



# Rôle des interactions surface-souterrain sur les crues du Doubs

Rapport final

**BRGM/RP-69534-FR**

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations (projets)  
de Service public du BRGM AP19D3E122

**J.-B. Charlier**

**Vérificateur :**

Nom : Bernard LADOUCHE

Fonction : Hydrogéologue

Date : 04/02/2020

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Jean-Christophe MARECHAL

Fonction : Responsable d'Unité

Date : 04/02/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : CRUE, HYDROLOGIE KARST, CARTOGRAPHIE, JURA

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Charlier J.-B.** (2019) – Rôle des interactions surface-souterrain sur les crues du Doubs. Rapport final. BRGM/RP-69534-FR, 73p.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

La contribution des eaux souterraines aux crues est une problématique traitée dans le cadre de la convention annuelle entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations). Pour l'année 2019, un des modules sur les « crues karstiques » concerne le bassin du Doubs sur le territoire du SPC RAS.

Les besoins identifiés portent sur une meilleure compréhension du rôle des interactions surface-souterrain le long du Doubs, connu pour alimenter en partie le bassin de la Loue via des pertes conséquentes en aval de Pontarlier. L'objectif de cette étude est double :

- de proposer une cartographie de la géométrie du bassin hydrogéologique du Doubs à partir des connaissances actuelles sur le secteur du Doubs (en amont de Mathay).
- d'améliorer le modèle de pertes du Doubs au niveau d'Arçon qui alimentent la Loue, par l'analyse croisée des données hydrométriques, de simulation des échanges latéraux (pertes) et des données hydrochimiques (NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, P<sub>tot</sub>).

La cartographie des sous-bassins du Doubs a été réalisée en comparant le découpage topographique et le découpage hydrogéologique, afin d'évaluer l'importance des écoulements inter-bassins souterrains. On observe une meilleure cohérence de la distribution des valeurs de débit spécifique (module) pour le découpage des bassins hydrogéologiques, lié à la prépondérance d'écoulements souterrains en contexte karstique. Ce résultat est supporté par les données de traçage artificiel et les indicateurs morphométriques (indices de Gravelius, altitude moyenne) calculés pour chaque sous-bassins. A partir de la localisation des pluviomètres Temps-réels utilisés par le SPC RAS, une pondération est proposées pour chaque station en prenant en compte les 2 découpages topographiques et hydrogéologiques. Un facteur correctif du poids des pluviomètres est proposé afin d'intégrer les écoulements souterrains lorsqu'ils sont significatifs.

Le modèle des pertes du Doubs qui alimentent la Loue – modèle proposé dans le rapport BRGM/RP-63844-FR (Charlier et al., 2014) - est affiné en croisant les données hydrométriques avec des données hydrochimiques (PO<sub>4</sub>, P<sub>tot</sub>, NO<sub>3</sub>) sur la zone de pertes à Arçon et la source de la Loue. Les pertes sont estimées à partir des échanges latéraux sur le tronçon du Doubs et à partir de 2 modèles calés selon différents scenarii. Afin de contraindre le calage du modèle, les contributions des flux de pertes de différents traceurs aux flux de la source de la Loue sont comparés. PO<sub>4</sub> semble être le traceur le plus pertinent pour tracer les pertes du fait de son origine domestique sur le bassin du Doubs. Il en ressort qu'un modèle de pertes avec des capacités maximales d'absorption plafonnant entre 5 et 10 m<sup>3</sup>/s semble cohérent. L'analyse des crues majeures de janvier 2018 indique que des pertes plus importantes se sont produites temporairement, en lien probablement avec une modification des conditions d'infiltration lors de ces épisodes exceptionnels.

Sur la base de ces résultats, des préconisations sont proposées au SPC RAS pour améliorer la prévision des crues sur la zone amont du Doubs, en tenant compte des interactions surface-souterrain.



# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Cartographie des sous-bassins du Doubs .....</b>	<b>11</b>
2.1. DONNEES DISPONIBLES ET CALCUL DES INDICES MORPHOMETRIQUES	11
2.1.1. Données spatiales .....	11
2.1.2. Données caractérisant l'hydrologie et la morphométrie des bassins .....	11
2.2. DECOUPAGE DES SOUS-BASSINS ET CALCUL DES INDICES MORPHOMETRIQUES.....	12
2.2.1. Découpage topographique et hydrogéologique.....	12
2.2.2. Caractéristiques des sous-bassins.....	12
2.3. VARIABILITE SPATIALE DES DEBITS SPECIFIQUES.....	16
2.4. COMPARAISON DES INDICES MORPHOMETRIQUES.....	21
2.4.1. Indice de Gravelius .....	21
2.4.2. Altitudes moyennes.....	21
2.5. PONDERATION DES PLUVIOMETRES SELON LE TYPE DE DECOUPAGE	21
2.5.1. Pour l'ensemble des stations hydrométriques .....	21
2.5.2. Cas de la station d'Ornans pour la mise en vigilance de la Loue.....	24
<b>3. Estimation des captures du Doubs et des transferts vers le bassin de la Loue</b>	<b>29</b>
3.1. SITE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES.....	29
3.1.1. Système karstique des sources de la Loue.....	29
3.1.2. Connaissances actuelles sur les relations Doubs-Loue et données disponibles	33
3.2. DONNEES TEMPORELLES .....	33
3.3. CONTRIBUTION DES PERTES DU DOUBS A LA SOURCE DE LA LOUE ....	36
3.3.1. Résultats à partir des données de débit.....	36
3.3.2. Résultats à partir des données de modélisation.....	39
3.3.3. Résultats à partir des données hydrochimiques.....	43
3.3.4. Focus sur les épisodes majeurs de janvier 2018.....	49
<b>4. Conclusions et préconisations.....</b>	<b>53</b>
4.1. CARTOGRAPHIE DES SOUS-BASSINS DU DOUBS .....	53
4.2. CAPTURES DU DOUBS VERS LA LOUE .....	53
4.3. PRECONISATIONS .....	54

## 5. Bibliographie..... 55

### Liste des figures

Illustration 1 –découpages des sous-bassins topographiques du Doubs et des sous-bassins limitrophes.....	13
Illustration 2 –découpages des sous-bassins hydrogéologiques du Doubs et des sous-bassins limitrophes.....	13
Illustration 3 – comparaison des découpages des sous-bassins topographiques et hydrogéologiques du Doubs et des sous-bassins limitrophes au niveau de chaque station hydrométrique .....	14
Illustration 4 – données de débit moyen inter-annuel pour les stations hydrométriques du Doubs et des bassins limitrophes.....	15
Illustration 5 – Débits spécifiques estimés pour les bassins topographiques (en haut) et bassins hydrogéologiques (en bas) de chaque station hydrométrique.....	17
Illustration 6 – Comparaison des surfaces des bassins topographiques (en abscisse) et hydrogéologiques (en ordonnée) en fonction du débit spécifique (taille des cercles) pour les sous-bassins amonts (à gauche) et intermédiaires (à droite) .....	18
Illustration 7 – Zoom sur la zone Haut-Doubs (tronçon Mouthe->Ville-du-Pont) - Haute-Loue (amont de Chenecey-Buillon) de l'illustration 5 .....	19
Illustration 8 – Zoom sur la zone Haut-Doubs (tronçon Ville-du-Pont -> Beaumes-les-Dames) de l'illustration 5 .....	20
Illustration 9 – Indices de compacité de Gravelius pour les sous-bassins topographiques (en haut) et sous-bassins hydrogéologiques (en bas) .....	22
Illustration 10 – Altitude moyenne des bassins d'alimentation pour les sous-bassins topographiques (en haut) et sous-bassins hydrogéologiques (en bas).....	23
Illustration 11 – Superposition des polygones de Thiessen de la couche pluviométrique et des bassins topographiques (en haut) hydrogéologiques (en bas).....	25
Illustration 12 – Ecart (en points) des pourcentages de pondération de chaque pluviomètre à partir des polygones de Thiessen pour le découpage topo-graphique et hydro-géologique (cf illustration 11).....	26
Illustration 13 – Délimitation des sous-bassins emboîtés en amont d'Ornans et écarts (en points) des pourcentages de pondération de chaque pluviomètre pour chaque sous-bassin .....	27
Illustration 14. Localisation des arrivées d'eau et des stations hydrométriques au niveau de la source de la Loue. ....	29
Illustration 15. De gauche à droite : arrivée d'eau principale de la source de la Loue (Loue Vasque), arrivée d'eau secondaire (Loue canal) et déversoir EDF (Loue barrage) qui intègre l'ensemble des arrivées d'eau - clichés BRGM. ....	30
Illustration 16. Localisation des stations de mesure et ténendue du bassin hydrogéologique des sources de la Loue et bassin versant des pertes du Doubs (fond géologique d'après Carte Géologique Harmonisée 1/50 000 BRGM ©).....	32
Illustration 17. Modèle conceptuel des sources de la Loue et des apports issus des pertes du Doubs (Charlier et al., 2014) .....	33
Illustration 18 – Plan de situation des stations QUARSTIC.....	34

Illustration 19 – Comparaison des données instantanées (8h du matin) de débit de la source de la Loue EDF (somme des arrivées d'eau Loue vasque+Loue canal+arrivées mineures) avec celles de Loue canal (à gauche) et de la Loue à Vuillafans) ; l'intervalle de confiance CI à 95% est indiqué. ....	35
Illustration 20 – Comparaison des données instantanées (8h du matin) de débit de la source de la Loue EDF avec celles de la Loue à Vuillafans à la même heure (à gauche) et avec une heure de plus (9h du matin) pour tenir compte d'un éventuel déphasage lié à la propagation de l'onde de crue ; l'intervalle de confiance CI à 95% est indiqué. ....	36
Illustration 21 – Chroniques de précipitations, de débit du Doubs (à Arçon et à Ville-du-Pont) et de la source de la Loue, et estimation des contributions des pertes du Doubs au débit de la source de la Loue. ....	38
Illustration 22 – Relations $Q_{\text{pertes}}$ vs. $Q_{\text{Arçon}}$ avec proposition des 2 modèles de pertes et des paramètres associés. ....	39
Illustration 23 – Zoom de l'illustration 22 sur la fin de l'étiage de basses eaux et les premières crues hivernales de 2011. ....	41
Illustration 24 – Chroniques hydrologiques de l'illustration 21 avec modèle de pertes présenté en illustration 22. ....	42
Illustration 25 – Schéma conceptuel des transferts de $PO_4$ , $P_{\text{tot}}$ et $NO_3$ entre le Doubs et la Loue. ....	43
Illustration 26 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en $PO_4$ , des flux de P- $PO_4$ , et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue. ....	45
Illustration 27 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en $P_{\text{tot}}$ , des flux de $P_{\text{tot}}$ , et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue. ....	46
Illustration 28 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en $NO_3$ , des flux de N- $NO_3$ , et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue. ....	47
Illustration 29 – Comparaison des flux de pertes en regard des flux de à la source de la Loue vasque ; les valeurs en gras sont les résultats de flux massiques proches d'un ratio de 100% à +/- 20% entre les flux des pertes et les flux à la source de la Loue vasque. ....	48
Illustration 30 – Relations entre le débit des sources de la Loue à la vasque et la proportion de pertes du Doubs dans le débit de la source de la Loue. ....	49
Illustration 31 – Zoom de l'illustration 22 sur les crues majeures de janvier 2018. ....	50
Illustration 32. Carte géologique au 1/1 000 000 du nord du massif du Jura centrée sur le bassin du Doubs (BRGM © et GeoCover V2). ....	59
Illustration 33. Carte structurale du massif du Jura (Bichet et Campy, 2008). ....	60
Illustration 34. Log géologique du massif du Jura (Chauve, 2006) et localisation des principaux aquifères et aquicludes du bassin Loue-Lison. ....	61
Illustration 35. Synthèse des précipitations annuelles et des maxima journaliers sur le bassin Loue-Lison le long du gradient d'altitude entre Besançon (307 m NGF), Epenoy (752 m NGF), Pontarlier (831 m NGF) et Mouthe (939 m NGF). ....	65
Illustration 36. Contexte géologique des pertes du Doubs et de la source de la Loue (Bichet et Campy, 2008 modifié d'après Chauve (2006)). ....	69
Illustration 37. Jaugeages différentiels le long du Doubs au niveau de la zone de capture connectée aux sources de la Loue (d'après Chauve, 2006). ....	70

Illustration 38. Relations entre débit du Doubs en amont des pertes (confluence) et le débit des pertes mesurées par jaugeage, et interprétation hydrogéologique du déficit d'écoulement (Jacquemin, 1984).....	71
Illustration 39. Courbe enveloppe du débit total des pertes en fonction du débit amont (DIREN, 1995) .....	72

## Liste des annexes

Annexe 1 Contexte hydrogéologique du bassin du Doubs dans le massif du Jura .....	57
Annexe 2 Gradient pluviométrique (RP-63844-FR – Charlier et al., 2014).....	63
Annexe 3 Synthèse des connaissances sur les relations Doubs-Loue (RP-63844-FR – Charlier et al., 2014) .....	67

# 1. Introduction

La contribution des eaux souterraines aux crues est une problématique traitée dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations). Pour l'année 2019, un des modules sur les « crues karstiques » concerne le bassin du Doubs sur le territoire du SPC RAS.

Les besoins identifiés portent sur une meilleure compréhension du rôle des interactions surface-souterrain le long du Doubs. En effet, le Doubs est connu pour alimenter en partie le bassin de la Loue via des pertes conséquentes à Arçon, en aval de Pontarlier. Ces pertes sont totales en étiage et un premier modèle issu de simulations des échanges latéraux (action BRGM-SHAPI 2014) simule des capacités de pertes atteignant 10 m<sup>3</sup>/s en crue, représentant une part non négligeable des écoulements du Doubs sur ce tronçon. Les relations débit-débit entre les stations au droit des pertes et les autres stations aval du secteur du Doubs amont sont complexes et ne permettent pas au SPC RAS d'anticiper de manière fiable l'évolution des crues le long du Doubs. Enfin, d'un point de vue prévision, le Doubs à Mathay est simulé par un modèle global (GRP) qui ne tient pas compte de l'ensemble de cette complexité, et une meilleure compréhension des phénomènes en jeu permettrait de faire évoluer potentiellement l'approche utilisée en prévision.

L'objectif de cette étude est double :

- de proposer une cartographie de la géométrie du bassin du Doubs à partir des données hydrogéologiques connues sur le secteur du Doubs (en amont de Mathay). Cette cartographie permettra de mieux contraindre les zones d'apport et de pertes du bassin en vue de son intégration dans la prévision des crues.
- d'améliorer le modèle de pertes du Doubs qui alimentent la Loue. En effet, depuis 2016, on dispose de traceurs chimiques naturels pour comparer les entrants et sortants sur le système Doubs-Loue, à travers les données du réseau QUARSTIC (réseau BRGM, CD25, SMIX Loue, AERMC). L'objectif de l'action est de mieux contraindre le modèle de pertes du Doubs par l'analyse croisée des données hydrométriques, de simulation des échanges latéraux (pertes) et des données hydrochimiques (NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, P<sub>tot</sub>).

Les résultats attendus portent sur une spatialisation des sous-bassins déficitaires et excédentaires du bassin du Doubs sur son linéaire au sein du massif karstique du Jura, et sur la fiabilisation de l'estimation des pertes du tronçon du Doubs à Arçon qui contribue à l'alimentation de la Loue.



## 2. Cartographie des sous-bassins du Doubs

### 2.1. DONNEES DISPONIBLES ET CALCUL DES INDICES MORPHOMETRIQUES

#### 2.1.1. Données spatiales

L'acquisition des données spatiales sur la zone d'étude a porté sur :

- le relief : BDAlti & MNT 25m suisse ;
- la géologie : carte géologique BRGM 1/1 000 000 et 1/50 000 & et carte GeoCover V2 qui se base sur les cartes existantes de l'Atlas géologique de la Suisse 1/25 000 (GA25) ;
- le réseau hydrographique : BD CARTHAGE & swissTLMRegio ;
- les données « eau » avec localisation des principales émergences et pertes : portail ADES & OFEV (Office fédéral de l'environnement) ;
- les traçages artificiels : DREAL de Franche-Comté & OFEV ;
- le découpage des unités hydro(géo)logiques : DREAL/SPR<sup>1</sup> & OFEV ;
- le découpage des bassins topographiques au droit des stations hydrométriques : données SPC RAS à partir du MNT50 & données OFEV ;

#### 2.1.2. Données caractérisant l'hydrologie et la morphométrie des bassins

**Qmoy** : moyenne inter-annuelle ( $Q_{moy}$ ) au niveau des stations hydrométriques. La collecte de ces données a été réalisée à partir de la Banque Hydro et de l'OFEV pour respectivement les stations françaises et suisses.

**AIREamont** : la surface de l'ensemble de la partie amont à la station hydrométrique.

**Qsp** : le débit inter-annuel spécifique pour l'ensemble de la partie amont à la station hydrométrique ( $Q_{moy} / \text{AIREamont}$ ). Il renseigne sur les flux moyens par unité de surface.

**AIREinter** : la surface de bassin intermédiaire situé entre 2 stations hydrométriques. Cette surface est donnée pour la station aval. Dans le cas des têtes de bassin (sans station en amont),  $\text{AIREinter} = \text{AIREamont}$ .

**ALTmoy** : l'altitude moyenne du bassin intermédiaire.

**PERIM** : le périmètre du bassin intermédiaire.

**IND\_GRAVELIUS** : l'indice de compacité de Gravelius pour le bassin intermédiaire, qui est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface ( $\text{IND\_GRAVELIUS} = \text{PERIM} / (2\sqrt{\pi \text{AIREinter}})$ ). Le coefficient est supérieur à 1 et est d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact.

---

<sup>1</sup> D'après communication personnelle de Y. Cadet ; découpage basé en partie sur le respect du module hydrologique aux stations hydrométriques ; ce découpage est validé sur un critère de construction donné et correspond à un niveau de connaissance qui a localement évolué (nouveaux traçages, jaugeages, etc.)

## **2.2. DECOUPAGE DES SOUS-BASSINS ET CALCUL DES INDICES MORPHOMETRIQUES**

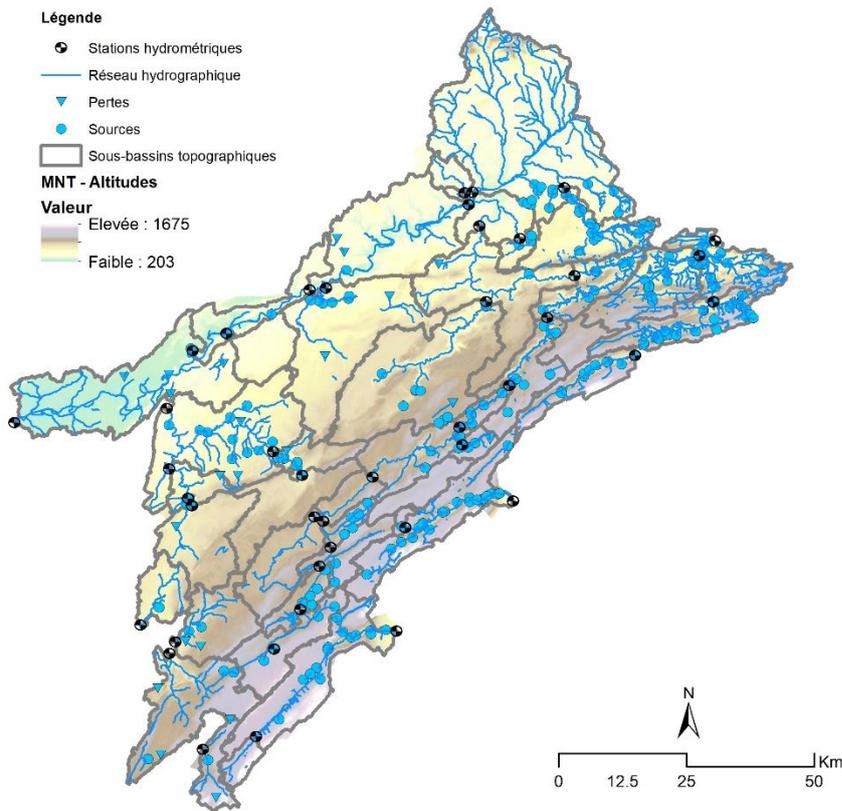
### **2.2.1. Découpage topographique et hydrogéologique**

Le découpage des bassins topographiques (Illustration 1), réalisé à partir du MNT, donne une représentation des limites des écoulements en surface et subsurface, contrôlés par la pente. Celui des bassins hydrogéologiques (Illustration 2), réalisé à partir des données de traçage artificiel et de la géologie, donne une représentation des limites des écoulements souterrains, contrôlés par les réseaux karstiques. Une présentation du contexte hydrogéologique de la vallée du Doubs dans le massif du Jura est réalisée en Annexe 1.

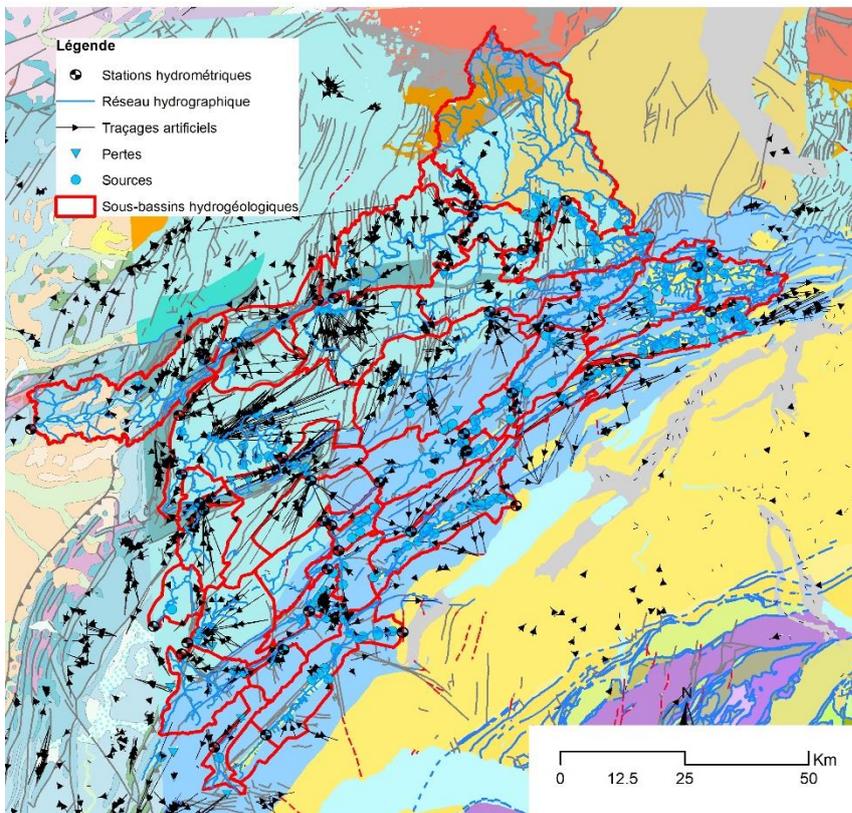
### **2.2.2. Caractéristiques des sous-bassins**

Le résultat de ces deux découpages topographiques et hydrogéologiques est présenté sur la superposition en Illustration 3, et une synthèse des caractéristiques hydrologiques et morphométriques des bassins est présentée dans le Tableau de l'Illustration 4. On observe globalement des écarts significatifs pour les sources instrumentées à leur exutoire (sources du Doubs, du Lison, de la Loue, du Verneau, d'Arcier) ou pour celles instrumentées à proximité (Loue à Vuillafans, Areuse à St Sulpice, Cusancin à Beaume les Dames, ou le Lison à Myon).

On observe une plus forte variabilité des caractéristiques pour le découpage topographique. A titre d'exemple, les valeurs de débit spécifique qui se distribuent entre 15 et 45 L/km<sup>2</sup> présentent pour 4 stations des Qsp aberrantes (plusieurs centaines voire milliers de L/km<sup>2</sup>, écriture en rouge dans le Tableau) pour le découpage topographique. Une distribution bien plus homogène est visible pour le découpage hydrogéologique, renforçant l'idée que les processus souterrains sont prépondérants en domaine karstique.



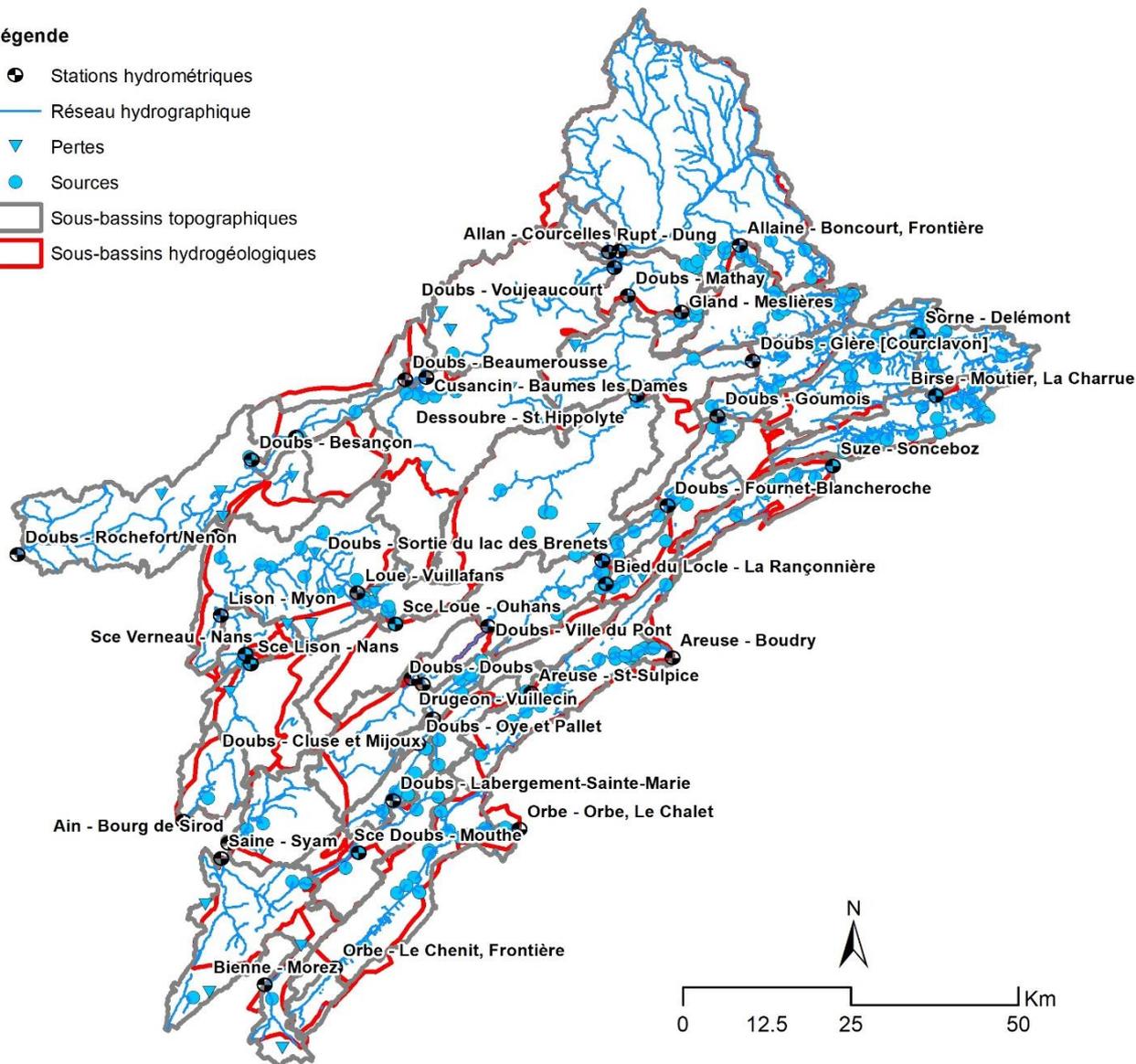
*Illustration 1 –  
découpages des sous-  
bassins  
topographiques du  
Doubs et des sous-  
bassins limitrophes*



*Illustration 2 –  
découpages des sous-  
bassins  
hydrogéologiques du  
Doubs et des sous-  
bassins limitrophes*

**Légende**

-  Stations hydrométriques
-  Réseau hydrographique
-  Pertes
-  Sources
-  Sous-bassins topographiques
-  Sous-bassins hydrogéologiques



*Illustration 3 – comparaison des découpages des sous-bassins topographiques et hydrogéologiques du Doubs et des sous-bassins limitrophes au niveau de chaque station hydrométrique*

Stations		Découpage topographique						Découpage hydrogéologique						Comparaison des découpages								
		Bassin amont			Bassin intermédiaire			Bassin amont			Bassin intermédiaire			Bassin amont		Bassin intermédiaire		Bassin amont		Bassin intermédiaire		
		Qmoy m3/s	AIREamont km²	Qsp L/km²	AIREinter km²	ALTmoy m NGF	PERIM km	IND GRAV ELIUS (-)	AIREamont km²	Qsp L/km²	AIREinter km²	ALTmoy m NGF	PERIM km	IND GRAV ELIUS (-)	Ecart_AIRE amont %	Ecart_AIRE inter %	Ecart_PERI M %	Ecart_ALT moy %	Ecart_AIRE amont %	Ecart_AIRE inter %	Ecart_PERI M %	Ecart_ALT moy %
Ain - Bourg-de-Siod	F	9.4	1768	52.3	1788	687	106.2	2.22	219.8	42.5	219.8	895	77.8	1.47	-23%	-23%	27%	-30%	-23%	-23%	27%	-30%
Allaine - Boncourt-Frontiere	CH	3.3	211.7	15.4	211.7	718	96.4	1.86	213.2	15.3	213.2	564	110.2	2.11	-1%	-1%	-14%	22%	-1%	-1%	-14%	22%
Allan - Courcelles	F	22.1	909.5	24.3	909.5	428	228.1	2.12	1109.0	19.9	895.8	416	231.3	2.16	-22%	2%	-1%	-3%	-22%	2%	-1%	-3%
Angillon - Champagnole	F	3.1	104.4	29.7	104.4	665	72.4	1.98	91.8	33.8	91.8	664	47.9	1.39	12%	12%	34%	1%	12%	12%	34%	1%
Areuse - Boudry	CH	11.3	280.0	40.4	287.0	1208	145.6	2.50	365.8	30.9	247.3	1047	114.4	2.04	-31%	7%	21%	13%	-31%	7%	21%	13%
Areuse - St-Subice	CH	4.8	13.3	363.0	13.3	1092	23.1	1.77	118.5	40.7	118.5	1112	72.5	1.87	-792%	-792%	-214%	-2%	-792%	-792%	-214%	-2%
Bied du Locle - La rancorniere	CH	0.4	36.4	9.9	36.4	1077	33.4	1.55	31.6	11.4	31.6	1063	29.7	1.48	13%	13%	11%	1%	13%	13%	11%	1%
Bienna - Morez	F	2.9	80.2	36.4	80.2	1252	85.1	2.86	76.8	38.0	76.8	1072	71.4	2.28	4%	4%	16%	14%	4%	4%	16%	14%
Brise - Moutier, La Charue	CH	3.3	185.5	17.6	185.5	1174	93.0	1.91	183.7	17.7	183.7	926	95.1	1.96	1%	1%	-2%	21%	1%	1%	-2%	21%
Brise - Soyheries, Bois du Treuil	CH	10.9	383.1	28.5	169.5	791	92.6	1.99	573.1	19.0	170.7	711	94.0	2.02	-50%	-1%	-2%	10%	-50%	-1%	-2%	10%
Cuscantin - Baumes les Dames	F	7.3	468.8	15.5	468.8	561	192.8	2.49	353.6	20.6	353.6	550	111.2	1.66	25%	25%	42%	2%	25%	25%	42%	2%
Dessoubre - St-Hippolyte	F	13.6	551.7	24.7	551.7	785	182.3	2.17	615.2	22.1	615.2	797	126.5	1.43	-12%	-12%	31%	-1%	-12%	-12%	31%	-1%
Doubs - Beaumerousse	F	96.5	4134.2	23.3	416.2	461	151.7	2.08	4218.0	21.4	430.6	402	143.0	1.93	-2%	-3%	6%	13%	-2%	-3%	6%	13%
Doubs - Besancon	F	97.8	4286.0	22.8	149.8	436	141.3	3.23	4504.0	21.7	151.6	364	95.8	2.18	-5%	-1%	32%	17%	-5%	-1%	32%	17%
Doubs - Cluse et Mijoux	F	7.8	349.9	22.2	99.9	926	99.1	2.78	350.2	22.2	118.4	1067	84.3	2.17	0%	0%	15%	-15%	0%	0%	15%	-15%
Doubs - Courclavon	F	33.0	1217.1	27.1	144.4	719	86.3	2.01	1216.0	27.1	165.5	743	83.9	1.83	0%	0%	3%	-3%	0%	0%	3%	-3%
Doubs - Doubs	F	7.8	392.2	19.9	42.3	1015	47.9	2.06	397.8	19.7	47.6	1028	43.9	1.78	-1%	-12%	8%	-3%	-1%	-12%	8%	-3%
Doubs - Fournet-Blanchenoche	F	19.8	909.6	21.8	41.3	965	44.6	1.94	875.0	22.6	70.0	990	41.3	1.38	4%	4%	7%	-4%	4%	4%	7%	-4%
Doubs - Gourmois	F	28.8	1072.7	26.8	163.2	963	133.1	2.82	1050.0	27.4	175.9	962	81.8	1.73	2%	2%	39%	0%	2%	2%	39%	0%
Doubs - Labergeimont-Sie-Marie	F	4.4	175.0	25.2	174.6	1107	126.6	2.88	148.1	29.8	80.1	1061	73.3	2.29	15%	15%	42%	4%	15%	15%	42%	4%
Doubs - lac des Brenets	F	21.5	868.3	24.7	183.4	933	91.1	1.88	805.0	26.6	205.0	947	75.5	1.48	7%	7%	17%	-2%	7%	7%	17%	-2%
Doubs - Mathay	F	53.6	2132.0	25.1	363.7	663	202.8	2.88	2111.0	25.4	278.7	592	114.3	1.91	1%	1%	44%	11%	1%	1%	44%	11%
Doubs - Oye et Pallet	F	6.6	250.0	26.4	75.0	951	76.1	2.46	231.8	28.4	83.7	956	77.5	2.37	7%	7%	23%	-1%	7%	7%	23%	-1%
Doubs - Rochefort/Nonon	F	106.0	5860.8	18.1	505.3	397	227.8	2.84	4935.0	21.5	431.3	276	174.4	2.35	16%	16%	23%	30%	16%	16%	23%	30%
Doubs - Ville du Pont	F	11.4	648.5	17.6	67.7	808	59.2	2.02	569.0	20.0	31.2	902	46.6	2.33	12%	12%	54%	-12%	12%	12%	54%	-12%
Doubs - Voujaucourt	F	78.4	3249.0	24.1	125.0	411	90.7	2.27	3434.0	22.8	118.5	409	74.9	1.93	-6%	-6%	17%	0%	-6%	-6%	17%	0%
Dugeon - Vuillech	F	3.3	188.6	17.3	188.6	1017	107.9	2.20	140.0	23.3	140.0	887	69.0	1.63	26%	26%	36%	13%	26%	26%	36%	13%
Gland - Mestiere	F	1.0	38.7	26.4	38.7	557	46.2	2.08	35.9	28.4	35.9	555	36.3	1.70	7%	7%	21%	0%	7%	7%	21%	0%
Lison - Myon	F	7.2	305.3	23.7	74.7	575	61.6	1.99	215.8	33.5	61.3	534	45.6	1.63	29%	29%	26%	7%	29%	29%	26%	7%
Loue - Chenecsey-Bullion	F	46.7	1069.9	43.6	465.1	506	191.5	2.49	1299.4	35.9	590.7	538	161.3	1.86	-21%	-21%	16%	-6%	-21%	-21%	16%	-6%
Loue - Vuillatrans	F	20.9	299.5	69.8	88.5	1048	87.5	2.80	493.0	42.4	296.6	770	122.2	1.98	-65%	-65%	-40%	27%	-65%	-65%	-40%	27%
Orbe - Le Chenit, Frontiere	CH	0.9	45.8	20.1	45.8	1386	36.1	1.49	69.1	13.3	69.1	1225	36.6	1.23	4%	4%	23%	9%	4%	4%	23%	9%
Orbe - Orbe, Le Chalet	CH	11.5	342.3	33.6	296.5	1204	140.3	2.28	329.1	34.9	260.0	1094	108.3	1.88	-37%	-37%	-30%	-1%	-37%	-37%	-30%	-1%
Rupt - Durg	F	0.6	43.7	13.0	43.7	385	44.1	1.87	59.8	9.5	59.8	390	57.2	2.07	0%	0%	53%	7%	0%	0%	53%	7%
Saïne - Syam	F	8.0	297.1	26.9	297.1	950	166.4	2.70	204.6	39.1	204.6	885	78.0	1.53	40%	40%	49%	-6%	40%	40%	49%	-6%
See Doubs - Mouthie	F	1.9	0.1	20632.8	0.1	1046	1.4	1.28	68.0	27.2	68.0	1204	35.8	1.22	-75374%	-75374%	-2506%	-15%	-75374%	-75374%	-2506%	-15%
See Lison - Nans	F	5.2	230.3	22.4	230.3	670	123.0	2.27	137.7	37.6	137.7	711	63.0	1.50	40%	40%	49%	-6%	40%	40%	49%	-6%
See Loue - Ouhans	F	9.1	211.0	42.9	211.0	820	145.1	2.80	196.4	46.1	196.4	843	70.3	1.40	7%	7%	52%	-3%	7%	7%	52%	-3%
See Vaire Arcier - Arcier	F	1.2	2.0	583.4	2.0	447	8.4	1.67	134.7	8.7	134.7	447	53.0	1.28	-6619%	-6619%	-6619%	0%	-6619%	-6619%	-6619%	0%
See Verneau - Nans	F	0.5	0.3	1347.5	0.3	610	2.9	1.40	16.9	27.3	16.9	740	20.5	1.40	-4827%	-4827%	-602%	-21%	-4827%	-4827%	-602%	-21%
Somme - Delemont	CH	4.3	213.6	20.0	213.6	866	82.8	1.59	218.8	19.6	218.8	786	87.3	1.65	-2%	-2%	-5%	9%	-2%	-2%	-5%	9%
Suze - Sonceboz	CH	4.2	127.0	33.3	127.0	1226	76.4	1.90	114.3	37.0	114.3	1015	79.2	2.07	10%	10%	-4%	17%	10%	10%	-4%	17%

Illustration 4 – données de débit moyen inter-annuel pour les stations hydrométriques du Doubs et des bassins limitrophes

### 2.3. VARIABILITE SPATIALE DES DEBITS SPECIFIQUES

Les deux cartes de l'illustration 5 présentent les débits moyens inter-annuels spécifiques pour les deux découpages topographiques (en haut) et hydrogéologique (en bas). Les zones endoréiques majeures (Plateau de Saône sur l'impluvium de la source d'Arcier, vallée de la Brévine sur le bassin de l'Areuse et la tête de bassin de la Birse) ne sont pas rattachées à un bassin topographique et apparaissent en blanc sur la carte du haut. Les différences entre découpage sont plus marquées sur la zone amont du Doubs (sud) où le réseau hydrographique est moins dense du fait du contexte purement karstique.

On observe un **contraste plus élevé des valeurs de débit inter-annuel spécifique (Qsp) pour les bassins topographiques**, avec des valeurs très élevées supérieures à 50 L/km<sup>2</sup> pour la Loue à Vuillafans et l'Ain à Bourg de Sirod, et surtout des valeurs aberrantes pour les sources du Doubs, d'Arcier, du Verneau et de l'Areuse.

Les **valeurs plus homogènes observées pour le découpage des bassins hydrogéologique** indiquent néanmoins des différences entre bassins. Le Qsp du Doubs le long de la Haute-Chaine (entre 15 et 30 L/km<sup>2</sup>) est inférieur à celui de la Bienne, de l'Ain, de la Loue, et des bassins suisses (entre 30 et 45 L/km<sup>2</sup>).

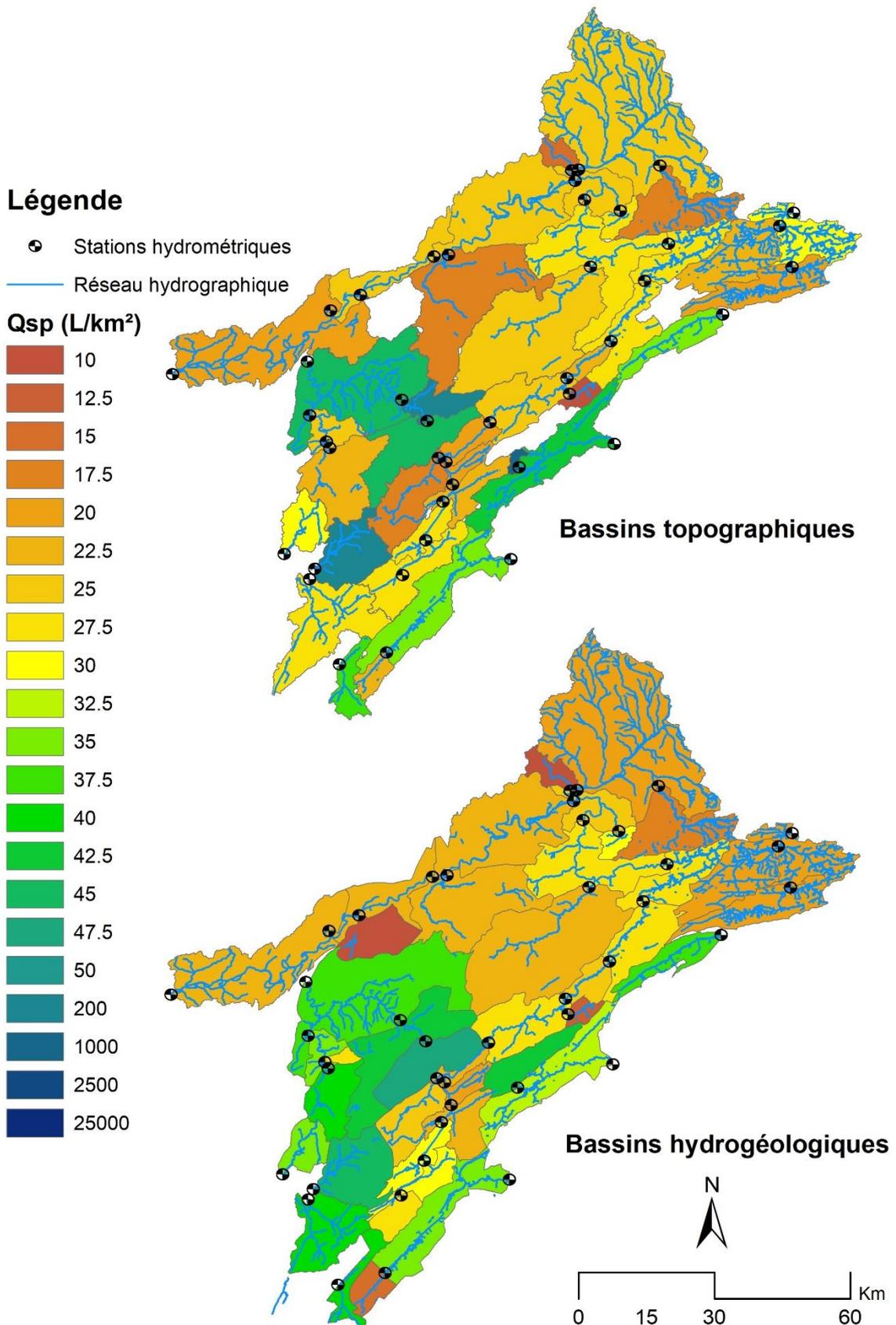


Illustration 5 – Débits spécifiques estimés pour les bassins topographiques (en haut) et bassins hydrogéologiques (en bas) de chaque station hydrométrique

La comparaison des débits inter-annuels spécifiques (Qsp) des 2 types de découpage pour chaque station est présentée en Illustration 6 pour les bassins amonts (à gauche) et intermédiaires (à droite). La taille des cercles indique le Qsp du bassin topographique. La différenciation bassins amonts et bassins intermédiaires n'apporte pas d'intérêt car dans les deux cas on observe une **surface du bassin hydrogéologique bien supérieure à celle du bassin topographique pour les têtes de bassin (< 50 km<sup>2</sup>), engendrant des Qsp « anormalement » élevés. Pour les bassins >100 km<sup>2</sup>, l'effet d'échelle comme la non-superposition des 2 types de découpage en limitant les écarts de surface.**

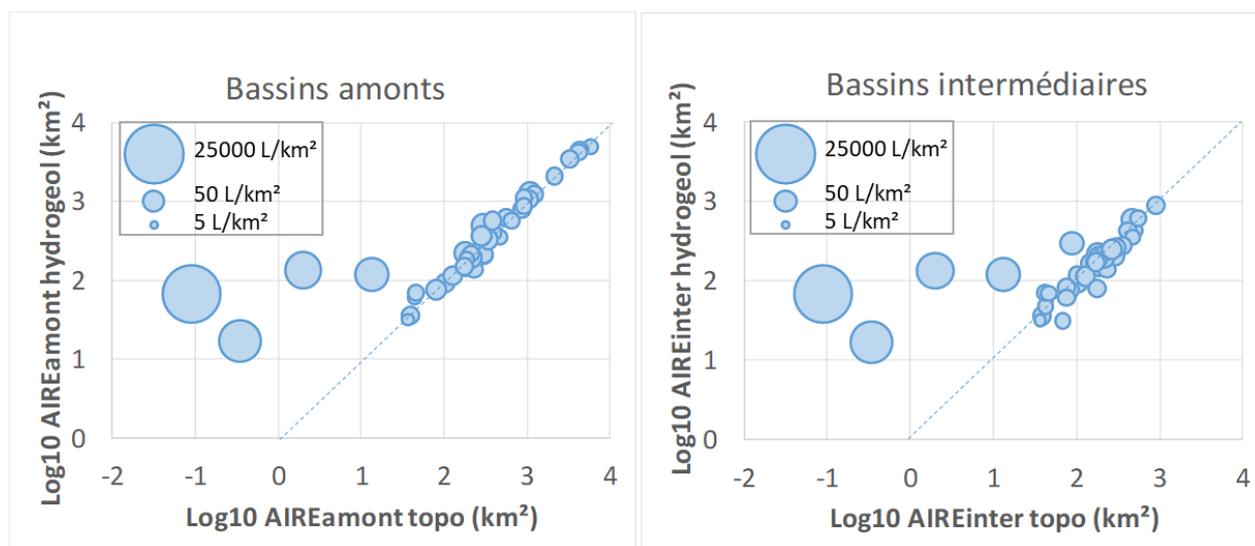


Illustration 6 – Comparaison des surfaces des bassins topographiques (en abscisse) et hydrogéologiques (en ordonnée) en fonction du débit spécifique (taille des cercles) pour les sous-bassins amonts (à gauche) et intermédiaires (à droite)

Les Illustration 7 et Illustration 8 présentent des zoom de l'illustration 5 afin de mieux comprendre la variabilité spatiale de Qsp.

Sur le **tronçon du Doubs Mouthe -> Ville du Pont** (Illustration 7), on observe un déficit d'environ 40% du Qsp sur le Doubs comparé aux bassins limitrophes, ainsi qu'un excédent sur l'Ain et la Loue. Ce résultat à partir de données moyennes de débit peut s'interpréter comme des échanges souterrain interbassins (Le Mesnil et al., 2020), avec des captures du Doubs au profit de l'Ain et la Loue. La question se pose également pour des écoulements transfrontaliers vers l'Areuse mais les écarts de Qsp sont moins élevés et peuvent être générés par le contraste pluviométrique.

Ces résultats sont cohérents avec ce qui est connu des relations entre le Doubs et la Loue, c'est à dire les pertes au niveau de Pontarlier qui alimentent la source de la Loue (Fournier et al., 1901 ; Charlier et al., 2014). Concernant l'Ain, cela renforce l'hypothèse de captures du Dugeon et des eaux de la tourbière de Frasne au profit d'un drainage souterrain vers le sud-ouest.

Sur le **tronçon du Doubs Ville du Pont -> Beaume les Dames** (Illustration 8), le déficit d'écoulement de la zone plus en amont (tronçon précédent Mouthe-Ville-du-Pont) est atténué en comparaison avec les bassins limitrophes. On ne met donc pas en évidence d'échanges inter-bassins notables au niveau de la Haute-Chaîne avec la Suisse et au niveau des plateaux (Dessoubre, Cusancin).

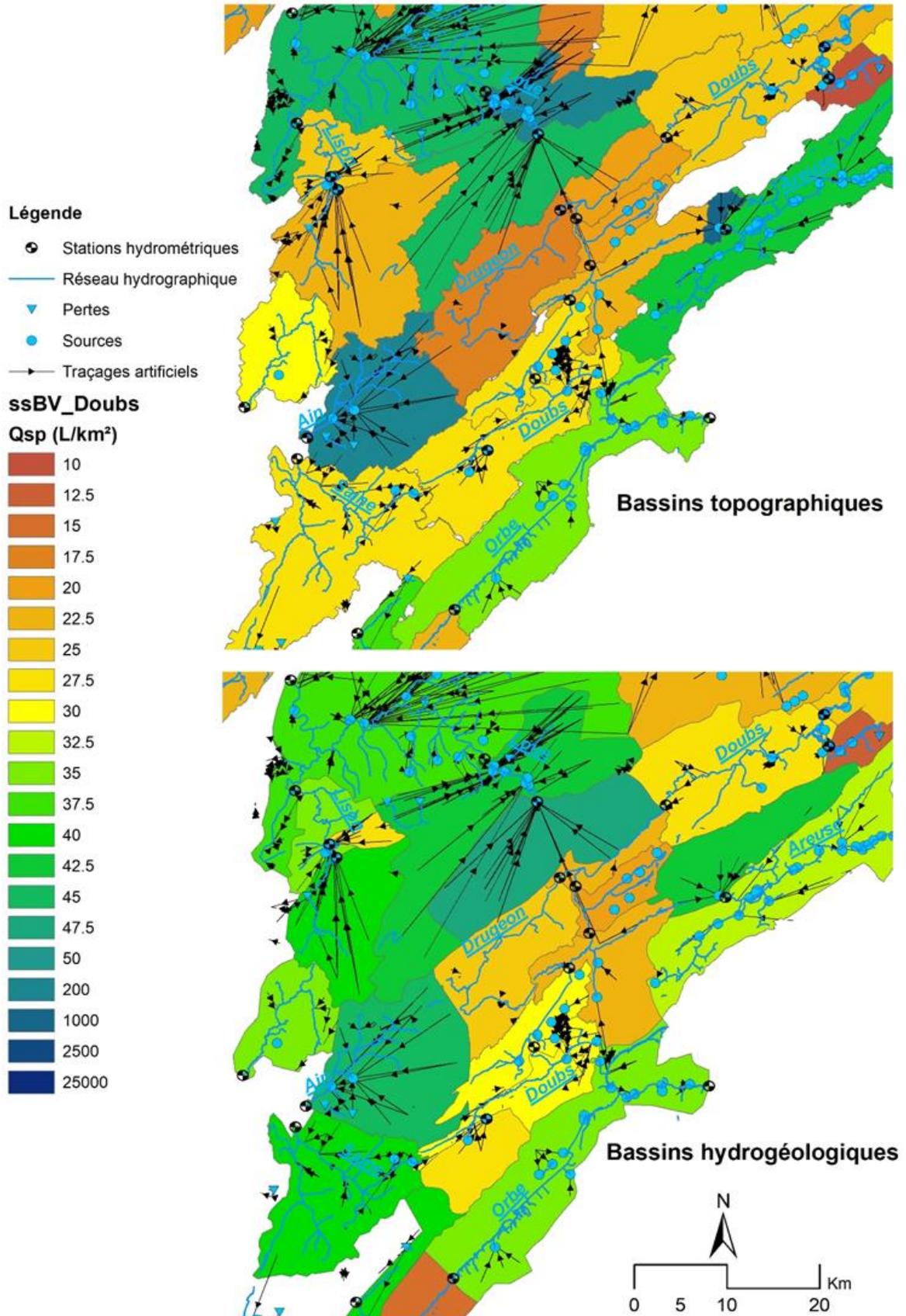


Illustration 7 – Zoom sur la zone Haut-Doubs (tronçon Mouthe->Ville-du-Pont) - Haute-Loue (amont de Chenecey-Buillon) de l'illustration 5

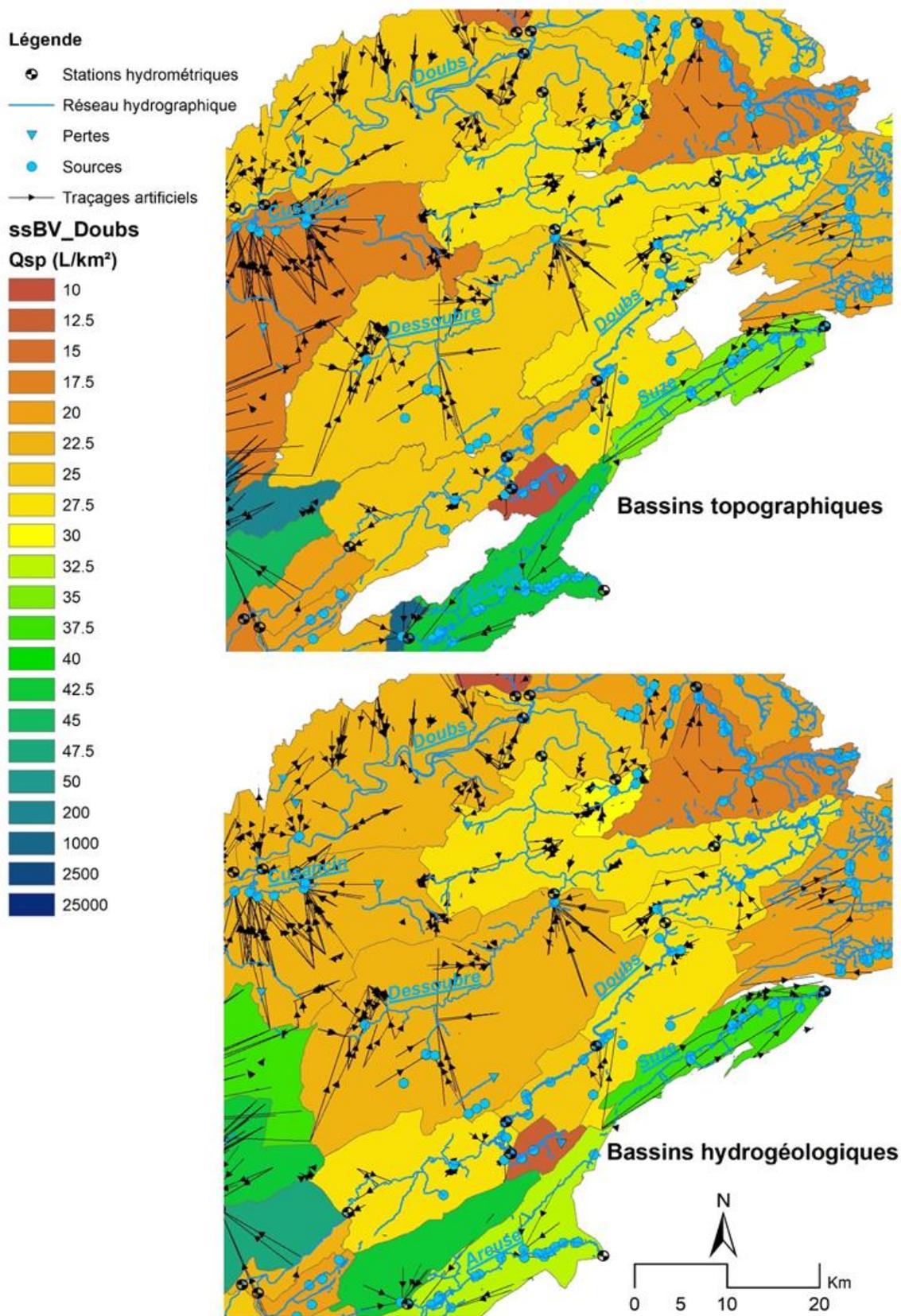


Illustration 8 – Zoom sur la zone Haut-Doubs (tronçon Ville-du-Pont -> Beaumes-les-Dames) de l'illustration 5

## 2.4. COMPARAISON DES INDICES MORPHOMETRIQUES

### 2.4.1. Indice de Gravelius

L'indice de compacité de Gravelius est utilisé pour comparer la géométrie des bassins selon les deux découpages. L'illustration 9 présente cet indice estimé pour chacun des bassins intermédiaires. Les valeurs au tons rouge qui tendent vers 1 indiquent un bassin compact. On observe une nette différence entre les 2 découpages, **les bassins hydrogéologiques présentant globalement des géométries beaucoup plus compactes que celles des bassins topographiques**. Cela peut s'interpréter simplement avec l'allongement des bassins topographiques dans l'axe de l'Arc Jurassien (SW-NE). Ainsi, le réseau souterrain apparaît donc divergent avec l'orientation des grandes structures qui contrôlent le relief, avec des axes de drainage distribués dans toutes les directions de l'espace, contrairement aux écoulements souterrains dont les directions sont proches de N-S pour le Lison, la Loue, le Cusancin, et Arcier.

### 2.4.2. Altitudes moyennes

Du fait d'une **forte corrélation entre les deux gradient altitudinaux et pluviométriques** (NW-SE sur l'ensemble du massif, cf Annexe 2), l'altitude moyenne des bassins est un indicateur également intéressant d'un point de vue hydrologique.

On observe un **contraste légèrement plus marqué pour les bassins topographiques, lié à l'allongement des bassins perpendiculaire au gradient**. Cependant, le gradient d'altitude est conservé pour les bassins hydrogéologiques et la différence de ALTmoy entre les deux découpages paraît moins intéressant que l'indice de compacité ou de Qsp.

## 2.5. PONDERATION DES PLUVIOMETRES SELON LE TYPE DE DECOUPAGE

### 2.5.1. Pour l'ensemble des stations hydrométriques

La mise en évidence de l'importance des écoulements souterrains interbassins sur la zone d'étude nous guide à proposer une nouvelle pondération des pluviomètres utilisés en prévision temps-réel (actuellement sur la base d'un découpage purement topographique des bassins). Pour cela, une comparaison des pondérations des pluviomètres temps-réel pour les deux types de découpage va nous permettre d'identifier les stations pour lesquelles la pondération affectée au bassin hydrogéologique serait à privilégier.

La méthode des polygones de Thiessen sont utilisés pour caractériser la pondération des pluviomètres des différents bassins hydrologiques et hydrogéologiques définis dans cette étude. Les résultats sont présentés sur l'illustration 11.

La comparaison des deux découpages est présentée sur le Tableau de l'illustration 12 sous la forme de l'écart (en points) des pourcentages de pondération des pluviomètres pour chaque station. Afin d'identifier les stations les plus affectées par le type de découpage, les deux premières colonnes mettent en évidence les valeurs minimales et maximales des écarts pour l'ensemble des pluviomètres.

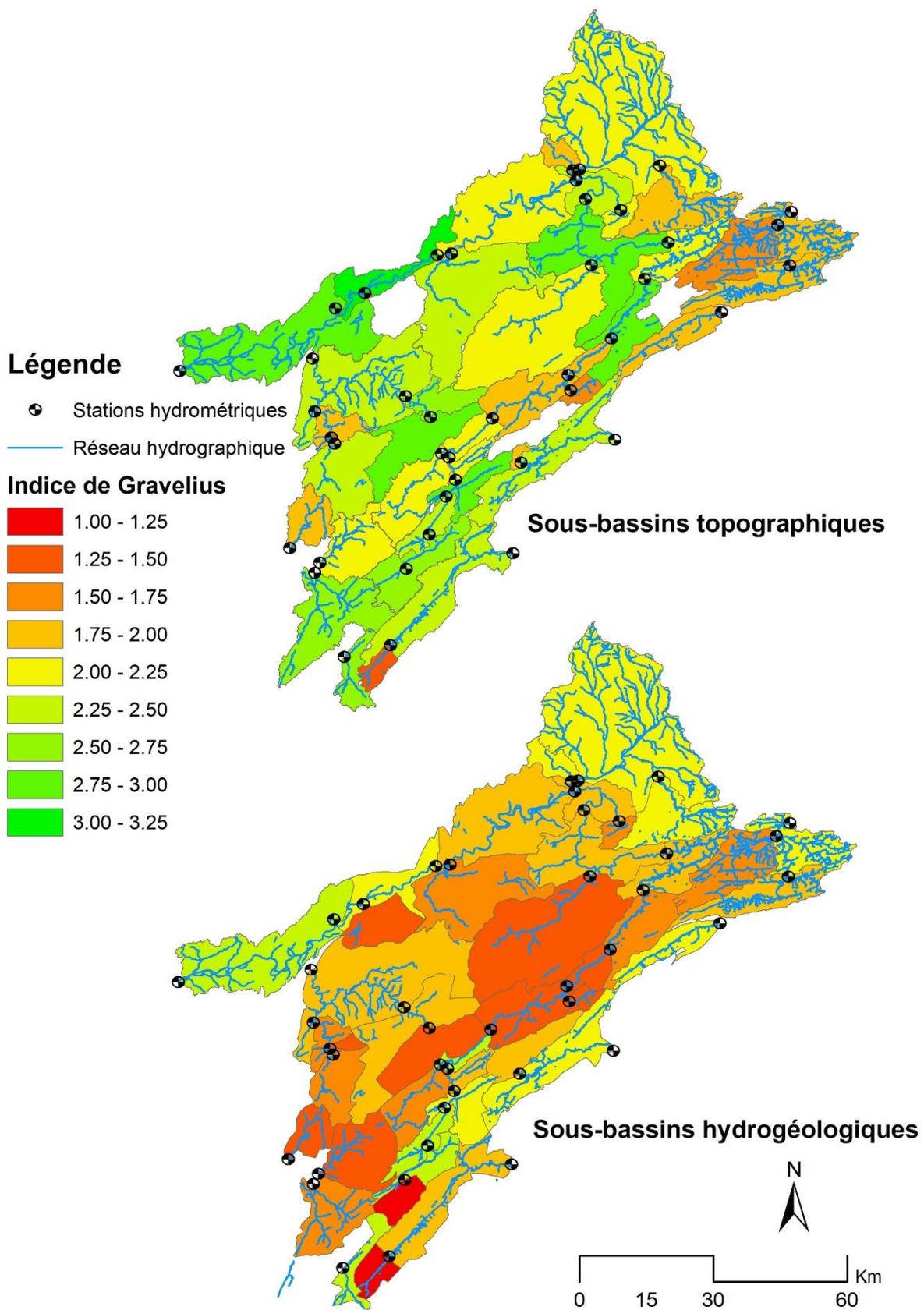


Illustration 9 – Indices de compacité de Gravelius pour les sous-bassins topographiques (en haut) et sous-bassins hydrogéologiques (en bas)

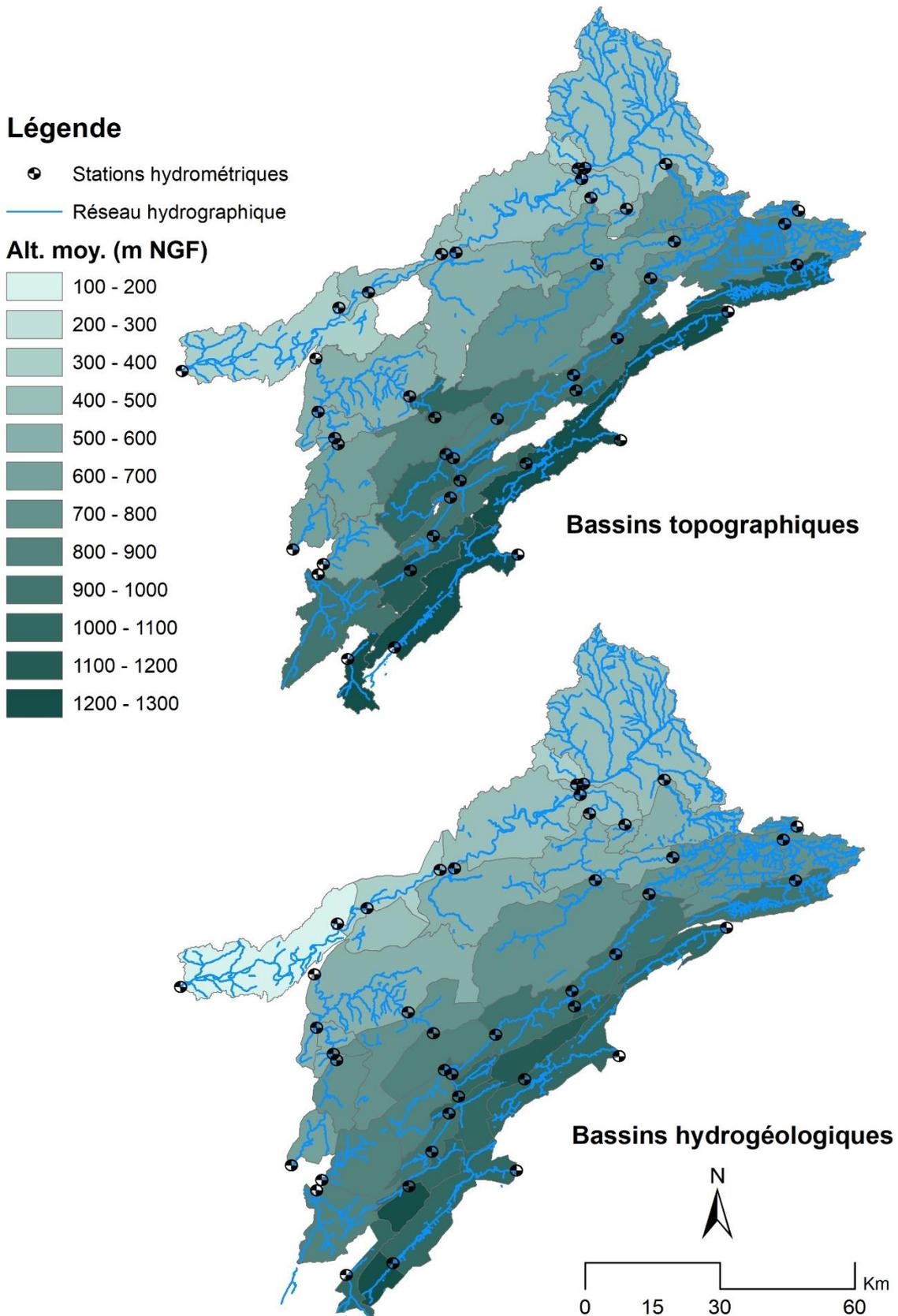


Illustration 10 – Altitude moyenne des bassins d'alimentation pour les sous-bassins topographiques (en haut) et sous-bassins hydrogéologiques (en bas)

Cela permet de réaliser une sélection des stations les plus influencées par les écoulements souterrains. Par défaut, ont été mis en évidence (surlignées en gras) celles dont la valeur minimale ou maximale des écarts dépasse 10%. On y retrouve :

- Les stations placées aux exutoires des principales sources : Doubs, Arcier, Loue, Verneau
- Les stations placées à proximité des exutoires des principales sources et donc fortement influencées par les écoulements souterrains : Cusancin à Beaume-les-Dames et la Loue à Vuillafans et Chenecey-Buillon
- Les stations influencées par les écoulements inter-bassins et notamment les pertes : Doubs à Cluse-et-Mijoux, Labergement Sainte-Marie, Mathay, Ville-du-Pont.

Pour ces stations, une piste d'amélioration est de prendre en compte la nouvelle pondération basée sur un découpage des bassins hydrogéologiques.

### **2.5.2. Cas de la station d'Ornans pour la mise en vigilance de la Loue**

Dans la sélection des stations les plus influencées par les écoulements souterrains, la Loue ressort fortement. Sur ce tronçon réglementaire, la station d'Ornans est stratégique pour la mise en vigilance du tronçon et ses forts enjeux au niveau de la ville. Cette station de hauteur d'eau ne permet pas le calcul des débits du fait d'un barrage à seuil mobile en amont de la ville. Elle n'a donc pas été incluse dans l'analyse précédente. Il est cependant possible d'y proposer une pondération des pluviomètres Temps-réels en réalisant le même type de comparaison des bassins hydrogéologiques et topographiques.

L'illustration 13 présente les délimitations des deux types de bassin en amont d'Ornans pour le sous-bassin intermédiaire (tronçon) Vuillafans-Ornans, le sous-bassin de la Loue en amont d'Ornans, et le sous-bassin de la Loue en amont d'Ornans incluant le sous-bassin des pertes du Doubs.

Les résultats des pondérations indiquent une sur-représentation de plus de 10% du pluviomètre de Levier sur le plateau au sud-ouest à défaut du pluviomètre Coulans sur le sous-bassin intermédiaire. Puis, avec l'augmentation de la taille du bassin versant au niveau de la Loue une sur-représentation du pluviomètre Epenoy en rive gauche à défaut du pluviomètre de Levier en rive droite.

### Légende

- ▲ Pluvio Temps réel
- Stations hydrométriques
- Réseau hydrographique
- ssBV\_Doubs

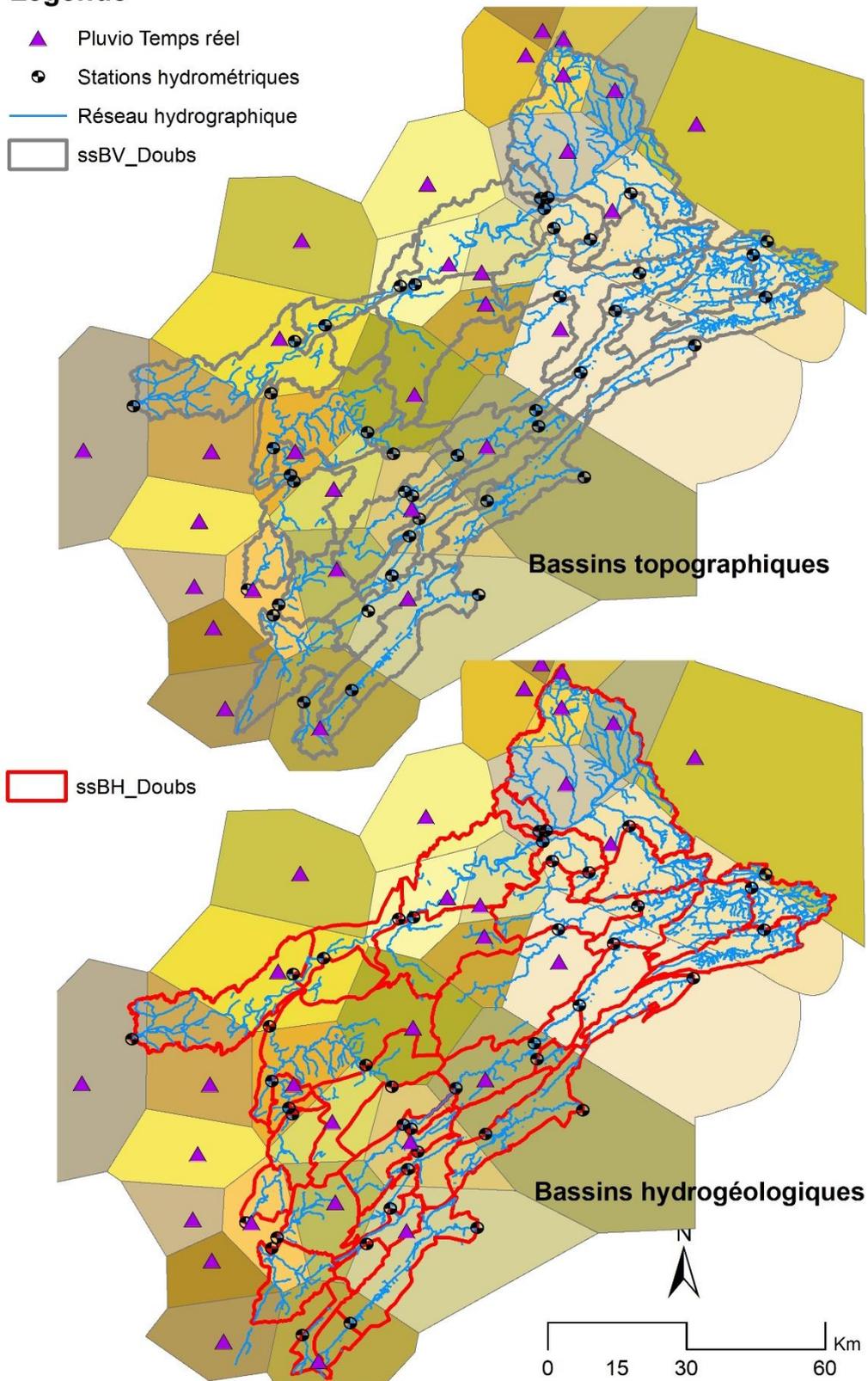


Illustration 11 – Superposition des polygones de Thiessen de la couche pluviométrique et des bassins topographiques (en haut) hydrogéologiques (en bas)



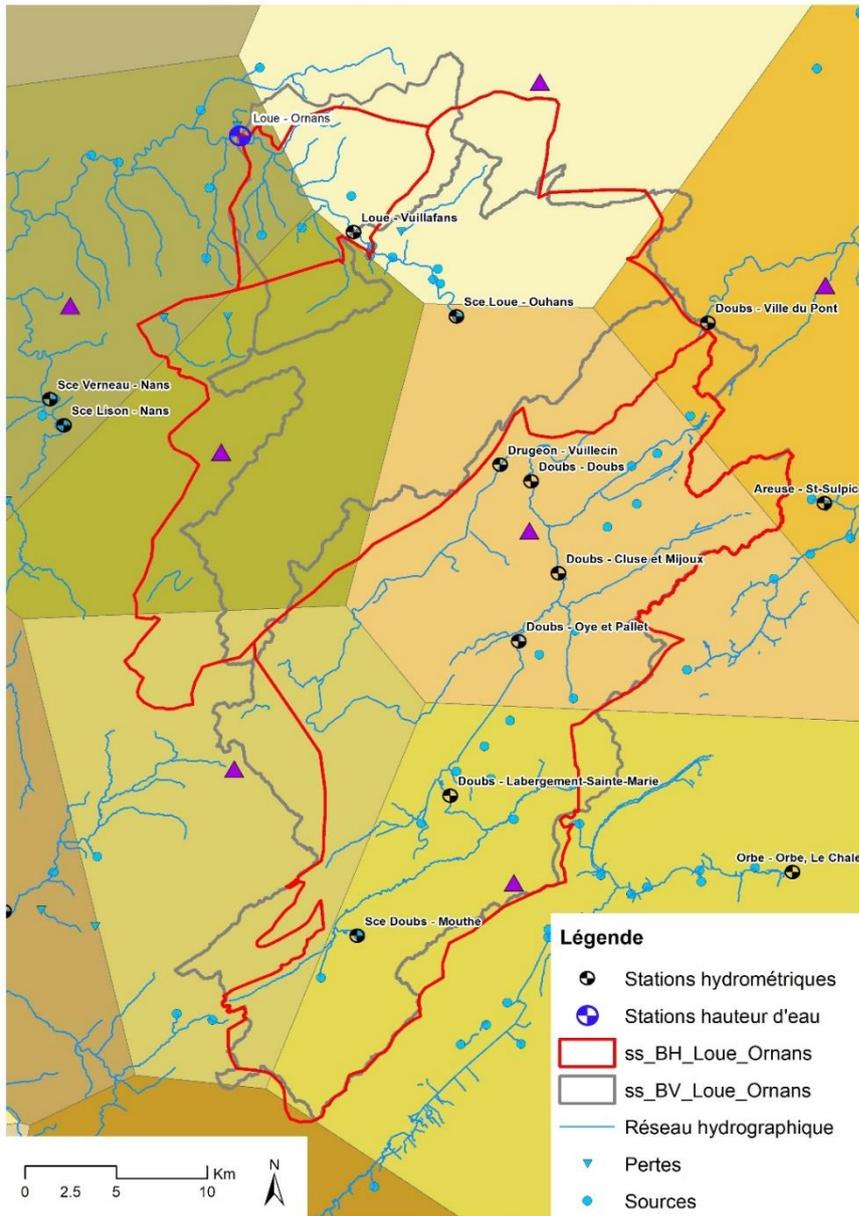


Illustration 13 – Délimitation des sous-bassins emboîtés en amont d'Ormans et écarts (en points) des pourcentages de pondération de chaque pluviomètre pour chaque sous-bassin

Stations pluviométriques Temps réel	
90074001	Novillard
90065003	Ballon
90052002	Giromagny
90044001	Felon
90035001	Dorans
90009001	St Dizier
70561002	Villersexel
7047002	Rioz Xaria
70061002	Bethay
68062001	Carpach
39470005	Rousses-EDF
39331002	Mignovillard-EDF
39313002	Marigny-EDF
39118002	Chatel-Joux-EDF
39097003	Champagnole
39013004	Arbois
25529001	Sancey le Grand
25494001	La Boisseau
25462001	Portarlier
25356003	Marche
25334001	Levier
25285001	Grand'Combe
25223002	Coulans
25219002	Epenoy
25087002	Branne
25021001	Arc et Senans
7386	Tavaux
7288	Besancon
Ecart max (points de pourcentage)	11.9
Ecart min (points de pourcentage)	-10.6
Stations hydrométriques	
Loue - de Vuillafans à Ormans	11.9
Loue - amont d'Ormans	-4.0
Loue - amont d'Ormans avec Doubs	-5.1



### 3. Estimation des captures du Doubs et des transferts vers le bassin de la Loue

#### 3.1. SITE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES

##### 3.1.1. Système karstique des sources de la Loue

###### a) Description des émergences et des stations hydrométriques

Les sources de la Loue émergent des calcaires du Kimméridgien<sup>2</sup> à Ouhans. Leurs localisation est donnée sur l'illustration 14.

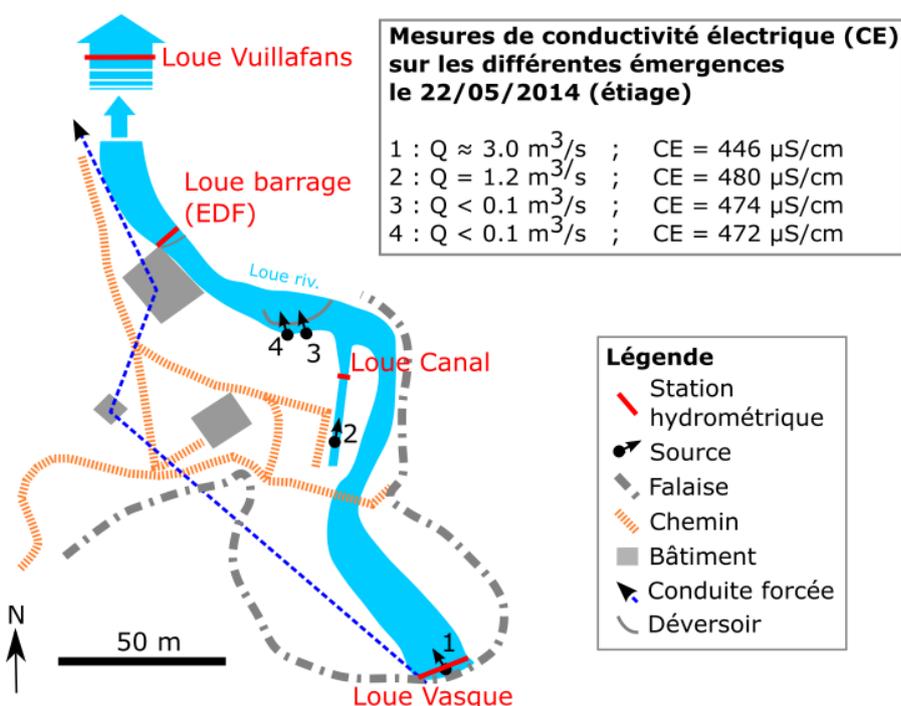


Illustration 14. Localisation des arrivées d'eau et des stations hydrométriques au niveau de la source de la Loue.

La source principale (n°1) appelée « **Loue vasque** » (Illustration 15) jaillit d'un porche et est de loin l'émergence qui apporte le plus fort débit. Elle est en partie turbinée par EDF.

Une seconde arrivée d'eau (n°2) dite « **Loue canal** » (Illustration 15) existe en contrebas de la vasque. D'après le rapport de la DIREN (1995), une coloration a permis de montrer que cette émergence n'était pas une dérivation d'une partie des eaux de Loue vasque. Cette étude montre également qu'une communication existe entre Loue vasque et Loue canal selon le niveau dans la vasque. Dans tous les cas, si une communication entre les deux systèmes paraît inévitable, la signature chimique légèrement plus minéralisée en basses eaux de Loue canal montre qu'elle peut être périodiquement en partie déconnectée de l'émergence Loue vasque.

<sup>2</sup> Voir Annexe 1 pour un log géologique et hydrogéologique du massif du Jura

Deux autres arrivées d'eau sont observables en aval de Loue canal (n°3 et 4) et montrent une minéralisation intermédiaire à Loue vasque et Loue canal.



Illustration 15. De gauche à droite : arrivée d'eau principale de la source de la Loue (Loue Vasque), arrivée d'eau secondaire (Loue canal) et déversoir EDF (Loue barrage) qui intègre l'ensemble des arrivées d'eau - clichés Brgm.

Enfin, des mesures de débit sur la Loue sont réalisées par EDF au niveau de la station dite « **Loue barrage** » à partir du turbiné et du déversé, au regard de l'évolution de la cote. Compte tenu du faible volume de la retenue, la valeur calculée de la Loue par EDF est a priori représentative du débit des sources additionné des apports latéraux des arrivées mineures.

La campagne de jaugeage des différentes arrivées d'eau effectuée en très basses eaux en novembre 2018 par la DREAL BFC (*communication personnelle de Le Barbu E., 2019*) donne : 0.45 m<sup>3</sup>/s à la vasque (arrivée d'eau n°1), 0.12 m<sup>3</sup>/s à Loue canal (arrivée d'eau n°2), 0.02 m<sup>3</sup>/s à l'arrivée d'eau n°3 et 0.33 m<sup>3</sup>/s à l'arrivée d'eau n°4. Ce constat illustre le changement de fonctionnement hydraulique de Loue canal et de la résurgence n°4 (par le percement de barbacanes a priori) par des chutes des bas débits à Loue canal à partir de 2014.

### **b) Le bassin hydrogéologique des sources**

Le système des sources de la Loue est un système binaire comprenant une part de recharge dite diffuse sur un bassin hydrogéologique délimité sur une surface de 196 km<sup>2</sup>, et une part de recharge localisée issue de l'infiltration des eaux du Doubs au sein d'une zone de pertes située entre Pontarlier et Ville-du-Pont (Illustration 16) principalement au niveau d'Arçon.

Les résultats des différents traçages artificiels tendent à montrer que l'arrivée d'eau « Loue canal » draine seulement la gouttière synclinale du val de Goux-les-Usiers depuis le sud (Reilé, 2010), et serait peu influencée par l'eau des pertes du Doubs. La question de savoir si les pertes ont un unique exutoire à « Loue vasque » n'est pas totalement tranchée, étant donné que les traçages réalisés n'ont pas tous intégré un suivi différencié entre les deux arrivées de « Loue vasque » et « Loue canal ».

La caractérisation fine des sous-bassins des deux émergences principales nécessiterait des études plus poussées, et par souci de simplification, nous regrouperons l'ensemble des zones de recharge des éventuels sous-bassins en un seul bassin hydrogéologique des sources de la Loue. En se fiant aux données actuelles des traçages bancarisés par la DREAL, les pertes du Doubs ressortiraient principalement (voire uniquement d'après certains traçages) à la vasque. L'alimentation des sources de la Loue par les pertes du Doubs entre Pontarlier et Ville-du-Pont impose d'étendre le bassin d'alimentation des sources à celui du Doubs à Ville-du-Pont.

**c) L'épaisseur de la zone non saturée**

La zone non saturée (ZNS) du karst de la source de la Loue est conséquente et peut être estimée en première approche par la différence d'altitude entre la surface et l'altitude de la source (en considérant un gradient hydraulique de 0.1% en basses eaux - correspondant à gradient piézométrique des nappes à surface libre). Celle-ci est d'environ 250 m. Bien que l'ensemble de la ZNS ait peu de chances d'être totalement saturée, la variabilité spatiale des propriétés d'infiltration et la compartimentation du milieu font qu'il est probable qu'une saturation partielle des conduits se réalise dans la zone superficielle du karst.

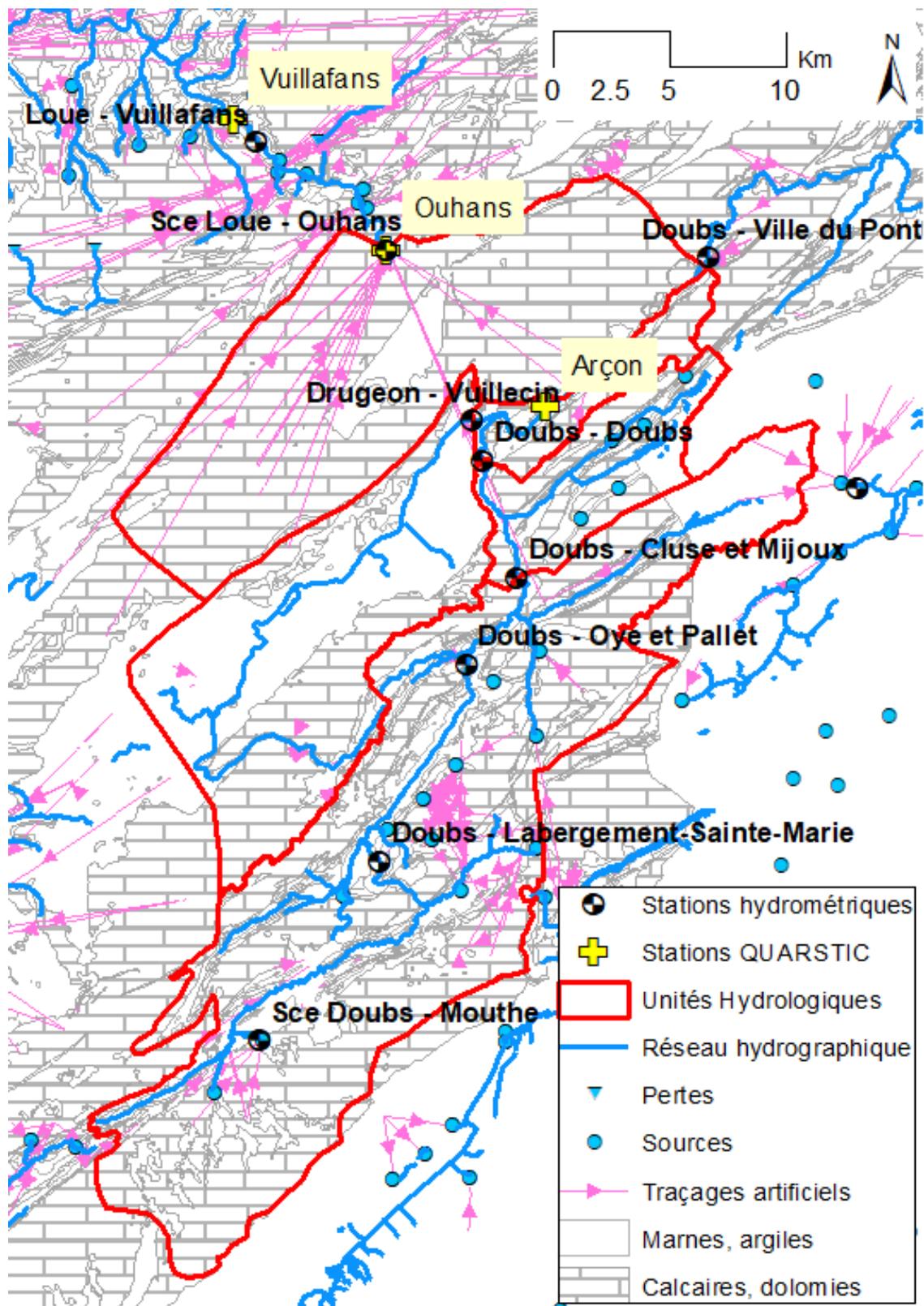


Illustration 16. Localisation des stations de mesure et t endue du bassin hydrogéologique des sources de la Loue et bassin versant des pertes du Doubs (fond géologique d'après Carte Géologique Harmonisée 1/50 000 BRGM  )

### 3.1.2. Connaissances actuelles sur les relations Doubs-Loue et données disponibles

#### a) Schéma conceptuel

Le schéma conceptuel de l'aquifère des sources de la Loue (Charlier et al., 2014) est synthétisé dans l'illustration 17. Une zone de recharge diffuse sur le plateau de Pontarlier s'étend sur environ 200 km<sup>2</sup>. La percolation à travers le sol et l'épikarst rejoint le massif calcaire fissuré à travers des écoulements lents (réservoir *Matrix*) et rapides (réservoirs *Conduit*). Afin de tenir compte d'une compartimentation des écoulements provenant de l'infiltration sur le bassin du Dugeon et de l'infiltration sur la partie nord, 2 réservoirs *Conduit 1* & 2 ont été identifiés. Les pertes du Doubs sont connectées au *Conduit 2* à travers une recharge localisée. La Loue vasque draine ce compartiment rapide et une partie du compartiment *Matrix*, et Loue canal draine l'autre compartiment rapide en plus du reliquat du réservoir *Matrix*.

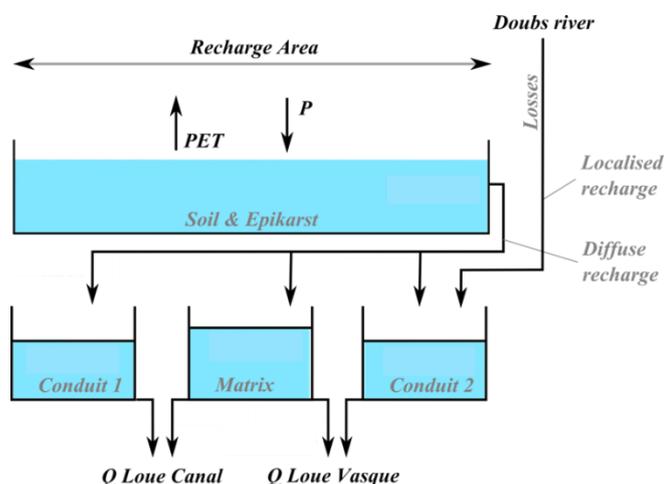


Illustration 17. Modèle conceptuel des sources de la Loue et des apports issus des pertes du Doubs (Charlier et al., 2014)

#### b) Estimation des pertes

Historiquement les pertes ont été estimées le long du tronçon Pontarlier-Ville du Pont par jaugeages différentiels le long du cours d'eau en période d'étiage (Chauve, 2006), avec des valeurs autour de quelques m<sup>3</sup>/s. L'analyse hydrologique récente de la DREAL BFC sur les assecs du Doubs (Le Barbu et al., 2019) montrent que les pertes du Doubs sont un phénomène fluctuant avec des phases d'aggravations puis d'atténuations sans explications hydrologiques évidentes. Lors des grands assecs historiques, ces pertes varient de quelques m<sup>3</sup>/s dans les années 90 à près de 12 m<sup>3</sup>/s en 2018. L'étude BRGM de 2014 (Charlier et al., 2014) a permis d'estimer l'importance de ces pertes attribuées à l'infiltration vers les sources de la Loue lors des périodes de crue. Les valeurs de pertes ont été revu à la hausse avec des débits de pertes de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/s en crue sur le tronçon entre la confluence du Dugeon et du Doubs (somme des débits à Vuillecin et Doubs) et Ville-du-Pont.

## 3.2. DONNEES TEMPORELLES

#### a) Données hydrologiques

Les données hydrologiques portent sur :

- les précipitations au sol à Pontarlier (Meteo France) ;
- les débits du Doubs à Doubs et Ville-du-Pont et du Dugeon à Vuillecin (Banque Hydro, voir la localisation sur l'illustration 16) ;

Le débit du Doubs en amont de la zone de pertes à Arçon (confluence Dugeon et Doubs) est égal à la somme des débits des deux stations du Doubs à Doubs et du Dugeon à Vuillecin.

### **b) Stations hydrochimiques (réseau QUARSTIC)**

Les données hydrochimiques sur le Doubs à Arçon et à Loue vasque (voir la localisation sur l'illustration 16) portent sur les nutriments acquis dans le cadre du réseau QUARSTIC (Charlier et al., 2018) : nitrate, orthophosphate, phosphore total.

Le suivi hydrochimique aux stations du Doubs à Arçon et de Loue vasque (Illustration 18) est réalisé à l'aide d'un échantillonneur (Echantillonneur portable 3700, 24 flacons, ISCO) pour des prélèvements d'eau (flacons composites journaliers à bi-hebdomadaires) pour l'analyse – entre autres - des teneurs en nutriments ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ , Ptot). La présentation détaillée de l'instrumentation et des méthodes analytiques se trouve dans le rapport BRGM/RP-68315-FR (Charlier et al., 2018).

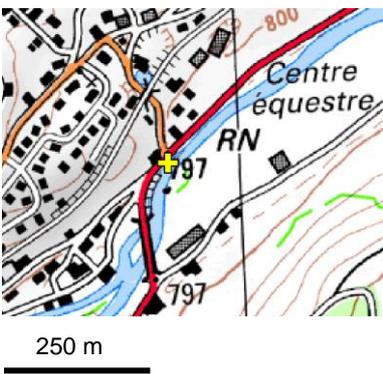
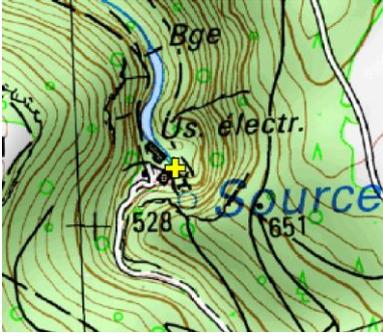
Station	Localisation sur fond SCAN25 IGN©	Installation (photos BRGM©)
Doubs à Arçon		
Source de la Loue		

Illustration 18 – Plan de situation des stations QUARSTIC

### c) Reconstitution des débits horaires à la source de la Loue

Les prélèvements EDF conséquents à la station Loue vasque (principale arrivée d'eau) influencent les variations du niveau d'eau jusqu'à l'usine de Mouthier. De plus, la métrologie est délicate à la vasque et pose des soucis récurrents de mesures des débits, ce qui ne permet pas d'utiliser des chroniques obtenues à partir d'une mesure in-situ. Par contre l'estimation des débits sur la seconde arrivée d'eau (Loue canal) est fiable du fait d'un seuil bien contrôlé au sein du canal (Illustration 15).

Afin d'établir une chronique horaire du débit des sources de la Loue non perturbée par les prélèvements, il est possible de se baser sur les données instantanées journalières (valeur à 8h du matin) au barrage EDF qui représentent la somme des arrivées d'eau de la source de la Loue. Celles-ci sont corrélées en Illustration 19 aux données instantanées correspondantes aux stations de Loue canal (à gauche) et de la Loue à Vuillafans (à droite), où des données en continu existent.

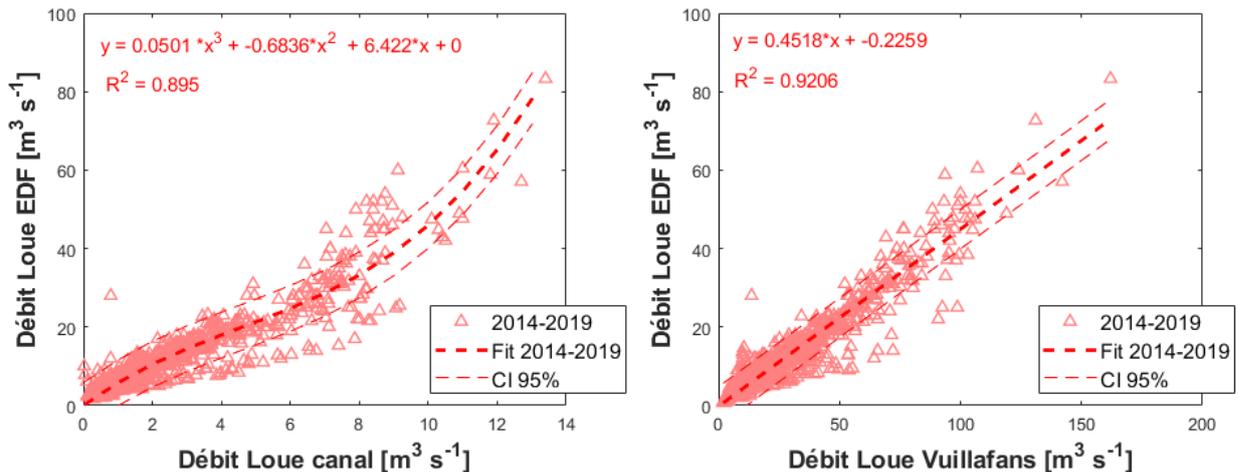


Illustration 19 – Comparaison des données instantanées (8h du matin) de débit de la source de la Loue EDF (somme des arrivées d'eau Loue vasque+Loue canal+arrivées mineures) avec celles de Loue canal (à gauche) et de la Loue à Vuillafans) ; l'intervalle de confiance CI à 95% est indiqué.

On observe une bonne relation polynomiale d'ordre 3 entre Loue canal et Loue EDF, et une forte corrélation linéaire entre Vuillafans et Loue EDF. Loue à Vuillafans étant à plusieurs km en aval des sources, un test de déphasage d'1h sur les données instantanées à 8h a été effectué (Illustration 20). La prise en compte d'un déphasage de 1h n'apporte pas d'amélioration du coefficient  $R^2$ .

A partir de ces relations, les données pour les sources de la Loue utilisées dans l'étude sont les suivantes :

- Loue canal continu : données validées DREAL
- Loue vasque continu : différence entre les débits EDF continus estimés à partir de Vuillafans (Illustration 19) et les débits à Loue canal

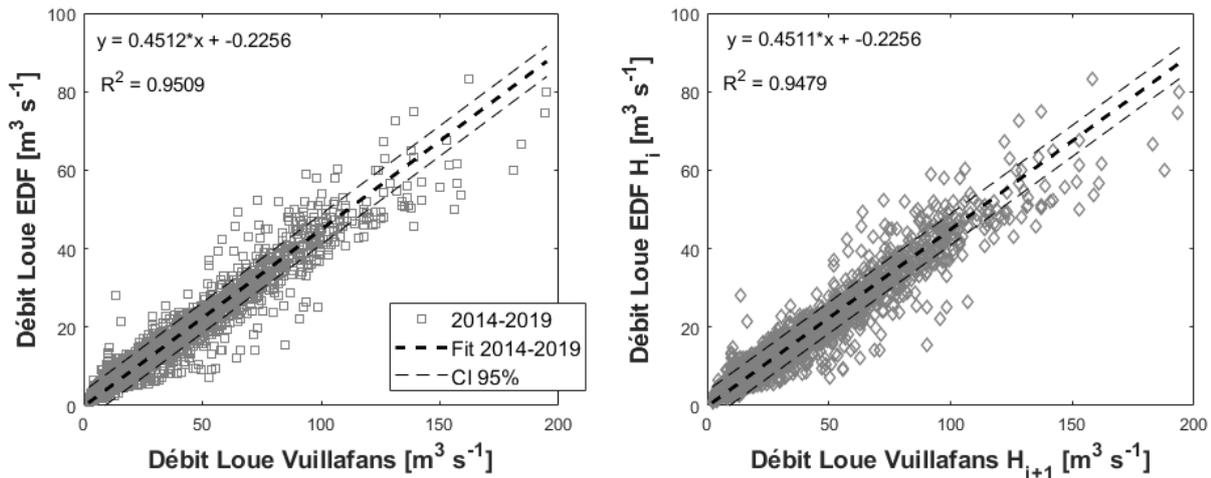


Illustration 20 – Comparaison des données instantanées (8h du matin) de débit de la source de la Loue EDF avec celles de la Loue à Vuillafans à la même heure (à gauche) et avec une heure de plus (9h du matin) pour tenir compte d'un éventuel déphasage lié à la propagation de l'onde de crue ; l'intervalle de confiance CI à 95% est indiqué.

### 3.3. CONTRIBUTION DES PERTES DU DOUBS A LA SOURCE DE LA LOUE

#### 3.3.1. Résultats à partir des données de débit

##### a) Pertes estimées à partir des échanges latéraux

Une première estimation des pertes est réalisée à partir du différentiel entre le débit aval (Doubs à Ville-du-Pont) et le débit amont de la zone de pertes (Doubs à Arçon<sup>3</sup>) en tenant compte d'un déphasage d'une heure :

$$Q_{\text{échanges}}(t) = Q_{\text{Ville du Pont}}(t + 1h) - Q_{\text{Arçon}}(t)$$

Sur la période mai 2016-janvier 2018, l'estimation des échanges latéraux sur le Doubs donne des valeurs tantôt positives, tantôt négatives. La partie négative est considéré comme des pertes et est comparée aux débits de la Loue à la vasque sur l'illustration 21 après déphasage de 24h lié au transfert dans la ZNS du karst de la Loue.

$$Q_{\text{pertes}}(t) = \begin{cases} Q_{\text{échanges}}(t - 24h) & \text{si } Q_{\text{échanges}}(t - 24h) < 0 \\ 0 & \text{si } Q_{\text{échanges}}(t - 24h) \geq 0 \end{cases}$$

A partir de cette chronique de pertes, le rapport  $Q_{\text{pertes}}(t)/Q_{\text{Loue vasque}}(t)$  donne une estimation de leur contribution au débit de la Loue vasque afin d'évaluer l'importance de la recharge du karst de la Loue par les captures du Doubs (cf Illustration 21). Une incertitude sur la contribution des pertes est fournie sur la base d'une erreur de 5% sur chacun des débits mesurés.

<sup>3</sup> Débit du Doubs à Arçon est défini comme la somme des débits des deux stations du Doubs à Doubs et du Dugeon à Vuillecin.

Lorsque la contribution des pertes est estimée inférieure à 100% des débits de la source de la Loue, l'autre part contributive peut provenir i) d'une infiltration diffuse sur le bassin d'alimentation (plateau de Pontarlier-Levier) et/ou ii) de la zone noyée du karst qui restitue les eaux de recharge précédemment stockées. Lorsque la contribution des pertes est estimée supérieure à 100%, ce qui est physiquement impossible, on identifie les périodes pendant lesquelles une partie du débit des pertes est stocké temporairement dans le karst. Ce stockage peut se produire dans la zone non saturée alimentée par les pertes lorsqu'il y a une déconnexion hydraulique entre la rivière et l'aquifère. Il ne faut pas non plus occulter la possibilité de pertes du Doubs par débordement, ne contribuant pas à la recharge si les eaux de débordement sont restituées au cours d'eau.

### ***b) Typologie***

Si l'on passe en revue les différentes périodes hydrologiques, on observe :

- En périodes d'étiage de basses eaux une très forte contribution des pertes aux débits de la Loue (100 à 200% de contribution), indiquant que le soutien d'étiage est principalement assuré par les captures du Doubs ;
- Pour les crues de reprises une contribution proche de 100%, en lien avec l'état de sous-saturation du karst et des faibles stocks en début de cycle hydrologique ;
- Pour les crues hivernales une contribution assez faible – de l'ordre de quelques dizaines de pourcents – en lien avec les fortes contributions de la recharge diffuse et des stocks initiaux. Il faut cependant avoir à l'esprit que ces crues apportent les débits les plus élevés et que de faibles contributions en pourcentage ne signifie pas de plus faibles débits issus des pertes ;
- Pour les crues printanières une contribution variable mais qui semble plus importante que celle des crues hivernales, en lien avec de plus faibles débits à la source.
- En période d'étiage de hautes eaux une contribution d'environ 50% des pertes au débit de la Loue, vérifiant que la part d'infiltration diffuse liée à la recharge par les précipitations et/ou de stockage de la recharge hivernale est plus importante qu'en étiage de basses eaux

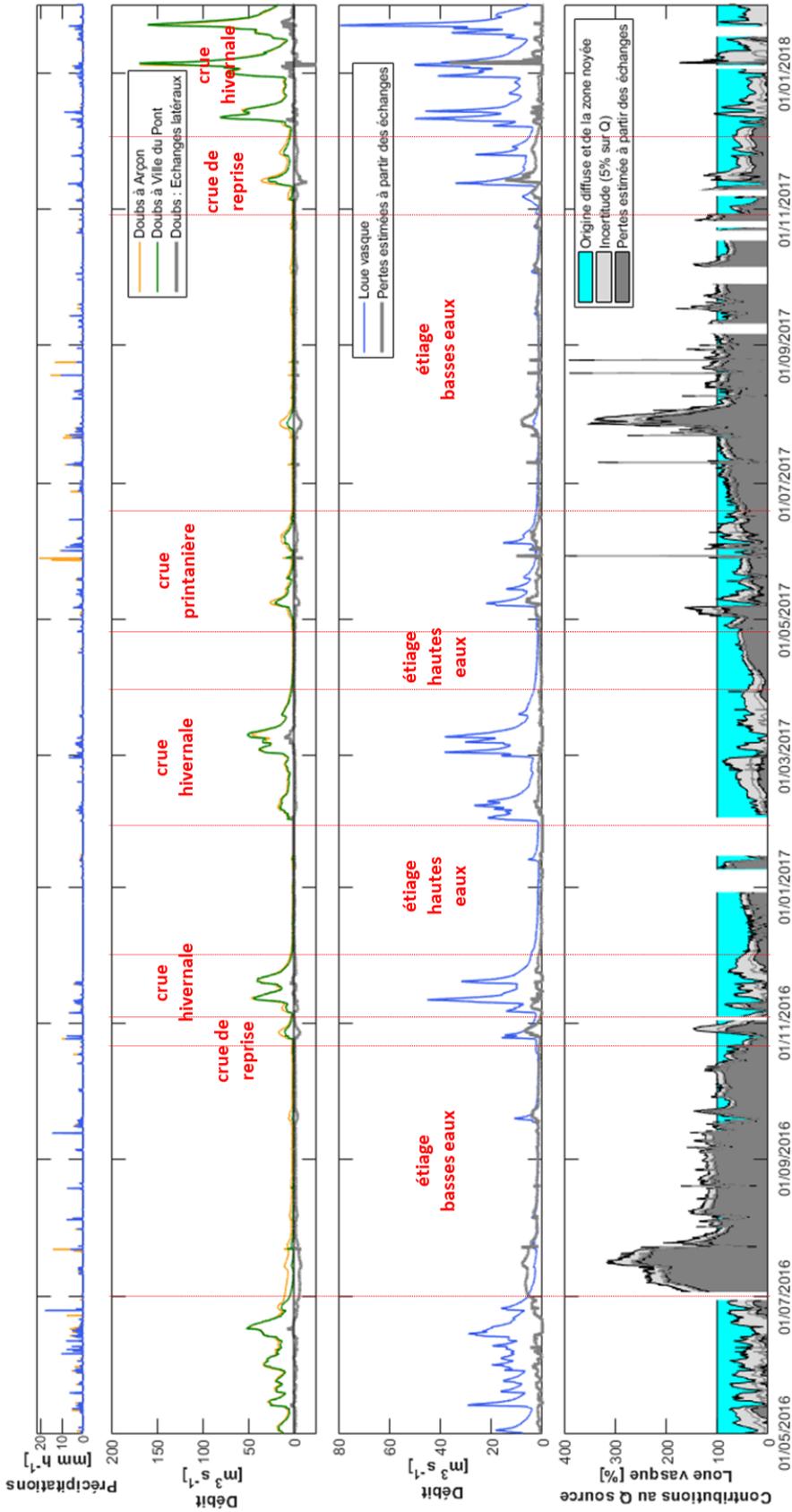


Illustration 21 – Chroniques de précipitations, de débit du Doubs (à Arçon et à Ville-du-Pont) et de la source de la Loue, et estimation des contributions des pertes du Doubs au débit de la source de la Loue.

**3.3.2. Résultats à partir des données de modélisation**

**a) Modèle de pertes 1 – intensité des pertes non soumis aux variations de saturation du karst**

Un premier modèle de pertes est défini pour la période 2016-2018 sur la base du modèle proposé dans le rapport BRGM/RP-63844-FR (Charlier et al., 2014). Ce Modèle 1 est basé sur l’hypothèse que l’ensemble ou une partie de l’épaisse zone non saturée du karst (Cf Section 3.1.1c) ne se sature pas, même lors des hautes eaux et des crues. Dans ce cas, le taux d’infiltration au niveau du cours d’eau n’est pas contrôlé par l’état de saturation de l’aquifère, mais par la capacité d’infiltration des formations superficielles au niveau du cours d’eau. Dans ce dernier cas, on peut supposer qu’elle reste relativement constante tout au long de l’année, et ce quel que soit le niveau de saturation du karst et du bassin du Doubs en général.

Le modèle 1 est une courbe enveloppe des points exprimés dans la relation  $Q_{\text{pertes}}$  vs.  $Q_{\text{Arçon}}$  de l’illustration 22 avec un plafonnement des valeurs de pertes qui suppose que le karst possède une la capacité d’absorption maximale, sans tenir compte des crues majeures dépassant 100  $\text{m}^3/\text{s}$  au niveau du tronçon du Doubs. La fonction combine une relation linéaire sur les premiers  $\text{m}^3/\text{s}$  avec une fonction logarithmique pour les valeurs supérieures.

$$Q_{\text{modèle pertes 1}}(t) = \begin{cases} K \cdot Q_{\text{Arçon}}(t) \cdot l \cdot L & \text{si } Q_{\text{Arçon}} < 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ a \cdot \log(Q_{\text{Arçon}}(t)) + b & \text{si } Q_{\text{Arçon}} \geq 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

Avec K, a et b des paramètres à caler, l et L les longueurs et largeur respectives du cours d’eau.

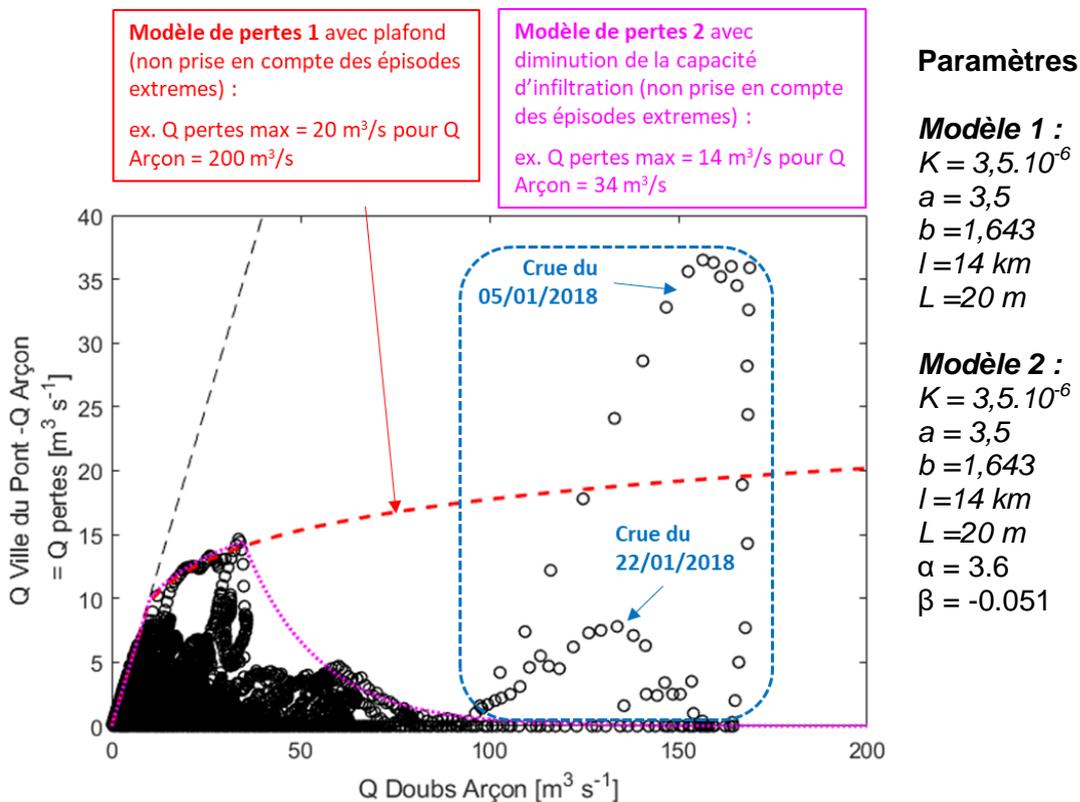


Illustration 22 – Relations  $Q_{\text{pertes}}$  vs.  $Q_{\text{Arçon}}$  avec proposition des 2 modèles de pertes et des paramètres associés.

La distribution des points en regard de la droite  $y = x$  indique que des pertes totales (i.e.  $Q_{\text{pertes}}(t) = Q_{\text{Arçon}}(t)$ ) sont observées pour des débits à Arçon jusqu'à  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sur la base du modèle proposé en 2014, un plafonnement des pertes est envisagé pour - de manière réaliste - intégrer l'ensemble des points pour des conditions hydrologiques standard ( $Q_{\text{Arçon}} < 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Ainsi les crues majeures de 2018 ne sont pas considérées afin de ne pas induire un biais élevé qui pourrait être lié au taux d'infiltration lors des débordements du lit majeur.

Le modèle est donc défini pour respecter ces 2 conditions :

- calage sur la droite  $y = x$  pour les plus faibles débits
- plafonnement autour de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les valeurs les plus élevées.

Notons que ce Modèle 1 simule donc des pertes totales pour les plus faibles débits quel que soit les conditions hydrologiques, ce qui ne se vérifie uniquement qu'en basses eaux en période d'étiage non sec (hors période de pertes totales) ; le Modèle 1 simule donc des pertes plus importantes que ce qui peut être observé par différence entre les débits aval et amont du tronçon).

### ***b) Modèle de pertes 2 – intensité des pertes soumis à une variation de la saturation du karst***

Un second modèle de pertes est défini afin de tenir compte de la saturation du karst lors des hautes eaux et des crues. Ce Modèle 2 est basé sur l'hypothèse que l'ensemble ou une partie de la zone non saturée du karst se sature après les crues de reprise de fin été-début automne. Le Modèle 2 reprend le fonctionnement du Modèle 1 pour la gamme de débits du Doubs  $< 35 \text{ m}^3/\text{s}$ , mais au-delà, l'augmentation de la saturation de l'aquifère est supposé être contrôlée par les mises en charge du Doubs engendrant une diminution de la capacité d'infiltration des formations superficielles au niveau du cours d'eau.

Le modèle 2 est également une courbe enveloppe des points exprimés dans la relation  $Q_{\text{pertes}}$  vs.  $Q_{\text{Arçon}}$  de l'illustration 22 avec une diminution des valeurs de pertes au-delà d'un certain seuil qui suppose que le karst possède une capacité d'absorption maximale en basses eaux ( $< 10 \text{ m}^3/\text{s}$  de débit dans le Doubs), puis d'une diminution exponentielle. Ce modèle ne tient également pas compte des crues majeures dépassant  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  au niveau du tronçon du Doubs. La fonction combine une relation linéaire sur les premiers  $\text{m}^3/\text{s}$  avec une fonction logarithmique pour les valeurs intermédiaires, puis une décroissance exponentielle pour les valeurs fortes.

$$Q_{\text{modèle pertes 2}}(t) = \begin{cases} K \cdot Q_{\text{Arçon}}(t) \cdot l \cdot L & \text{si } Q_{\text{Arçon}} < 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ a \cdot \log(Q_{\text{Arçon}}(t)) + b & \text{si } 10 \leq Q_{\text{Arçon}} \leq 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ \alpha \cdot \exp(Q_{\text{Arçon}}(t) \cdot \beta) & \text{si } Q_{\text{Arçon}} \geq 35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

Avec  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $l$ , et  $L$  les mêmes paramètres du Modèle 1, et  $\alpha$  et  $\beta$  les paramètres spécifiques au Modèle 2 à caler.

### ***c) Comparaison modèle de pertes et pertes estimées par échanges***

Les résultats des modèle sont fournis dans l'illustration 24 qui reprend la même figure que l'illustration 21. Un zoom de l'illustration 24 est donné en illustration 23 sur la fin de période de basses eaux en octobre 2011 et les crues de fin 2011 afin de mieux évaluer le comportement des modèle. On observe globalement que les 2 modèles sont très similaires, étant donné que seules les plus forts épisodes conditionnent des simulations différentes (au-delà de  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  à Arçon). Les 2 modèles reproduisent la composante de base à la station de Loue vasque, ce qui tend à

illustrer l'importance des pertes sur le débit de la source en étiage notamment. Concernant les contributions des pertes à la source, les modèles suivent fidèlement les estimations à partir des échanges en périodes d'étiage (quand les contributions sont proches de 100% ou supérieures) mais les surestime en périodes de hautes eaux et de crue. Et ce, même pour le modèle de pertes 2, qui contrairement au modèle 1 est conçu pour diminuer les pertes en hautes eaux.

Les 2 modèles ont donc tendance à surestimer le flux des pertes en période de hautes eaux, mais aussi en périodes de moyennes eaux (10 à 30 m<sup>3</sup>/s à Arçon). Le choix des courbes enveloppes pour simuler les pertes pose la question de leur importance réelle à deux niveaux :

- Sur l'évolution de la saturation du karst, notamment dans de plus faibles gammes de débit que celles testées pour les hautes eaux ;
- Dans le bilan des échanges sur le bassin intermédiaire situé entre Arçon et Ville-du-Pont et face notamment aux apports lors des crues.

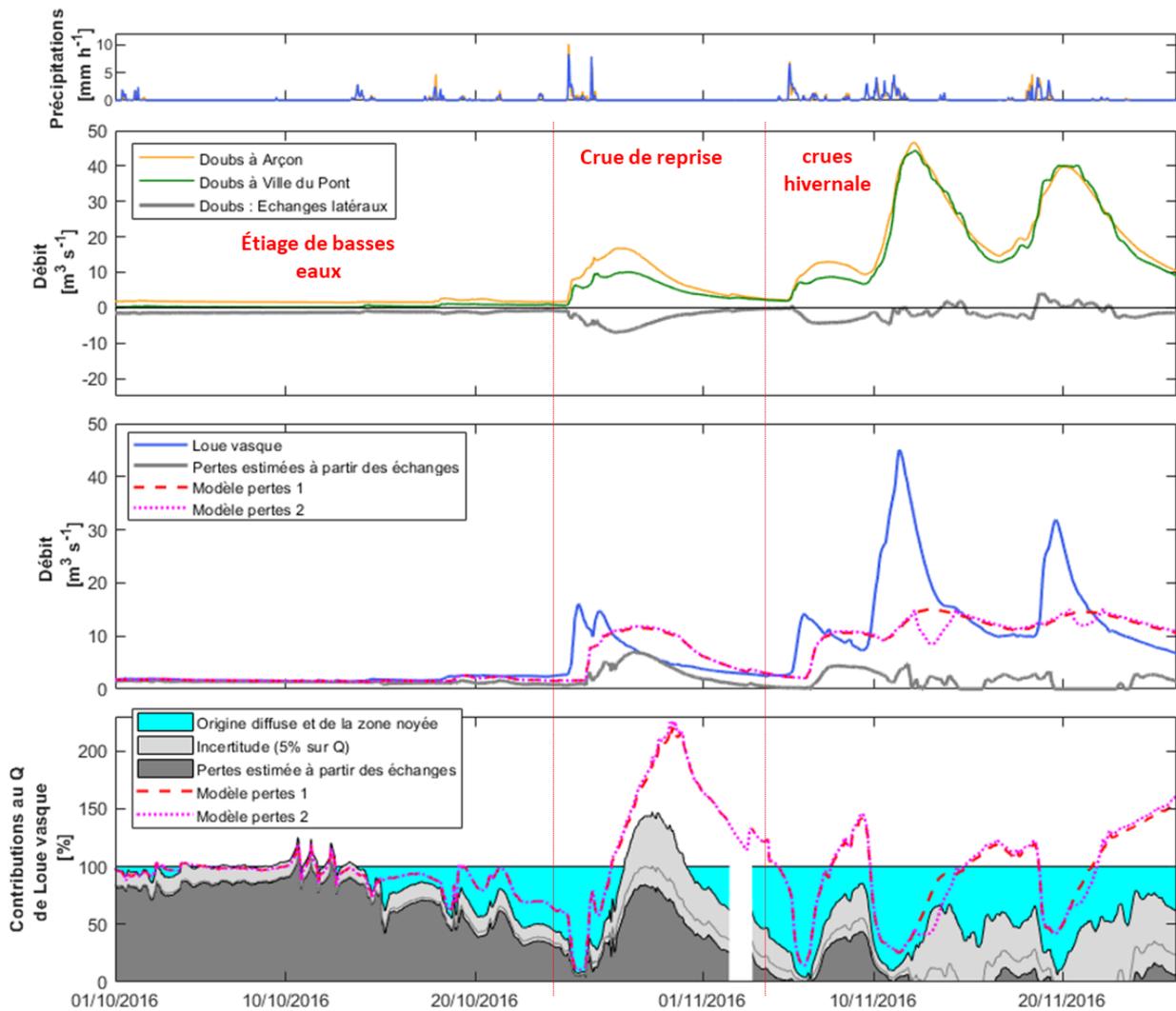


Illustration 23 – Zoom de l'illustration 22 sur la fin de l'étiage de basses eaux et les première crues hivernales de 2011.

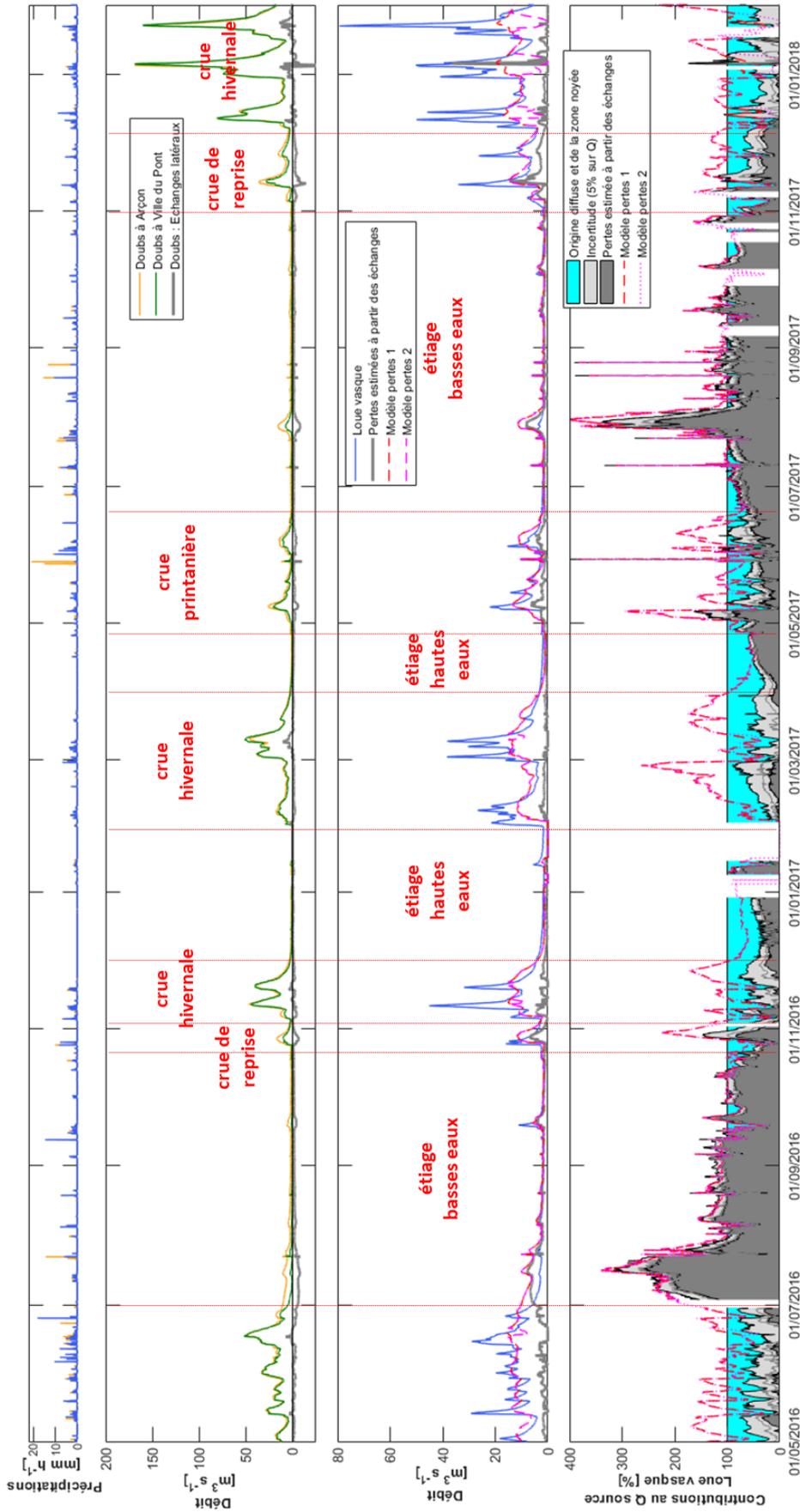


Illustration 24 –  
Chroniques hydrologiques de l'illustration 21 avec modèle de pertes présenté en illustration 22.

### 3.3.3. Résultats à partir des données hydrochimiques

#### a) Hypothèses pour contraindre le modèle de pertes

Le schéma conceptuel hydrogéologique présenté en Illustration 17 est utilisé pour définir des hypothèses sur le transfert des traceurs hydrochimiques entre le Doubs et la Loue (Illustration 25). Le phosphore est supposé provenir principalement de rejets domestiques. Les zones urbaines étant concentrées sur le bassin d'alimentation des pertes du Doubs au niveau de Pontarlier, l'essentiel des flux mesurés à la source est supposé provenir de ces mêmes pertes. La contribution issue de la recharge diffuse sur l'impluvium est supposée négligeable en comparaison. L'azote est supposé provenir de l'ensemble du bassin d'alimentation, via les apports d'origine agricole au niveau de la recharge diffuse, ainsi que via les apports domestiques au niveau de la recharge localisée des pertes du Doubs. L'origine des  $\text{NO}_3$  est donc multiples, ce traceur peut être toutefois utilisé pour vérifier que les estimations de flux modélisés sont en accord avec ces hypothèses. On suppose ici que les nitrates ne sont pas dégradés au cours de leur transfert dans le karst, les conditions oxygénées de la zone noyée ne permettant pas le processus de dénitrification.

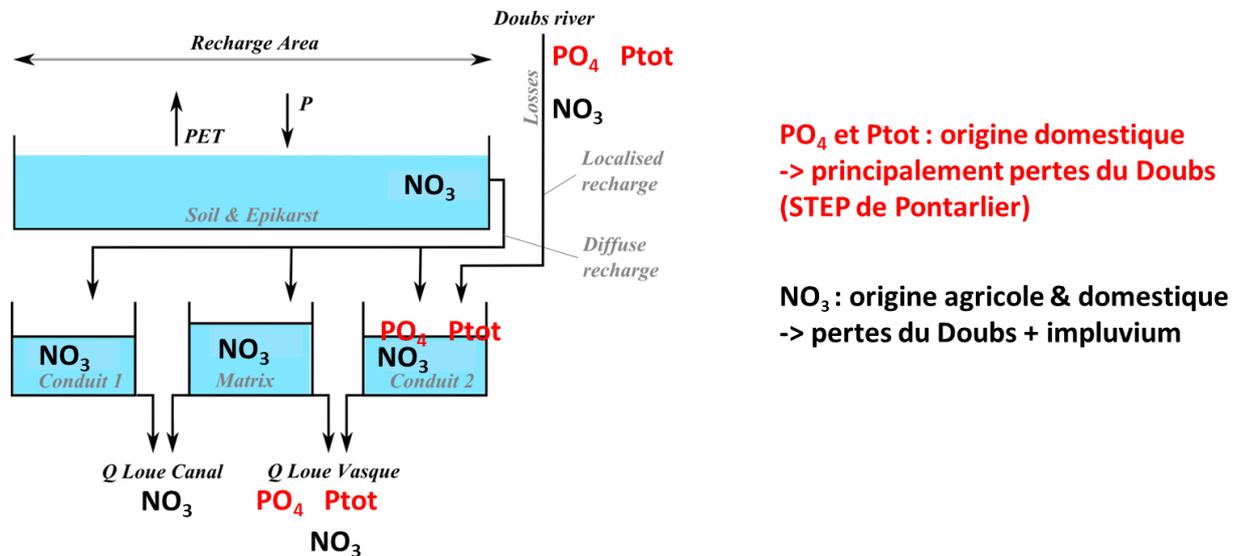


Illustration 25 – Schéma conceptuel des transferts de  $\text{PO}_4$ ,  $P_{tot}$  et  $\text{NO}_3$  entre le Doubs et la Loue

#### b) Utilisation des traceurs $\text{PO}_4$ , $P_{tot}$ , et $\text{NO}_3$

Les traceurs sont utilisés ainsi dans l'inter-comparaison de l'estimation des pertes :

- Estimation des chroniques de flux massiques ( $F_{pertes}(t)$  et  $F_{Loue\ vasque}(t)$ ) en  $\text{P-PO}_4$ ,  $P_{tot}$ , et  $\text{N-NO}_3$  au niveau des pertes et de la source de la Loue à partir des chroniques de débit  $Q$  et de concentration de respectivement  $\text{PO}_4$ ,  $P_{tot}$  et  $\text{NO}_3$  ;
- Estimation des contributions des pertes à la source de la Loue à travers le rapport  $F_{pertes}(t) / F_{Loue\ vasque}(t)$ . A noter que le temps de transit entre les pertes et la Loue n'est pas pris en compte dans cette approche, et que la variabilité de l'état de saturation du karst qui pourrait affecter ce temps de transit est interprété comme un stockage temporaire dans la zone d'infiltration ;
- Le bilan respectif des flux exportés par les pertes et par la source est réalisé sur l'ensemble de la chronique.

Les Illustration 26 à Illustration 28 présentent les résultats de l'estimation des flux pour les 3 traceurs  $\text{PO}_4$ ,  $\text{P}_{\text{tot}}$ , et  $\text{NO}_3$ . Pour les deux traceurs  $\text{PO}_4$  et  $\text{P}_{\text{tot}}$ , l'évolution des concentrations est marquée par des pics erratiques très élevés lors des crues de reprise et des crues hivernales (notamment lors de l'hiver 2017-2018). Les concentrations sur le Doubs étant très largement supérieures à celles de la source de la Loue, les contributions des pertes aux flux de la source de la Loue apparaissent donc très largement supérieures à 100% lors des crues. Aussi bien dans le cas des pertes estimées par échanges que dans les deux cas des pertes simulées, la recharge du karst par des flux de pertes plus importants que ceux de l'exutoire de Loue vasque témoignent d'un stockage dans le système lors du transit.

Pour le traceur  $\text{NO}_3$ , l'évolution est marquée par une cyclicité annuelle et une concentration légèrement supérieure à la source, comparé au Doubs. Il en ressort que les contributions des pertes à la source de la Loue sont quasi-systématiquement inférieures à 100% en étiage comme lors des crues. Ce comportement témoigne d'apports significatifs via l'infiltration diffuse sur le bassin et va dans le sens de l'hypothèse initiale sur les contributions ayant pour origine aussi bien l'infiltration diffuse que localisée (pertes). Ce traceur ne va donc pas pouvoir être utilisé pour contraindre le modèle de contribution des pertes du Doubs à la source de la Loue.

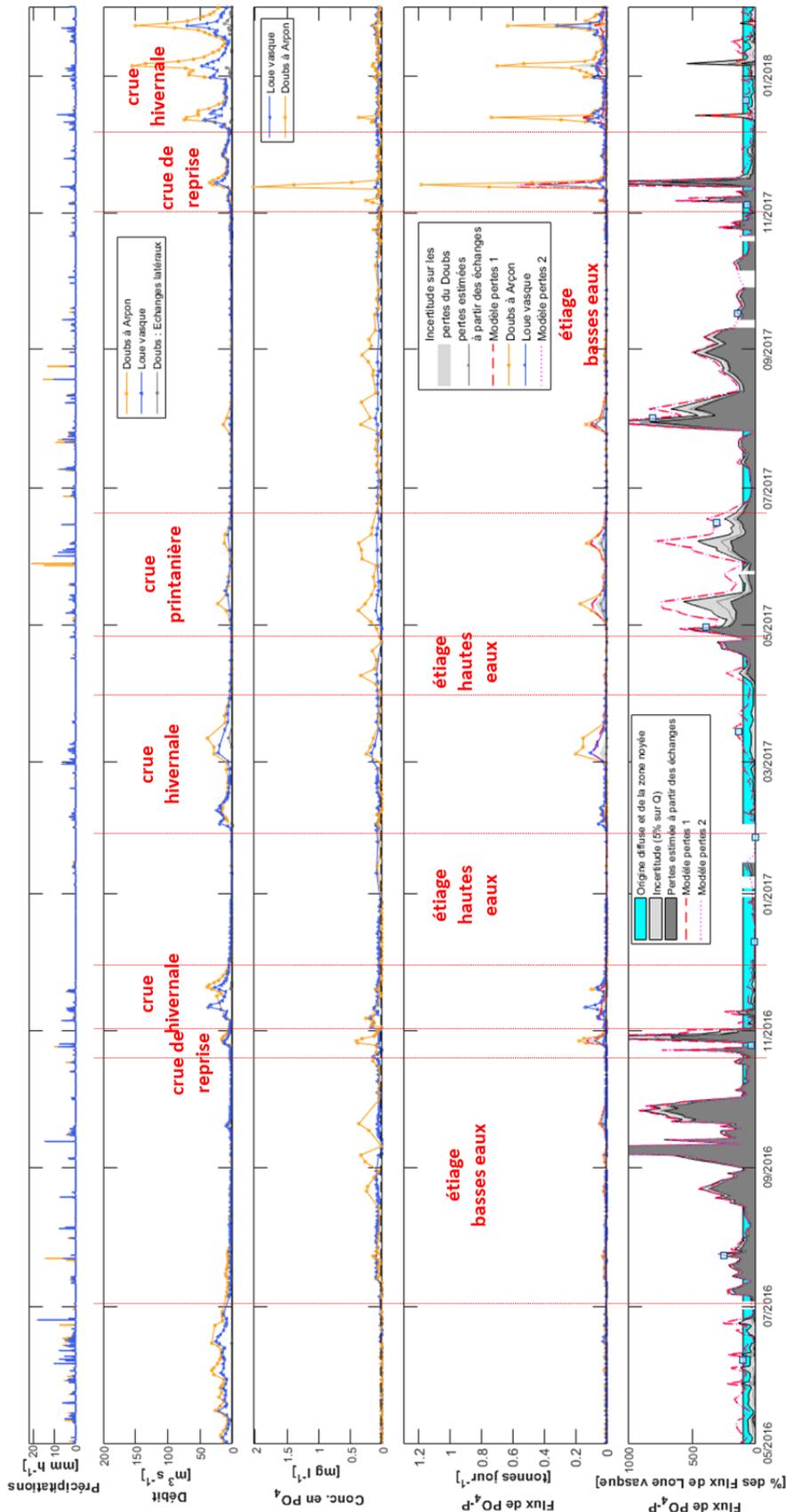


Illustration 26 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en PO<sub>4</sub>, des flux de P-PO<sub>4</sub>, et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue.

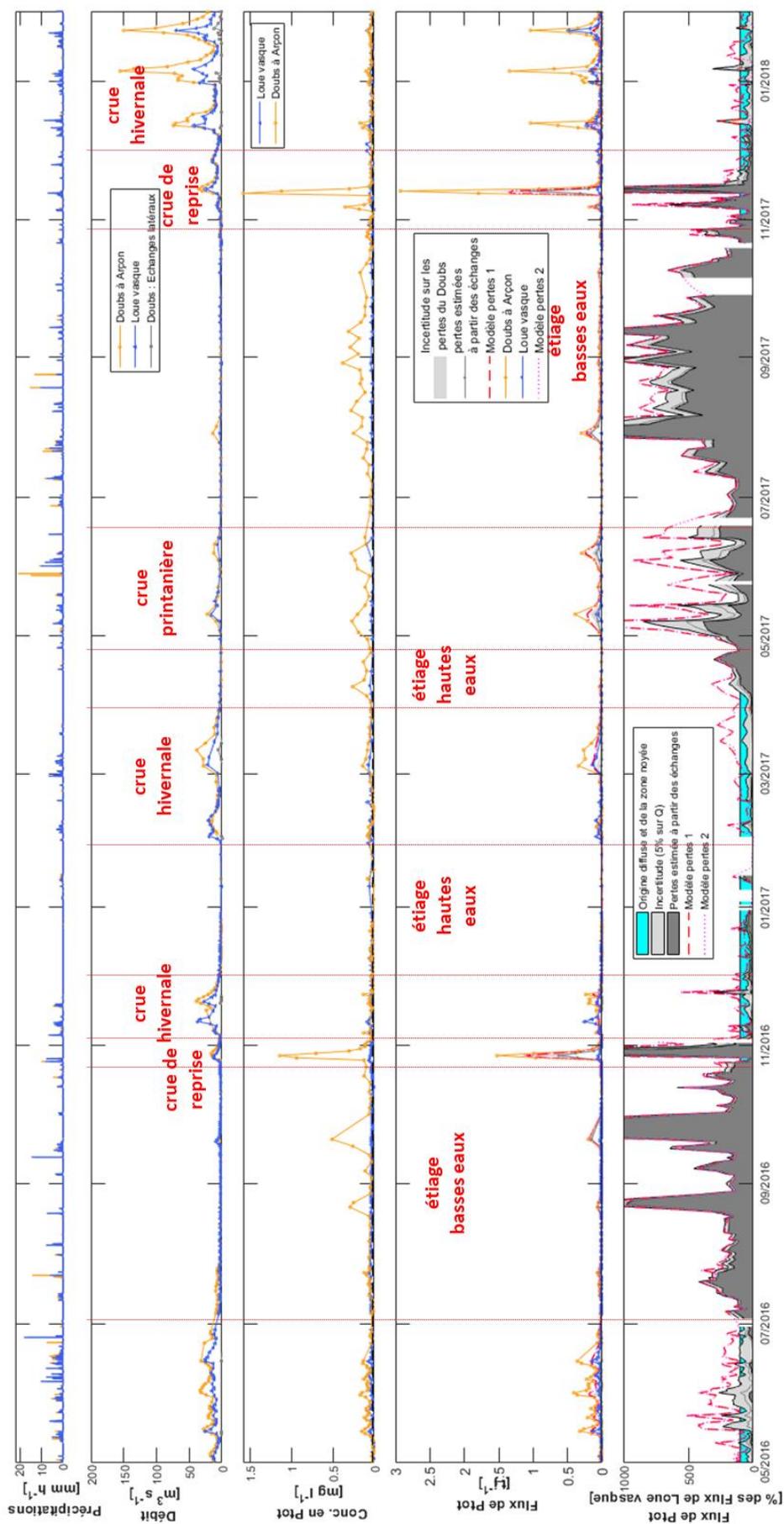


Illustration 27 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en Ptot, des flux de Ptot, et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue.

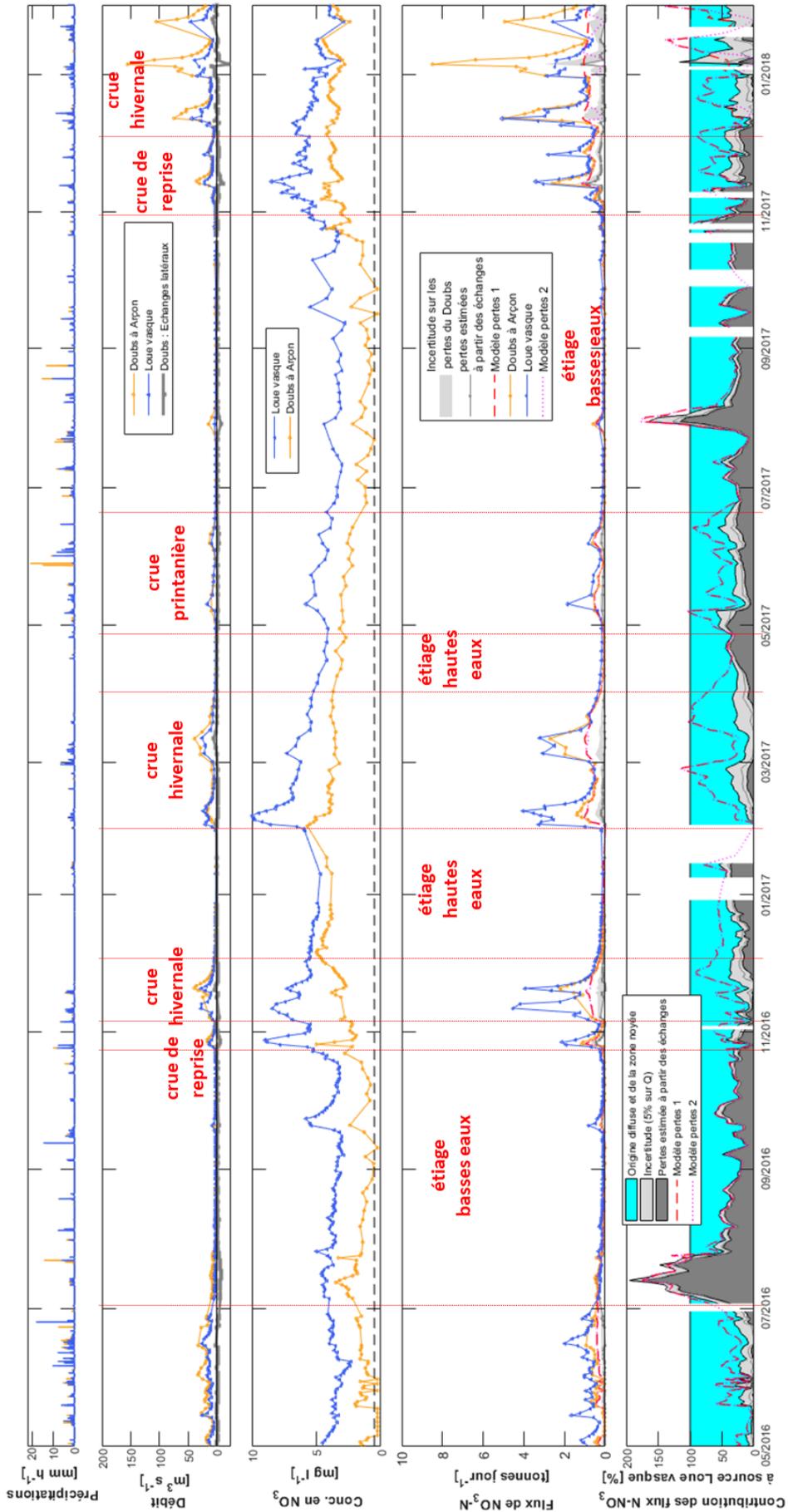


Illustration 28 – Chroniques de précipitations, de débit, de concentration en  $\text{NO}_3$ , des flux de  $\text{N-NO}_3$ , et de l'estimation des contributions des pertes du Doubs au flux de la source de la Loue.

### c) Bilan des flux selon différents modèles de pertes

Après avoir analysé les dynamiques, cette section présente une comparaison des bilans de masse des traceurs exportés par les pertes jusqu'à la Loue. Ces bilans sont calculés sur l'ensemble de la chronique 2015-2018 disponible.

A partir du Modèle de pertes 1 présenté en section 3.3.2, plusieurs calages peuvent être proposés sur le niveau de plafonnement de l'intensité des pertes, afin de tester différents scénarii de bilan des flux. L'illustration 29 présente les bilans des flux issus des 3 méthodes d'estimations du débit des pertes :

- Approche via les échanges latéraux : les bilans présentent les estimations des bornes inférieures et supérieures liées aux incertitudes sur les débits (Pertes inf. et Pertes sup.) ;
- Modèle de pertes 1 : les résultats du modèle 1 pour 4 valeurs de capacité d'absorption maximale plafonnant à 5, 10, 15, et 20 m<sup>3</sup>/s sont présentés ;
- Modèle de pertes 2 : un seul calage correspondant à une optimisation de la courbe enveloppe (Illustration 22) est présentée.

Approche utilisée		Bilan des flux hydriques (Q) et massiques en P-PO4, Ptot et N-NO3 exportés par les pertes vers la source de la Loue			
		Exprimée en pourcentage des contributions des pertes à la source de la Loue vasque			
		Q	P-PO4	Ptot	NO3
Echanges	<i>Pertes inf</i>	59%	<b>113%</b>	194%	27%
	<i>Pertes échanges</i>	32%	67%	<b>115%</b>	14%
	<i>Pertes sup</i>	24%	53%	<b>91%</b>	10%
Modèle de pertes 1	<b>Modèle 1 (CAL 20 m<sup>3</sup>/s)</b>	93%	156%	273%	45%
	<b>Modèle 1 (CAL 15 m<sup>3</sup>/s)</b>	81%	134%	233%	39%
	<b>Modèle 1 (CAL 10 m<sup>3</sup>/s)</b>	68%	<b>112%</b>	193%	33%
	<b>Modèle 1 (CAL 5 m<sup>3</sup>/s)</b>	56%	<b>92%</b>	157%	28%
Modèle de pertes 2	<b>Modèle 2</b>	91%	153%	272%	44%

Illustration 29 – Comparaison des flux de pertes en regard des flux de à la source de la Loue vasque ; les valeurs en gras sont les résultats de flux massiques proches d'un ratio de 100% à +/- 20% entre les flux des pertes et les flux à la source de la Loue vasque

On note que sur les bilans de flux hydriques (sur la seule base des débits), l'estimation des flux de pertes les plus proches de 100% sont pour un modèle plafonnant à 20 m<sup>3</sup>/s. Cette valeur n'est pas en cohérence avec les apports issus de la recharge diffuse, la contribution des pertes étant alors sur-évaluée.

**Concernant le traceur PO<sub>4</sub>, les modèles les plus cohérents avec une origine principalement issue des pertes sont le modèle de pertes 1 avec un calage à 10 et 5 m<sup>3</sup>/s.**

Concernant le traceur P<sub>tot</sub>, la surestimation des flux issus des pertes en regard des flux à la Loue pose la question de la pertinence de ce traceur et de son caractère conservatif sur des échanges surface-souterrain (limitation de l'infiltration de P adsorbé sur les matières en suspension ? Piégeage/Stockage dans la zone d'infiltration ?). Mais il ne peut apporter des informations fiables pour nos hypothèses de fonctionnement.

Concernant NO<sub>3</sub>, il est donné à titre indicatif car peu adapté conceptuellement (cf Illustration 25).

### 3.3.4. Focus sur les épisodes majeurs de janvier 2018

A partir de la typologie présentée en section 3.3.1, les relations entre pertes du Doubs et source de la Loue peuvent être caractérisées dans un graphique binaire entre la proportion de pertes dans le débit de la Loue, et ce même débit (Illustration 30). Les valeurs de proportion de pertes supérieures à 100% indiquent un stockage temporaire dans le karst. On observe globalement une distribution des points sous une courbe convexe illustrant de très fortes contributions des pertes pour les plus faibles débits et de très faibles contributions pour les plus forts. La crue majeure du 05/01/2018 se situe au-dessus de cette courbe, soulignant le caractère atypique des relations Doubs-Loue lors des phénomènes majeurs.

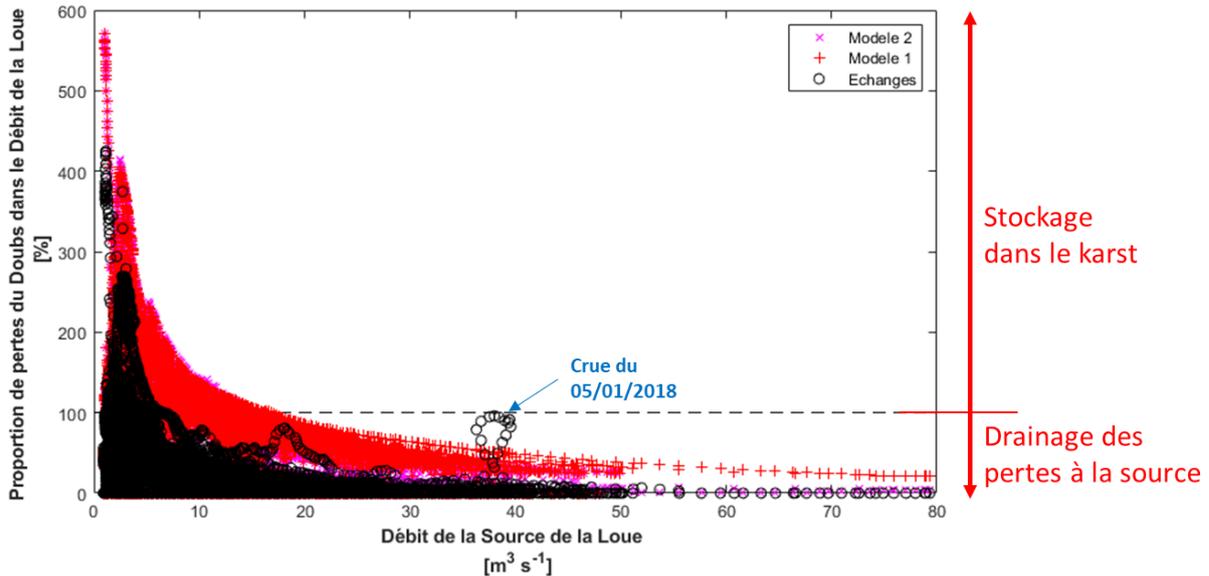


Illustration 30 – Relations entre le débit des sources de la Loue à la vasque et la proportion de pertes du Doubs dans le débit de la source de la Loue

L'illustration 31 présente un zoom de l'illustration 24 sur la période novembre 2017-janvier 2018 au cours de laquelle se produisent les 2 épisodes majeurs de janvier 2018. Sur ce graphique sont également représentés les contributions des pertes aux flux de  $PO_4$  qui semble être un marqueur pertinent pour quantifier les flux d'alimentation en provenance du Doubs. Le modèle de pertes utilisés est calé pour un plafonnement des pertes entre 5 et 10  $m^3/s$ , ce qui est une valeur cohérente avec les résultats des bilans. Bien que l'estimation des pertes à l'aide du modèle 1 (courbes en tirets rouges) et du modèle 2 (courbe en pointillés magenta) soient supérieures à celles à l'aide des échanges, on observe une diminution des contributions des pertes lors de chaque crue. Le modèle de pertes 2 semble même plus adapté à la simulation des pertes lors des épisodes du 12/12/2017 et du 22/01/2018.

La crue du 05 janvier dénote des autres épisodes car la montée de crue qui est rapide à Arçon est plus lente à Ville du Pont, sans pour autant que la décrue soit déphasée. Le volume de pertes est donc très conséquent sur le début de l'épisode, indiquant que le débit de pertes a atteint près de 40  $m^3/s$ . Aucun des modèles n'a été conçu pour simuler ce phénomène.

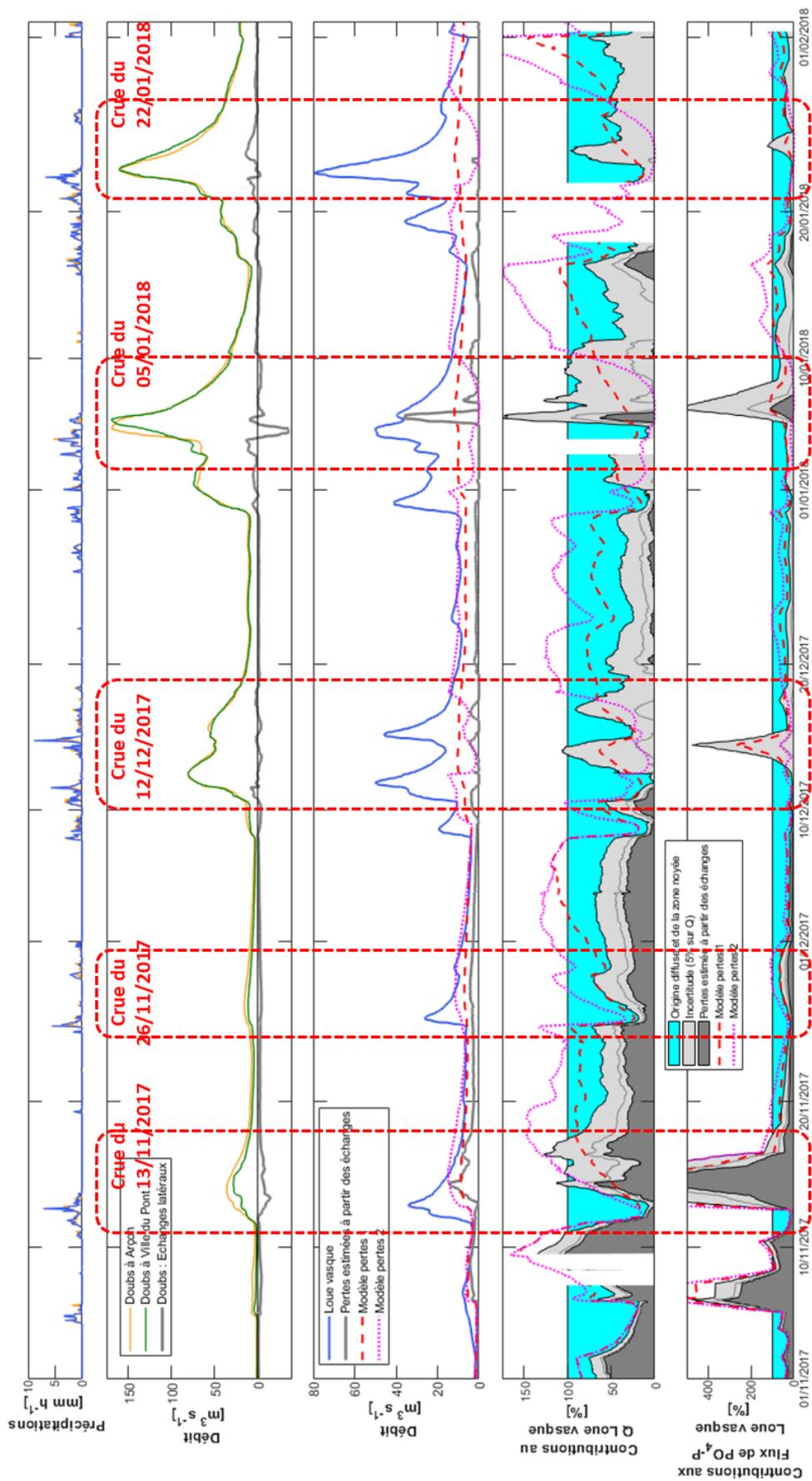


Illustration 31 –  
Zoom de  
l'illustration 22  
sur les crues  
majeures de  
janvier 2018.

Les contributions des pertes au débit et aux flux de  $\text{PO}_4$  à a source de la Loue indiquent que le phénomène d'infiltration vers le karst est tout à fait plausible, étant donné que les valeurs modélisées ne dépassent pas 100% du débit et des flux. La question n'est pas totalement tranchée concernant le devenir de ces pertes par débordement du lit majeur ou infiltration, cependant, il est intéressant d'observer que ce phénomène ne se produit pas lors du second épisode majeur du 22 janvier 2018, au cours duquel les hydrogrammes de crue entre Arçon et Ville du Pont sont parfaitement en phase, avec un volume de crue très similaire. Le fait que - au contraire des débits maximum de pertes – le pic de crue à la source de la Loue soit plus important sur le second épisode (22 janvier 2018) engendre une très forte contribution des pertes au débit de la Loue (points atypiques sur l'illustration 30) illustrant un possible stockage des pertes dans le karst lors de l'épisode du 5 janvier 2018.

Ainsi, l'hypothèse d'une modification des conditions d'infiltration lors des épisodes majeurs de 2018 devient intéressante pour expliquer les fortes pertes de la crue du 05/01/2018. Cette hypothèse est supportée par les nombreuses nouvelles captures observées dans le lit du Doubs lors de l'assec historique de 2018.



## 4. Conclusions et préconisations

L'objectif de cette étude était de mieux comprendre le rôle des interactions surface-souterrain le long du Doubs, et notamment sur sa partie au niveau des pertes entre Arçon et Ville du Pont. Deux axes sont abordés dans ce rapport, avec une cartographie des indicateurs hydrologiques au niveau des sous-bassins du Doubs et, une nouvelle estimation des pertes du Doubs à l'aide d'un modèle intégrant de nouvelles données hydrochimiques.

### 4.1. CARTOGRAPHIE DES SOUS-BASSINS DU DOUBS

La cartographie des sous-bassins du Doubs a été réalisée en comparant le découpage topographique du découpage hydrogéologique, afin d'évaluer l'importance des écoulements inter-bassins souterrains. Globalement, la non-superposition des deux découpages est plus marquée pour les petits sous-bassins, ce qui est cohérent avec l'effet d'échelle lié à la présence de sources.

On observe un contraste plus élevé des valeurs de débit spécifique (module) pour les bassins topographiques, et donc une distribution de valeurs plus homogènes pour le découpage des bassins hydrogéologique. Les données de traçage artificiel permettent d'expliquer les écarts observés entre les bassins déficitaires comme le Dugeon et le Doubs entre Cluse et Ville du Pont, et les bassins excédentaires comme la tête de bassin de l'Ain et de la Loue. Ces phénomènes marqués sur le Haut-Doubs, se répercutent également côté Suisse avec la question d'écoulements transfrontaliers vers l'Areuse depuis le Doubs.

L'analyse d'indicateurs morphométriques montrent que le découpage hydrogéologique engendre des sous-bassin globalement plus compacts que les bassins topographiques. Ceci a un léger impact sur les altitudes moyennes des bassins d'alimentation, en lien avec le gradient pluviométrique.

L'intérêt d'intégrer les limites hydrogéologiques dans le découpage des sous-bassins pour la prévision des crues du Doubs amont se situe dans une meilleure prise en compte de l'ensemble des écoulements (souterrains) en contexte karstique. En effet, les zones contributives aux crues définies à partir du découpage topographique ne sont pas représentatives des écoulements souterrains prépondérant en regard du ruissellement de surface.

A partir de la localisation des pluviomètres Temps-réels utilisés par le SPC RAS, une pondération des pluviomètres est proposée pour chaque station en prenant en compte les 2 découpages topographiques et hydrogéologiques. Un facteur correctif est proposé pour chacun des sous-bassins.

### 4.2. CAPTURES DU DOUBS VERS LA LOUE

Le modèle des pertes du Doubs qui alimentent la Loue – modèle proposé dans le rapport BRGM/RP-63844-FR (Charlier et al., 2014) - est affiné en croisant les données hydrométriques avec des données hydrochimiques ( $\text{PO}_4$ ,  $\text{Ptot}$ ,  $\text{NO}_3$ ) sur la zone de pertes à Arçon et la source de la Loue.

Tout d'abord, l'analyse a porté sur une fiabilisation des données de débit à la station de Loue vasque qui reçoit l'ensemble des pertes du Doubs.

Une première estimation des pertes est réalisée à l'aide d'une analyse simple du différentiel entre le débit aval et amont. Une typologie des périodes hydrologiques et des pertes correspondantes est proposée, montrant globalement une très forte contribution des pertes aux débits de la Loue lors des étiages, et une forte diminution lors des épisodes de crue du fait de la recharge additionnelle sur l'impluvium de la source de la Loue. Une seconde estimation des pertes est réalisée à partir d'un modèle dont la fonction se base sur une courbe enveloppe qui encadre les points de la relation entre le débit du Doubs en amont des pertes et le débit des pertes estimées par différentiel. Un premier modèle de pertes (Modèle 1) considère que la saturation du karst n'influence pas la capacité d'infiltration dans le lit du cours d'eau (plafonnement des pertes) et un second modèle (Modèle 2) considère une diminution de cette capacité d'infiltration lors des hautes eaux.

Afin de contraindre le calage du Modèle de pertes 1, les contributions des flux de pertes de différents traceurs aux flux de la source de la Loue sont comparés pour différents scénarios de capacité d'absorption maximale de la zone des pertes (plafonnement des intensités de pertes entre 5 et 20 m<sup>3</sup>/s). Le PO<sub>4</sub>, dont l'origine est essentiellement domestique est le traceur qui semble le mieux correspondre pour décrire dans le schéma conceptuel de la source de la Loue la composante de recharge en provenance du Doubs, car la production de PO<sub>4</sub> sur l'impluvium est très faible en regard des apports par le Doubs. L'analyse des bilans de masse indique que le Modèle de pertes 1 plafonnant entre 5 et 10 m<sup>3</sup>/s semble cohérent.

Cependant, l'analyse des crues majeures de janvier 2018 montre que des pertes très importantes (intensité de 40 m<sup>3</sup>/s sur la base des échanges latéraux) se sont produites en début d'épisode. Une modification des conditions d'infiltration en lien avec le caractère exceptionnel de la crue est une hypothèse à creuser. Si les conditions d'infiltration dans ce secteur sont modifiées de façon pérenne (hypothèse étayée avec l'épisode d'assec exceptionnel qui a suivi à partir d'avril 2018), le modèle d'infiltration devra être actualisé sur la base des nouveaux épisodes de crue.

### 4.3. PRECONISATIONS

A l'échelle du bassin du Doubs, les préconisations afin d'améliorer la prévision des crues sur le Doubs amont et la mise en vigilance des tronçons réglementaire sont de :

- privilégier les bassins hydrogéologiques lorsque les écarts avec les bassins topographiques sont importants ;
- d'intégrer une correction des pluies à l'aide d'une nouvelle pondération basée sur le découpage hydrogéologique pour la sélection des sous-bassins caractérisés par des écarts importants entre découpage topographique et hydrogéologique.

A l'échelle du tronçon des pertes du Doubs vers la Loue, les préconisations sont de :

- tenir compte d'intensités de pertes autour de 10 m<sup>3</sup>/s en condition hydrologique « standard », soit pour des crues entre 20 et 80 m<sup>3</sup>/s ;
- d'envisager des pertes plus conséquentes lors d'épisodes exceptionnels (de l'ordre de 40 m<sup>3</sup>/s), en ayant toutefois à l'esprit qu'il existe peu de recul sur cet aspect : une analyse des épisodes les plus récents sera nécessaire pour confirmer ces premiers résultats.

## 5. Bibliographie

**Berthelot A., 1901.** Sur les origines de la source de la Loue. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 133: 394-397 (disponible sur <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3089k>).

**Bichet V. et Campy M., 2008.** Montagnes du Jura – Géologie et paysages, NEO Editions, 293 pages + Annexes.

**Blavoux B., Burger A., Chauve P., and Mudry J. 1979.** Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura, Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique, 21(4): 295-306.

**Charlier J.-B., Desprats J.-F., Ladouche B., 2014.** Appui au SCHAPI 2014 – Module 1 – Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique dans les crues de la Loue à Chenecey-Buillon, Rapport BRGM/RP-63844-FR, 116p, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63844-FR.pdf>.

**Charlier J.-B., Vallet A., G. Hévin, F. Moiroux, 2018.** Projet QUARSTIC : QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises. Rapport final. BRGM/RP-68315-FR, 165p, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68315-FR.pdf>.

**Chauve P. 2006.** Chapitre IX. Jura, in: Aquifères et Eaux souterraines en France. Roux, J.Cl., (Ed.), AIH-IAH, BRGM Editions, Tome 2, pp 561-590.

**Chauve P., P Jacquemin, and J Mania. 1986a.** Représentation des écoulements en milieu karstique de zone plissée : exemple des hauts bassins du Doubs et de la Loue. Bulletin de la Société Géologique de France, II(2): 645-652

**Chauve P., J. Mudry, P. Rosenthal, G. Tissot, and P. Tresse. 1986b.** Rôle des abaissements d'axe dans les circulations karstiques du Jura. Bulletin de la Société Géologique de France, II(2): 329-336

**DIREN, 1995** - Étude du système hydrologique Doubs-Loue (pertes du Doubs – sources de la Loue). Rapport, 63p.

**Dörfliger N., Pinault J.-L., Petit V., Jauffret D., 2004.** Systèmes karstiques et crues du Doubs. Méthodologie de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surface, lors de crues et des étiages. BRGM/RP-53063-FR, 182p.

**Fournier, E. 1901.** Les phénomènes de capture des cours d'eau superficiels par les cours d'eau souterrains, dans les régions calcaires. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 133: 961-963 (disponible sur <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3089k>).

**Fournier E., 1913.** Pertes du Doubs avec la Loue – Expérience de coloration de 1910. Notice historique et descriptive. Jacques et Demontrond, Besançon, 24p.

**Jacquemin Ph., 1984.** Réponses hydrodynamiques des hauts bassins du Doubs et de la Loue. Thèse de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 164p + Annexes.

**Le Barbu E., Philippe M., Cadet Y., 2019.** Sécheresse 2018 dans le Haut-Doubs : du jamais vu depuis 1906. Colloque UNESCO-SHF : «Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019».

**Le Mesnil M., Charlier J.-B., Moussa R., Caballero Y., Dörfliger N., 2020.** Interbasin Groundwater Flow: Characterization, Role of karst areas, Impact on annual water balance and flood processes. Journal of Hydrology, in press. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124583.

## **Annexe 1**

# **Contexte hydrogéologique du bassin du Doubs dans le massif du Jura**



La géologie du massif du Jura se caractérise essentiellement par les formations jurassiques (en bleu sur l'illustration 32) entre un substratum triasique (en rose) et des affleurements Crétacé (en vert) en altitude. Le massif se découpe en 3 grandes zones structurales principales (Illustration 33) : i) les avant-monts, ii) les zones de plateaux où les formations sont globalement tabulaires et compartimentées par les faisceaux qui sont d'étroites bandes plissées et faillées, et iii) la Haute-Chaine où les plis sont plus marqués créant un relief plus contrasté en altitude.

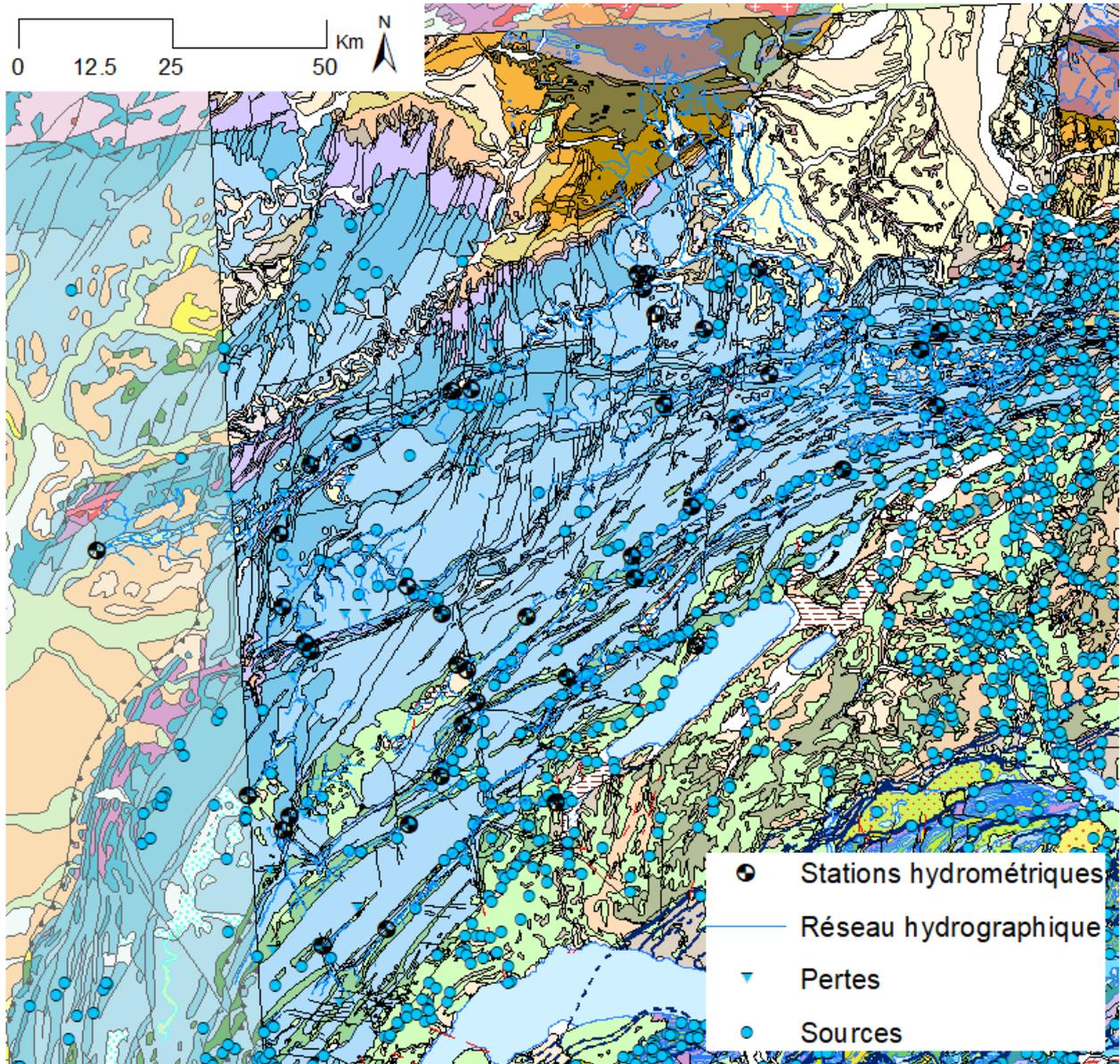


Illustration 32. Carte géologique au 1/1 000 000 du nord du massif du Jura centrée sur le bassin du Doubs (BRGM © et GeoCover V2)

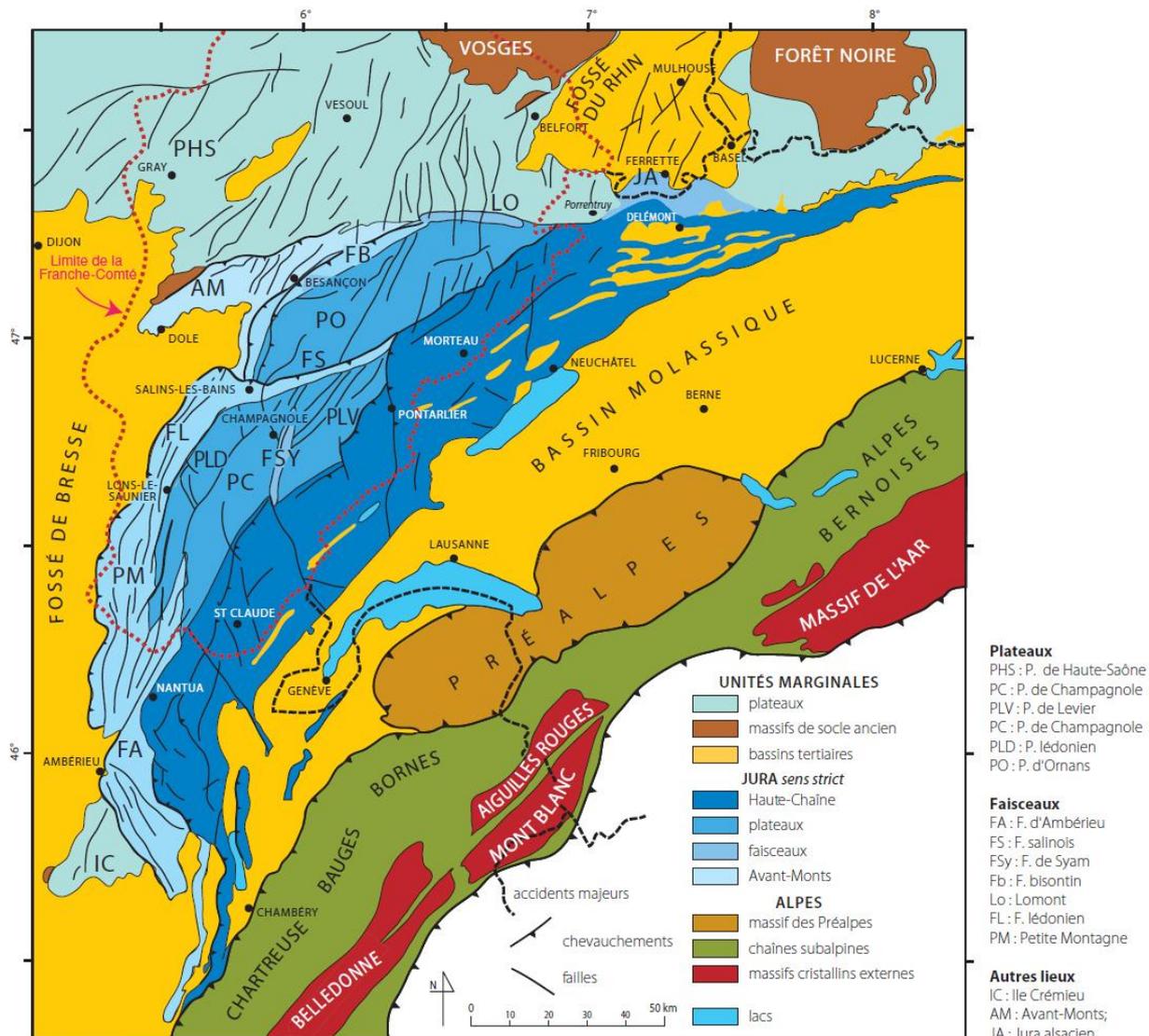


Illustration 33. Carte structurale du massif du Jura (Bichet et Campy, 2008)

Les principales formations aquifères et aquicludes sont formalisées sur le log géologique type du massif du Jura reproduit sur l'illustration 34. En localisant les sources les plus importantes sur le log, on constate que les principaux aquifères sont localisés dans les deux grandes séries carbonatées du Malm et du Dogger, séparées par les marnes oxfordiennes.

Les systèmes karstiques développés dans les deux séries aquifères du Malm et du Dogger donnent lieu à des systèmes superposés sur les plateaux. Ceux-ci sont par exemple drainés successivement par la haute vallée de la Loue en amont d'Ornans, puis par la vallée basse et sur le Lison à l'aval où les cours d'eau ont incisé le Jurassique moyen. L'analyse structurale du secteur montre que les circulations souterraines sont en lien avec la déformation des structures plissées (faisceaux et haute-chaîne), et notamment avec les zones d'abaissement d'axe des plis synclinaux (Chauve et al., 1986b). Le drainage se fait vers les zones structurellement les plus basses et qui sont entaillées transversalement par les gorges. Au niveau des plateaux, les émergences se situent sur les points bas des structures faillées avec des directions d'écoulement dans le sens des abaissements des compartiments.

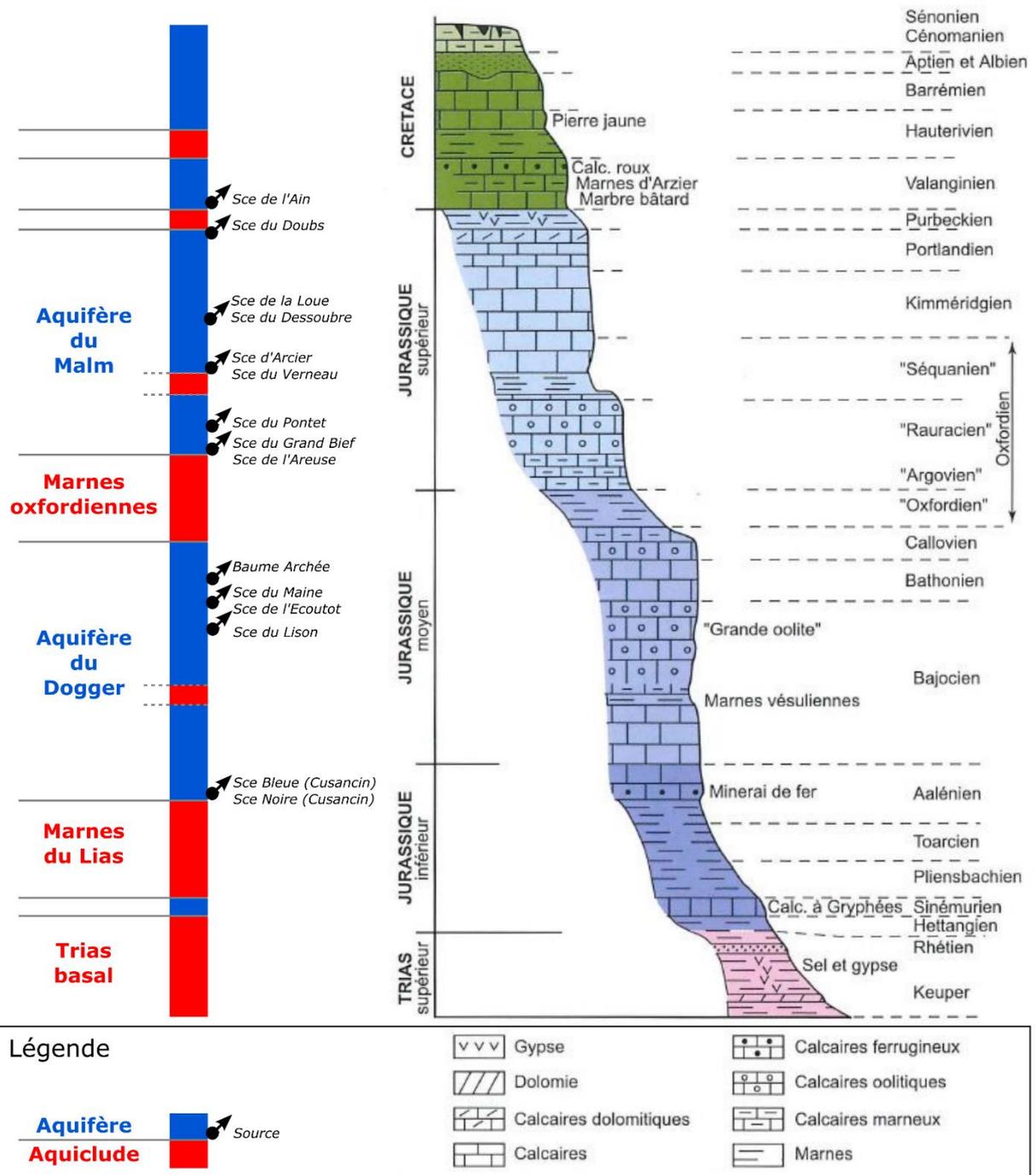


Illustration 34. Log géologique du massif du Jura (Chauve, 2006) et localisation des principaux aquifères et aquicludes du bassin Loue-Lison



## **Annexe 2**

### **Gradient pluviométrique (RP-63844-FR – Charlier et al., 2014)**



Le climat jurassien est continental à montagnard en direction de la Haute-chaîne et marque un gradient net de pluviométrie avec l'altitude (Illustration 35). Les précipitations annuelles augmentent respectivement de 1181 mm à Besançon (307 m d'altitude) à 1767 mm à Mouthe au cœur de la Haute-chaîne.

La distinction des précipitations pluvieuses et neigeuses montre que le régime des pluies est relativement homogène sur l'ensemble des plateaux autour de 1300 mm en moyenne. Le gradient des précipitations totales est en fait contrôlé par les précipitations neigeuses qui augmentent de 150 à 450 mm/an vers la Haute-Chaîne.

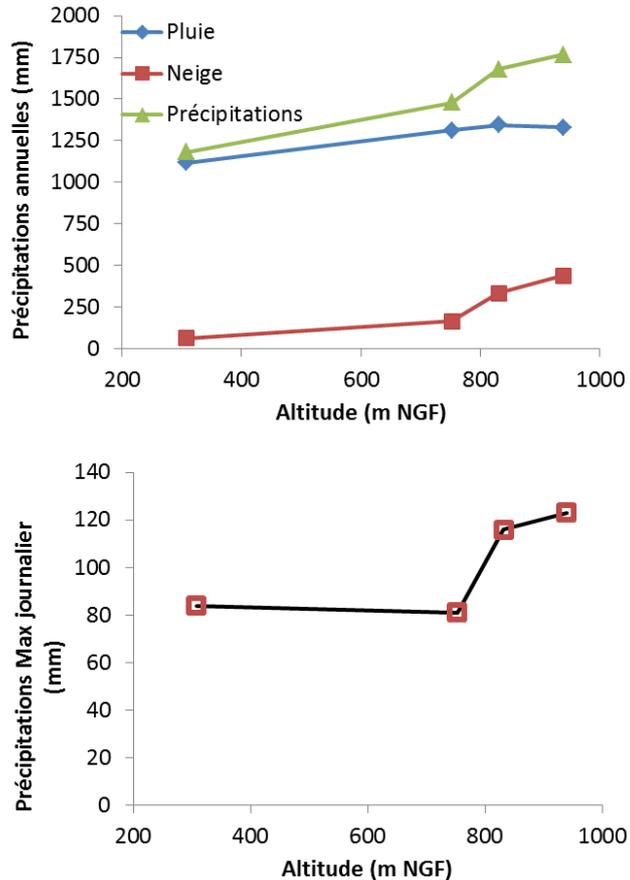


Illustration 35. Synthèse des précipitations annuelles et des maxima journaliers sur le bassin Loue-Lison le long du gradient d'altitude entre Besançon (307 m NGF), Epenoy (752 m NGF), Pontarlier (831 m NGF) et Mouthe (939 m NGF)

La variation inter-mensuelle moyenne est d'environ 30 mm (de 100 à 145 mm/mois à Epenoy) pour l'ensemble des stations ce qui indique une faible variabilité moyenne des précipitations saisonnières. Le bassin est donc arrosé régulièrement toute l'année et les longues périodes d'étiage sont rares et irrégulières d'année en année. Les maxima journaliers suivent également le gradient d'altitude avec des cumuls record atteignant 130 mm/jour sur la Haute-Chaîne.



## **Annexe 3**

### **Synthèse des connaissances sur les relations Doubs-Loue (RP-63844-FR – Charlier et al., 2014)**



## Le bassin versant des pertes du Doubs

Le lien entre les pertes du Doubs en aval de Pontarlier - principalement vers Arçon - et les sources de la Loue est connu depuis l'incendie des usines Pernod de Pontarlier en 1901 lors duquel près de 1000 m<sup>3</sup> d'absinthe se sont déversés dans le lit du Doubs et dans un puits perdu, réapparaissant le surlendemain à la source (Berthelot, 1901 ; Fournier, 1901). « ... l'odeur s'est répandue le long du cours de la Loue, à Mouthier. Elle était aussi forte que celle d'un verre d'absinthe pris sur la table d'un café » (Berthelot, 1901). Les analyses des échantillons prélevés à la source n'ont laissé aucun doute sur l'origine de l'odeur et de la coloration verte : « *Aucun corps de ce genre ne saurait préexister dans une eau potable.* » (Berthelot, 1901). La connexion entre Doubs et Loue fut validée dix ans plus tard lors d'un traçage à l'aide de 100 kg de fluorescéine qui colora la Loue jusqu'à Chenecey-Buillon (Fournier, 1913). Les circulations souterraines entre les pertes du Doubs et la source sont rendues possibles grâce au décrochement de Pontarlier qui interrompt la continuité des marnes liasiques en profondeur (Illustration 36) (Chauve et al., 1986a ; Chauve, 2006).

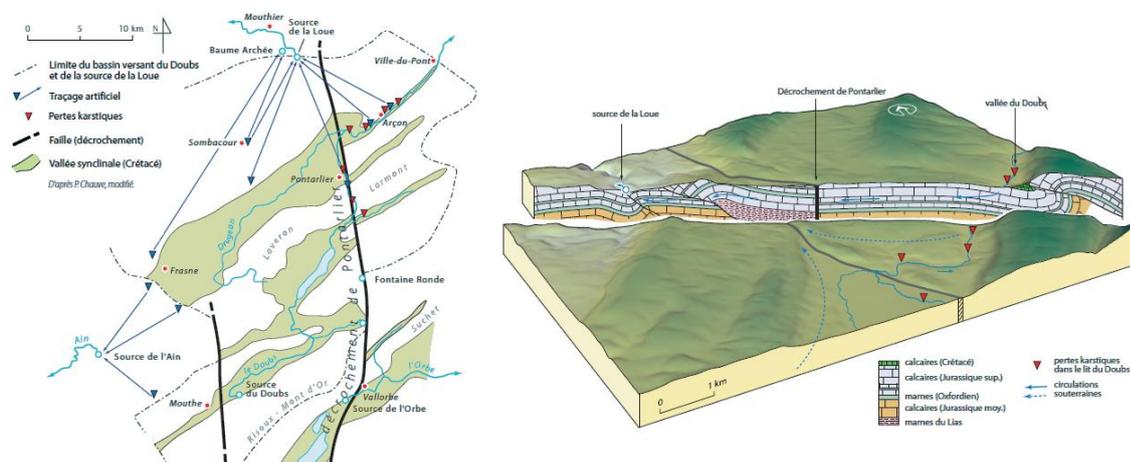


Illustration 36. Contexte géologique des pertes du Doubs et de la source de la Loue (Bichet et Campy, 2008 modifié d'après Chauve (2006))

Les pertes du Doubs en aval de sa confluence avec le Dugeon au profit de la Loue se traduit par un déficit d'écoulement du bassin du Dugeon (gouffre de Jardel) et une augmentation de la zone de recharge de la Loue vers la Haute-Chaîne de 10 à 30% (Chauve et al., 1986a). L'approche isotopique menée par Blavoux et al. (1979) montre que l'altitude moyenne de recharge des eaux de la Loue en période de crue de fonte de neige correspond à des altitudes de la haute-chaîne (1300 m). Le bassin hydrogéologique (hors bassin des pertes) étant à une altitude moyenne de 850 m, cela illustre l'influence des pertes du Doubs (qui draine la Haute-Chaîne) dans la recharge du système en moyennes et hautes eaux. Une première quantification de l'influence des apports issus des pertes sur les crues de la Loue a été réalisée à l'aide d'un modèle de transfert (Dörfliger et al., 2004). Elle montre une contribution potentielle élevée qui traduit surtout la prédominance de transferts rapides au sein du réseau de drainage, comparé aux apports diffus plus différés. L'illustration 16 présente les limites du bassin hydrographique du Doubs à Ville-du-Pont dont la surface est de 550 km<sup>2</sup>.

### a) Situation de la zone de pertes

La zone de capture du Doubs connecté aux sources de la Loue se situe principalement entre Cluse-et-Mijoux sur le Doubs, Vuillecin sur le Dugeon à la confluence avec le Doubs, et Ville-du-

Pont sur le Doubs à l'aval. Des jaugeages différentiels en basses et moyennes eaux ont été réalisés en 1979 (Chauve et al., 1986a), en 1983 (Jacquemin, 1984), et en 1994 (DIREN, 1995). L'illustration 37 présente les variations spatiales et temporelles des débits sur la zone de capture (Chauve 2006).

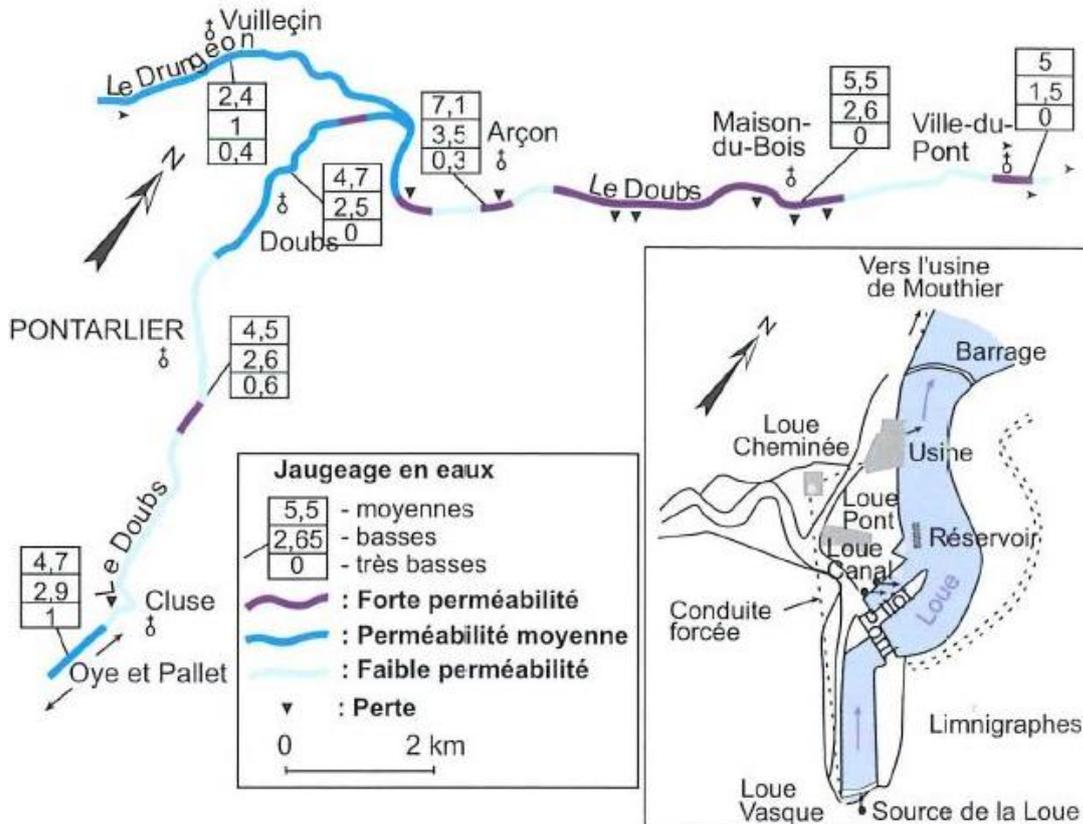


Illustration 37. Jaugeages différentiels le long du Doubs au niveau de la zone de capture connectée aux sources de la Loue (d'après Chauve, 2006)

La zone de capture principale se situe en aval de la confluence jusqu'à Maison-du-Bois sur environ 5 km. Deux autres zones de capture de plus faible importance se situent à proximité de Pontarlier et entre Maison-du-Bois et Ville-du-Pont.

## b) Modèles existants d'estimation du débit des pertes du Doubs

### • Méthode de Jacquemin (1984)

Les relations entre les pertes du Doubs et la source de la Loue ont été étudiées dans la thèse de Jacquemin (1984) qui présente une relation pour calculer le débit des pertes du Doubs à partir des débits du Doubs en amont de la zone de pertes. Les données disponibles proviennent des jaugeages différentiels réalisés par le SRAE de Franche-Comté (Chauve et al., 1980a, cité par Jacquemin, 1984) en 1979 et lors de la thèse de Jacquemin (1984) en 1983. Le débit des pertes est exprimé en fonction du débit à la confluence du Drugeon et du Doubs (Illustration 38).

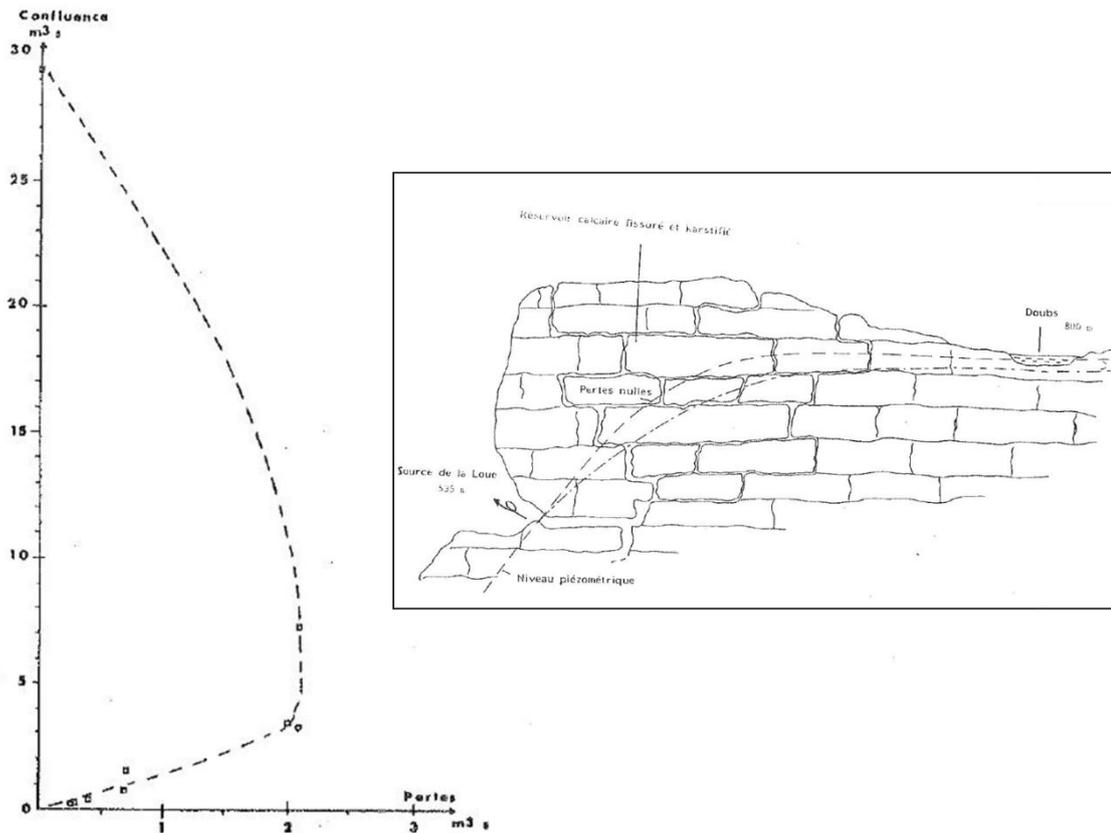


Illustration 38. Relations entre débit du Doubs en amont des pertes (confluence) et le débit des pertes mesurées par jaugeage, et interprétation hydrogéologique du déficit d'écoulement (Jacquemin, 1984)

L'allure de la relation obtenue sur l'illustration 38 montre un débit de pertes proportionnel aux écoulements à la confluence pour des débits à la confluence inférieurs à  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pour des débits supérieurs, le débit des pertes est plafonné à environ  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  puis décroît avec une augmentation des débits à la confluence jusqu'à devenir nul. L'interprétation de cette courbe est un refus à l'infiltration qui apparaît du fait d'une saturation du karst dans la zone de capture.

Des critiques peuvent être émises sur la méthode :

- cette méthode intègre un débit de pertes entre la confluence et Ville-du-Pont dans la zone la plus filtrante mais tend à négliger les pertes entre Pontarlier (station amont de Cluse-et-Mijoux) et la confluence ;
- elle estime le débit des pertes à différents régimes hydrologiques sur la base d'une relation établie en basses eaux ;
- elle considère un refus à l'infiltration du fait de l'impossibilité d'estimer les pertes lors des périodes de hautes eaux durant lesquelles les apports latéraux peuvent être plus conséquents.

#### • Méthode de la DIREN (1995)

La méthode proposée par la DIREN (1995) est basée sur une analyse différentielle des débits journaliers entre Pontarlier et Ville-du-Pont. Elle montre qu'une courbe enveloppe peut être estimée pour le débit total des pertes. Cette enveloppe correspond à la droite des pertes totales pour des débits amont (Pontarlier + Vuillecin) inférieurs à  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  et par un plafonnement autour de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  pour des débits amont supérieurs.

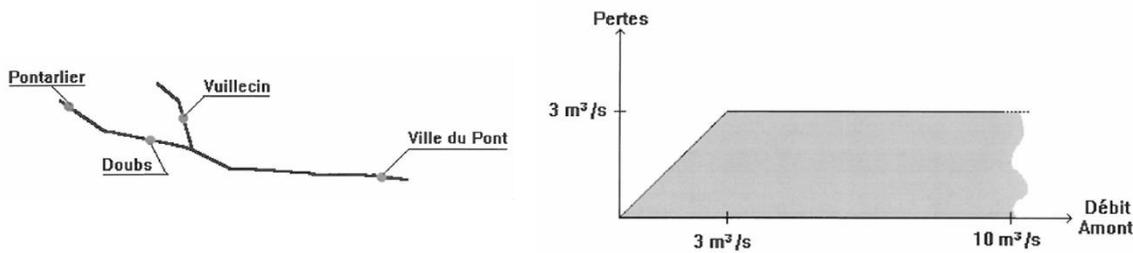


Illustration 39. Courbe enveloppe du débit total des pertes en fonction du débit amont (DIREN, 1995)

Il faut avoir à l'esprit que la dispersion des points à l'intérieur de cette courbe enveloppe peut être grande et que certains points se situent au-dessus lors des crues.

Cette méthode propose, contrairement à celle de Jacquemin (1984), un plafonnement des débits avec l'augmentation des débits amont. Dans ce cas, la saturation du karst impose un débit d'infiltration maximal plutôt qu'un refus à l'infiltration.

La critique principale de cette méthode est celle d'utiliser un pas de temps journalier trop intégrateur des variations de débit sur le Doubs (propagation de l'onde de crue en quelques heures). Ceci n'est pas préjudiciable pour les périodes de basses eaux, mais peut engendrer lors des crues une sous-estimation du débit instantané des pertes.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction de l'Eau, de l'Environnement, des Procédés  
et Analyses**  
Unité Nouvelles ressources en eau et économie  
1039, rue de Pinville, 34000 – Montpellier – France  
Tél. : 04 67 15 79 90