

Source de la Bèze (21) – Crédit Photo EPTB Saône Doubs

L'assec du Doubs en 2018 : retour sur un épisode hydroclimatique exceptionnel

Avec le soutien de :



Quelques clichés pris entre Arçon et Grand'Combe-Châteleu en août et octobre 2018

Table des matières

Introduction, contexte et données	1
1 Des échanges karst-rivières irréguliers dans l'espace et dans le temps.....	3
1.1 Un secteur hydrogéologiquement complexe.....	3
1.2 L'irrégularité des débits échangés entre surface et souterrain	6
2 Un épisode hydroclimatique remarquable.....	10
2.1 Un étiage historique.....	10
2.2 Une pluviométrie largement déficitaire.....	13
Conclusion	16

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Nombre de jours d'assec en considérant les débits de la station de Ville-du-Pont.....</i>	<i>1</i>
<i>Figure 2 : Carte de présentation des bassins Haut-Doubs et Haute-Loue. Réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques et hydrométriques utilisées</i>	<i>2</i>
<i>Figure 3 : Géologie du secteur perdant et traçages environnants</i>	<i>4</i>
<i>Figure 4 : Coupe interprétative des phénomènes de capture des eaux du Haut-Doubs (d'après Cabinet Reillé, 2018).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 5 : Jaugeages différentiels le long du Doubs au niveau des secteurs perdants (d'après Chauve, 2006).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 6 : Modèles d'estimation des pertes du Doubs sur le secteur d'Arçon (inspiré de Charlier et al., 2014).....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 7 : Scénario d'évolution du profil du long du secteur perdant au cours de l'année 2018.</i>	<i>9</i>
<i>Figure 8 : Caractérisation de l'étiage 2018 par l'utilisation des VCN_d : exemple de la station du Doubs à Mouthe (septembre/novembre 2018)</i>	<i>10</i>
<i>Figure 9 : A - Précipitations cumulées sur la période juin/novembre (1980-2018). B - Précipitations cumulées sur la période juin/novembre (2018).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 10 : A- Le déficit de précipitations de l'année 2018 par rapport aux moyennes 1980-2018 (période juin-novembre). B - Comparaison des précipitations mensuelles. C- Comparaison des températures</i>	<i>14</i>
<i>Figure 11 : Cumul de pluies et température moyenne à Besançon (Doubs) depuis 1885. Période 1 juin – 31 octobre (source : MétéoFrance)</i>	<i>15</i>

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Rangs des étiages en fonction des différents VCN appliqués aux stations du Haut-Doubs (le tableau indique, par année, le rang de la variable ; les trois premiers rangs sont mis en évidence par le dégradé de couleur).</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 2 : Rangs des étiages en fonction des différentes HCN appliquées aux hauteurs d'eau enregistrées au droit du lac de Chaillexon (seules dix années ont été consignées : celles au cours desquelles les HCN₁₀ ont été les plus basses).</i>	<i>12</i>

Introduction, contexte et données

Le Massif du Jura a été confronté en 2018 à un épisode climatique historique marqué par la convergence d'un fort déficit pluviométrique enregistré dès la période printanière et de températures élevées. Conséquence directe du phénomène, certaines rivières du massif ont enregistré des étiages¹ exceptionnels en particulier le Doubs (partie amont) puisque la rivière a été en assec pendant près de six mois (juin/décembre) sur un linéaire d'environ 20 km à l'aval du village d'Arçon (Haut-Doubs). Si cet épisode d'assec a été aussi marquant localement, c'est en raison de son intensité mais aussi de son traitement médiatique (nombreuses unes de la presse quotidienne régionale) et cet article se veut apporter des éléments de réponse à une assertion de l'Est Républicain dans son édition du 29 juillet 2018 « *Le Doubs totalement à sec sans que l'on ne sache pourquoi* ». L'emballlement médiatique fait certes écho à une situation remarquable mais il est opportun de rappeler que voir le Doubs asséché sur ce tronçon est relativement courant. Un rapide coup d'œil aux données des débits de la station hydrométrique de Ville-du-Pont (station localisée en aval d'Arçon) permet d'identifier par exemple à la fin des années 1980/début des années 1990 une succession d'étiages sévères avec des épisodes d'assec qui ont duré plus d'un mois² (Figure 1).

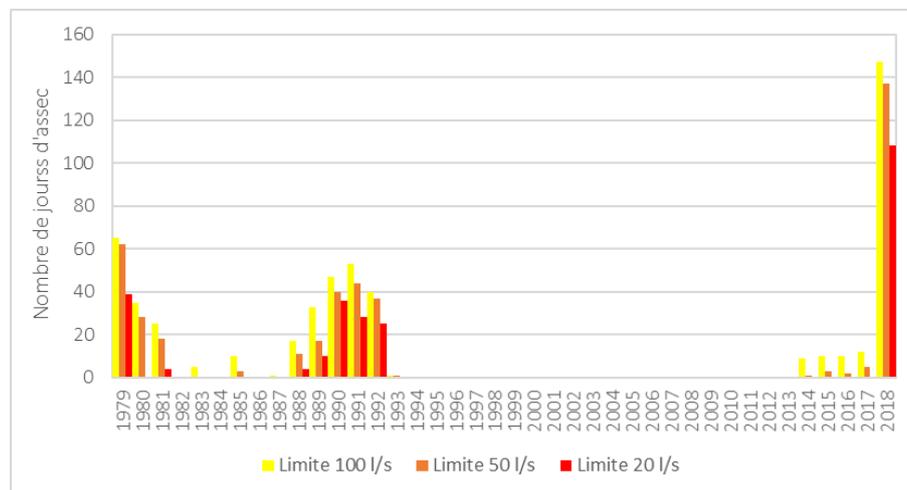


Figure 1 : Nombre de jours d'assec en considérant les débits de la station de Ville-du-Pont

Ce qui intéresse la démarche, c'est avant tout l'évènement de 2018 qui s'identifie aisément sur la figure 1 puisque marqué par un tarissement total de près de 6 mois. Pour caractériser cet épisode remarquable, l'article s'intéresse d'abord aux paramètres structurels notamment géologiques puisque la nature karstique des terrains implique des échanges complexes entre la rivière, le calcaire sous-jacent et les vallées périphériques. En couplant analyses historiques et observations récentes, il est possible d'identifier certains grands traits du fonctionnement hydrogéologique du secteur Haut-Doubs/Haute-Loue. S'ensuit une démarche d'analyse statistique des variables hydroclimatiques disponibles sur le secteur permettant de quantifier

¹ Selon le dictionnaire français d'hydrologie (Comité Nationale Français des Sciences Hydrologiques), l'étiage est un « *débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières habituelles, même s'il en est l'exacerbation* ».

² Dans un article récent Le Barbu *et al.*, (2018) considèrent qu'en deçà de 100 l/s à la station de Ville-du-Pont, le Doubs est en assec. Afin de rendre la limite un peu plus souple, différents seuils sont proposés sur la figure 1, ils n'impliquent pas une modification des principaux constats quant à la durée des épisodes d'assec.

le caractère exceptionnel de l'étiage enregistré en 2018 puisque le deuxième le plus sévère depuis 1906.

Par ailleurs, la zone d'étude ne correspond pas *stricto-sensu* à la zone perdante en aval de Pontarlier (Figure 2) mais plutôt à deux hydrosystèmes, celui du Haut-Doubs (Haute-Chaîne) et celui de la Haute-Loue (plateaux et faisceau) dont on sait avec certitude depuis l'historique traçage à l'absinthe³ de 1901 qu'ils sont connectés.

Outre l'organisation hydrographique du secteur, la figure 2 permet d'apprécier la localisation :

- des stations hydrométriques gérées par la DREAL Bourgogne Franche-Comté avec un parc dense et des chroniques anciennes pour certaines stations permettant une approche diachronique et des comparaisons sur des variables d'étiages historiques. En complément de ces chroniques de débits, la chronique des cotes du lac de Chaillexon (en aval de Morteau) sera également utilisée : elle permet de travailler sur des données vieilles de plus d'un siècle ;
- des postes pluviométriques (parc Météo-France) bien répartis à l'échelle du territoire investi et sur lesquels près de 40 ans de données ont été compilées pour être comparées à l'année 2018.

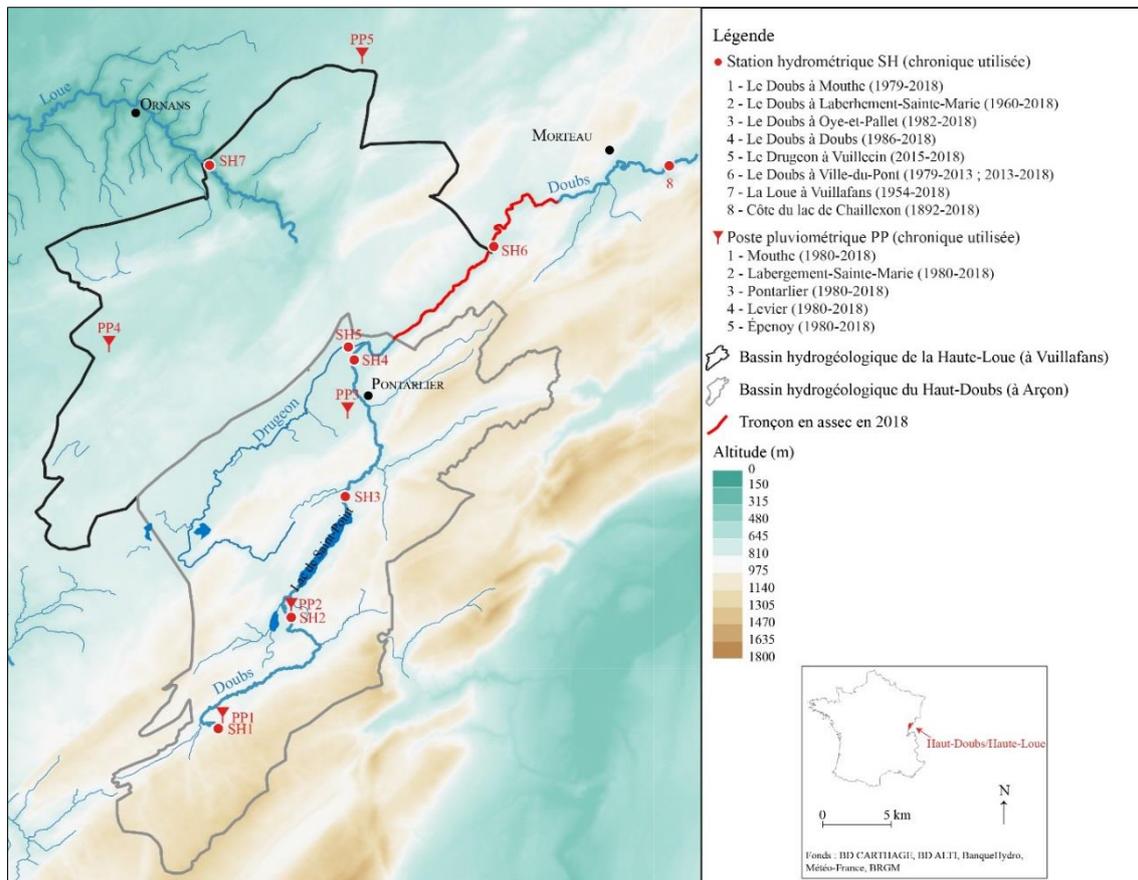


Figure 2 : Carte de présentation des bassins Haut-Doubs et Haute-Loue. Réseau hydrographique et localisation des stations pluviométriques et hydrométriques utilisées

³ En 1901, l'incendie de l'usine Pernod de Pontarlier a contraint les exploitants à déverser quelques 600 m³ d'absinthe dans un puits perdu de l'usine réapparus le surlendemain à la source de la Loue (Berthelot, 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 ».

1 Des échanges karst-rivières irréguliers dans l'espace et dans le temps

1.1 Un secteur hydrogéologiquement complexe

La Haute-Chaîne du Jura dans la région de Pontarlier s'inscrit dans les formations du Jurassique et du Crétacé au sein desquels s'agencent des calcaires et des marnes localement coiffés par du matériel glaciaire quaternaire (Figure 3). Les hétérogénéités lithologiques induisent des contrastes de perméabilité et un étagement de quatre systèmes aquifères partiellement cloisonnés et d'importance inégale.

- L'aquifère du Dogger (Jurassique moyen), contenu par les marnes du Lias, constitue à l'échelle régionale un des deux principaux systèmes aquifères karstiques. A l'échelle de la zone d'étude, les calcaires qui arment cet aquifère affleurent dans certains axes anticlinaux mais aussi et surtout dans le défilé du Coin de la Roche avec des répercussions manifestes sur les conditions d'émergence en aval de la zone perdante (cf. infra, Figure 4).

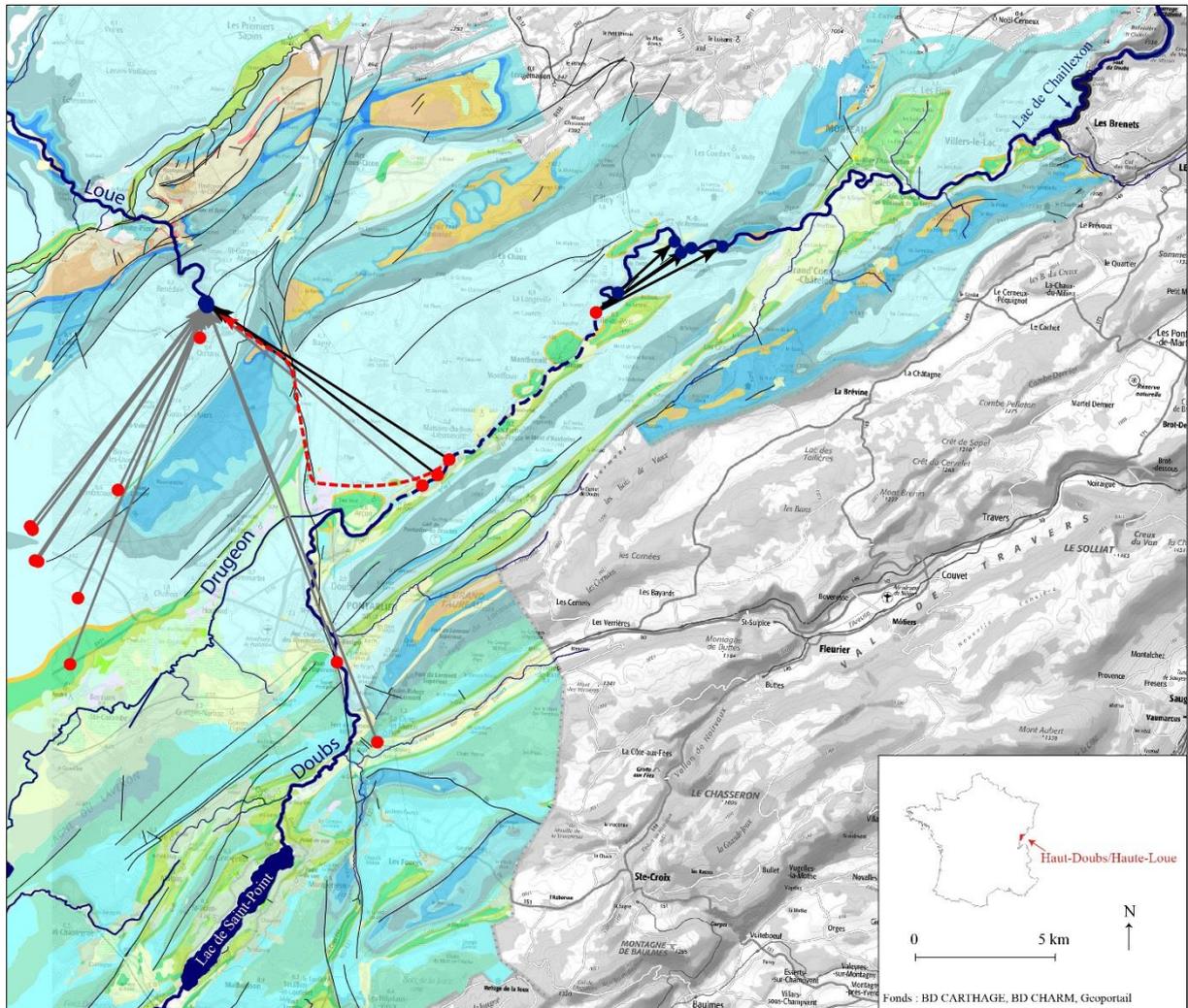
- L'épaisse série des marnes oxfordiennes (100-150 m) segmente⁴ l'aquifère du Dogger de celui du Malm (Jurassique supérieur) qui constitue le second aquifère karstique de très grande importance. De près de 400 m d'épaisseur, il est constitué de séries franchement calcaires (faciès Rauracien, Tithonien) recoupées par des bancs plus marneux du Kimméridgien. C'est au sein de ces différents étages que l'on identifie les principaux phénomènes hydrokarstiques du secteur : les pertes du Doubs en aval de Pontarlier, la source de la Loue, les émergences en amont du Coin de la Roche (grotte de la Colombière, grotte du Coin de la Roche, grotte du Pont du Diable, source de la Corchère).

Plus marginalement, deux autres séries de formations surmontent ponctuellement les deux principaux aquifères jurassiens :

- Les formations du Crétacé marquées par une alternance de bancs marneux (type faciès Purbeckien du Berracien, marnes de l'Hauterivien) et de bancs calcaires (étage du Valanginien). L'impact de ces formations sur l'hydrogéologie locale est considéré comme négligeable, les quelques affleurements carbonatés du Valanginien plaqués dans le val du Saugeais⁵ sont drainés par des sources aux débits très indigents (par rapport aux phénomènes hydrokarstiques précités).
- Les formations glaciaires (matériel morainique) et surtout fluvio-glaciaires avec dans le secteur le delta glacio-lacustre de Pontarlier dans lequel se développe la nappe de l'Arlier et du Dugeon. En fonction de la granulométrie de la base des dépôts (fluvio)glaciaires (argiles/limons/sables/blocs), des connexions avec les calcaires sous-jacents sont possibles.

⁴ À l'échelle du massif, des variations latérales de faciès et/ou la tectonique permettent des connexions hydrauliques entre ces deux aquifères.

⁵ Correspond au nom du synclinal dans lequel s'écoule le Doubs entre les villages d'Arçon et Ville-du-Pont.



Légende

Géologie

Quaternaire

- Fz, Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, graviers, sables, argiles
- FJy, Cône fluvio-glaciaire de Pontarlier (Würm)
- Gy/GyJ/GLy1 Moraine terminale (Mouthier) (Würm) / Moraines jurassiennes et cailloutis (GrandCombe-Châtelet, Montlebon, synclinal des Alliés) (Würm) / Alluvions de delta glacio-lacustre de Pontarlier (Würm)

Crétacé inférieur

- n3, Calcaires bioclastiques glauconieux ou ferrugineux, associés à des marnes dans la vallée de l'Ognon et la dépression de la Saône, marnes grises à *Exogyra couloni* (Marnes d'Hauterive) (Hauterivien)
- n2, Calcaires roux oolithiques à *Pholadomya elongata*, ferrugineux, exploités aux Grangettes et à Oye-et-Pallet, équivalent moins riche de la "limonite de Métabiel" (Valanginien)
- n1, Calcaires fétides, dolomitiques, brèches à cailloux noirs, argiles verdâtres, marnes claires, faune saumâtre et d'eau douce : *Cerithium*, *Turritella*, *Planorbis*, *Cyprina* ; lentilles de gypse des Fins (exploité) (Purbeckien) (Berriasien)

Jurassique supérieur

- j6-7, Calcaires, calcaires dolomitiques, marnes à *E. virgula* (Portlandien-Kimmeridgien indifférenciés)
- j7/j6 Calcaires à tubulures café-au-lait flammés (à *Gravesia*) (couche de Chailley) et calcaires hydrauliques (à la base, calcaires dolomitiques (cargneules) lacustres au sommet (Tithonien), Calcaires massifs à débris, calcaires grés-marneux, crayeux des gorges de Noailles, calcaires massifs détritiques (Virgulien & Piérocien) (Kimmeridgien)
- j6b1, Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à *Ptéroceras*) (Kimmeridgien supérieur, Piérocien)
- j5c-6aR / j5c2-6aM / j5c1S, Calcaires graveleux plus ou moins crayeux, gréseux et marnes (Pierre blanche de Risoux, marnes et calcaires de Besançon) (faciès Séquanien indifférencié, Oxfordien supérieur-Kimmeridgien inférieur) / Marnes grises et calcaires gréseux, oolithiques, lumachelles ou argileux bioclastiques (Séquanien moyen, Oxfordien terminal-Kimmeridgien basal) / Calcaires fins blancs crayeux, calcaires graveleux jaunes, se terminant par une dalle calcaire gréseuse, Calcaires de Clerval, tidalites de Mouchard, Calcaires de l'Isle-sur-le-Doubs (Séquanien inférieur, Oxfordien supérieur basal)
- j5c1R, Calcaires oolithiques et calcaires à Polypiers, calcaires récifaux, calcaires noduleux, oolithiques (-de Pagnoz), pisolitique (Rauracien) (Oxfordien supérieur)
- j5bA, Marnes et marno-calcaires (couches d'Ellfingen et du Geissberg), Astartes, calcaires hydrauliques et couches à sphérites (Argovien) (Oxfordien moyen)
- j5a, Marnes gris-noir à ammonites pyriteuses, *Creniceras renggeri* (Oxfordien inférieur)

Jurassique moyen et inférieur

- j3-4b/j4a Calcaires (Callovien inférieur et Bathonien non différenciés) / Calcaires localement oolithiques, lumachelles, marnes, "Dalle nacrée", lacunes (Callovien inférieur)
- j3, Calcaires compacts, parfois bicolores, oolithiques, spathiques, marnes, calcaires à *Momies*, calcaires à silex (Bathonien)
- j2b / j2a, Calcaires oolithiques (Grande oolithe) à entroques, petites huîtres, marnes à *O. acuminata* (Vésulien), subfurcatum, *Garantia*, *Parkinsonia*, lacunes (Bajocien supérieur) / Calcaires à entroques (de Vésoul) au nord, polypiers, calcaires à silex (de Messia), calcaires spathiques (à *Sowerby*) (Bajocien inférieur)
- j1 / j1b calcaires ferrugineux inférieurs, calcaires roux sableux, calcaires oolithiques, puis minéral de fer et calcaires supérieurs de Tourmans et Rougemont (Aalénien) / Calcaire et minéral de fer, mines de Laissey, Deluz (Aalénien supérieur)
- 14-j1, Marnes (Toarcien-Aalénien indifférenciés)

Traçages

- Traçage historique
- Traçage récent (2018)
- Point de restitution
- Point d'injection
- ~ Interprétation des orientations d'écoulement (d'après Cabinet Reilé, 2018)

Figure 3 : Géologie du secteur perdant et traçages environnants

À l'hétérogénéité hydrogéologique s'ajoute l'impact de la tectonique et notamment du décrochement de Pontarlier qui interrompt en profondeur la continuité des marnes du Lias et permet la capture des eaux du Doubs par la Loue (Chauve repris dans Campy et Bichet, 2008). Plutôt que de revenir sur les nombreuses campagnes de traçages qui depuis le début du 20^e siècle attestent des connexions hydrauliques entre ces deux cours d'eau (Fournier, 1913 ; Jacquemin, 1984 ; Mettetal, 1986), le choix est fait ici de s'attarder sur les campagnes de coloration qui ont été réalisées en 2018 par le cabinet Reilé (2018) lors de la période d'assec :

- Une première campagne a eu lieu le 17/09/2018 avec une double injection (fluorescéine et rhodamine) dans deux diaclases⁶ localisées dans le lit mineur du Doubs en aval du village d'Arçon. La réapparition des colorants a été constatée par suivis fluorimétriques et analyses spectrométriques au niveau des sources de la Loue (Loue vasque et Loue canal) plus de 20 jours après l'injection, le délai important étant fortement corrélé aux conditions initiales très sèches. L'allure en cloche des courbes de restitution couplée à des taux de restitution importants (particulièrement pour la fluorescéine) témoignent selon l'opérateur d'un écoulement qui s'opère dans un drain karstique très transmissif orienté selon les axes tectoniques locaux soit depuis la gouttière synclinal du Saugeais vers le décrochement de Pontarlier (cf. Figure 3).
- Une deuxième campagne de traçages a été réalisée les 23 et 24 octobre 2018 avec des introductions de colorants réalisées en aval de Maison-du-Bois (en aval de la première campagne) dans le lit mineur du Doubs toujours à sec. La grande originalité de ces investigations a été de permettre l'identification d'une capture infra-talweg et intrabassin puisque du Doubs vers le Doubs : le passage des colorants ayant été reconnu sur au moins cinq exutoires localisés dans le lit du cours d'eau (Puits de Sombrenon, sources de Remonot, du Pont du Diable, de la Corchère, grotte de la Colombière) entre les villages de Ville-du-Pont et Grand-Combe-Châteleu.

Ces deux campagnes ont donc permis d'identifier un double système de capture du Doubs vraisemblablement en lien avec l'inversement d'inclinaison de l'axe synclinal du Saugeais (Cabinet Reilé, 2018) qui impliquerait un partage des eaux souterraines entre :

- un premier tronçon en amont du Maison-du-Bois qui correspond à la zone de capture principale, celle du Doubs par la Loue (phénomène reconnu depuis 1901) ;
- un second tronçon en aval du Maison-du-Bois marqué par l'auto-capture du Doubs par les émergences karstiques localisées en amont du défilé du Coin de la Roche dans le talweg du cours d'eau.

Afin de mieux circonscrire cette limite et les dynamiques de capture du secteur, le bureau d'études propose par ailleurs une double approche : sismique pour mieux appréhender les ondulations de l'axe synclinal du Saugeais et hydrogéologique par un forage profond qui permettrait de mesurer les variations de la zone saturée dans le karst du Jurassique supérieur.

⁶ Ces deux zones de pertes localisées ont par ailleurs été busées en juillet 2018 pour atténuer les débits perdants sur le secteur Arçon/Maison-du-Bois.

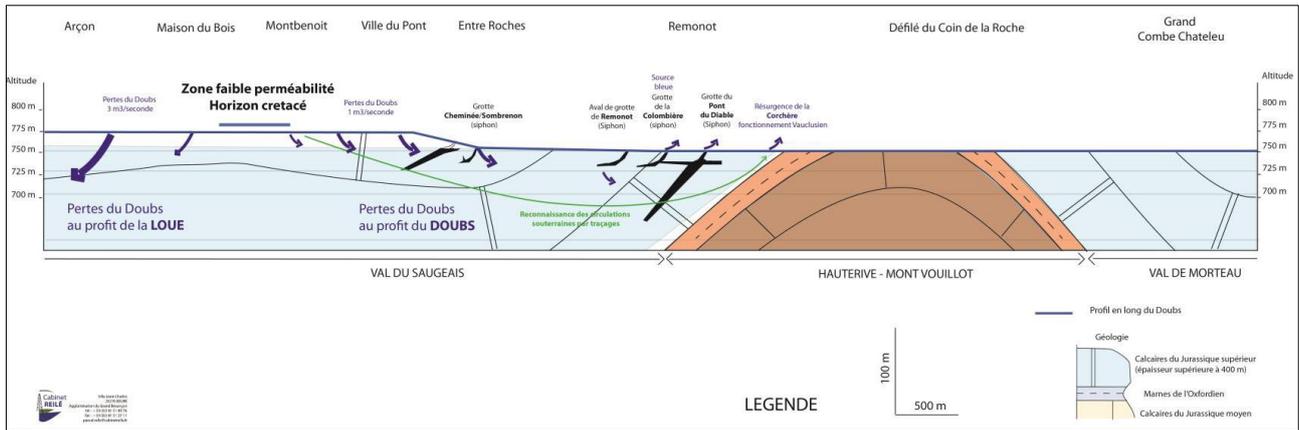


Figure 4 : Coup interprétative des phénomènes de capture des eaux du Haut-Doubs (d'après Cabinet Reilé, 2018)

1.2 L'irrégularité des débits échangés entre surface et souterrain

Variabilité spatiale des modalités d'infiltration et de restitution mais aussi forte variabilité temporelle puisque le recours aux jaugeages différentiels (Chauve et *al.*, 1980 ; Jacquemin, 1983 ; DIREN, 1995) a permis de sérier un peu mieux les volumes fuyants en fonction des contextes hydrologiques. En 2006, Chauve propose par ailleurs une synthèse de ces travaux que reprend la figure 5.

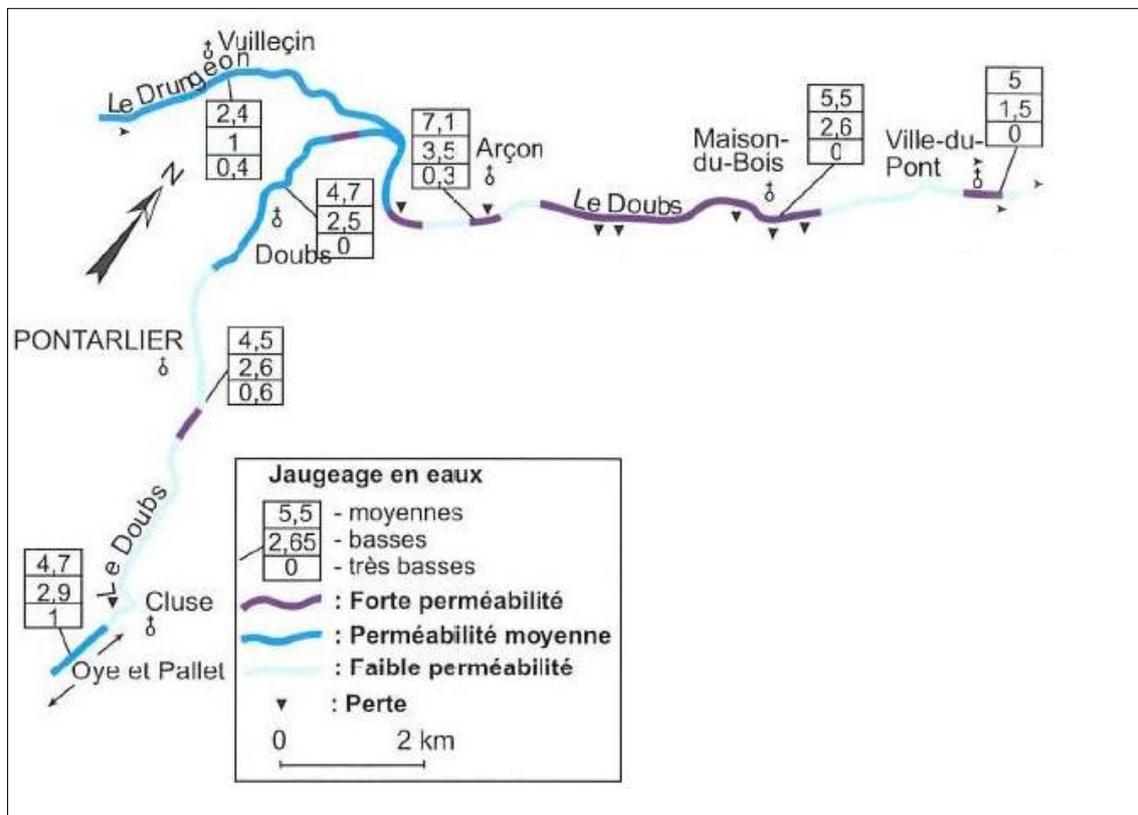


Figure 5 : Jaugeages différentiels le long du Doubs au niveau des secteurs perdants (d'après Chauve, 2006)

Les différentes études portées sur le secteur synthétisées partiellement la figure 5 évoquent :

- L'hétérogénéité hydrogéologique du tronçon entre Oye-et-Pallet et Ville-du-Pont. S'opposent des secteurs de faible perméabilité à des secteurs de très forte perméabilité où se localisent les principales zones perdantes notamment entre Arçon et Maison-du-Bois.
- Le comportement hydrologique de la zone de capture principale. Les différentes campagnes de jaugeages menées sur le secteur ont ainsi permis de préciser dans des contextes hydrologiques contrastés (situations de moyennes, basses et très basses eaux) les débits soustraits au Doubs.

Même si c'est principalement le contexte de (très) basses eaux qui intéresse la démarche, la question de l'estimation des pertes du Doubs (quel que soit le contexte hydrologique) demeure prépondérante. Elle a donné lieu à différents modèles que la figure 6 illustre et qui est utile de rappeler :

- Dans le cadre de sa thèse, Jacquemin (1984) propose un premier modèle de relation entre les débits en aval et en amont du secteur perdant d'Arçon établi à partir de jaugeages différentiels. Selon l'auteur, le débit des pertes augmente proportionnellement au débit du Doubs et ce jusqu'à un seuil estimé à 3,5 m³/s, les débits fuyants sont alors estimés à 2 m³/s. Au-delà de cette valeur seuil, les débits perdants décroissent pour atteindre une valeur nulle pour un débit du Doubs d'environ 30 m³/s, Jacquemin voit dans cette décroissance des débits perdants un refus d'infiltration en lien avec une saturation des calcaires sous-jacents.
- En 1995, la DIREN propose à son tour un modèle d'estimation des pertes basé sur l'analyse différentielle des débits journaliers. À l'instar du modèle Jacquemin, le modèle DIREN propose une relation linéaire entre l'augmentation des débits perdants et les débits du Doubs jusqu'à un plafonnement autour de 3 m³/s. Plutôt qu'un refus d'infiltration lié à une saturation du karst, les auteurs justifient cette valeur seuil par une capacité maximale d'infiltration.
- En 2014, le BRGM dans son rapport en appui au SCHAPI (Charlier *et al.*, 2014), propose une nouvelle approche via un modèle de propagation des écoulement latéraux. Sans rentrer dans le détail de la calibration et des hypothèses discutées, le modèle s'attache à simuler les pertes ou apports⁷ sur le tronçon en aval d'Arçon par l'exploitation des données de débits horaires des stations amont/aval (soit Doubs-Vuillecin/Ville-du-Pont). Sur cette base, les auteurs réévaluent grandement les chiffres avancés dans les années 80/90 avec des débits instantanés potentiels de perte de l'ordre de 8 m³/s⁸. Aussi, dans un rapport à paraître prochainement (Charlier, communication personnelle), le BRGM poursuit cette démarche de modélisation en couplant cette fois les données débitométriques avec les données du

⁷ Une rapide comparaison entre les données de débits des stations encadrant le principal secteur perdant (débit du Doubs à Doubs + débit du Drugeon à Vuillecin *versus* débit du Doubs à Ville-du-Pont) permet d'identifier des séquences hydrologiques « classiques » pour le secteur (débit amont < débit aval : fonctionnement en perte) mais aussi des séquences hydrologiques (notamment lors de certaines crues) au cours desquelles le débit en aval est plus important que le débit amont rendant probable l'hypothèse d'un fonctionnement émissif des phénomènes hydrokarstiques du secteur en lien avec une saturation de tout ou partie (épikarst) du système. L'article s'attachant à mieux identifier les mécanismes en jeu lors de l'épisode d'étiage 2018, ce type de fonctionnement en crues ne sera pas discutée dans la suite du document.

⁸ Ce chiffre est celui proposé en prenant en considération une incertitude sur l'estimation des débits de l'ordre de 10 %. Sur les données brutes, les estimations du modèle proposent des chiffres de débits instantanés potentiels de perte supérieurs à 15 m³/s.

réseau QUARSTIC⁹ (notamment les données Ptot et PO4), utilisées dans la démarche comme traceurs hydrogéochimiques entre les pertes du Doubs et la source de la Loue). Les résultats obtenus semblent confirmer les chiffres avancés en 2014 avec un modèle qui estime des volumes perdus en aval d'Arçon pouvant atteindre des valeurs comprises entre 5 et 10 m³/s, valeurs contraintes là-aussi selon les auteurs par la capacité maximale d'infiltration des pertes.

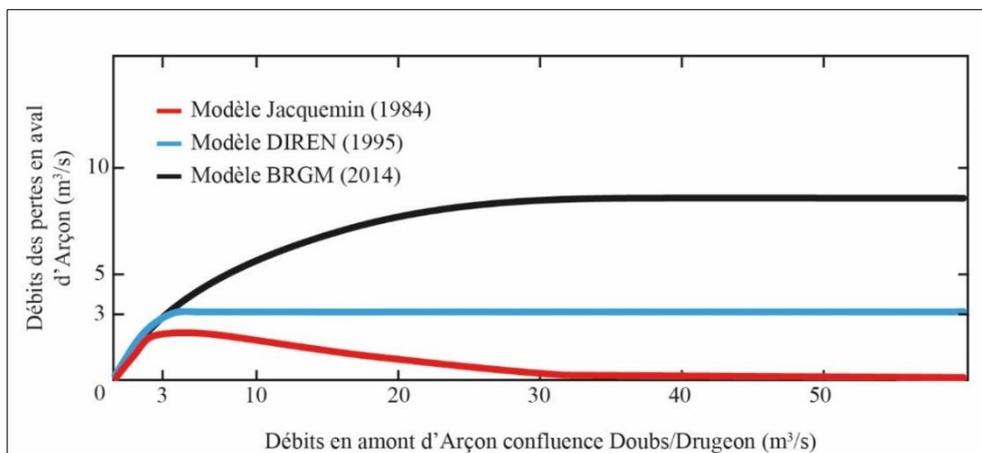


Figure 6 : Modèles d'estimation des pertes du Doubs sur le secteur d'Arçon (inspiré de Charlier et al., 2014)

Dans la perspective de mieux comprendre la situation de 2018 et pour faire écho aux modèles précités une première approche pourrait être de considérer qu'en deçà de 2,5 m³/s à Arçon (situation de basses eaux) les pertes sont totales (Mettetal et Mudry, 1998).

Une valeur seuil semble toutefois difficile à énoncer, les conditions de tarissement total étant variables à l'échelle des chroniques hydrologiques et dépendantes des conditions initiales¹⁰. En comparant l'allure des courbes de tarissement des assecs historiques, Le Barbu *et al.*, (2018) identifient clairement une variabilité des conditions de tarissement total avec une forte singularité de l'épisode de 2018 pour lequel la dynamique a été la plus rapide jamais enregistrée¹¹. Il faut donc envisager des conditions d'infiltration interannuelles évolutives au droit des pertes du secteur, phénomène à relier avec les dynamiques propres au karst du lit mineur et dans lequel des décolmatages des fissures/fractures des horizons carbonatés s'opèrent vraisemblablement. En 2018, le tarissement rapide aurait donc comme origine une majoration des capacités d'infiltration du secteur contrôlée par l'augmentation des soutirages karstiques. Cette hypothèse est étayée par des prospections de terrain menées lors de l'été 2018 notamment par les associations de pêche locale qui ont inventorié de nouvelles zones d'infiltration concentrées¹² et non reconnues jusqu'alors par les prospections qu'elles soient spéléologiques et/ou géophysiques (SMEA de la Saône et du Doubs, 1995)¹³.

⁹ Le réseau QUAlité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises est un réseau de suivi des paramètres physico-chimiques et nutritives déployé sur les bassins Haut-Doubs/Haute-Loue à partir de 2015 (<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68315-FR.pdf>).

¹⁰ Une valeur seuil implique également fiabilité et continuité de l'estimation débitométrique, or en très basses eaux les conditions de mesure sont souvent difficiles et les marges d'erreur plus importantes, c'est le cas notamment des stations hydrométriques du Doubs à Doubs ou du Drugeon à Vuillecin (Cabinet Reilé, 2012).

¹¹ Ceci malgré le soutien d'étiage apporté au Doubs par les vannages réalisés au droit du lac de Saint-Point dès le mois de juin.

¹² Les deux diaclases busées en 2018 et dans lesquels les traçages d'août ont été réalisés (§ 1.1) comptent parmi ces pertes nouvellement répertoriées.

¹³ Certaines zones de pertes concentrées sont connues de longue date telles les pertes du Gros Foyard ou de la Héronnière.

Aussi, l'assec 2018 fait suite à un hiver particulièrement arrosé et au cours duquel plusieurs crues d'occurrence importante (d'ordre décennale) ont été enregistrées en janvier de cette même année. Ce contexte hydroclimatique particulier (crues hivernales importantes suivies d'un assec historique) procède d'un scénario vraisemblable qu'illustre la figure 7 avec un décolmatage du matériel sédimentaire fin contenu dans la fissuration/fracturation du karst aboutissant à une augmentation des capacités d'infiltration du secteur.

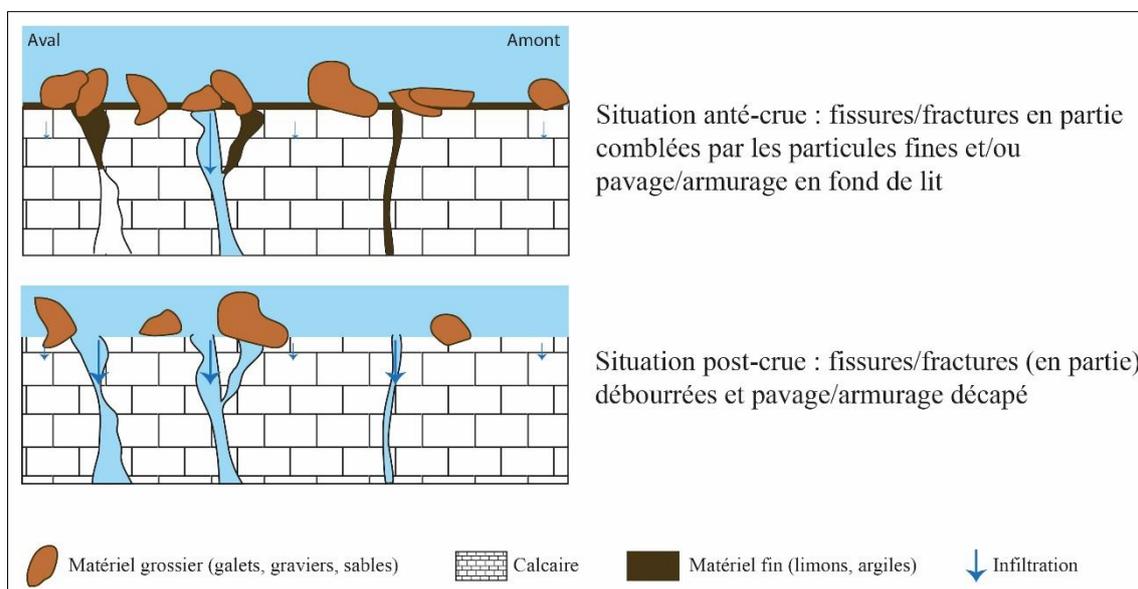


Figure 7 : Scénario d'évolution du profil du long du secteur perdant au cours de l'année 2018

Dans cet ordre d'idée, Le Barbu *et al.*, (2018) ont mis en vis-à-vis les épisodes d'assec importants avec le contexte hydrologique qui les précède et les auteurs ont conclu que seule l'année 1990 présente une configuration comparable (*i.e.* un épisode d'assec faisant suite à des crues d'occurrence significatives) à celle de l'année 2018 et ainsi que « *les phases d'augmentation des débits des pertes du Doubs ne trouvent donc pas systématiquement d'explicitation hydrologique* ». S'il était tentant de réaliser un tel rapprochement sur la succession crues-assecs, notons que i) le caractère morphogène d'une crue n'est pas directement corrélé à l'ampleur du phénomène¹⁴, ii) les phénomènes de colmatage/débouillage du karst du lit mineur procèdent de dynamiques complexes qu'il est difficile d'apprécier sans une approche hydrogéomorphologique fine de suivis des dynamiques sédimentaires¹⁵. Nous ne considérons donc pas que le scénario proposé en figure 7, s'il demeure hypothétique, soit remis en cause par l'article précité.

Pour conclure cette partie, nous retiendrons, des études anciennes et récentes menées sur le secteur, la forte variabilité dans le temps et dans l'espace des échanges hydriques entre la surface et le souterrain sur le Doubs en aval de Pontarlier. Cette variabilité est conditionnée par des paramètres structuraux (lithologique/tectonique/karstique) et conjoncturels (contexte hydroclimatique) et c'est naturellement que l'étude se poursuit par la caractérisation statistique des données de débits et de précipitations.

¹⁴ Le débit le plus morphogène est souvent considéré dans la littérature comme le débit à pleins bords qui est un débit d'occurrence relativement faible (2-5 ans).

¹⁵ En considérant de potentielles périodes d'émissivité du secteur (cf. note de bas de page 7), il est également envisageable que les phénomènes de décolmatage se réalisent *per ascensum* : l'évacuation des sédiments se réaliserait du bas vers le haut lors de la mise en charge de l'épikarst.

2 Un épisode hydroclimatique remarquable

Si une première appréciation de la profondeur de l'assec 2018 peut être réalisée à l'aune de la couverture médiatique de l'épisode¹⁶, un travail statistique sur les données hydroclimatiques locales est nécessaire pour quantifier plus finement l'importance du phénomène. Les localisations et caractérisations des stations sur lesquelles est basé ce travail statistique sont présentées en figure 1.

2.1 Un étiage historique

L'intensité, dans le temps et dans l'espace, de l'assec 2018 est directement corrélé aux débits historiquement bas enregistrés en amont du secteur perdant et ceci pendant plusieurs mois. Afin de mesurer cette intensité il faut quantifier la profondeur de l'étiage. Pour ce faire de nombreuses variables peuvent être utilisées (Abi-Zeid et Bobée, 1999 ; Pyrce, 2004 ; Lang, 2007). Dans ce document le choix a été fait de travailler sur les VCN_d soit les débits moyens minimums de l'année calculés sur d jours consécutifs. Ce choix permet :

- de s'affranchir des contraintes calendaires, le VCN_d contrairement au débit moyen mensuel le plus bas de l'année (QMNA qui est la variable la plus couramment utilisée pour caractériser les étiages en France notamment sa fréquence 1/5^e) se calcule sur des moyennes mobiles ;
- de quantifier et de comparer facilement la sévérité de l'étiage 2018 sur des durées différentes aux différentes stations. Ici, les VCN_3 , VCN_{10} , VCN_{30} et VCN_{60} ont été évalués sur quatre stations du Haut-Doubs (Mouthe, Labergement-Sainte-Marie, Oye-et-Pallet, Doubs) et une station de la Haute-Loue (Vuillafans).

La figure 8 illustre les différents VCN utilisés dans le cadre de la caractérisation statistique de l'étiage 2018.

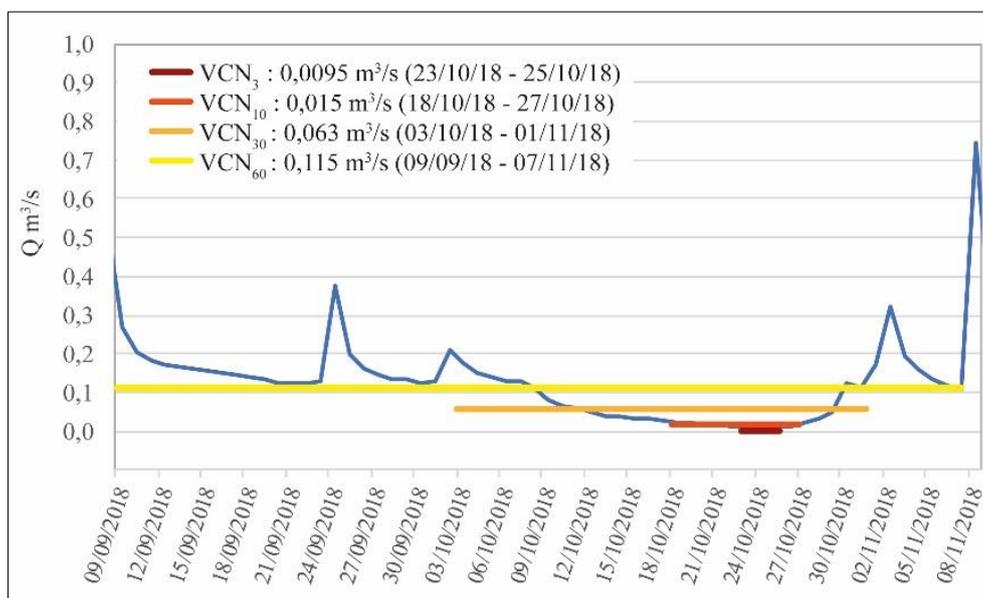


Figure 8 : Caractérisation de l'étiage 2018 par l'utilisation des VCN_d : exemple de la station du Doubs à Mouthe (septembre/novembre 2018)

¹⁶ La couverture médiatique de l'épisode a été importante notamment par l'Est Républicain (édition du Haut-Doubs) comme en attestent par exemple les parutions (papier et numérique) des 08/07/2019, 02/08/2018, 13/09/2018, 29/10/2018.

Dans la perspective de comparer les étiages des cinq stations retenues, les différents VCN ont été triés en assignant à chaque valeur le rang qu'elle représente (Tableau 1).

	Doubs à Mouthe				Doubs à Labergement-SM				Doubs à Oye-et-Pallet				Doubs à Doubs				Loue à Vuillafans			
	VCN3	VCN10	VCN30	VCN60	VCN3	VCN10	VCN30	VCN60	VCN3	VCN10	VCN30	VCN60	VCN3	VCN10	VCN30	VCN60	VCN3	VCN10	VCN30	VCN60
1954																	35	28	41	28
1955																	55	56	58	47
1956																	65	65	65	65
1957																	49	47	47	39
1958																	62	62	64	64
1959																	40	35	25	13
1960					50	54	47	50									12	13	18	19
1961					9	10	17	20									11	17	20	29
1962					3	3	3	3									1	1	1	1
1963					53	48	57	46									45	46	35	32
1964					4	4	2	2									4	4	4	3
1965					56	53	55	54									50	53	57	60
1966					30	29	29	29									25	26	42	43
1967					15	24	36	30									28	27	23	20
1968					33	40	49	47									46	45	50	48
1969					11	11	13	28									19	15	16	24
1970					59	59	59	59									56	49	46	59
1971					6	6	10	10									8	7	9	7
1972					1	2	5	5									2	2	3	5
1973					44	49	54	45									35	37	40	26
1974					52	57	51	51									39	36	33	37
1975					47	51	50	49									41	44	48	52
1976					10	12	9	12									13	11	11	11
1977					43	46	41	43									52	51	49	55
1978					27	30	24	17									14	12	12	17
1979	33	40	40	40	32	32	23	26									21	20	24	38
1980	14	19	31	30	54	52	48	42									61	64	63	58
1981	5	7	13	28	39	37	37	52									53	54	56	61
1982	35	38	38	35	57	55	56	58	37	37	37	37					64	61	55	50
1983	9	8	9	19	49	43	38	41	2	2	5	25					29	29	32	31
1984	17	25	19	15	45	47	34	24	14	12	11	9					18	24	21	12
1985	7	5	3	4	17	22	16	13	3	3	2	4					7	8	7	10
1986	12	14	23	20	25	21	18	15	23	22	20	19	10	9	10	10	16	14	13	21
1987	34	35	35	38	29	33	52	57	18	20	31	35	11	16	32	32	59	59	61	63
1988	21	23	21	32	38	42	43	48	15	17	17	30	5	13	12	27	57	55	51	44
1989	3	3	2	3	5	5	4	4	4	4	3	2	3	3	3	2	9	10	10	9
1990	6	6	11	7	16	13	14	7	8	7	6	14	21	18	8	8	27	33	34	27
1991	4	4	5	6	7	8	6	6	17	15	12	12	8	7	6	7	32	39	26	41
1992	2	2	4	23	46	39	33	36	31	29	24	18	16	17	11	13	43	41	44	45
1993	31	32	30	34	26	27	21	40	5	5	7	27	4	4	4	24	48	52	53	49
1994	18	18	22	14	14	16	28	21	25	28	28	21	7	10	18	14	20	19	17	18
1995	25	29	27	22	41	36	40	37	33	34	29	26	29	29	24	23	32	34	31	30
1996	32	28	18	8	51	50	39	25	27	31	27	23	13	26	25	22	37	40	39	33
1997	39	34	34	26	40	35	45	34	12	13	25	17	9	5	23	16	15	18	29	36
1998	19	17	14	13	34	31	25	22	16	14	10	6	17	12	7	5	6	6	8	8
1999	23	20	17	18	28	23	20	23	29	24	21	11	25	24	20	12	26	25	22	23
2000	38	37	36	31	48	44	42	38	20	19	19	24	28	28	26	26	50	50	59	51
2001	36	33	37	37	58	56	53	56	26	27	34	33	32	32	30	31	54	57	52	62
2002	27	26	28	17	37	34	31	27	22	21	15	15	12	8	19	21	42	42	37	34
2003	10	11	16	12	8	7	7	8	6	6	4	3	6	6	5	3	5	5	5	4
2004	22	21	25	11	19	19	22	14	19	17	16	10	24	23	13	6	22	21	19	14
2005	27	24	24	27	36	38	32	39	31	30	33	28	26	27	27	25	24	23	28	25
2006	30	27	32	21	42	45	44	35	34	33	30	29	19	20	29	28	29	32	43	40
2007	26	29	20	29	20	20	19	31	35	35	32	36	15	15	17	20	34	38	36	42
2008	40	39	39	36	55	58	58	55	36	36	36	34	33	33	33	33	58	60	62	56
2009	11	10	8	10	18	13	12	11	9	9	23	16	23	21	14	9	10	9	6	6
2010	13	15	26	25	22	18	30	32	12	10	14	22	22	19	16	17	38	31	30	46
2011	15	12	12	16	21	17	15	16	11	11	9	7	18	14	9	4	23	22	15	16
2012	29	31	29	24	24	25	26	33	21	23	18	20	20	22	22	18	47	48	45	57
2013	37	36	33	39	35	41	46	44	29	32	35	32	30	30	31	30	63	63	60	54
2014	24	22	15	33	31	28	35	53	24	25	26	31	31	31	28	29	60	58	54	53
2015	16	13	10	9	13	9	8	9	10	16	13	8	2	2	2	11	17	16	14	15
2016	20	16	7	2	12	15	11	19	28	26	22	13	27	25	21	19	44	43	38	35
2017	8	9	6	5	23	26	27	18	7	8	8	5	14	11	15	15	31	30	27	22
2018	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	2	2

Tableau 1 : Rangs des étiages en fonction des différents VCN appliqués aux stations du Haut-Doubs (le tableau indique, par année, le rang de la variable ; les trois premiers rangs sont mis en évidence par le dégradé de couleur).

Il est important de noter que les variations de rang entre les VCN pour une année donnée sont imputables à la durée de l'étiage : un épisode de très basses eaux peut être très sévère mais sur une courte durée. C'est le cas par exemple pour la station de Mouthe en 1992 qui présente des VCN₃ et VCN₁₀ classés au rang 2 mais un VCN₆₀ classé au rang 23. Un constat tout à fait similaire pourrait être fait sur la station du Doubs à Oye-et-Pallet pour l'année 1983. Mais l'information principale que véhicule le tableau 1 est le caractère exceptionnel de l'étiage 2018 qu'a subi le Haut-Doubs et que relaie la comparaison interannuelle des VCN sur les différentes stations. Ainsi, l'année 2018 est au premier rang pour toutes les durées de VCN et pour toutes les stations du Haut-Doubs (à l'exception du VCN₃ sur la station de Labergement-Sainte-Marie qui se place au 2^e rang) ce qui témoigne de la sévérité historique de l'étiage à l'échelle du bassin du Haut-Doubs et ceci à différentes échelles temporelles. Les valeurs de débits ont été historiquement basses que ce soit sur des temps très courts (VCN₃ et VCN₁₀) mais aussi et surtout sur des temps plus longs (VCN₃₀ ou VCN₆₀). Aussi, il est à noter que les VCN de durée 3 et 10 jours les plus critiques ont été enregistrés fin octobre/début novembre attestant d'un tarissement très long puisque démarrant dès le mois de juillet. C'est donc l'extrême indigence des débits du Doubs amont sur plusieurs mois qui est responsable de la durée de l'assec de 2018.

Une manière complémentaire de singulariser le caractère historique de l'étiage 2018 sur le Doubs est d'analyser les variations quotidiennes des cotes du lac de Chaillexon¹⁷ enregistrées depuis 1893. Une démarche analogue à celle appliquée aux débits des stations du Haut-Doubs a été réalisée : les hauteurs d'eau minimales du lac sur 3, 10, 30 et 60 jours consécutifs (HCN) ont été extraites de la chronique 1893/2018 puis classées par rang (des HCN₁₀) (Tableau 2). Sur plus de 120 années de données disponibles, l'année 2018 se classe au deuxième rang (derrière 1906¹⁸) des années au cours desquelles les cotes du lac ont été les plus basses et ceci à toutes les échelles de temps considéré (3, 10, 30 et 60 jours)¹⁹.

Année	HCN3	HCN10	HCN30	HCN60
1906	1	1	1	1
2018	2	2	2	2
1893	3	3	6	7
1911	4	4	3	5
1949	5	5	5	4
1947	6	6	7	6
1962	7	7	4	3
1898	8	8	8	10
2009	12	9	9	8
1923	9	10	12	13

Tableau 2 : Rangs des étiages en fonction des différentes HCN appliquées aux hauteurs d'eau enregistrées au droit du lac de Chaillexon (seules dix années ont été consignées : celles au cours desquelles les HCN₁₀ ont été les plus basses).

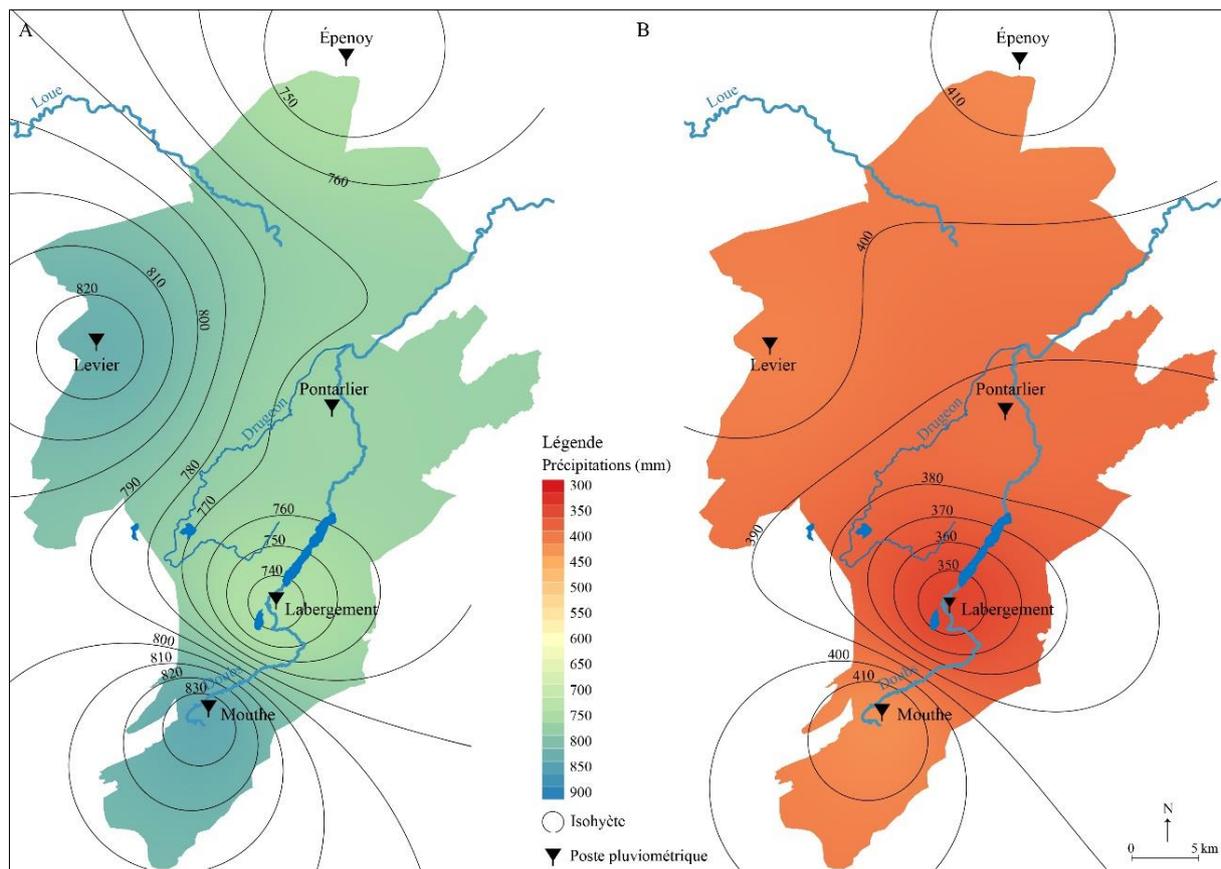
¹⁷ Le lac est localisé sur la commune de Villers-le-Lac (25) côté français et sur celle des Brenets (côté Suisse, canton de Neuchâtel) en aval du secteur perdant (Figure 3). Lac naturel, il est circonscrit en aval par un barrage naturel : l'éboulement du Saut-du-Doubs.

¹⁸ Quelques photos remarquables de l'étiage de 1906 sont disponibles sur cette page : <https://www.estrepublikain.fr/edition-haut-doubs/2018/09/13/doubs-a-sec-la-situation-exceptionnelle-de-1906>.

¹⁹ Ces résultats sont à légèrement pondérer en raison des interventions récentes (2001 et 2003) visant à colmater les nombreuses pertes naturelles du barrage dans la perspective de maintenir une cote minimale pour l'exploitation touristique du site, interventions qui ont peut-être eu une incidence sur la profondeur des étiages de ces quinze dernières années.

2.2 Une pluviométrie largement déficitaire

Il est difficile de s'intéresser à un étiage historique sans préciser quelque peu le contexte climatique de la période considérée. Les tendances décrites ci-après reposent sur l'analyse des données de précipitations (et de température plus marginalement) de cinq postes pluviométriques qui permettent de circonscrire la zone d'étude : ceux de Mouthe, Labergement-Sainte-Marie, Pontarlier, Levier et Épenoy (figure 9). Une spatialisation²⁰ des précipitations a été réalisée à partir des données des cinq postes précités. Dans un premier temps (figure 9A), la spatialisation a été portée sur les données de précipitations moyennes cumulées de la période juin/novembre et ceci à l'échelle des chroniques disponibles (1980-2018). Il en ressort qu'à cette échelle temporelle les précipitations sont relativement homogènes à l'échelle du territoire d'étude avec des totaux de l'ordre de 750/850 mm sur les six mois considérés²¹. Les quelques différences observées entre postes sont le reflet des contrastes orographiques (Haute-Chaine/plateau) et des effets d'exposition (crête) ou d'abri (fond de vallée). Dans un second temps (figure 9B), la même période de six mois a été prise en compte mais la spatialisation des précipitations aux cinq postes a été réalisée avec les données 2018. Ce qui se dégage avant tout ce sont les faibles totaux pluviométriques qui s'échelonnent en 2018 de 350 mm à 410 mm. Par rapport aux normales, le différentiel est de l'ordre de 400 mm/6 mois et touche l'ensemble de la zone d'étude soit un déficit pluviométrique extrêmement important et homogène à l'échelle des bassins Haut-Doubs et Haute-Loue.



²⁰ La méthode de spatialisation qui a été utilisée est l'inverse distance pondérée.

²¹ Les précipitations moyennes annuelles (1980-2018) s'échelonnent de 1713 mm (station de Mouthe) à 1405 mm (station d'Épenoy).

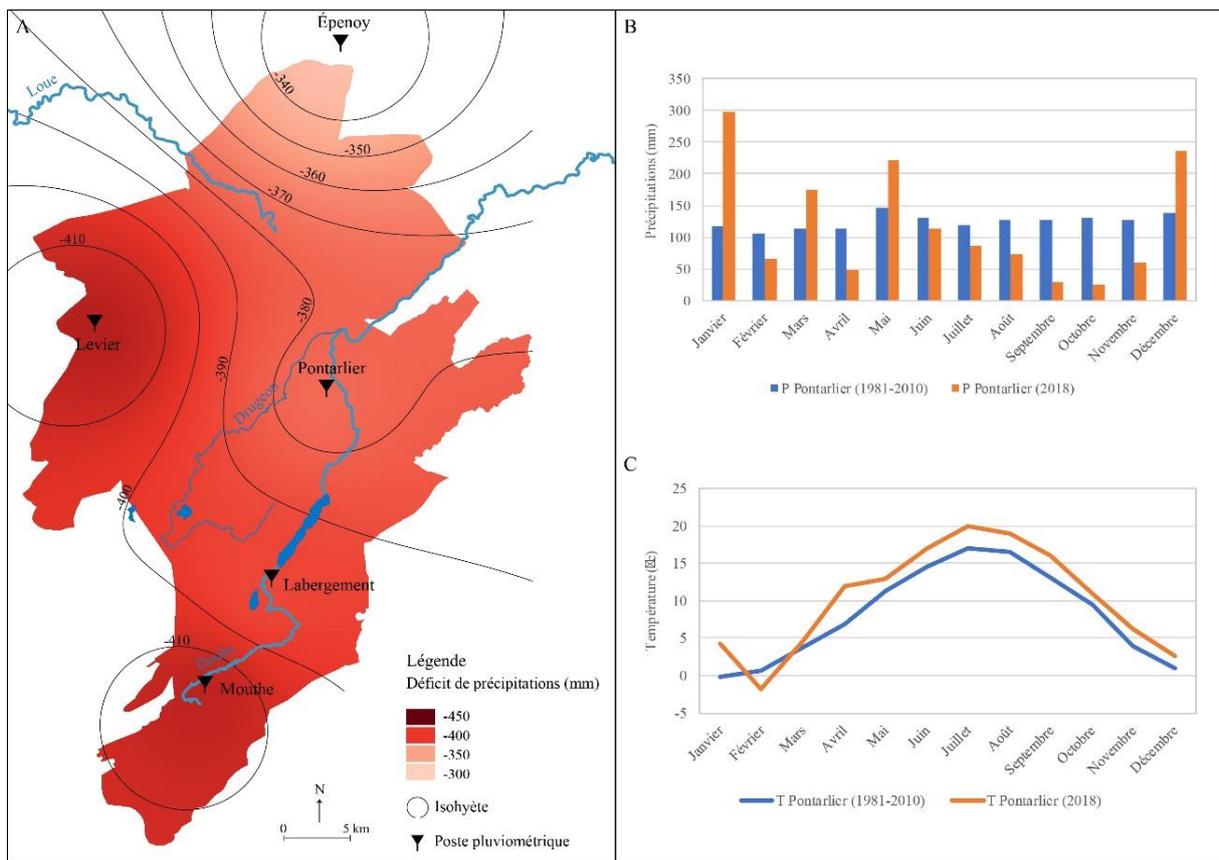


Figure 10 : A- Le déficit de précipitations de l'année 2018 par rapport aux moyennes 1980-2018 (période juin-novembre). B - Comparaison des précipitations mensuelles sur la même période à la station de Pontarlier. C- Comparaison des températures à la station de Pontarlier

L'observation des variations mensuelles 2018 des précipitations au poste de Pontarlier (poste retenu car le plus central) par rapport aux normales (figure 10B) permet d'affiner quelque peu le diagnostic sur la singularité de la pluviométrie de l'année 2018. Ainsi, l'année commence par un mois de janvier très largement excédentaire (300 mm) qui explique par ailleurs en grande partie les très fortes crues enregistrées localement (d'ordre décennal voire vicennal selon les stations) sur le bassin du Doubs et les bassins environnants. S'ensuit une succession de quatre mois (février-mai) avec des contrastes marqués par rapport aux normales mais rien d'exceptionnel à l'échelle d'un quadrimestre : les mois déficitaires comme février et avril étant compensés par des mois de mars et mai plus arrosés. Par contre, dès le début de la période estivale se conjugue à la fois une succession de mois (juin-juillet-août) légèrement moins arrosés qu'en période moyenne mais surtout la zone d'étude enregistre des températures anormalement hautes (figure 10C) (+2 à 3°C par rapport aux moyennes sur ces trois mois) qui exacerbent les phénomènes d'évapotranspiration. Il faut en conséquence envisager qu'une grande partie des précipitations estivales (déjà déficitaires) est reprise par les prélèvements évapotranspiratoires : les quelques épisodes pluvieux estivaux n'ont que peu/pas d'impact sur les débits. Après cette première phase estivale largement déficitaire suit une phase critique d'un point de vue pluviométrique. Les précipitations enregistrées lors des mois de septembre et d'octobre 2018 correspondent au 1/5 des précipitations moyennes sur cette période²², le

²² À la station de Pontarlier : 54 mm en 2018 pour 260 mm en moyenne pour ces deux mois sur la chronique 1982-2010.

tarissement largement amorcé lors de la période estivale se poursuit et aboutit aux étiages historiques commentés plus haut. Avec la diminution des températures, les quelques épisodes pluvieux du mois de novembre se traduisent par une augmentation toute relative des débits mais ce n'est qu'en toute fin d'année, au mois de décembre, que les précipitations sont suffisantes pour désamorcer l'étiage et permettre la remise en eau du Doubs en aval d'Arçon.

La singularité climatique de la période été/automne 2018 est tout à fait perceptible sur la figure 11 : la période du 1^{er} juin au 31 octobre 2018 a été à la fois la plus chaude et la moins arrosée depuis 1885²³ dans le Doubs.

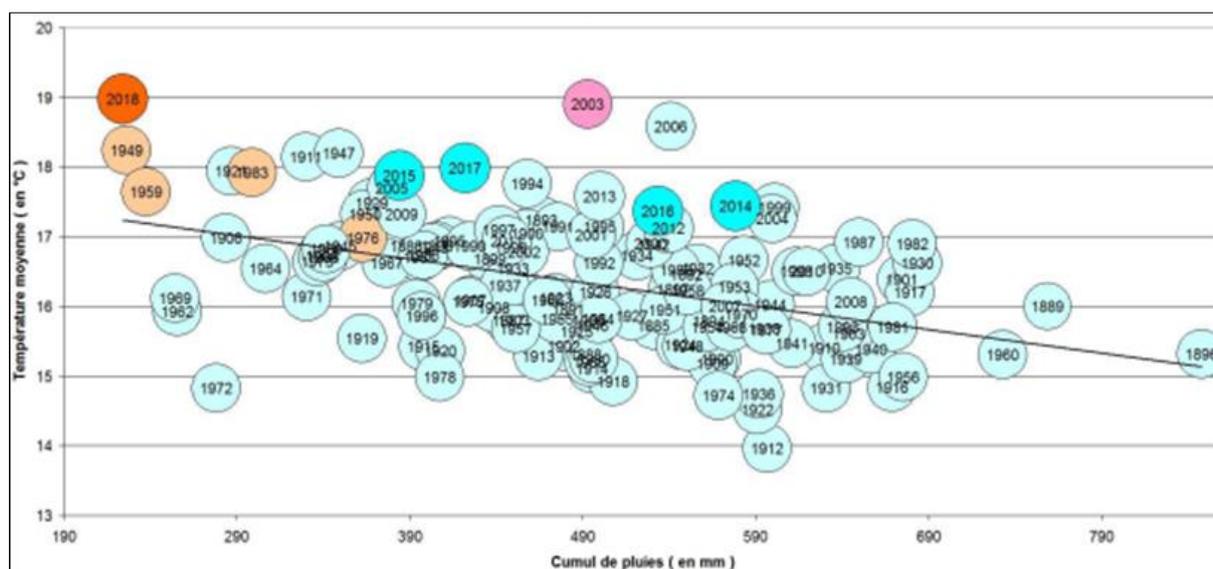


Figure 11 : Cumul de pluies et température moyenne à Besançon (Doubs) depuis 1885. Période 1 juin – 31 octobre (source : MétéoFrance)

²³ Même si la station de Besançon est située à quelques dizaines de kilomètres de la zone d'étude, elle est considérée comme représentative de la tendance climatique régionale.

Conclusion

La caractérisation statistique des données hydroclimatiques du Doubs dans sa partie amont permet d'attester du caractère exceptionnel de l'épisode enregistré en 2018, vraisemblablement l'étiage le plus sévère depuis l'historique épisode de 1906. Fait marquant d'un point de vue hydrologique (mais aussi sociétale), l'assec observé sur un linéaire de près de 20 km en aval d'Arçon et pendant plus de cinq mois n'est en fait que la traduction d'un déficit pluviométrique prolongé en milieu karstique. Le contexte géologique régit en partie les conditions d'écoulement et sur ce secteur c'est principalement la capture souterraine du Doubs par la Loue qui procède des dynamiques de circulation. Aussi, caractère inhérent au karst, ces dynamiques sont évolutives et une des singularités de la séquence 2018 est qu'il a été observé un tarissement total très rapide (en comparaison avec d'autres épisodes d'assec enregistrés antérieurement) rendant très probable l'hypothèse d'une modification interannuelle des conditions d'infiltration et dans ce cas-ci celle d'une majoration du soutirage karstique par les pertes. Même si ces dynamiques de soutirage hydraulique semblent variables à l'échelle des chroniques de données disponibles (quelques décennies), la Loue étant conquérante vis-à-vis du Doubs ce phénomène va de pair avec la structuration des écoulements souterrains et ne peut que s'accroître à des échelles de temps plus longues. La capture totale des écoulements du Doubs est inéluctable et seule la dimension temporelle est, en l'état des connaissances, difficile à apprécier. En surimposant ce contexte hydrogéologique défavorable aux tendances climatiques (scénarios prévisionnels du GIEC), il est fort probable que des situations de tarissement total et prolongé s'observent sur le Doubs en aval de Pontarlier de manière régulière au cours des prochaines décennies. Dans ce sens, l'étude menée par Caballero *et al.*, (2016) qui porte partiellement sur les émergences de la source de la Loue et du Lison évoque une baisse de la recharge estivale comprise entre 25 et 50% à l'horizon 2050 et si des incertitudes demeurent par rapport aux modèles utilisés (climatiques et de recharge), le rapport suggère donc une tendance lourde de diminution des débits estivaux préjudiciable aux hydrosystèmes karstiques jurassiens.

Si la question de la gestion des ressources en eau se posait déjà sur ce secteur au début du 20^e siècle²⁴, elle est aujourd'hui encore plus prégnante compte-tenu des perspectives mentionnées. Les aménagements réalisés en 2018 (pose de deux margelles sur deux diaclases importantes et d'un géotextile imperméable au niveau de la zone de perte dite de la Héronnière) doivent constituer des interventions exceptionnelles face à une situation de crise et de manière générale toute intervention doit être pensée systématiquement tant les répercussions sont difficilement prévisibles et potentiellement importantes. En ce sens, la création récente (2020) d'un EPAGE Haut-Doubs/Haute-Loue constitue une avancée significative pour une gestion raisonnée des ressources en eau de ce territoire d'exception.

²⁴ Des travaux de colmatage des pertes avaient déjà été réalisés en 1907 par le syndicat des usiniers de l'époque.

Bibliographie

- Abi-Zeid I., Bobee B. (1999). La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique, *Revue des sciences de l'eau*, n°12/3 pp. 459-483.
- Berthelot A., (1901). Sur les origines de la source de la Loue. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 133 : pp. 394-397.
- Bichet V., Campy M. (2008). *Montagnes du Jura – Géologie et paysages*, NEO Editions, 293 p. + annexes.
- Caballero, Y., Lanini, S., L. Zerouali, V. Bailly-Comte, (2016). *Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse*. Rapport final. BRGM/RP-65807-FR, 188 p., 159 ill., 3 CD.
- Cabinet Reilé, (2012). *Études de détermination des volumes prélevables dans le sous-bassin du Haut-Doubs*. Rapport d'étape – PHASE III, Quantification des ressources existantes et impact des prélèvements. 58 p. + annexes.
- Cabinet Reilé, (2018). *Campagnes de reconnaissance des pertes du Doubs par traçages*. Rapport, 46 p. + annexes.
- 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.
- 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, 102 Ill., 3 Ann., 154p.
- Chauve, P., Charles, G., Leonetti A. (1980). *Etude des pertes du Doubs*. Rapport interne L.G.A., Besançon, 30 p.
- 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.
- DIREN (1995). *Étude du système hydrologique Doubs-Loue (pertes du Doubs – sources de la Loue)*. Rapport, 63p.
- Fournier E. (1913). *Pertes du Doubs avec la Loue – Expérience de coloration de 1910*. Notice historique et descriptive. Jacques et Demontrond, Besançon, 24p.
- Jacquemin P. (1984). *Réponses hydrodynamiques des hauts bassins du Doubs et de la Loue*. Thèse de l'Université de Franche-Comté, Besançon, 164p + annexes.
- Lang C. (2007). *Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français*. Thèse de doctorat, Université de Metz, 292 p. + annexes.

LE Barbu E., Philippe M., Cadet Y. (2018). *Sécheresse 2018 dans le Haut-Doubs : du jamais vu depuis 1906*. Colloque UNESCO-SHF : « Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019 », 8 p.

Mettetal J.-P., (1986). *Etude hydrogéologique de la vallée de la Loue*. Rapport DIREN.

Mettetal J.P et Mudry J. (1998). *Le karst de la Loue et ses relations avec le Doubs (Franche-Comté)*. Rapport BRGM R40126. pp. 103-118.

Pyrce R.S. (2004). *Hydrological low flow indices and their uses*, WSC Report N°04-2004, Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario, 33p.

SMEA du bassin de la Saône et du Doubs (1994). *Étude hydrogéologique et géophysique. Pertes du Doubs à l'aval de Pontarlier*. 22 p. + annexes.



E.P.T.B  ÉTABLISSEMENT PUBLIC
territorial du bassin
saône & doubs

