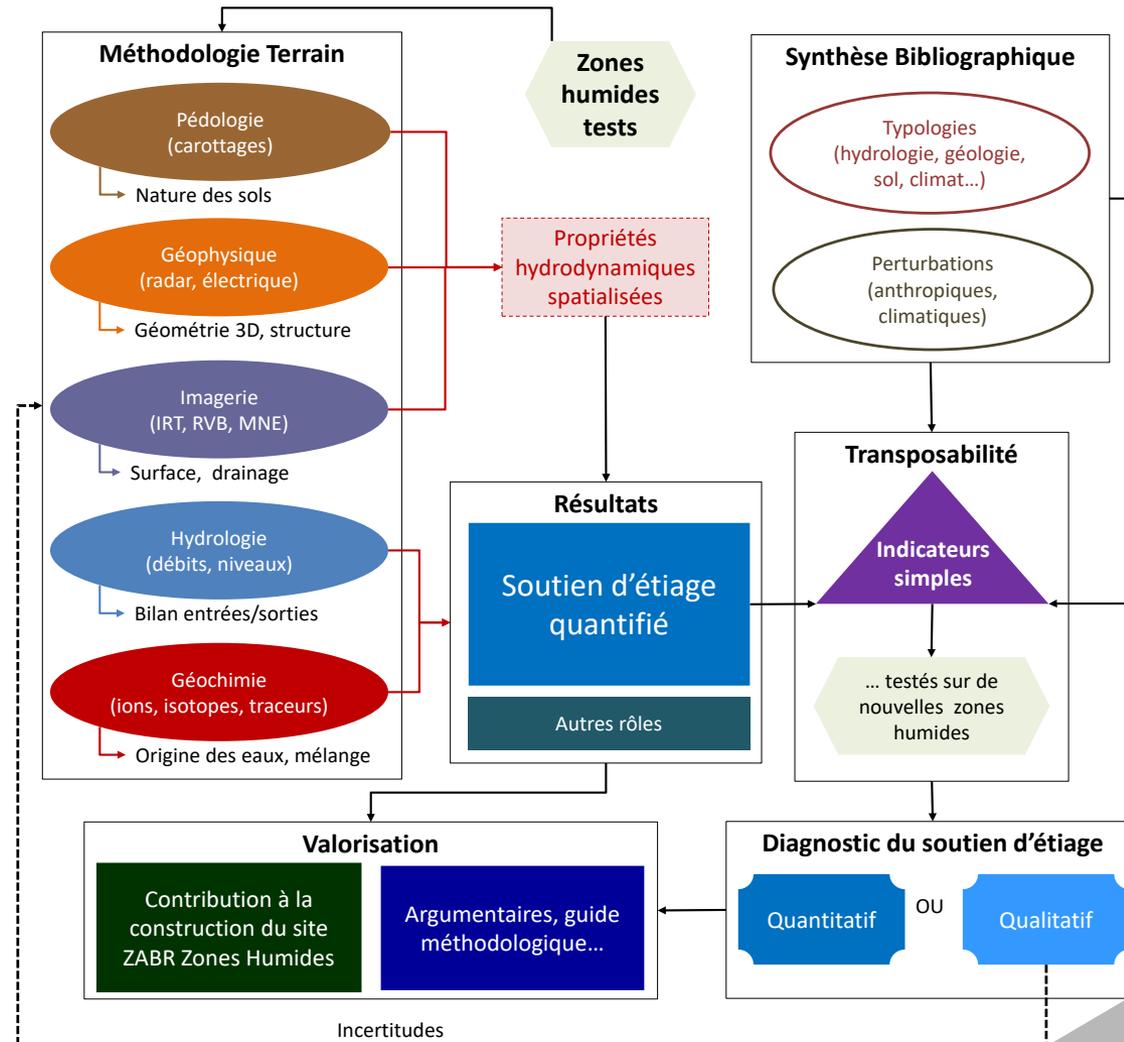
Méthodologie interdisciplinaire



Carotte de tourbe (Luitel)



Pertes de Fontfroide (Luitel)





Organisation

Personnes impliquées

- Mines Saint-Etienne – UMR 5600 EVS

Hydrologie, Hydrogéologie, Modèles réservoirs

F. Paran, D. Graillot, F. Dujardin

J. Ré-Bahuaud, Y. Pascoletti

- Mines Alès – LGEI

Hydrologie, Statistique, Réseaux de neurones

A. Johannet, G. Artigue

S. Pinel, H. Caldirak

- UJM-UMR 5600 EVS-Isthme

Pédologie, Géomatique, Multicritère, Maching learning

H. Cubizolle, P.O. Mazagol, C. Sacca J. Riquier

T. Jolly

- UJM-UMR 6524 LMV

Géochimie

Véronique Lavastre, June Chevet

- ENTPE-UMR 5023 Lehna

Géophysique

T. Winiarski

- AERMC

L. Cadilhac, F. Chambaud, N. Bosc-Bossut,

É. Lunaud, C. Zys, L. Perrin, M. Pignon

- ONF Aude

C. Cocula, E. Ebrard, B. Laroque

- Comité de suivi (CEN)

D. Danancher, J. Porteret

- **Tourbière de Luitel**

ONF Isère : C. Desplanque

Université de Grenoble IGE : J.P. Laurent

- **Tourbière de Frasne**

Epage Haut-Doubs Haute-Loue : G. Magnon, L.

Collin, T. Van-Rijswijk, V. Berthus

Communauté de communes Frasne Drugeon : T.

Van-Rijswijk, V. Berthus

Laboratoire Chrono-environnement - UMR 6249

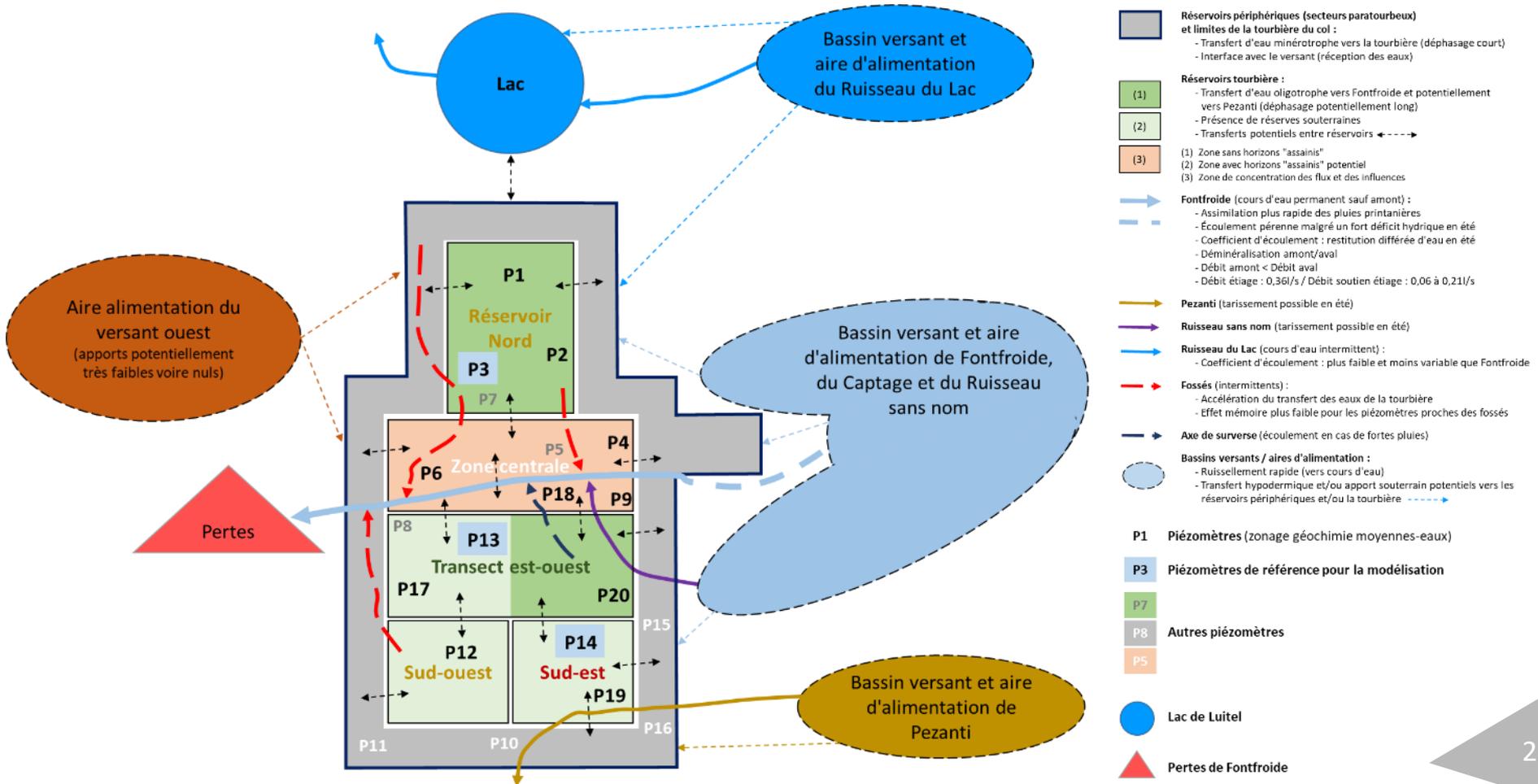
CNRS-UFC: C. Bertrand, G. Bertrand, M.L. Toussaint,

A. Lhosmot

Carte de synthèse

Fonctionnement hydrologique : Luitel

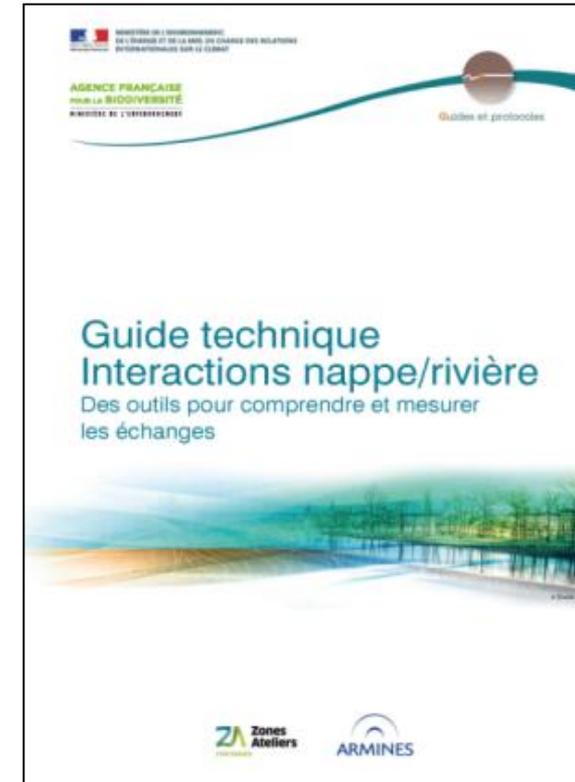
Carte de synthèse du fonctionnement hydrologique du Luitel



Projets

Interactions Eso/Esu

- **Aquifères alluviaux/rivière (Rhône) [2006-2015]**
 - 1 thèse (E. Lalot, 2014)
 - 1 guide méthodologique¹ (AE-RMC/Zabr, 2015)
 - 1 guide technique² (AFB, 2017)
- **Karst/rivière (Cèze, Gard) [2013-2020]**
 - 1 thèse (H. Chapuis, 2017)
 - 1 guide méthodologique (AE-RMC/Zabr, 2020)
- **ZH/Eso/Esu (Luitel-38, Frasné-26) [2016-2021]**
 - projet en cours
 - 1 guide méthodologique ou technique (AE-RMC/Zabr, 2022 ?)
- **Caprice (Chaîne des Puys, Veyre, Côte) [2019-2022]**
 - projet en cours
 - contexte volcanique



¹ http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VF.pdf

² <http://www.onema.fr/Guide-Interactions-nappe-riviere>

Références bibliographiques

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.

Guides et thèses : interactions eso/esu

- Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015) Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 178p.
- Lalot E. (2014) Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône. Thèse de Doctorat. Mines Saint-Étienne
- Paran F., Augeard B. (coordinateurs) (2017) Guide technique Interactions nappe/rivière : des outils pour comprendre et mesurer les échanges. Agence française pour la biodiversité, collection Guides et protocoles, 102p.
- Chapuis H. (2017) Caractérisation, évaluation, modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières – Application à la Cèze (Gard, France). Thèse de Doctorat. Mines Saint-Étienne.