



Etude de la ressource en eau sur le bassin versant de la Reverotte

Mission d'études

RAPPORT DE PHASE DIAGNOSTIC ET AVANT-PROJET SOMMAIRE

EPAGE Doubs Dessoubre



Etude de la ressource en eau sur le bassin versant de la Reverotte

Mission d'études

EPAGE Doubs Dessoubre

Rapport de phase Diagnostic et Avant-projet sommaire

VERSION	DESCRIPTION	Établi(e) par	Approuvé(e) par	Date
A	Version originale du document	QRR/CDEE	MML	11/2022
B	Reprises diverses	QRR/CDEE	QRR	01/2023

ARTELIA. AGENCE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE
21 Avenue Albert CAMUS. 21000 DIJON. TEL : 03 80 78 95 50

ARTELIA - 16 Rue Simone Veil - 93400 SAINT-OUEN-SUR-SEINE

ARTELIA Ville & Territoires - INE

Agence Bourgogne - Franche-Comté

21, Avenue Albert Camus

21 000 DIJON

Rapport de phase Diagnostic et Avant-projet sommaire

ETUDE DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LE BASSIN VERSANT DE LA REVEROTTE

SOMMAIRE

PRÉAMBULE	0
A. DIAGNOSTIC	1
1. DONNÉES D'ENTRÉE	2
2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE	4
3. CADRE HYDROGÉOLOGIQUE	4
3.1. Géologie	4
3.2. Hydrogéologie	7
3.3. Synthèse de l'approche hydrogéologique	11
4. DIAGNOSTIC HYDROLOGIQUE	11
4.1. Matériel et méthode	11
4.1.1. Principes et objectifs	11
4.1.2. Mesures ponctuelles : approche spatialisée	12
4.1.3. Instrumentation et enregistrements : approche temporelle	13
4.2. Contexte hydrologique	14
4.3. Approche longitudinale	17
4.3.1. Toutes eaux	17
4.3.2. En période de hautes eaux	20
4.3.3. En période de basses eaux	26
4.4. Mesures en continu	32
4.4.1. Tête de bassin (aval puits de la Doye)	32
4.4.1.1. Courbe de tarage	32
4.4.1.2. Hydrogramme, piézogramme et hyétogramme	34
4.4.1.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit	36
4.4.1.4. Synthèse	40
4.4.2. Partie médiane (sous Les Vaux)	41
4.4.2.1. Courbe de tarage	41
4.4.2.2. Hydrogramme, hyétogramme et régime thermique	43
4.4.2.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit	44
4.4.2.4. Synthèse	46

4.4.3. Fermeture de bassin (Gigot)	47
4.4.3.1. Courbe de tarage	47
4.4.3.2. Hydrogramme, hyétogramme et régime thermique.....	49
4.4.3.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit	53
4.4.3.4. Synthèse	55
4.4.4. Comparaison entre les 3 hydrogrammes.....	56
4.5. Synthèse de l'approche hydrologique.....	59
5. IDENTIFICATION DES FACTEURS DE PRESSION ANTHROPIQUES SUR L'HYDROLOGIE	60
5.1. Les captages	60
5.2. Les usages agricoles.....	61
5.3. Le couvert forestier	63
5.3.1. L'évolution du couvert forestier.....	63
5.3.1.1. Méthode	63
5.3.1.2. Résultats	63
5.3.2. Caractéristiques actuelles du peuplement forestier	64
5.3.3. Etat des connaissances sur l'incidence de la forêt sur l'hydrologie.....	66
5.3.4. Application au bassin versant de la Reverotte.....	67
5.3.5. Tendances de l'évolution des peuplements à l'horizon 2070	68
5.4. Les ouvrages transversaux.....	69
5.4.1. Le blocage du transit sédimentaire	69
5.4.2. L'évaporation des eaux.....	71
5.5. La dégradation des zones humides	71
5.6. Le changement climatique.....	73
6. BILAN DU DIAGNOSTIC	74
B. PROGRAMME D' ACTIONS	76
1. PHILOSOPHIE DU PROGRAMME D' ACTIONS	77
1.1. Précisions quant au niveau de rendu avant-projet sommaire ..	77
1.2. Hiérarchisation des interventions.....	77
2. FICHES ACTIONS	77

TABLEAUX

Tableau 1. Synthèse des données d'entrée	2
Tableau 2. Synthèse du suivi ONDE (Observatoire National Des Etiages) au niveau de la Reverotte au droit du captage de la Sommette.	14
Tableau 3. Classement du niveau d'intensité des basses eaux mensuelles (VCN3 mensuel) depuis 2008 au niveau de la station limnimétrique localisée sur le Dessoubre à Rosureux.	15
Tableau 4. Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye.	38
Tableau 5. Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la Reverotte en fermeture de bassin.	55
Tableau 6. Evolution des surfaces forestières du bassin versant entre 1950 et 2019.	63
Tableau 7. Liste des seuils impactant le transport solide (source : CE3E)	70
Tableau 8. Liste des milieux humides classés en ZNIEFF1	73
Tableau 9. Evaluation des tendances évolutives des débits à l'horizon 2070 sur le Dessoubre à Rosureux (OFB)	74
Tableau 10 – Synthèse du programme d'actions	78

FIGURES

Figure 1. Vue sur la Reverotte	0
Figure 2. Carte de présentation du secteur d'étude	4
Figure 3. Carte géologique du secteur d'étude (source : geoportail.gouv.fr)	5
Figure 4. Série stratigraphique du secteur d'étude	6
Figure 5. Coupe NW – SE au niveau de la Sommette	7
Figure 6. Variations de niveau du puits de la Doye entre 2012 et 2022 (source : ades.eaufrance.fr)	8
Figure 7. Carte de l'ensemble des traçages inventoriés par la DREAL (source : cartes.ternumbfc.fr)	9
Figure 8. Carte des ressources karstiques majeures (source : AERMC, 2013)	10
Figure 9. Cartes de localisation des points de mesure	13
Figure 10. Classement des niveaux de sécheresses mensuels (VCN3 mensuels du Dessoubre à Rosureux) de la période investiguée par rapport à ce qui est habituellement mesuré à mois équivalent (depuis 2008)	15
Figure 11. Niveau des basses eaux du Dessoubre à Rosureux lors de la période investiguée (VCN3 mensuel. en bleu), et positionnement par rapport aux débits classés mensuels de ces basses eaux (histogramme)	16
Figure 12. Variabilité des débits jaugés	17
Figure 13. Evolution longitudinale (en km depuis la source) du débit lors des différentes campagnes de jaugeages. En pointillés, données issues de l'étude Reilé 2005	19
Figure 14. Variabilité longitudinale du débit (m ³ /s) en période de fortes eaux	20
Figure 15. Evolution longitudinale du débit de la Reverotte le 2 février 2022. Les ronds bleus localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.	22
Figure 16. Evolution longitudinale du débit de la Reverotte le 23 février 2022. Les ronds bleus localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.	23
Figure 17. Variabilité longitudinale de paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température) en périodes de fortes eaux	24

Figure 18. Variabilité longitudinale du débit (m ³ /s) en période d'étéage	26
Figure 19. Evolution longitudinale du débit de la Réverotte le 22 juin 2022. Les ronds orange localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.	28
Figure 20. Evolution longitudinale du débit de la Réverotte le 13 octobre 2021. Les ronds orange localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.	29
Figure 21. Variabilité longitudinale de paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température) en périodes d'étéage.	30
Figure 22. Localisation des points de mesures dans la partie apicale de la Reverotte.....	32
Figure 23. Mesures piézométriques et débits jaugés	33
Figure 24. Tarage du Puits de la Doye	33
Figure 25. Hydrogramme de la Reverotte à l'aval du Puits de la Doye, et niveaux piézométriques du gouffre. En bas : Zoom sur la période du 01 au 02 décembre 2021.	34
Figure 26. Vue générale de l'hydrogramme et du hyétogramme de la Reverotte à l'aval du Puits de la Doye.	35
Figure 27. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en contexte automnal. Evènement isolé.	36
Figure 28. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en début de période hivernale. Succession de 2 événements rapprochés.	37
Figure 29. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en période hivernale. Succession de 3 événements se chevauchant.	37
Figure 30. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en période printanière. Evènement isolé.	38
Figure 31. Juxtaposition des Qmm (débit mensuel moyen) de la Reverotte à Gigot et du nombre de jours par mois où le Puits de la Doye est émissif. Données issues de l'étude SRAE 1991 et de la présente étude.....	40
Figure 32. Vues de la station monitorée le 15/03/2022. En haut : contact direct avec la roche en rive gauche du lit mineur (eau stagnante). En bas : illustration de la mobilité sédimentaire (sonde « déterrée »).	42
Figure 33. 2 modèles de tarage issus des enregistrements/jaugeages sous Les Vaux : modèle polynomiale toutes campagnes incluses (à gauche), régression linéaire basée sur les 4 campagnes non à sec (à droite).	42
Figure 34. Hydrogramme de la Reverotte sous Les Vaux et hyétogramme associé.....	43
Figure 35. Mise en regard de l'hydrogramme avec la dynamique de la thermie de la Reverotte (température et écart avec la température atmosphérique).....	44
Figure 36. Evènements pluies-débits de début et fin décembre 2021 (résolution journalière)...	44
Figure 37. Evènements pluies-débits en octobre 2021 (sortie d'étéage estival) et avril 2022 (transition entre fortes eaux hivernales et étéage estival), avec une résolution journalière.....	45
Figure 38. Evènements pluies-débits en juin-juillet 2022 (étéage estival), avec une résolution journalière.	46
Figure 39. Vue du tronçon sous Les Vaux. A gauche : période de fortes eaux le 02/02/2022 (vue d'une afférence intermittente en rive gauche). A droite : en période d'assec le 15/07/2022 (contact direct du lit mineur avec le karst fracturé).	47
Figure 40. Relations entre hydrologie du Dessoubre et de la Reverotte à Gigot (avant confluence), données SRAE 1991.	48
Figure 41. Corrélacion entre débits de la Reverotte jaugés en 2021-2022 à Gigot et débits extemporanés enregistrés sur le Dessoubre à Rosureux.	49

<i>Figure 42. Hydrogramme de la Reverotte en fermeture de bassin (échelle linéaire en haut, échelle logarithmique en bas).</i>	50
<i>Figure 43. Hydrogramme et hyétogramme de la Reverotte en fermeture de bassin de mi-août 2021 à mi-août 2022.</i>	50
<i>Figure 44. Thermie et variations nictédimales au regard de l'hydrologie de la Reverotte à Gigot.</i>	52
<i>Figure 45. Thermie et variations nictédimales au regard de l'hydrologie de la Reverotte à Gigot.</i>	52
<i>Figure 46. Superposition des hydrogrammes de la Reverotte en aval du Puits de la Doye (bleu), sous Les Vaux (orange) et à Gigot (gris).</i>	56
<i>Figure 47. Comparaison des 3 hydrogrammes lors de 2 pics de crues : début décembre 2021 et avril 2022.</i>	57
<i>Figure 48. Dynamique des contributions des débits apicaux (Doye) et médians (Les Vaux) aux débits de la Reverotte en fermeture de bassin (Gigot).</i>	58
<i>Figure 49. Carte des captages d'alimentation en eau potable</i>	61
<i>Figure 50. Carte de l'occupation du sol (CLC2018)</i>	62
<i>Figure 51. Graphique de l'occupation du sol (CLC2018)</i>	62
<i>Figure 52. Carte de l'évolution du couvert forestier entre 1950 et 2019</i>	64
<i>Figure 53. Carte des résineux du bassin versant de la Reverotte</i>	65
<i>Figure 54. Carte des résineux situés sur les versants de la vallée (source de la donnée : CE3E).</i>	66
<i>Figure 55. Graphique de la relation entre taux de déboisement et débits annuels (Cosanday, 2006, d'après Bosch Helwett, 1982)</i>	67
<i>Figure 56. Extrait de cartographie sur l'évolution de l'épicéa à l'horizon 2070 (climessence.fr).</i>	68
<i>Figure 57. Extrait de cartographie sur l'évolution le pin douglas à l'horizon 2070 (climessence.fr)</i>	68
<i>Figure 58. Carte des ouvrages hydrauliques (source de la donnée : CE3E)</i>	69
<i>Figure 59. Affouillement des fondations du pont de Martinvaux (source : CE3E)</i>	71
<i>Figure 60. Carte de localisation des milieux humides.</i>	72

PREAMBULE

Le Dessoubre et ses affluents sont des cours d'eau reconnus pour leur potentiel écologique, comme l'attestent leur classement en réservoir biologique dans le cadre du SDAGE Rhône Méditerranée Corse 2016-2021, et leur classement en liste 1 et 2 au titre du code de l'environnement (la Reverotte étant classée en liste 1).

La Reverotte, affluent rive gauche du Dessoubre de 12.8 km de long, connaît des **problématiques d'assecs dont les causes ne sont pas encore identifiées clairement** : même si la présence de failles est avérée, l'incidence des activités humaines sur les débits reste à quantifier précisément.

Aujourd'hui, l'EPAGE Doubs-Dessoubre vise la **labellisation « Rivières Sauvages »** sur 12 km de linéaire de la Reverotte. C'est dans ce cadre que la présente étude, intitulée « Restauration morphologique de la Reverotte et de ses affluents, et étude de la ressource en eau sur le bassin versant de la Reverotte », a été engagée par l'EPAGE.

Celle-ci est décomposée en deux lots :

- Lot 1 : étude de l'hydromorphologie et proposition d'actions ;
- Lot 2 : diagnostic de l'hydrologie et proposition d'actions.

Le présent rapport concerne le deuxième lot de l'étude. Plus particulièrement, il s'agit de réaliser un **diagnostic complet de l'hydrologie de la Reverotte** par le biais d'une campagne de mesures complète sur une année hydrologique et d'un état des lieux bibliographique. L'objectif final est **d'inventorier les différents facteurs de pression sur l'hydrologie** du cours d'eau, et notamment de départager les causes naturelles des causes anthropiques (section A). Cet état des lieux sert de base aux **propositions d'actions** qui sont développées par la suite (section B).

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre les cabinets CD Eau Environnement (hydrologie, bibliographie), Artelia (bibliographie, propositions d'actions), et M. Emmanuel Soncourt (hydrogéologie).



Figure 1. Vue sur la Reverotte

La Reverotte

[...] Elle était déjà notée Reverotte sur la carte de Cassini, mais Riverotte sur la carte de l'état-major ; ces deux formes sont utilisées dans les ouvrages du XIXème siècle, avec un avantage pour la première.

[...] Le diminutif « -ot » est ici adjoind au nom « rivière » devenu nom propre. On retrouve le même procédé avec le diminutif « -et » avec les NR [=hydronymes] le Rivet (Haute-Garonne, Hautes-Alpes, Ardèche), la Rivette ((Haute-Garonne), la Riviérette (Seine-Maritime, Hérault), la Riberette (Pyrénées-Orientales).

Christian Rieb. Lacs, rivières et ruisseaux du département du Doubs, Ed. Cabédita, 2021.



A. DIAGNOSTIC

1. DONNEES D'ENTREE

Le tableau suivant détaille les données bibliographiques et techniques collectées dans le cadre de la présente étude :

Tableau 1. Synthèse des données d'entrée

Titre de la donnée	Date	Auteur
Karst aquifère du massif du Jura : une ressource et un patrimoine à préserver, Vulnérabilité du BAC des sources du Dessoubre (département du Doubs) Cartographie des bassins versant de pertes, outils de protection, exploitation de la ressource	11/09/2017	B.E. Caille
Programme de restauration et de valorisation du bassin du Dessoubre	2007	Service Appui Technique et Ingénierie. DDAF du Doubs
Schéma général de restauration et de mise en valeur du Dessoubre et de ses affluents	2001	Horizons Centre-Est
Etude des pertes du cours d'eau de la Reverotte. Prospections géophysiques par polarisation spontanée, jaugeages, interprétation du phénomène karstique, propositions d'aménagement.	2005	Cabinet Reilé Maître d'ouvrage : Syndicat Mixte Saône - Doubs
Identification des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura	2013	Idées EAUX, B.E. Caille, MFR Géologie-Géotechnique SA, CPIE Haut Jura – Haut Doubs Maître d'ouvrage : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse
Explore2070.fr	En continu	OFB
Climessences.fr	En continu	ONF, OFB, Forêt privée
Le Dessoubre, délimitation et caractéristique du bassin d'alimentation, étude et apports, charges véhiculées et sources de pollution, influence sur les édifices biologiques.	1991	SRAE
Suivi de la qualité des eaux superficielles du département du Doubs, Focus sur le Haut-Dessoubre.	2020	CD Eau Environnement
Etude des pertes de la Reverotte	2005	Cabinet Reilé
Rapport de pompage du 10/06/2000 : étude hydrogéologique, Puits de la Doye, Loray, vallée de la Reverotte.	2020	Alain GAUTHIER, Jean Marie FROSSARD, Pascal REILE.

Bilan de l'eau et évapotranspiration de forêts feuillues	1987	PONTAILLER J.Y, NIZINSKI J., SAUGIER B.
Conséquences des forêts sur l'écoulement annuel des cours d'eau	2006	Claude COSANDEY
agreste.agriculture.gouv.fr	En continu	Ministère de l'agriculture

2. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Le secteur d'étude comprend l'ensemble du bassin versant de la Reverotte, estimé à une aire de 193km² sur la base du modèle numérique de terrain fourni par l'IGN, cf. carte ci-après.

La Reverotte prend sa source sur la commune de Loray (25 390), elle conflue en rive gauche avec le Dessoubre sur la commune de Bretonvillers (25380), après un parcours de 12.8km environ. Elle dénombre 6 affluents de linéaire réduit (1 à 2 km) prenant leur source sur le pourtour du cours principal de la Reverotte, à savoir le Ru de Loray, la source de la Sommette, le ruisseau du Val, le ruisseau du moulin de Vermondans, le Gimenev, et la Raie de la Marne.

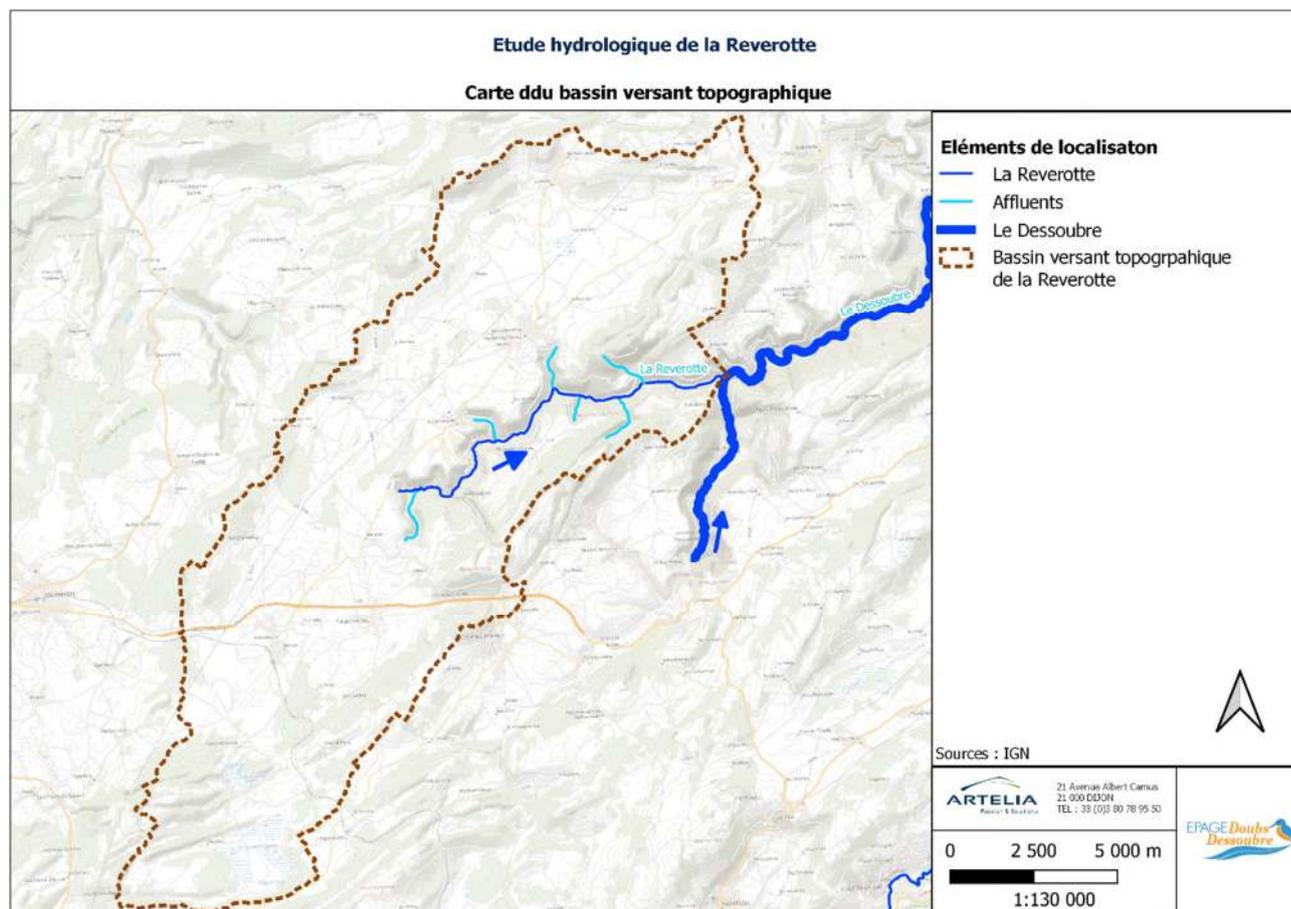


Figure 2. Carte de présentation du secteur d'étude

3. CADRE HYDROGEOLOGIQUE

3.1. GEOLOGIE

Le bassin de la Reverotte, et plus largement celui du Dessoubre, se situe sur la bordure Est du deuxième plateau du Haut Doubs, au cœur du plateau de Pierrefontaine-les-Varans et de Vercel-Villedieu-le-camp.

Les terrains constitutifs du sous-sol se sont déposés à l'époque Jurassique, sous forme de couches horizontales, empilées les unes sur les autres, les plus anciennes étant les plus profondes. Après leur dépôt, à l'époque de la formation des Alpes (essentiellement au Miocène), les couches ont été fracturées et plissées. Parallèlement,

l'érosion a entraîné l'élimination d'une partie importante des dépôts et formé le relief tel que nous le connaissons actuellement, avec ses vallées, ses combes, ses plateaux et ses sommets.

La carte géologique du secteur étudié est représentée en Figure 3. La série stratigraphique, faisant office de légende, est représentée en Figure 4.

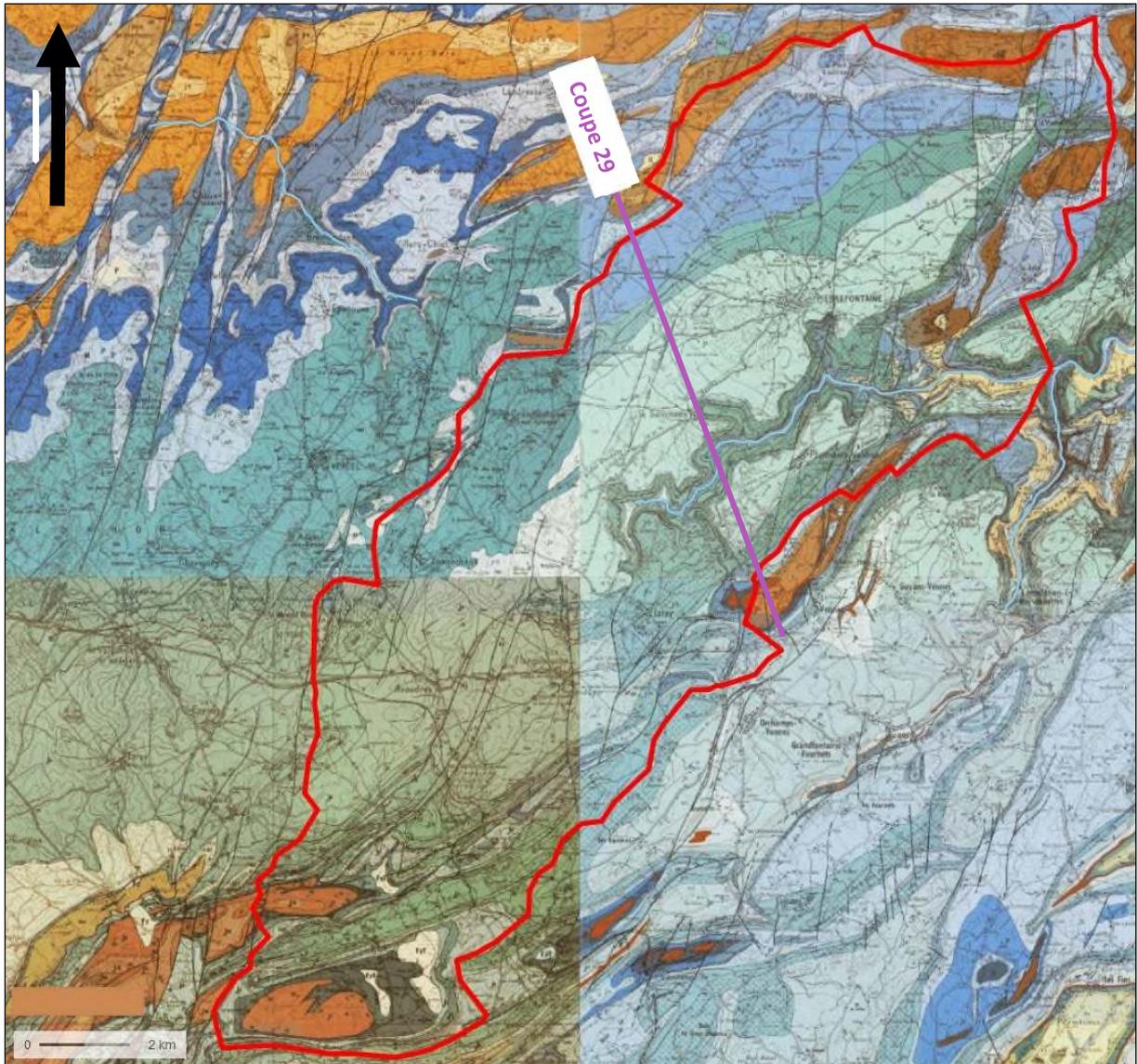


Figure 3. Carte géologique du secteur d'étude (source : geoportail.gouv.fr)

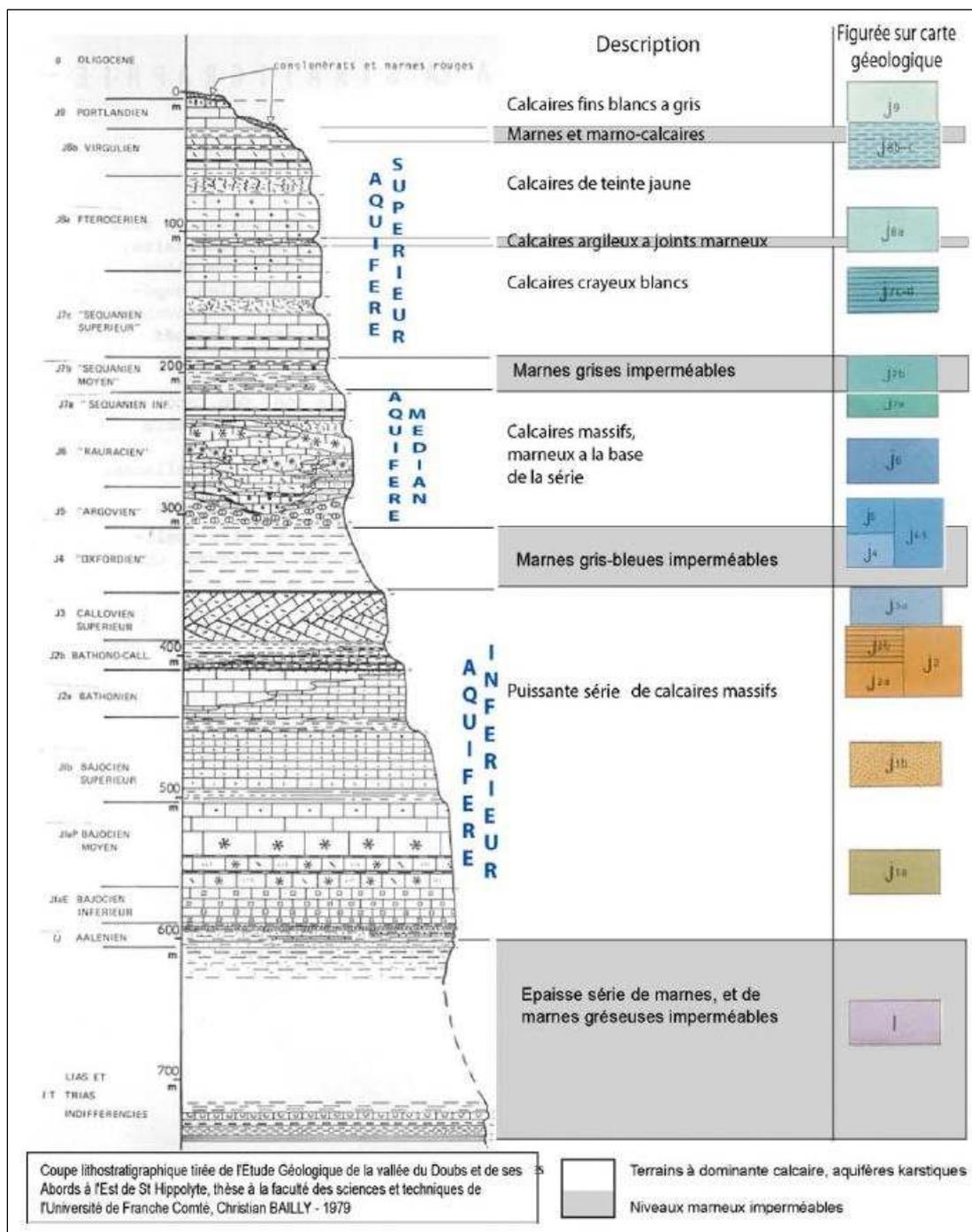


Figure 4. Série stratigraphique du secteur d'étude

La série des marnes du Lias (Jurassique inférieur), épaisse de plus de 100 m n'affleure pas dans le secteur. Elle est masquée par les couches plus récentes. Elle se situe à une profondeur de plusieurs centaines de mètres sous le fond de la vallée de la Reverotte.

Les calcaires du Jurassique moyen (Bajocien, Bathonien, Callovien), représentés sur la carte dans des couleurs à dominante marron, n'apparaissent que très ponctuellement à la pointe Sud et sur les bordures Est, Nord et Nord-Est du bassin de la Reverotte, à la faveur de bombements anticlinaux. Leur épaisseur dépasse 200 m.

Les marnes de la base du Jurassique supérieur (Oxfordien inférieur) présentent une épaisseur de 50 à 80 m. Elles affleurent en périphérie des calcaires du Jurassique moyen et se trouvent à plusieurs dizaines de mètres sous le fond de la vallée.

Les calcaires du Jurassique supérieur (Oxfordien, Kimméridgien, Portlandien) forment l'essentiel du sous-sol du secteur. Leur omniprésence s'explique en partie par leur épaisseur, qui dépasse 300 m. On observe dans cette masse plusieurs niveaux marneux, dont le plus notable, appelé « Séquanien moyen », daté du Kimméridgien, est représenté par 30 à 40 m de marnes tendres de couleur grise. La Reverotte coule la plupart du temps sur les calcaires dits du « Rauracien » (Oxfordien supérieur). Les marnes du « Séquanien moyen » affleurent en général en bas de versant, alors que de larges étendues du plateau sont formées par les calcaires du Kimmeridgien. Les calcaires du Portlandien sont totalement érodés.

Au plan tectonique, la plus grande partie du bassin, illustrée par la coupe 29 (Cf. Figure 5), rattachée au deuxième plateau, est relativement tabulaire, avec une légère courbure synclinale. Elle se termine au Sud-Est sur le faisceau de Belleherbe. On note à la pointe Sud du bassin un bombement anticlinal important, associé à d'assez nombreuses failles, faisant émerger les calcaires du Jurassique moyen (secteur de Passonfontaine, Arc-sous-Cicon, Nods).

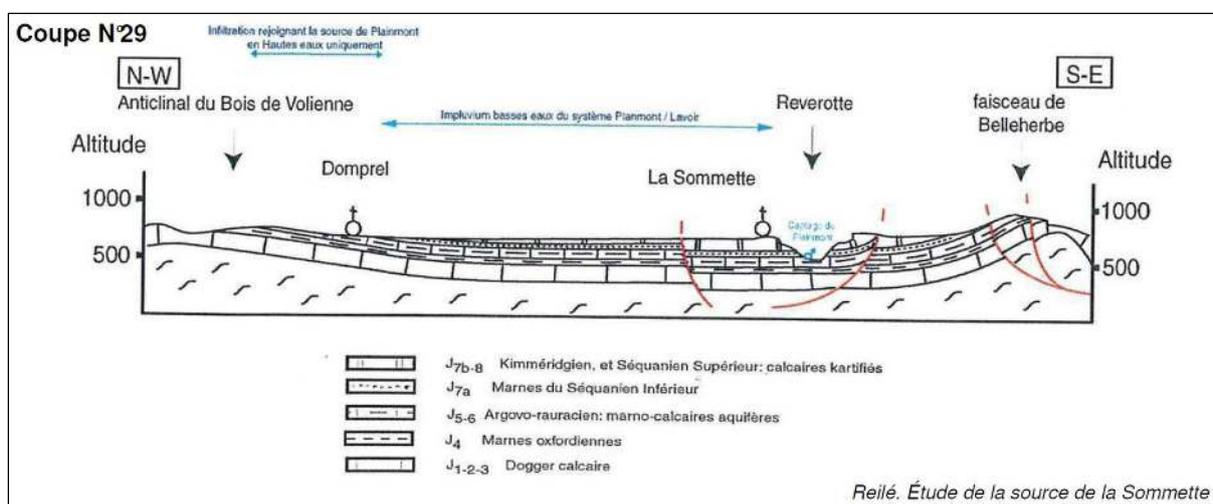


Figure 5. Coupe NW – SE au niveau de la Sommette

Le faisceau de Belleherbe se prolonge sur toute la bordure Est du bassin, jusqu'à son extrémité Nord (secteur de Derrière le Crêt, la Combe d'Enjoux).

3.2. HYDROGEOLOGIE

Au plan hydrogéologique, le secteur est caractérisé par des écoulements de type karstique. L'écoulement dans le sous-sol d'eau rendue agressive par la présence de gaz carbonique dissout la roche calcaire et entraîne l'élargissement des fissures initiées par la tectonique et la formation de vides plus ou moins importants. Les manifestations les plus spectaculaires en sont les grottes, gouffres, résurgences, pertes ou rivières souterraines. Alors que le calcaire massif est pratiquement imperméable, la présence de fissures élargies par dissolution permet la circulation d'eau en quantité importante, et à des vitesses très élevées. La vitesse de circulation et l'absence totale de filtration, rendent les eaux souterraines très vulnérables aux pollutions d'origine superficielle.

La présence de dolines (dépressions plus ou moins circulaires de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre, dont le fond peut être tapissé d'argile résiduelle) révèle en surface l'activité de dissolution souterraine. La forte perméabilité fait que le ruissellement est quasiment nul, au moins sur les plateaux, toutes les eaux de pluie pouvant s'infiltrer dans le sous-sol. Il est fréquent d'observer de vastes dépressions fermées,

sans exutoire, et parfois ponctuées de dolines. C'est le cas par exemple entre Pierrefontaine-les-Varans et Domprel, ou au Sud de Flangebouche.

Certaines zones présentent cependant des perméabilités superficielles plus faibles, du fait de l'affleurement de couches marneuses ou de placages de dépôts fluvioglaciers. Elles peuvent donner naissance à des zones marécageuses ou à des tourbières, parfois perforées de gouffres ou dolines les mettant en communication avec les calcaires sous-jacents. C'est le cas par exemple sur la commune de Passonfontaine (le Barchet, la Grande Seigne).

L'alternance des masses calcaires et des couches argileuses ou marneuses permet de distinguer plusieurs niveaux d'aquifères (Cf. Figure 4) :

- Aquifère inférieur, contenu dans les calcaires du Jurassique moyen, et encadré d'une part par les marnes du Lias, d'autre part par les marnes de l'Oxfordien ;
- Aquifère médian, contenu dans les calcaires de l'Oxfordien supérieur (« Rauracien ») ;
- Aquifère supérieur, dans les calcaires du Kimméridgien.

Les écrans intermédiaires (50 à 80 m dans l'Oxfordien inférieur, 30 à 40 m à la base du Kimméridgien) sont suffisants pour donner naissance à des sources et canaliser en partie les eaux souterraines. En particulier, la remontée des couches argileuses au sein des bombements anticlinaux peut constituer des barrières difficilement franchissables. Il faut cependant noter que les failles de rejet important (supérieur à l'épaisseur de la couche) peuvent permettre le passage de l'eau à travers ces écrans. Par ailleurs, les structures anticlinales peuvent présenter des points bas (« cols ») susceptibles de laisser passage à des écoulements. Cela pourrait notamment être le cas à travers le faisceau de Belleherbe au niveau de la vallée de la Reverotte.

La source de la Reverotte est issue de l'aquifère supérieur (calcaires du Kimméridgien « Séquanien supérieur »), dont les eaux s'écoulent à la surface des marnes du « Séquanien moyen ». Une fois passé le niveau imperméable, les eaux issues de la source peuvent se réinfiltrer dans les calcaires du « Rauracien » (Oxfordien supérieur) dans lesquels s'ouvre le puits de la Doye, et réalimenter l'aquifère médian.

Le fonctionnement **du puits de la Doye** peut être appréhendé grâce aux mesures de niveau archivées dans la banque Ades. Ce point est instrumenté depuis septembre 2011, avec quelques mesures anormales en 2013, et une grande interruption de mesure de 2013 à 2017. Les mesures disponibles montrent un fonctionnement en « tout ou rien ». En période de basses eaux, le niveau se situe à une altitude de 562 à 563 m environ, et le puits se comporte comme une perte. En période de hautes eaux, le niveau remonte à la surface du sol (altitude 575 à 576 m) et le puits devient émissif. Les variations de niveau ne donnent pas d'indication fiable sur le degré de recharge du karst ni sur le débit absorbé ou émis. En revanche, la durée des périodes de niveau bas donnent une idée de la sévérité des étiages. C'est particulièrement net par exemple en 2018. A l'inverse, en 2021, la période de basses eaux est plus courte et plus hachée.

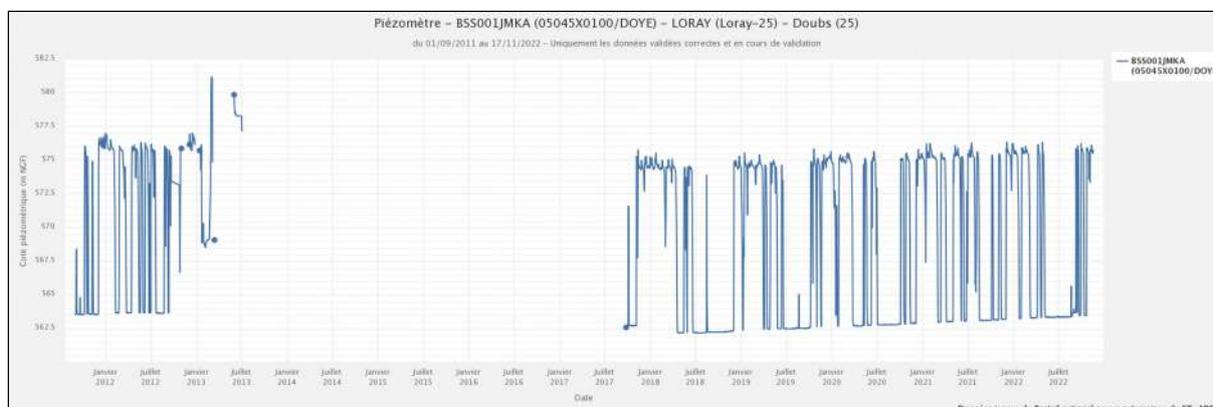


Figure 6. Variations de niveau du puits de la Doye entre 2012 et 2022 (source : ades.eaufrance.fr)

Comme la source de la Reverotte, les sources alimentant les cascades de Pierrefontaine et de Vermondan proviennent de l'aquifère supérieur.

Le captage de Plainmont à la Sommette provient de l'aquifère médian. Cependant, le cabinet Reilé estime que ce captage présente une alimentation mixte. En basses eaux, les circulations en provenance de l'aquifère médian seraient tarées, et seule subsisterait une alimentation en provenance de l'aquifère supérieur.

La source temporaire de Martinvaux, située à proximité de la source de la Reverotte, provient également de l'aquifère médian.

Aucune circulation issue de l'aquifère inférieur n'est connue dans le bassin de la Reverotte.

En milieu karstique, la réalisation de traçages (injection d'une substance colorée ou autre en un ou plusieurs points, et surveillance des points de réapparition) permet de déterminer les directions d'écoulement souterrain et de délimiter les zones d'alimentation des sources ou résurgences. La carte de la Figure 7 synthétise l'ensemble des traçages inventoriés par la DREAL Bourgogne - Franche-Comté.

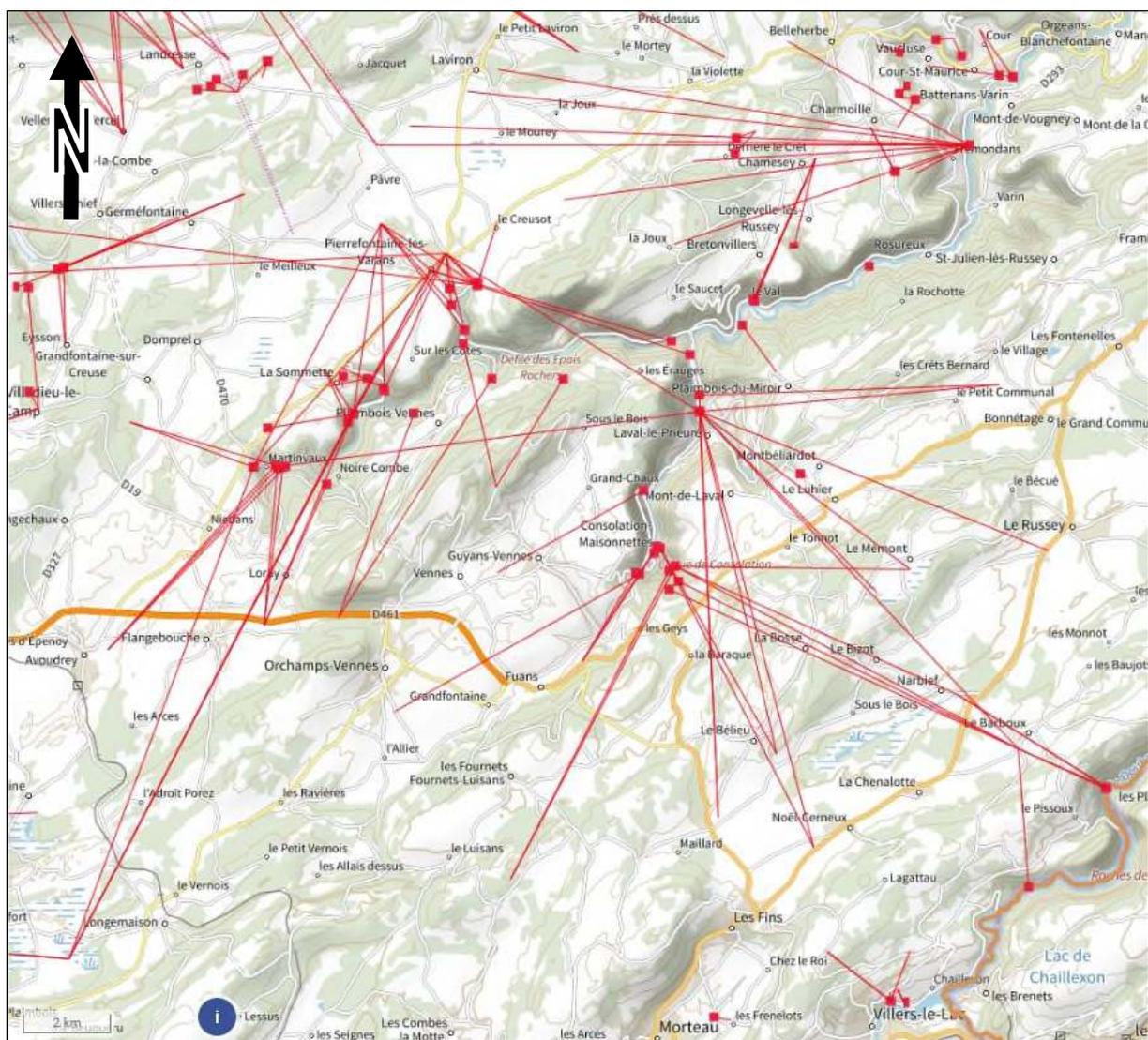


Figure 7. Carte de l'ensemble des traçages inventoriés par la DREAL (source : cartes.ternum-bfc.fr)

Un traçage réalisé en 1990 par le SRAE semble indiquer une relation entre le puits de la Doye et la source des Trois Pucelles dans la vallée du Dessoubre. Cependant, les débits en jeu semblent limités, et des interrogations

ont été formulées sur la validité de ce traçage. Il n'a pas été pris en compte dans le tracé des contours des ressources karstiques majeures.

L'Agence de l'Eau a lancé l'identification des ressources karstiques majeures du massif du Jura. Le rapport de septembre 2013 montre que le bassin de la Reverotte est encadré par les bassins des ressources majeures 13 (Sources noires – Alloz), 14 (plateau de Chamesey – source de la Froidefontaine), 19 (sources du Maine – Ecoutot) et 20 (Sources du Dessoubre et Bief Ayroux). A noter que cette dernière avait une superficie estimée de 123 km². De nouveaux traçages réalisés en 2017, et un suivi des débits réalisé de novembre 2016 à octobre 2017 ont conduit le bureau d'étude à penser que sa superficie serait plutôt comprise entre 230 et 270 km². Cependant, l'extension se ferait vers le Sud et l'Est, et ne modifie pas la position de la limite Dessoubre – Reverotte.

La Figure 8 montre la position et l'étendue des ressources majeur définies en 2013, ainsi que les traçages retenus comme valides pour cette délimitation.

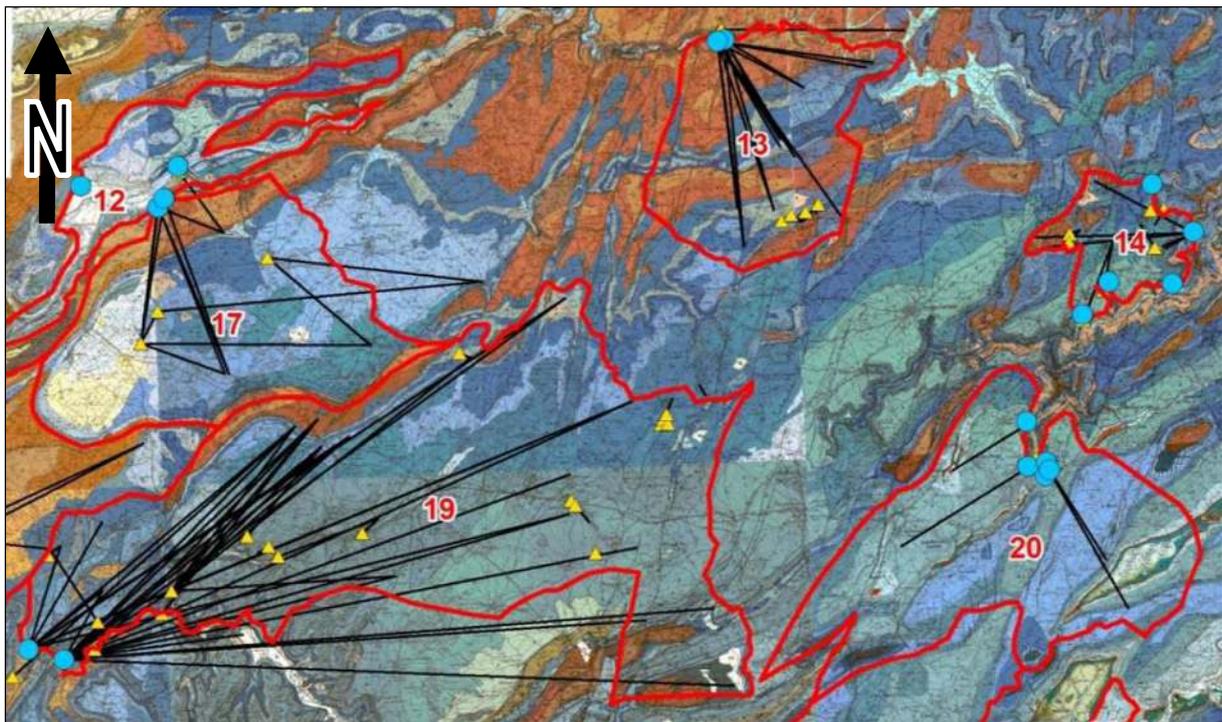


Figure 8. Carte des ressources karstiques majeures (source : AERMC, 2013)

La superficie du bassin versant souterrain de la Reverotte qui peut en être déduite est de 150 à 160 km², plus petite que le bassin versant superficiel, et sensiblement inscrit dans les mêmes limites.

Sur le Dessoubre, La lame d'eau écoulee est en moyenne de 711 mm sur la station de Rosureux (période 2008-2022) et de 693 mm sur la station de St Hippolyte (période 1958-2022). Si l'on calcule cette même lame d'eau sur l'année hydrologique 2021-2022, on trouve des valeurs de respectivement 601 mm et 486 mm. La relation établie entre la station de Rosureux et la Reverotte à Gigot (Cf. paragraphe 4.4.3) permet d'estimer une lame écoulee de 458 mm à Gigot. On le voit, à l'échelle annuelle, le déficit d'écoulement sur la Reverotte n'est pas très significatif. En revanche, si l'on fait un calcul similaire sur les mois de juin, juillet et août 2022 ; on trouve les lames d'eau suivantes :

- Dessoubre à Rosureux : 20 mm ;
- Dessoubre à St Hippolyte : 26 mm ;
- Reverotte à Gigot : 5 mm.

Le déficit d'écoulement à cette période sur la Reverotte peut être estimé à environ 270 l/s.

Le déficit d'écoulement de la Reverotte peut s'expliquer par la forte perméabilité de son lit et le fait que le niveau d'eau dans le karst de l'Oxfordien supérieur (aquifère médian) est inférieur, en période d'étiage, à celui du cours d'eau. A l'époque où des moulins étaient installés sur la rivière, ce phénomène était partiellement atténué. D'une part, les seuils, en ralentissant l'écoulement, favorisaient localement le dépôt des sédiments et le colmatage du lit. D'autre part, les usiniers, confrontés régulièrement au manque d'eau, consacraient une part importante de leur temps à la recherche et au colmatage des pertes. L'abandon des moulins lors de la première partie du XXe siècle a entraîné un retour progressif à l'état naturel. Il est également clair que les évolutions climatiques actuelles, en réduisant la quantité d'eau disponible (Cf. les sécheresses récentes, notamment 2018 et 2022), ne font qu'accentuer la pénurie.

3.3. SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE

Le bassin de la Reverotte se situe dans un contexte de sous-sol calcaire perméable, avec des circulations d'eau rapides empruntant des cheminements fissurés et élargis par dissolution. La présence de deux couches argileuses formant écran individualise 3 niveaux de circulations d'eau. Le niveau supérieur alimente la source de la Reverotte et les cascades de Pierrefontaine et de Vermondans. Le niveau médian alimente les sources de Martinvaux et de Plainmont. Les circulations du niveau inférieure n'apparaissent pas dans le bassin de la Reverotte.

La délimitation du bassin versant souterrain peut être réalisée à l'aide des différentes expériences de coloration réalisées dans le secteur. Le bassin souterrain se superpose sensiblement au bassin versant superficiel, avec cependant une superficie un peu plus faible. La Reverotte coule sur les calcaires perméables. Lorsque le niveau d'eau dans les calcaires est plus bas que celui de la rivière (ce qui est illustré par le fonctionnement du puits de la Doye), cela entraîne des pertes d'eau de la rivière vers le sous-sol.

La comparaison des débits de la Reverotte avec ceux du Dessoubre à Rosureux ou à St Hippolyte montre qu'en basse eaux, le débit des pertes (ou plus exactement le déficit d'écoulement) est de l'ordre de 270 l/s sur la Reverotte. Ces pertes expliquent l'assèchement de la Reverotte sur des longueurs importantes en période de basses eaux.

4. DIAGNOSTIC HYDROLOGIQUE

4.1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.1.1. Principes et objectifs

L'approche présentée dans cette partie a trait à l'acquisition de mesures de terrain complètes (août 2021 à août 2022) pour une connaissance fine du fonctionnement hydrologique du cours d'eau, le contexte karstique local rendant inadéquates les méthodes de modélisation hydrologiques classiques (elles ne rendraient pas compte des pertes et autres écoulements souterrains complexes).

Pour atteindre cet objectif, deux approches complémentaires ont été réalisées :

- Une approche longitudinale où 7 points de suivis répartis le long du linéaire de la Reverotte ont été jaugés mensuellement pendant un cycle hydrologique complet ;
- Une approche temporelle où 3 points ont été monitorés en continu.

4.1.2. Mesures ponctuelles : approche spatialisée

Les débits ont été jaugés mensuellement (en essayant de favoriser des contextes météorologiques variés) par la méthode d'extrapolation des champs de vitesses (courantomètres Flowatch, Swoffer 2100, Fluvia).

Complémentairement, certaines métriques physico-chimiques (température, pH, conductivité) ont été mesurées *in situ* afin de caractériser de possibles origines contrastées des différentes masses d'eau jaugées, et par conséquent d'affiner l'interprétation des dynamiques hydrologiques longitudinales.

Cette approche est destinée à appréhender le fonctionnement hydrologique global de la Reverotte le long de son linéaire, sans en détailler les mécanismes très fins et nécessairement complexes dans un contexte karstique très affirmé. Ainsi, les différents tronçons (dont ceux sujets à assecs fréquents) seront considérés dans leur globalité, i.e. sans en détailler leurs sous-fonctionnements « internes ».

Dans ce cadre, ce sont 7 points répartis le long du linéaire de la Reverotte qui ont été investigués, complétés par d'autres points conjointement mesurés de façon systématique pour certains, plus occasionnels pour d'autres. D'amont en aval, leurs localisations respectives sont :

- Source de la Reverotte (quelques mètres à la sortie de la grotte, en amont du moulin en ruine ;
- Aval du Puits de la Doye, en amont de la confluence avec le Ru de Martinvaux et de la résurgence du Moulin : point complémentaire mesuré systématiquement pour le tarage d'une sonde enregistreuse ;
- Aval de la confluence avec le Ru de Loray et la résurgence du Moulin. Ce point (avec le précédent) caractérise un tronçon fréquemment à sec ;
- Amont du captage de la Sommette, dans le secteur de Plainmont, mais en aval de la source du lavoir ;
- Trop-plein principal du captage se déversant dans la Reverotte mesuré occasionnellement (écoulement pérenne, parfois très faible, mais parfois extrêmement élevé) ;
- Aval du captage de la Sommette (quelques mètres en aval du pont) mesuré occasionnellement ;
- Secteur sous Les Vaux, caractéristique d'un secteur en assec fréquent ;
- Aval du Ruisseau du Val, au niveau du lieu-dit de la Sapinière, en amont de la confluence avec le ruisseau du Moulin de Vermondans ;
- Au niveau du seuil partiellement en ruine noté OH11, en aval des confluences avec les ruisseaux du Moulin de Vermondans, de Guimenev, et de Vautran ;
- En fermeture de bassin, quelques mètres en amont du pont de Gigot.

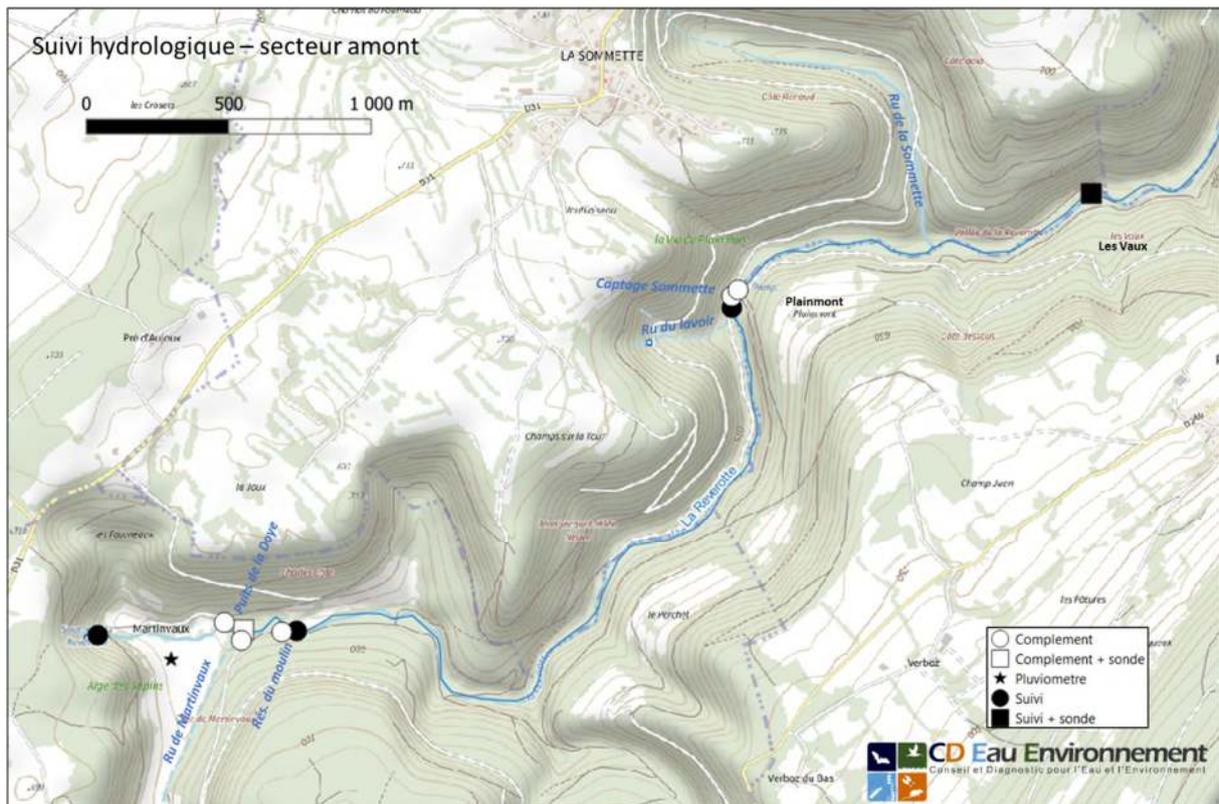


Figure 9. Cartes de localisation des points de mesure

4.1.3. Instrumentation et enregistrements : approche temporelle

La pression, et donc la hauteur d'eau, a été mesurée et enregistrée en continu par des sondes Baro LevelTroll100 et/ou LevelTroll500, selon des précisions millimétriques, voire déci-millimétriques. La compensation avec la pression atmosphérique est réalisée soit directement grâce à un câble ventilé (levelTroll500), soit indirectement par l'intermédiaire d'une sonde barométrique conjointement fixée hors d'eau (LevelTroll100). Ces sondes enregistrent conjointement la température de l'eau.

Ces sondes immergées furent implantées dans deux secteurs aux assecs fréquents (aval Puits de la Doye et sous les Vaux) ainsi qu'en fermeture de bassin.

La construction de courbes de tarages grâce aux 12 campagnes de jaugeages ponctuels permet de transformer les chroniques des hauteurs d'eau en des hydrogrammes propres à chacune de ces stations monitorées. Il sera ainsi par exemple possible de caractériser la fréquence et la durée des assecs pour les tronçons concernés.

Le monitoring est complété par l'installation de 2 pluviomètres enregistreurs, l'un localisé dans la partie apicale du linéaire (Martinvaux), l'autre dans sa partie distale (Gigot).

Ainsi, la juxtaposition des hyétoigrammes avec les hydrogrammes permet de caractériser le fonctionnement hydrologique des différents points en réponse à des événements pluvieux marquants et à différentes saisons (temps et intensité de la réponse, temps et durée de la décrue).

En outre, ces jeux de données (et leurs interprétations) sont complétés par les informations issues du suivi piézométrique du Puits de la Doye (BRGM) et de la station météorologique (MétéoFrance) de Pierrefontaine-les-Varans (lieu-dit La Caubonnote).

Au final, la combinaison des informations longitudinales et des enregistrements en continu en certains points permettra d'acquérir une vision relativement fine et complète de l'hydrologie de la Reverotte, à l'échelle des tronçons et lors de la période investiguée, i.e. mi-août 2021 à mi-août 2022.

4.2. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Les mesures hydrologiques sur la Reverotte furent réalisées de la mi-août 2021 à la mi-août 2022. La contextualisation de ce cycle hydrologique par rapport aux niveaux habituels doit être *a minima* considérée pour la future expertise des mesures.

Tableau 2. Synthèse du suivi ONDE (Observatoire National Des Etiages) au niveau de la Reverotte au droit du captage de la Sommette.

La Sommette (ONDE)										
	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
2012			1a	1a	1f	1a	1a			
2013			1a	1a	1a	1f	1f			
2014			1a	1a	1a	1a	1a			
2015			1a	1a	1a	1a	1a	1f		
2016			1a	1a	1a	1f	1a	1f	1a	
2017			1a	1a	1a	1a	1a	1f		
2018			1a	1a	1f	2	1f	1f	1f	1a
2019			1a	1a	1f	1a	1f	1a		
2020			1a	1a	1f	1a	1f			
2021			1a	1a	1a	1a	1a			
2022			1f	1f	1f	2	1f			

1a : « Ecoulement visible acceptable » ; 1f : « Ecoulement visible faible » ; 2 : « Ecoulement non visible ». Encadré : période investiguée.

2021 fut une année marquée en juillet par une crue estivale très inhabituelle pour la période (>Q2), et plus globalement par l'absence de basses eaux estivales particulièrement marquées, comme corroboré par les observations sur la station ONDE localisée sur la Reverotte.

Par la suite, d'août 2021 à février 2022, les niveaux des basses eaux s'inscrivirent globalement dans la gamme de ce qui est habituellement observé, quoiqu'un peu plus marqués pour les mois d'octobre et novembre 2021 (les basses eaux y sont plus élevées 2 années sur 3).

Lors de la dernière partie de la période investiguée, i.e. de mars à août 2022, les niveaux des basses eaux furent inhabituellement faibles, particulièrement pour les mois de mars, juin et juillet, les plus « secs » de la chronique depuis 2008. Cela est par ailleurs corroboré par les faibles écoulements de la Reverotte observés de façon inhabituellement chronique au niveau de la station ONDE.

Tableau 3. Classement du niveau d'intensité des basses eaux mensuelles (VCN3 mensuel) depuis 2008 au niveau de la station limnimétrique localisée sur le Dessoubre à Rosureux.

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Année
2008						6	5	3		5	5	4	4
2009	11	10	1	4	10	12	6	14	12	13	12	7	11
2010	9	11	10	10	8	3	12	6	3	6	2	3	7
2011	10	13	6	6	11	11	11	2	5	8	10	12	10
2012	2	12	7	5	4	5	4	8	1	1	3	1	2
2013	5	9	5	1	1	4	3	4	4	3	1	5	1
2014	3	3	9	7	3	8	2	1	2	4	4	8	3
2015	4	4	2	3	7	10	10	10	8	11	11	9	9
2016	12	1	3	2	2	1	7	11	9	10	7	13	6
2017	13	7	4	11	6	9	8	5	6	7	6	2	8
2018	1	8	8	12	12	7	9	9	10	12	13	11	11
2019	7	2											
2020							13	12	11	2	8	10	11
2021	6	5	11	8	5	2	1	7	7	9	9	6	5
2022	8	6	12	9	9	13	14	13					14

Plus le rang est élevé (couleur tirant vers le rouge), plus l'étiage fut intense pour le mois considéré. Exemple : Le rang « 10 » au mois de juillet 2015 signifie que parmi les 14 VCN3 de juillet disponibles, celui de 2015 fut le 10^{ème} plus faible.

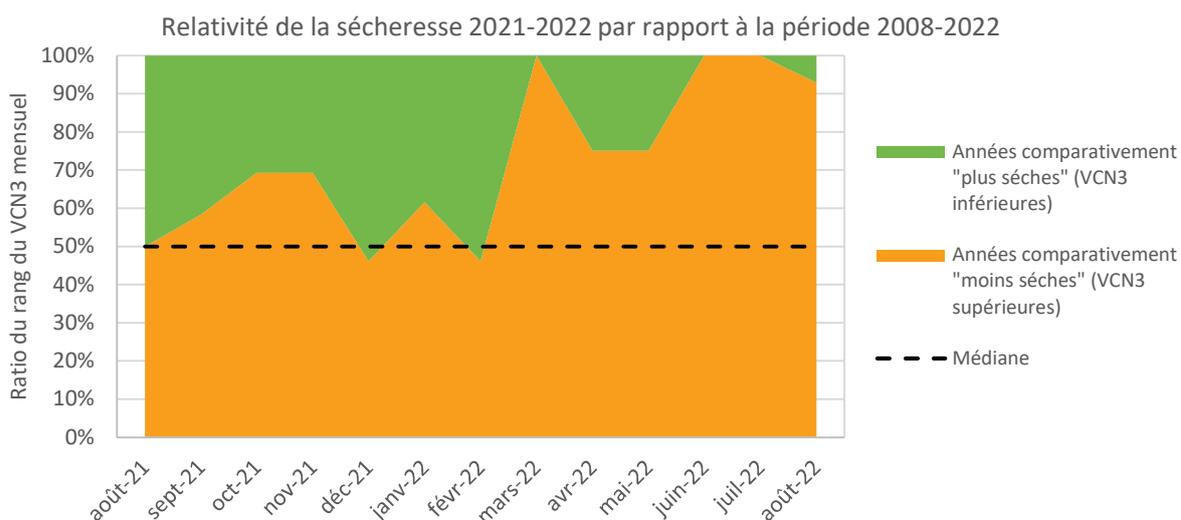


Figure 10. Classement des niveaux de sécheresses mensuels (VCN3 mensuels du Dessoubre à Rosureux) de la période investiguée par rapport à ce qui est habituellement mesuré à mois équivalent (depuis 2008).

Orange : proportion d'années où le VCN3 mensuel fut plus élevé, i.e. où le mois considéré fut « sec ». Exemple : « 75% en avril 2022 » signifie que 75% des VCN3 du mois d'avril depuis 2008 furent plus élevés, i.e. qu'avril 2022 présenta des basses eaux marquées.

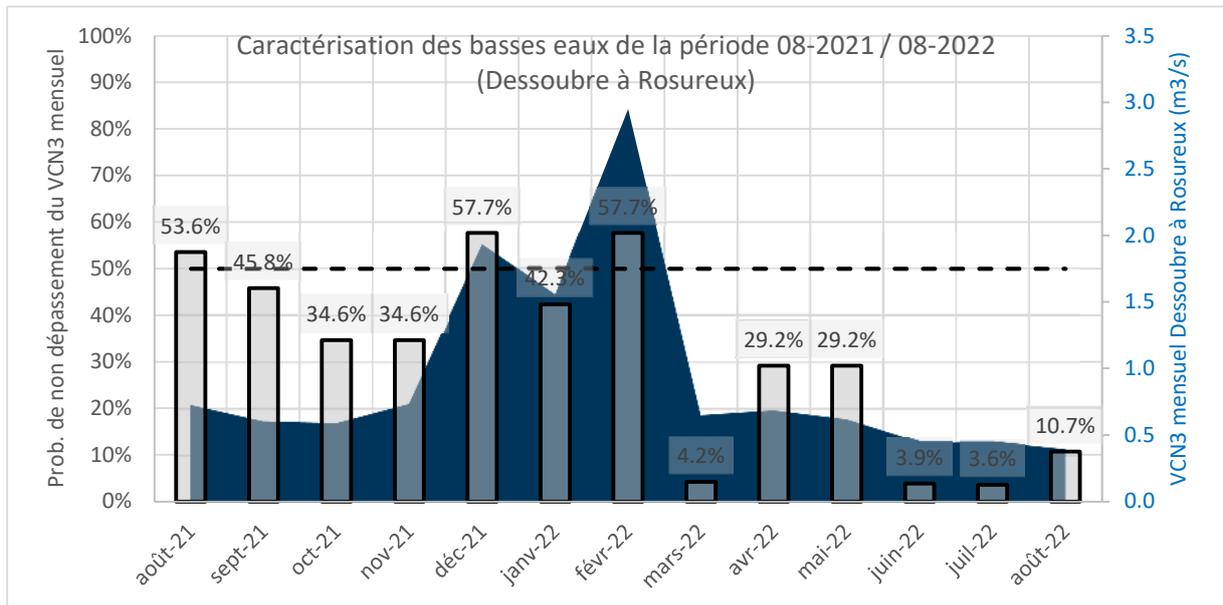


Figure 11. Niveau des basses eaux du Dessoubre à Rosureux lors de la période investiguée (VCN3 mensuel, en bleu), et positionnement par rapport aux débits classés mensuels de ces basses eaux (histogramme).

Le pourcentage indique la probabilité d'observer un VCN3 plus faible, i.e. plus il est faible, plus les basses eaux furent marquées pour le mois considéré.

Globalement, 2021 fut une année plutôt humide (nettement moins que 2012 ou 2013 par exemple) et un peu moins lors du second semestre ; en revanche, bien que non achevée lors de rédaction de ce document, 2022 figurera très vraisemblablement parmi les années les plus sèches (sinon la plus sèche) depuis au moins 2008.

Pour la période considérée, on peut donc regrouper les niveaux des basses eaux mensuelles en 3 catégories :

- Dans la « normale » : août, septembre, décembre 2021, janvier, février 2022 ;
- Plutôt marquées : octobre, novembre 2021, avril, mai 2022 ;
- Très marquées, « hors normes » : mars, juin, juillet et août 2022.

4.3. APPROCHE LONGITUDINALE

4.3.1. Toutes eaux

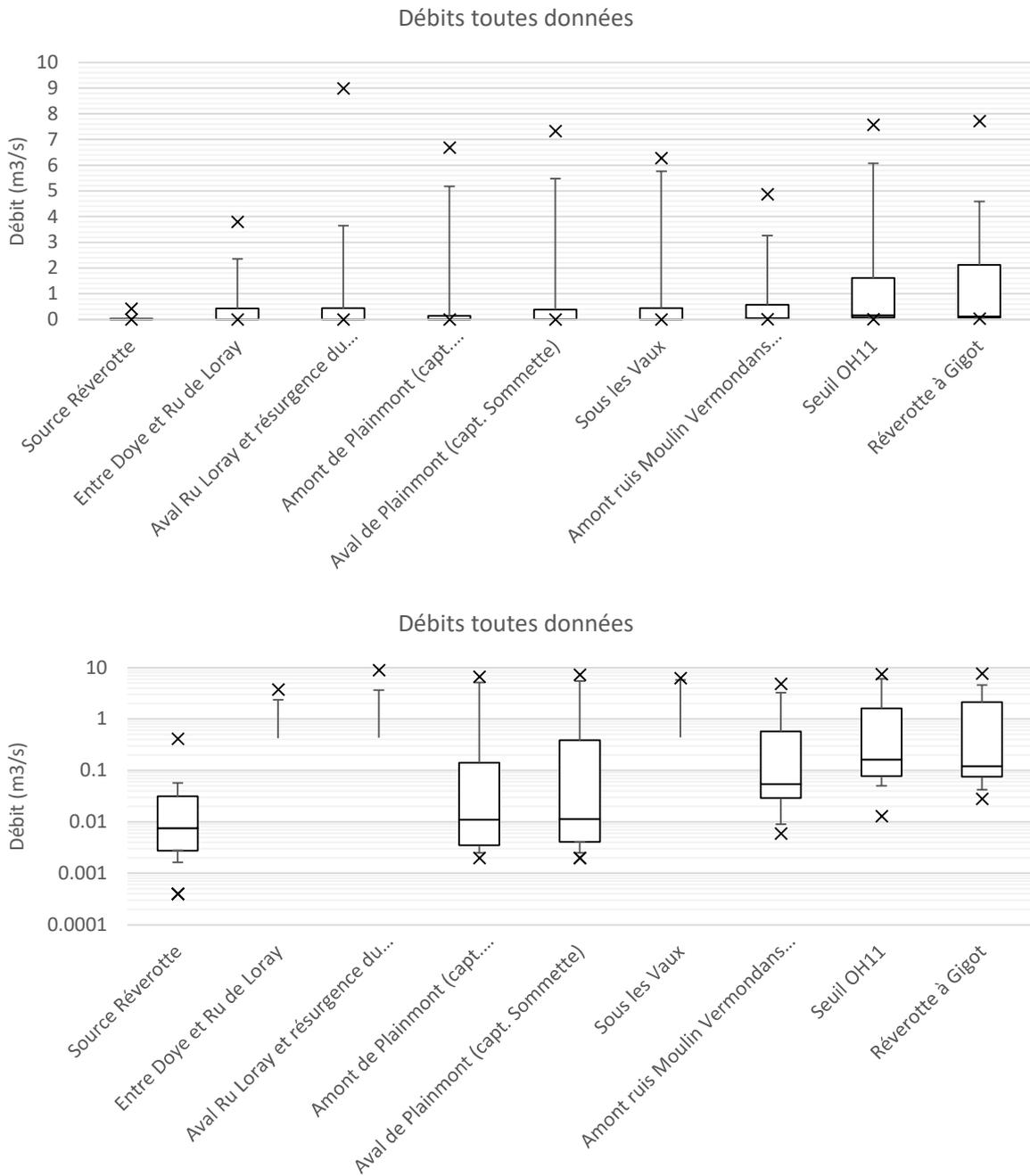


Figure 12. Variabilité des débits jaugés

(m³/s, échelle linéaire en haut, échelle logarithmique en bas) le long du linéaire de la Réverotte (toutes campagnes de jaugeages confondues) : minimum, percentiles 10, 25, 50, 75, 90, maximum

Comme souvent en hydrologie, la représentation de la variabilité temporelle des débits selon une échelle linéaire est écrasée par les pics élevés mais peu récurrents. Tout au plus, on constate l'absence (ou faiblesse) de pic de débit au niveau de la source.

La représentation de cette variabilité des débits selon une échelle logarithmique permet d'apporter des informations complémentaires :

- Caractère relativement tamponné de la source ;
- Secteurs à assecs fréquents (>50% des mesures) mais sujets à d'importants pics de débits comme par ailleurs le long du linéaire ;
- Secteur de Plainmont en eau pérenne entre deux tronçons en assecs fréquents ;
- Accroissement significatif et plus ou moins progressif des débits (surtout des basses et moyennes eaux) en aval du second tronçon aux assecs fréquents.

Cette approche en évolution longitudinale de la variabilité des débits ne permet toutefois pas de rendre compte des importantes disparités entre campagnes de jaugeages, en particulier des différences de dynamiques spatiales entre faibles, moyennes et fortes eaux. La figure suivante indique ainsi la prévalence de **2 grands types de dynamiques** :

- En fortes eaux (décembre 2021, février 2022, voire avril 2022) :
 - très forte augmentation du débit à l'aval du Puits de la Doye,
 - puis relative conservation du flux jusqu'à la confluence avec le Dessoubre (évolution longitudinale un peu moins brusque en avril 2022) ;
- Moyennes à faibles eaux (autres mois suivis) :
 - perte totale du débit de la source dès en amont du Puits de la Doye,
 - puis résurgence pérenne selon un ordre de grandeur similaire au niveau de Plainmont,
 - à nouveau assèchement systématique et complet plus en aval,
 - et « forte » résurgence (débit plus élevé qu'à la source et à Plainmont) dès en amont de la confluence avec le ruisseau du Moulin de Vermondans.

Afin de faciliter la lecture de ces 2 principaux modes de fonctionnements, la dynamique hydrologique a été appréhendée non pas en « toutes eaux » (comme précédemment exposé), mais plutôt en considérant des « basses eaux relativement marquées » (octobre 2021 et mai à août 2022) *versus* des « fortes eaux » (décembre 2021, 2 campagnes de février 2022 et avril 2022). Les mécanismes ont été évalués en considérant les variabilités spatiales du débit, leurs évolutions longitudinales, mais aussi en observant concomitamment les dynamiques de certaines paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité).

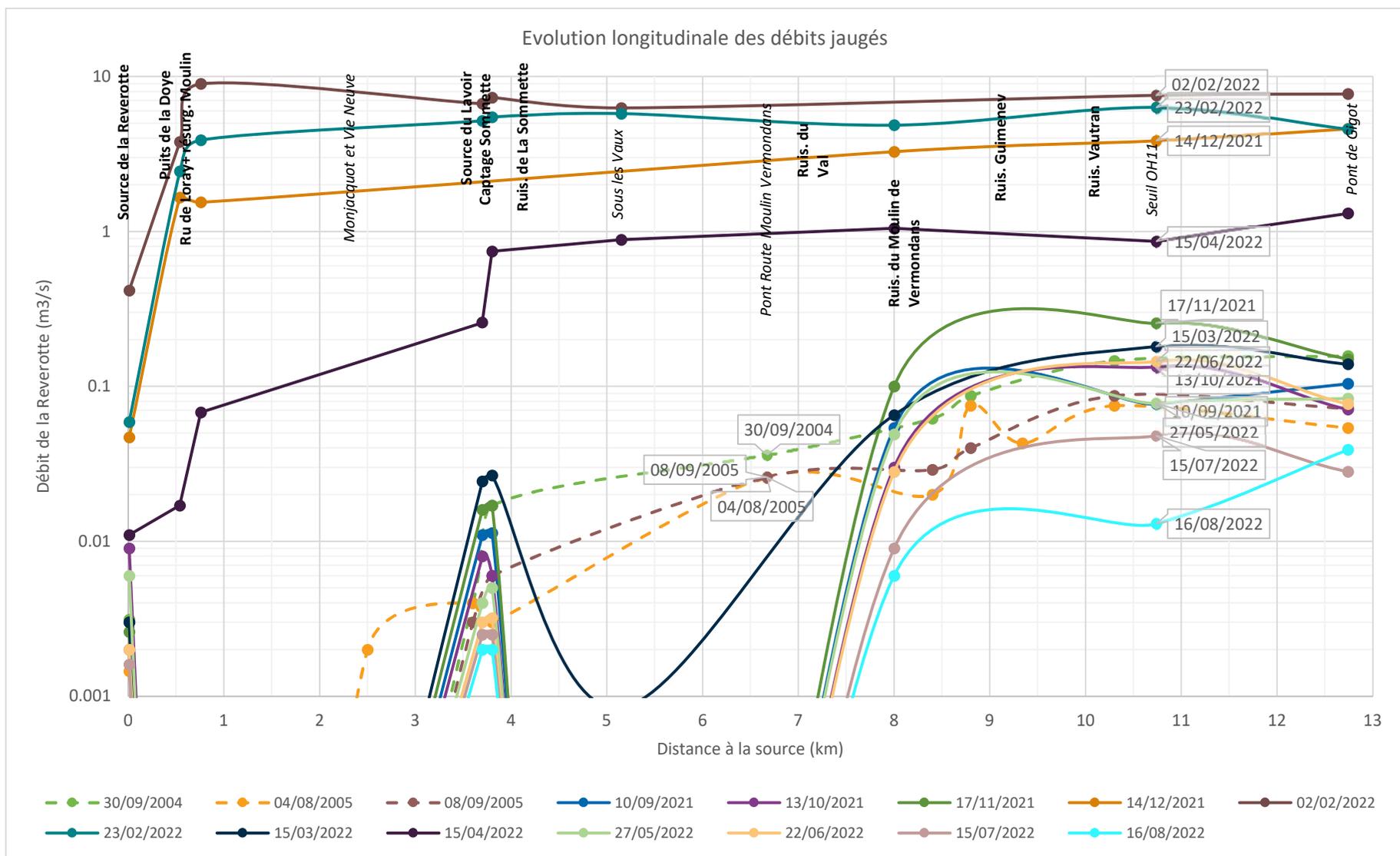


Figure 13. Evolution longitudinale (en km depuis la source) du débit lors des différentes campagnes de jaugeages. En pointillés, données issues de l'étude Reilé 2005.

4.3.2. En période de hautes eaux

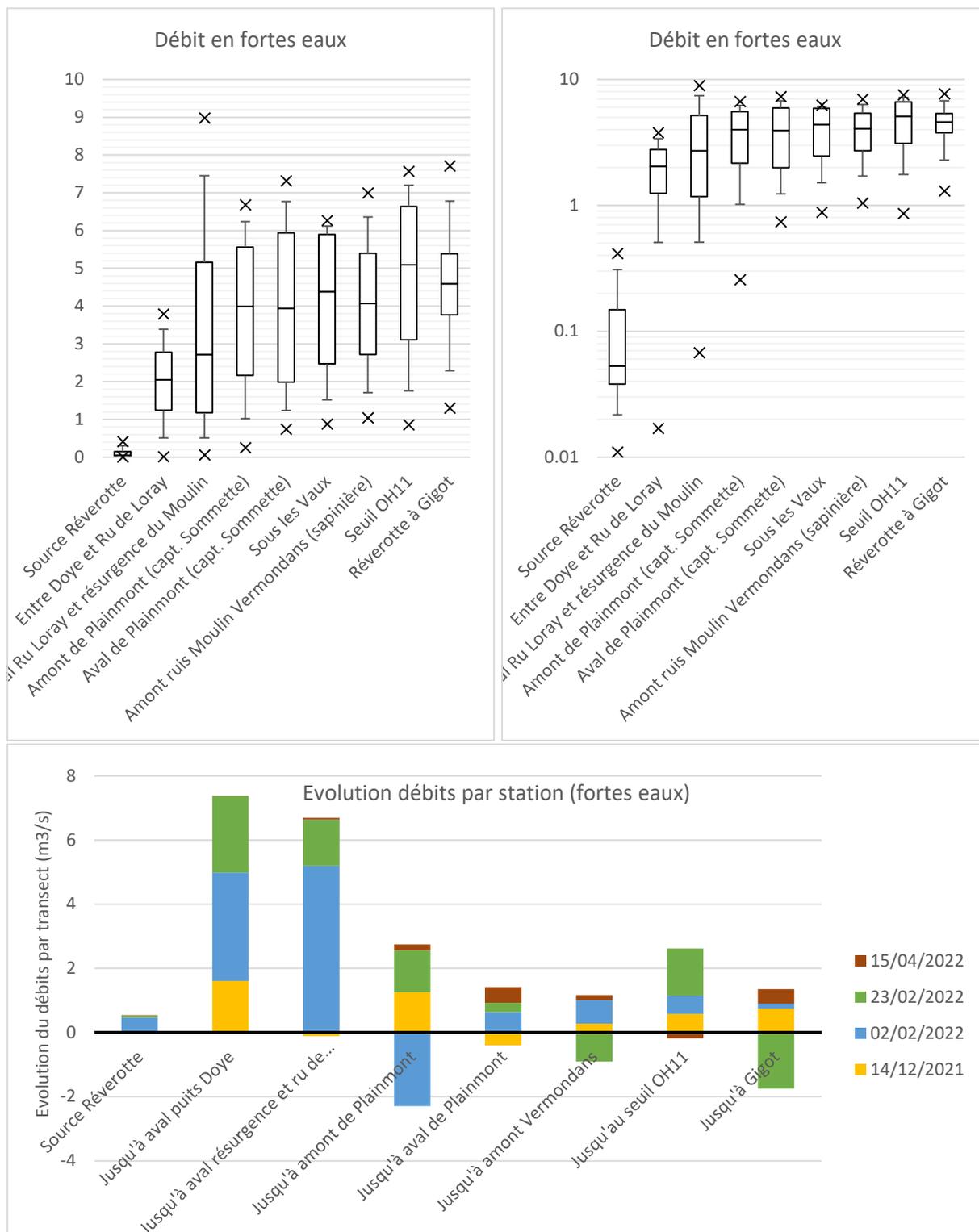


Figure 14. Variabilité longitudinale du débit (m3/s) en période de fortes eaux

Echelles linéaires et logarithmiques en haut, évolutions entre deux points de mesures successifs en bas (valeurs négatives = perte de débit entre les 2 points).

En contexte de hautes eaux, la part du débit de la Reverotte émanant directement de la source est marginale. En revanche, les principaux contributeurs sont localisés quelques centaines de mètres plus en aval via les résurgences karstiques apicales (puits de la Doye, Ru de Martinvaux, résurgence du Moulin). Ce constat est d'autant plus affirmé lorsqu'il s'agit des plus fortes eaux.

Les apports en débit plus en aval sont aussi existants, mais proportionnellement moins contributifs que les résurgences apicales. En outre, des pertes y sont parfois mesurées, mais de façon équivoque compte tenu à la fois de leurs variabilités spatiales et temporelles, et d'autre part des incertitudes des mesures de jaugeage accrues en période de très fortes eaux.

Les 2 figures suivantes illustrent ces dynamiques spatiales lors de 2 campagnes aux fortes eaux.

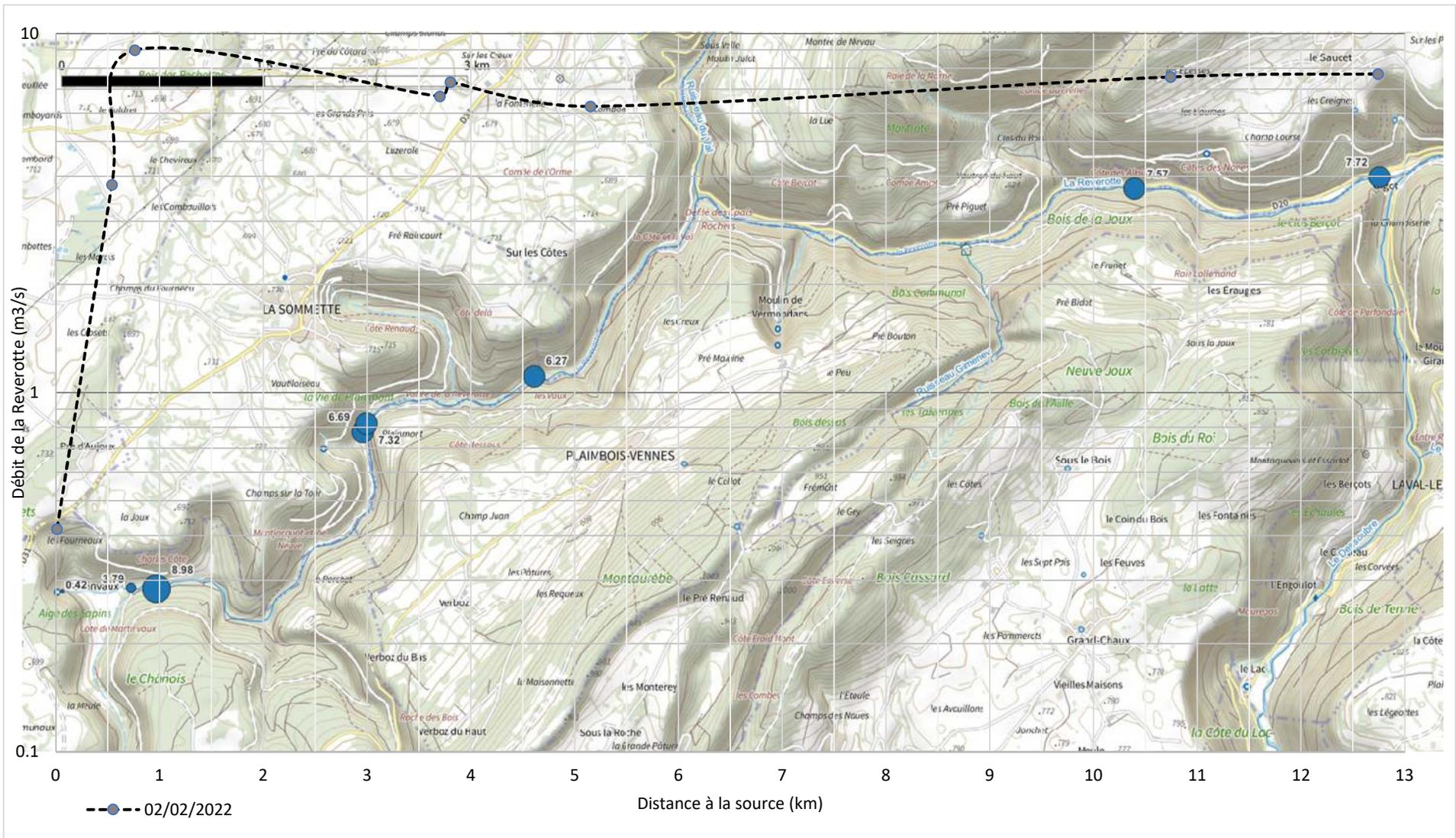


Figure 15. Evolution longitudinale du débit de la Reverotte le 2 février 2022. Les ronds bleus localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.

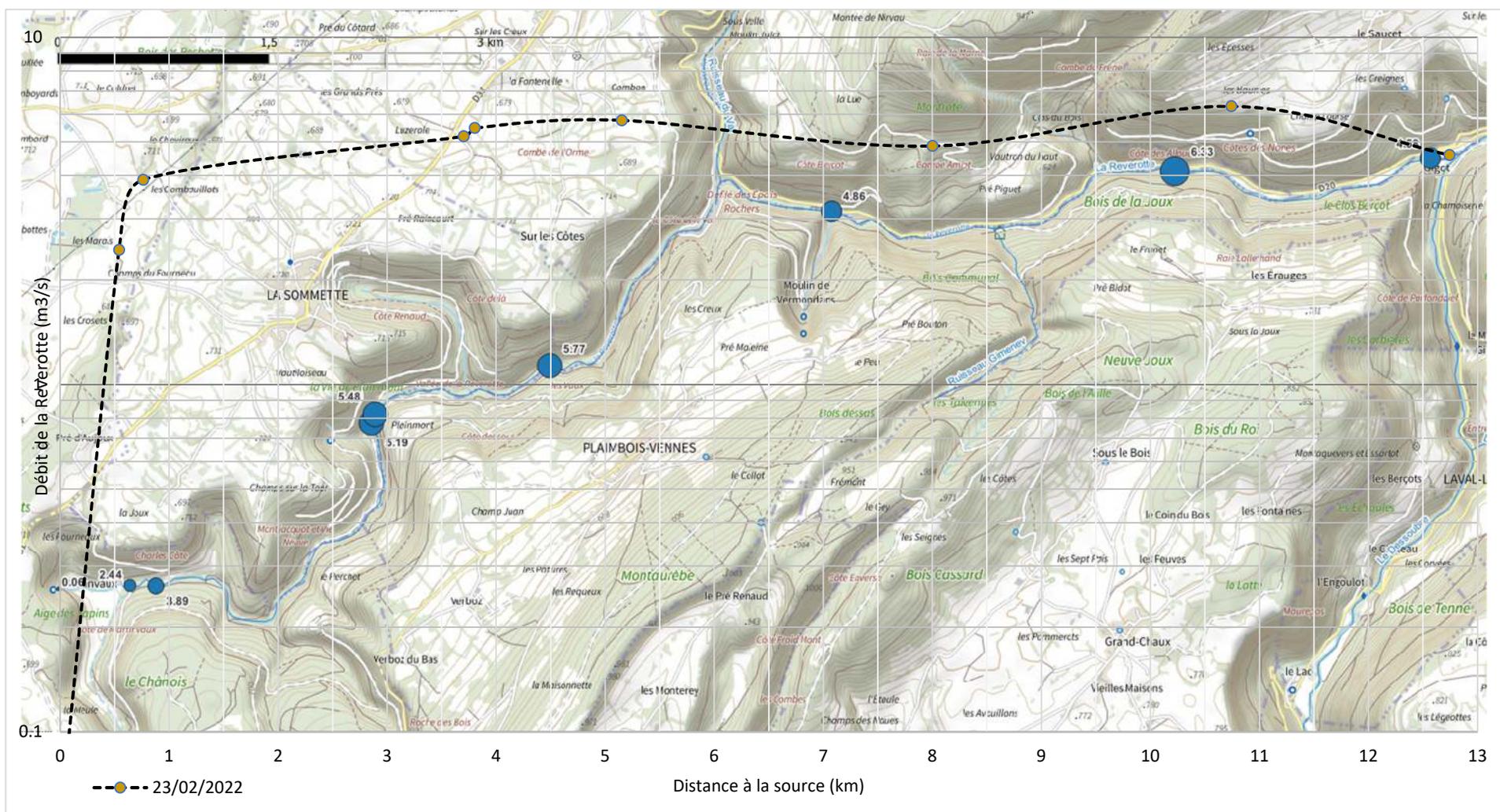


Figure 16. Evolution longitudinale du débit de la Reverotte le 23 février 2022. Les ronds bleus localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.

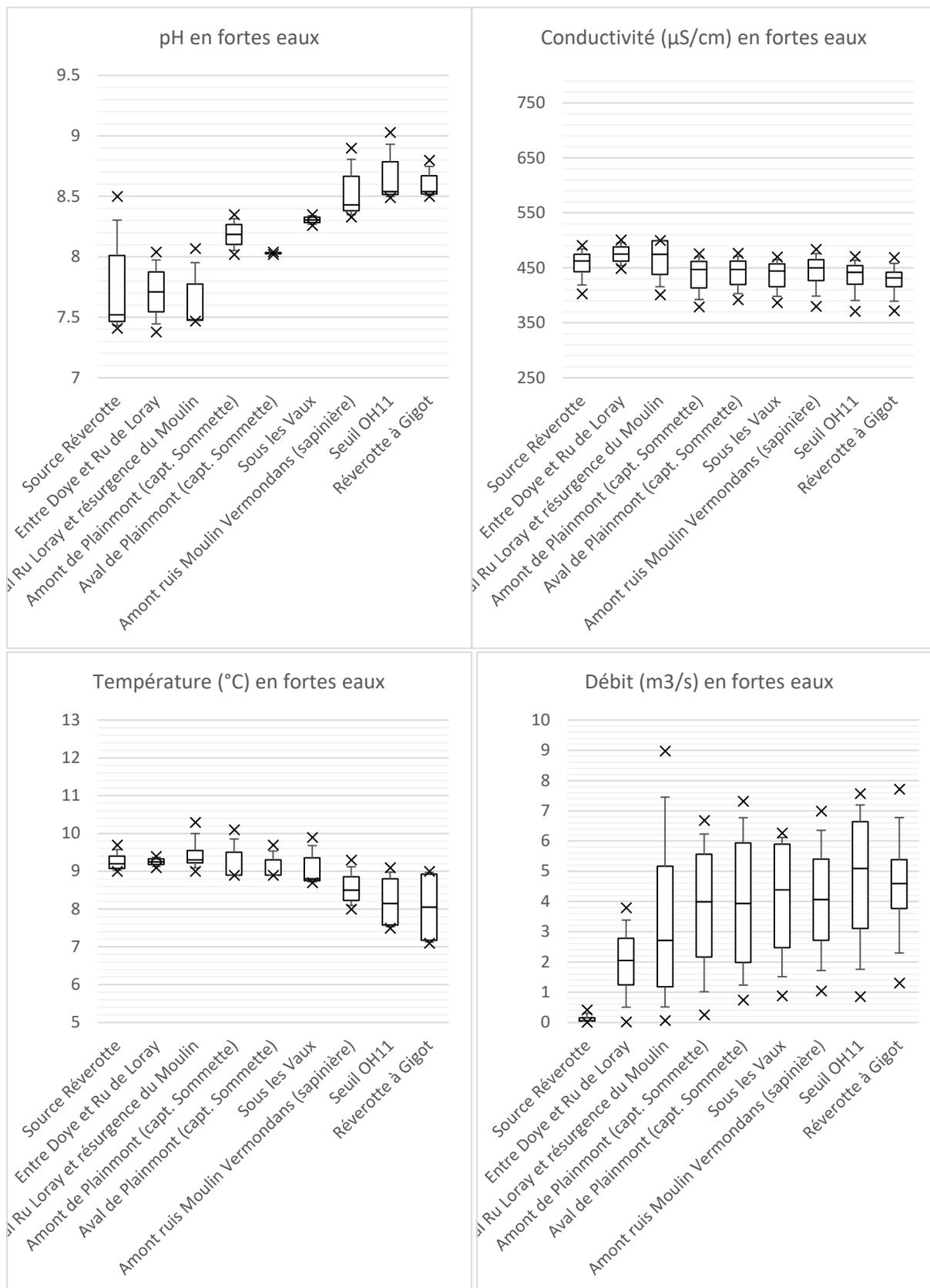


Figure 17. Variabilité longitudinale de paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température) en périodes de fortes eaux.

La variabilité du débit lors de ces périodes est rappelée en bas à droite.

La dynamique spatiale de la conductivité s'avère globalement peu tranchante en période de fortes eaux (un peu plus marquée en tête de bassin), contrastant ainsi avec ce qui est observé en période de basses eaux. Ceci tend à indiquer une origine globalement commune et homogène des eaux s'écoulant le long du linéaire, corroborant ainsi les mesures hydrologiques lors de ces forts débits.

La dynamique spatiale du pH en période de fortes eaux indique quant à elle un contraste important entre les parties apicales et distales du linéaire, avec un espace de transition entre les deux. Le caractère moins alcalin en tête de bassin serait la conséquence d'un faible temps de contact des eaux avec le carbonate de calcium : il s'agirait donc là de transferts rapides des eaux de pluies vers les résurgences karstiques apicales, mécanismes particulièrement efficaces en période de saturation de l'épikarst. Plus en aval, le temps de contact entre eaux de ruissellements et la roche carbonatée s'accroît (d'où un pH davantage alcalin), *via* les écoulements surfaciques d'une part, et d'autre part *via* des réseaux souterrains plus profonds et donc des temps de transferts plus longs qu'au niveau de l'épikarst apical.

La température tamponnée de la moitié amont du linéaire (globalement entre 9 et 9,5°C) indique pour sa part un lien étroit entre écoulements surfaciques et le réseau karstique dans ce secteur. Cette proximité tend à se distendre au niveau de la moitié aval du linéaire, d'où un refroidissement croissant de la température de la Reverotte via un temps de contact croissant avec les faibles températures atmosphériques (fortes eaux essentiellement hivernales).

En résumé, en période de fortes eaux, l'épikarst saturé engendre des transferts rapides et massifs vers les résurgences apicales de la Reverotte, contributeurs d'une part majeure du débit global du cours d'eau. Plus en aval, les liens entre eaux souterraines et surfaciques tendent à se distendre au profit de mécanismes davantage centrés sur des transferts longitudinaux (part des écoulements de surface davantage affirmée, sans être pour autant exclusifs).

4.3.3. En période de basses eaux

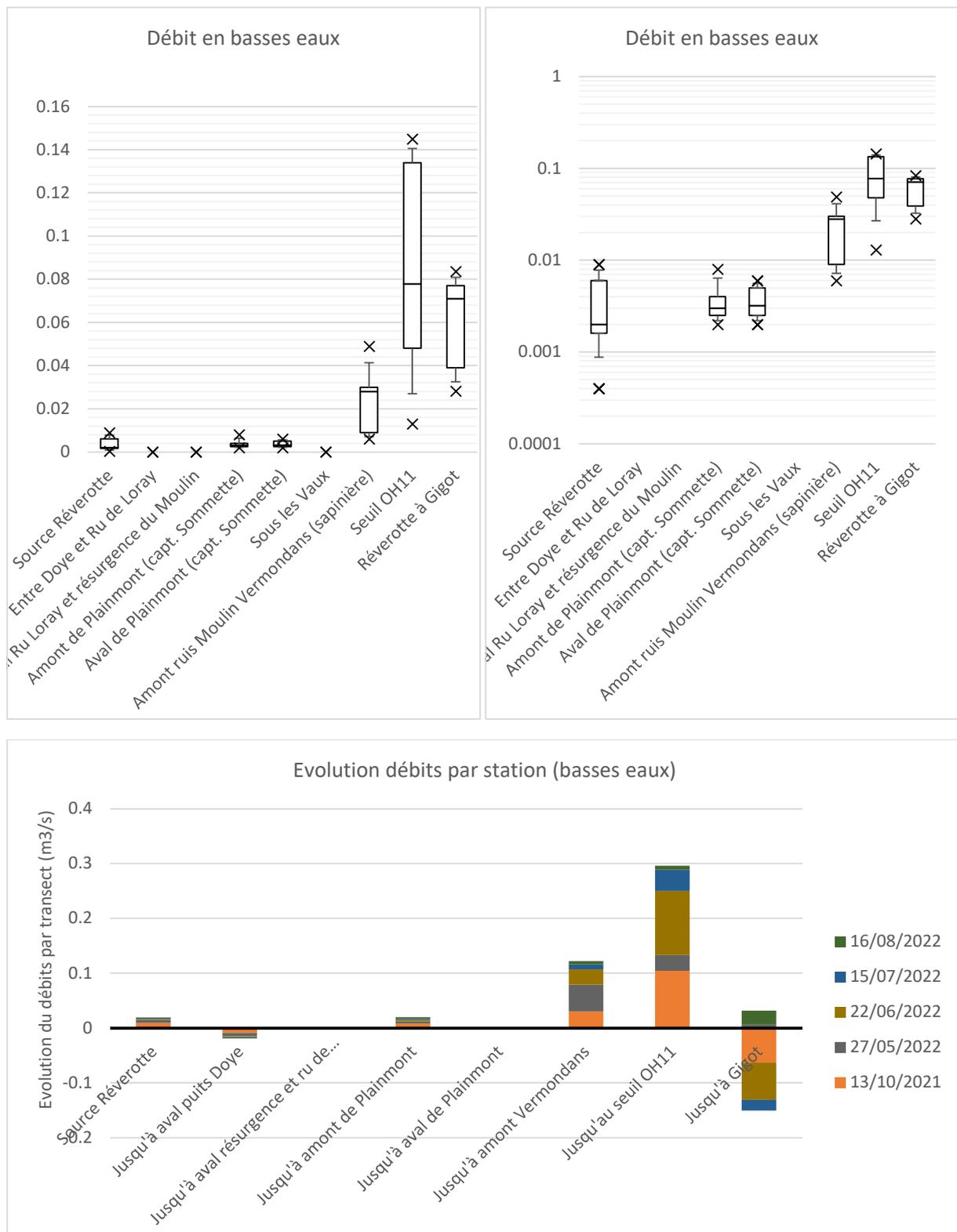


Figure 18. Variabilité longitudinale du débit (m3/s) en période d'été

Echelles linéaires et logarithmiques en haut, évolutions entre deux points de mesures successifs en bas (valeurs négatives = perte de débit entre les 2 points).

Le débit de la Reverotte en période d'étiage se constitue essentiellement dans sa moitié aval, et plus encore dans son dernier tiers de linéaire. A noter des pertes récurrentes mesurées dans la partie la plus distale du cours d'eau, en amont de Gigot.

Plus en amont, on observe des débits faibles mais pérennes au niveau de la source, se perdant intégralement en amont du Puits de la Doye après quelques centaines de mètres d'écoulements surfaciques. Un écoulement faible mais pérenne est de nouveau observé quelques kilomètres plus en aval dans le secteur de Plainmont, avant de nouveau de se perdre intégralement dans le karst.

Les 2 figures suivantes illustrent ces dynamiques spatiales lors de 2 campagnes réalisées en périodes d'étiage.

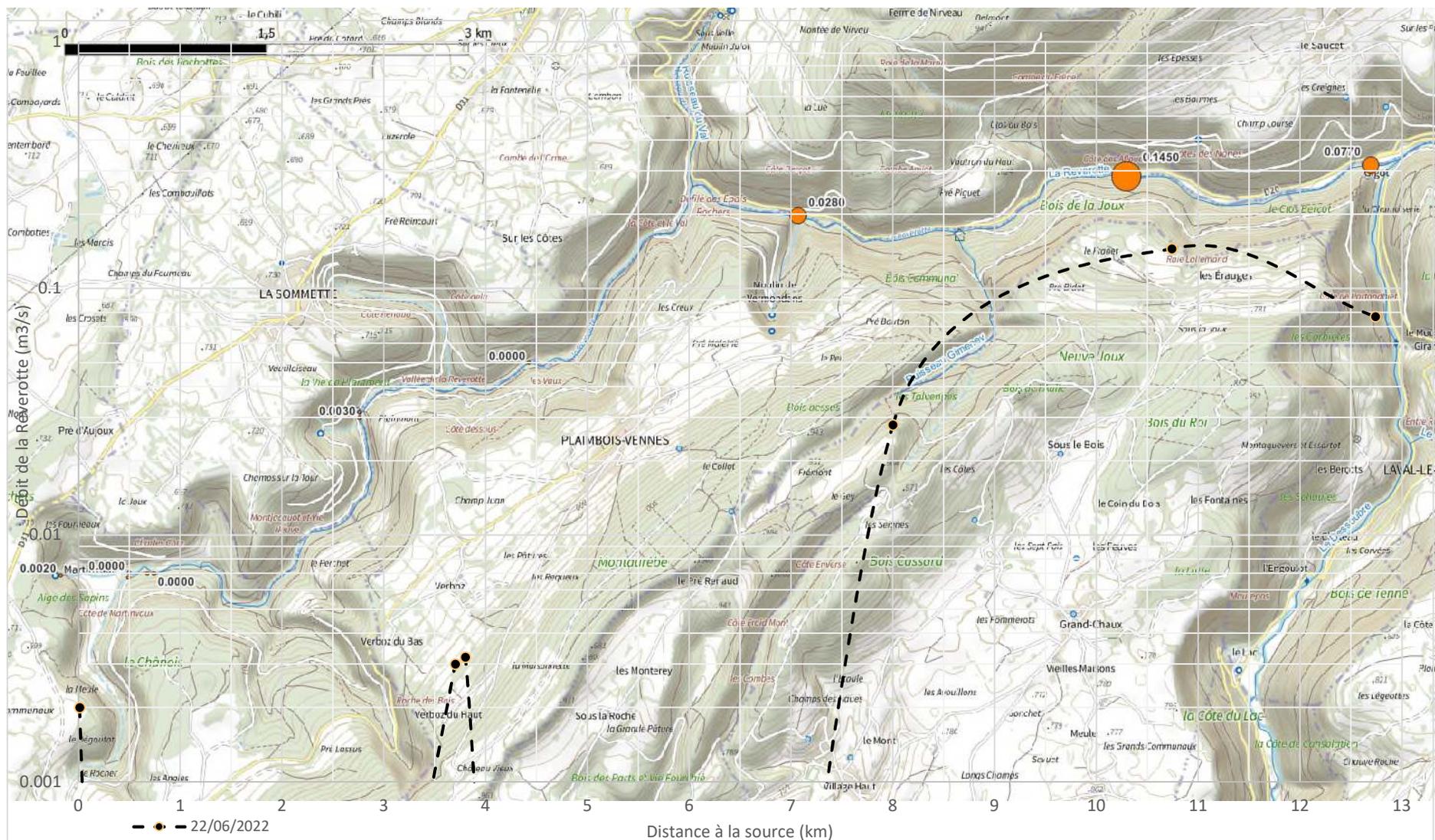


Figure 19. Evolution longitudinale du débit de la Réverotte le 22 juin 2022. Les ronds orange localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.

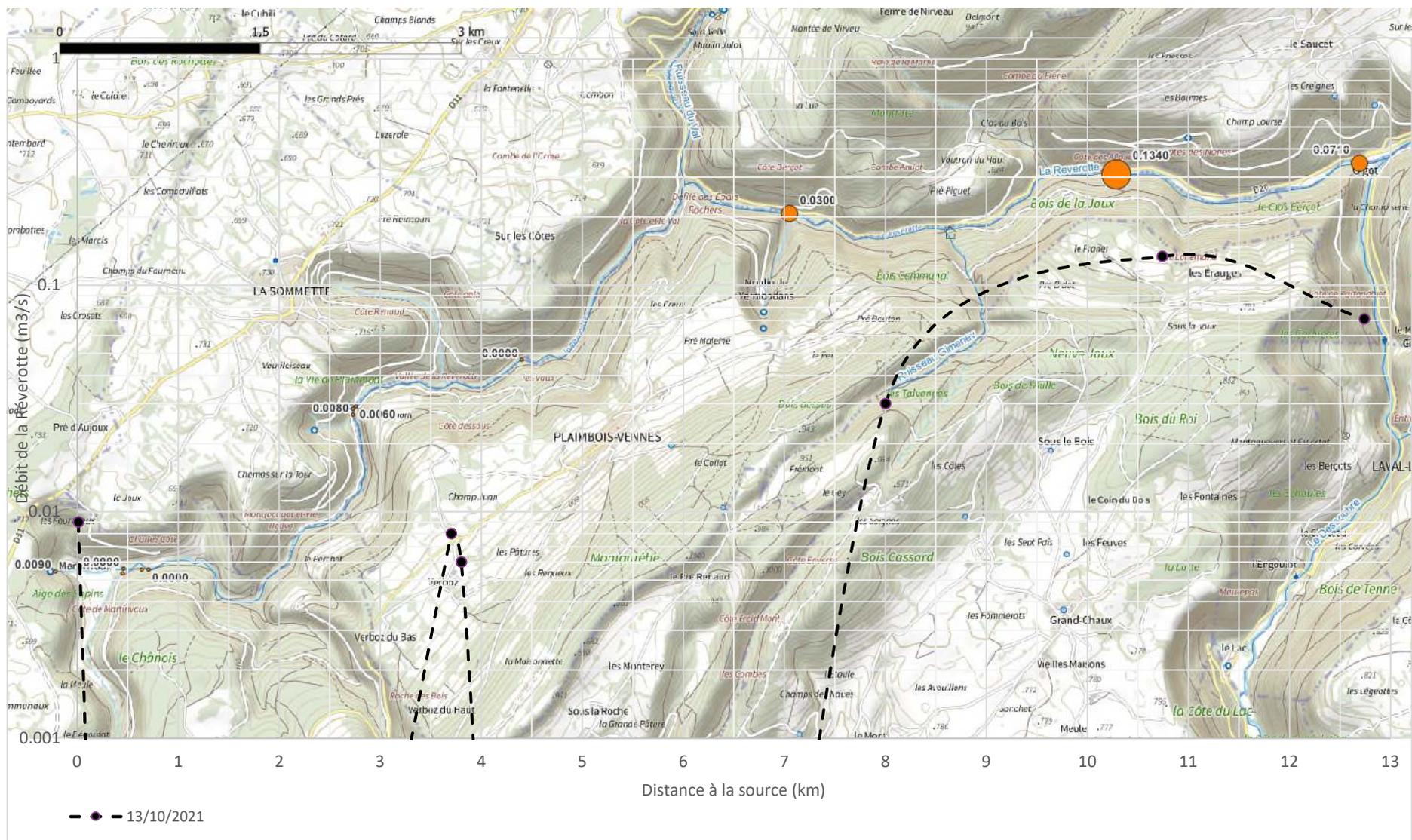


Figure 20. Evolution longitudinale du débit de la Réverotte le 13 octobre 2021. Les ronds orange localisent les stations de jaugeages et leurs tailles sont proportionnés aux débits mesurés. Les pointillés sont intégrés au graphique superposé représentant les débits (échelle logarithmique) en fonction de la distance à la source.

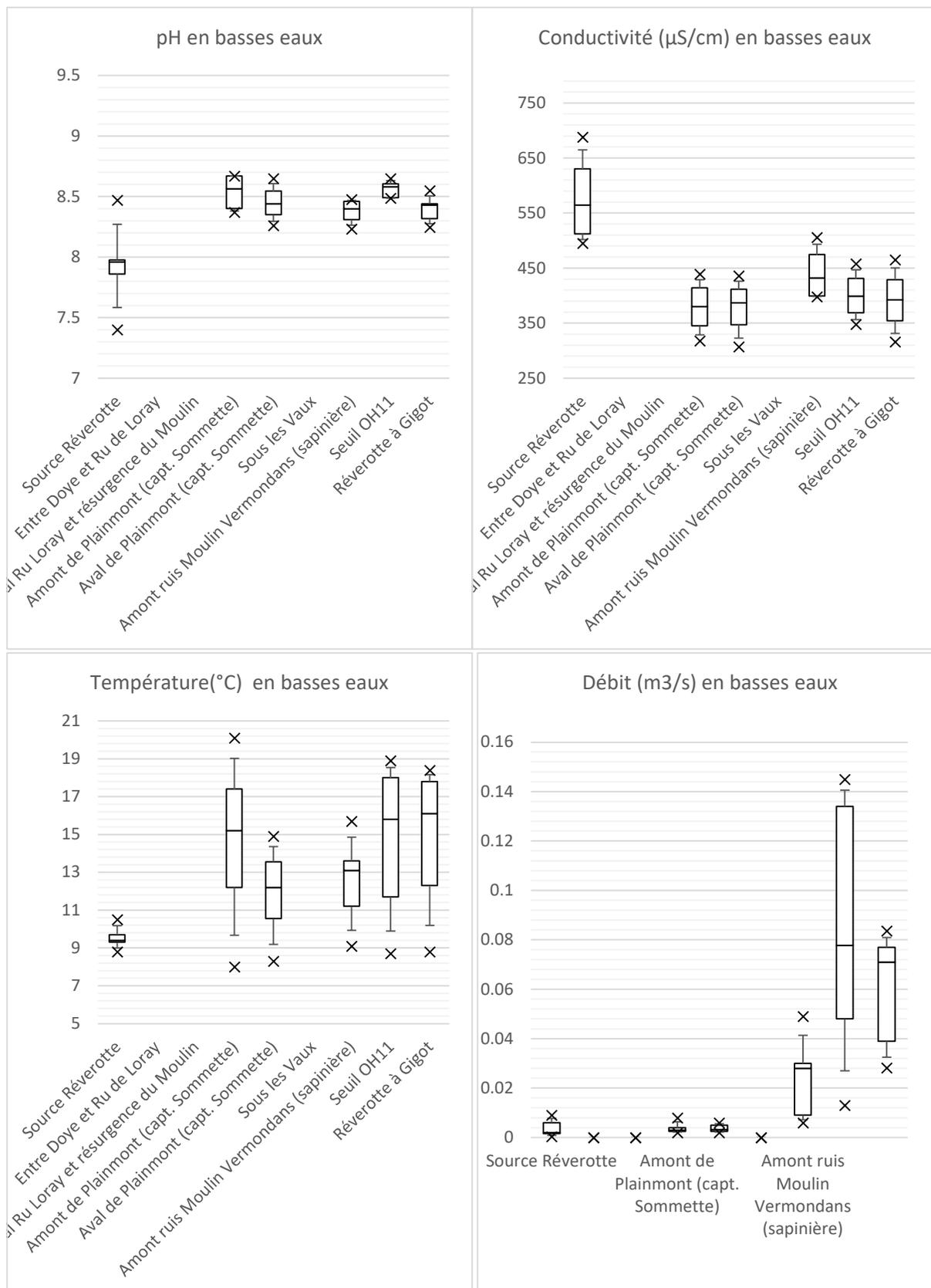


Figure 21. Variabilité longitudinale de paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température) en périodes d'étiage.

La variabilité du débit lors de ces périodes est rappelée en bas à droite.

Les pH de la Reverotte sont nettement alcalins en période de basses eaux, de façon un peu moins marquée au niveau de la source. Ceci indique des temps de contact relativement longs avec le carbonate de calcium des roches calcaires, i.e. un temps de résidence relativement long de l'eau dans le réseau karstique avant sa résurgence à la surface. Ce mécanisme diffère pour partie au niveau de la source où le temps de résidence dans ce karst le plus superficiel demeurerait moins durable.

Similairement, la dynamique spatiale de la conductivité indique le caractère « à part » de la source en période de basses eaux par rapport à une relative homogénéité des mécanismes de transferts des écoulements plus en aval.

La température de la Reverotte indique pour sa part des temps de contact significatifs avec les températures atmosphériques élevées, donc une origine souterraine de ces eaux plus distantes en termes temporels. Autrement dit, la faiblesse des vitesses en période de basses eaux favorise un temps de contact avec les températures atmosphériques plus longs, et donc un éloignement de la température de l'eau de surface avec la température de l'eau souterraine. Une nouvelle fois, la source fait exception, avec le caractère tamponné de la température qui est issue directement du karst : l'eau provient directement du karst sans avoir eu le temps de disposer d'une température fortement impacté par l'atmosphère, même en période de basses eaux.

Dans ce cadre général essentiellement marqué par un fort contraste source/reste du linéaire en période de basses eaux, on observe par ailleurs des nuances sous-tendant des liens plus ou moins affirmés avec des résurgences karstiques au contributions plus ou moins relatives :

- Résurgences de Plainmont (température davantage tamponnée à l'aval du captage) : hormis le trop-plein du captage de la Sommette, des petits écoulements latéraux plus ou moins diffus sont observés (rive gauche) et surtout un contact plus direct avec le karst à l'aval du pont est fortement suspecté ;
- Amont de la confluence avec le ruisseau du Moulin de Vermondans : conductivité un peu plus élevée et température davantage tamponnée (comparativement à plus en aval) : proximité géographique (à préciser) avec le début des résurgences aval contribuant fortement au débit de la Reverotte en période d'étiage.

Il est toutefois à remarquer que la plus forte contribution au débit qui réside à l'amont du seuil OH11 ne se traduit pas par un particularisme physico-chimique ostensible.

En résumé, en période de basses eaux, l'alimentation de la Reverotte se réalise essentiellement *via* le contact direct entre karst profond et la partie aval du linéaire. Ces eaux ont résidé longuement dans le système karstique puis transitent lentement à la surface, leur laissant le temps de se réchauffer en période estivale. La première moitié du linéaire est globalement déconnectée de ce karst profond, et les karsts plus superficiels ne sont plus suffisamment saturés pour alimenter leurs résurgences, d'où des assecs fréquents et durables. A ce mécanisme d'ensemble grossier, il convient bien entendu d'ajouter des nuances explicatives des variations longitudinales (pertes/résurgences) selon la proximité de failles et/ou de marnes intermédiaires (pérennité des flux à la source et vers Plainmont, pertes à Gigot...).

4.4. MESURES EN CONTINU

4.4.1. Tête de bassin (aval puits de la Doye)

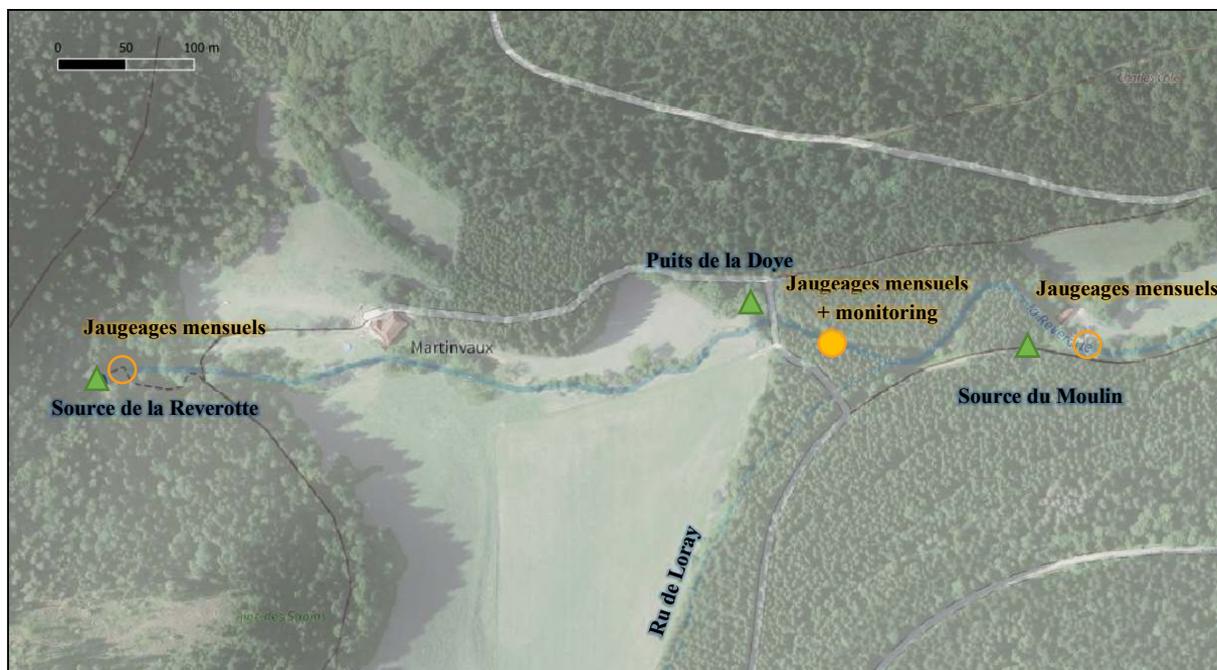


Figure 22. Localisation des points de mesures dans la partie apicale de la Reverotte.

4.4.1.1. Courbe de tarage

La chronique des hauteurs d'eau utilisée pour le tarage de la station localisée à l'aval du Puits de la Doye est issue des enregistrements piézométriques de ce gouffre (BRGM, station 05045X0100) : la résolution des mesures y est élevée (fréquence horaire), la chronique des données y est ancienne, et enfin son tarage rendra possible d'évaluer les hydrogrammes correspondants à la fois anciens et futurs (le suivi de la station étant pérenne).

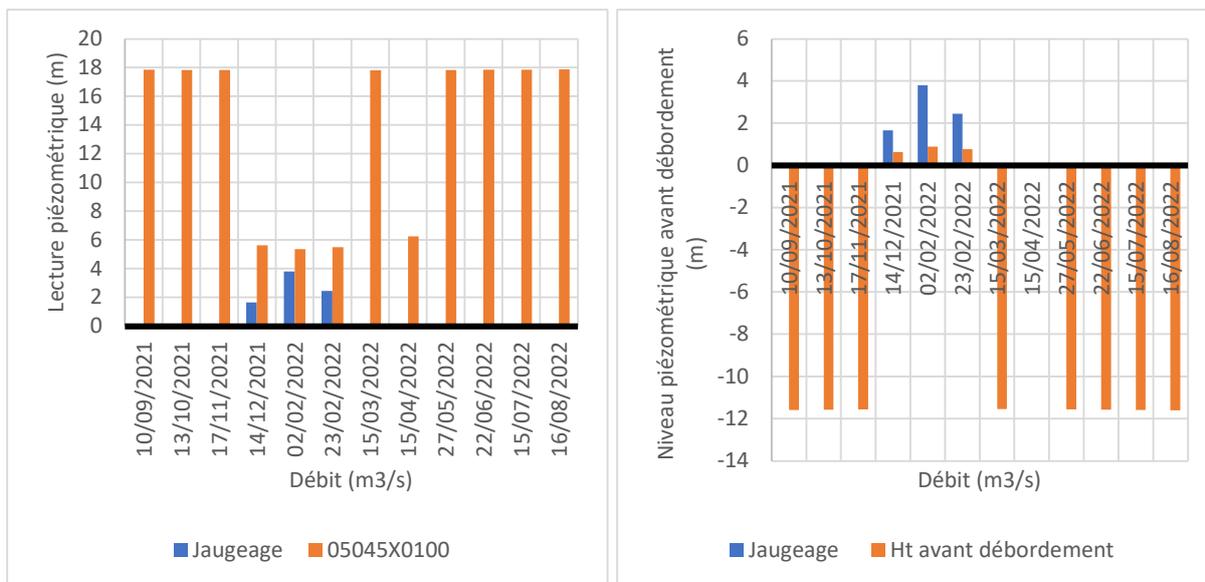


Figure 23. Mesures piézométriques et débits jaugés

Orange : mesures piézométriques (m) (valeurs brutes à gauche, hauteur par rapport à la surface à droite). Bleu : débits jaugés à l'aval du Puits de la Doye (4 valeurs non à sec, donc 1 très faible en avril 2022).

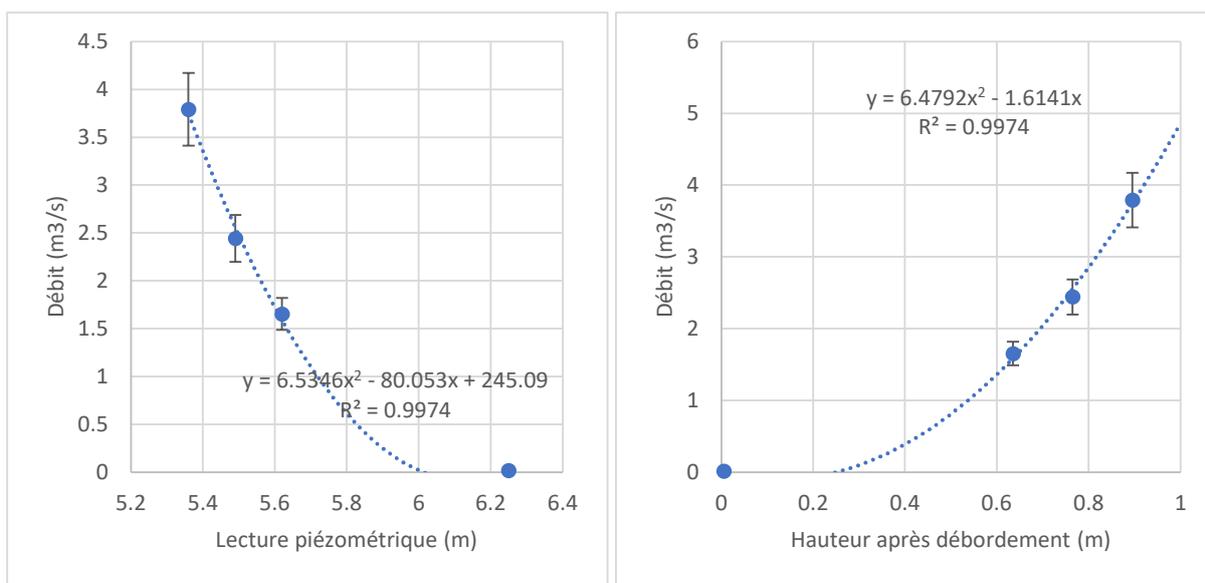


Figure 24. Tarage du Puits de la Doye

A gauche : relation polynomiale entre lecture piézométrique brute et débit (formule directement utilisable pour construire des hydrogrammes). A droite : représentation plus classique pour une courbe de tarage via les hauteurs d'eau après débordement. Les barres d'erreurs verticales correspondent aux incertitudes de jaugeage communément admises (10% de la mesure).

Parmi les 4 campagnes de jaugeages réalisées, 4 ne correspondirent pas à des assècs à l'aval du Puits de la Doye, le débit ayant été très faible le 15 avril 2022 (17 L/s) avec un niveau piézométrique affleurant la surface. La cote piézométrique de débordement du gouffre est de 6,255m (hauteur à laquelle doit être retrancher la lecture piézométrique afin de disposer d'une altitude relative à la surface) : la cote de débordement était ainsi par exemple de 0,5cm le 15 avril 2022.

Remarque : le coefficient de détermination de la courbe de tarage est élevé (99,74%) et le serait encore davantage (99,99%) si on effectuait la correction excluant le débit provenant de la source de la Reverotte et venant s'ajouter aux débits de débordement du gouffre. Néanmoins, la part contributive de cette source demeure anecdotique par rapport aux débits directement générés par le Puits de la Doye (uniquement en hautes eaux, cf chapitre 3.2). En outre, cette approche répondrait à la question « quel est le débit surfacique généré par le débordement du Puits de la Doye ? », mais pas à la problématique présente « quel est le débit de la Reverotte à l'aval du Puits de la Doye ? ».

4.4.1.2. Hydrogramme, piézogramme et hyétogramme

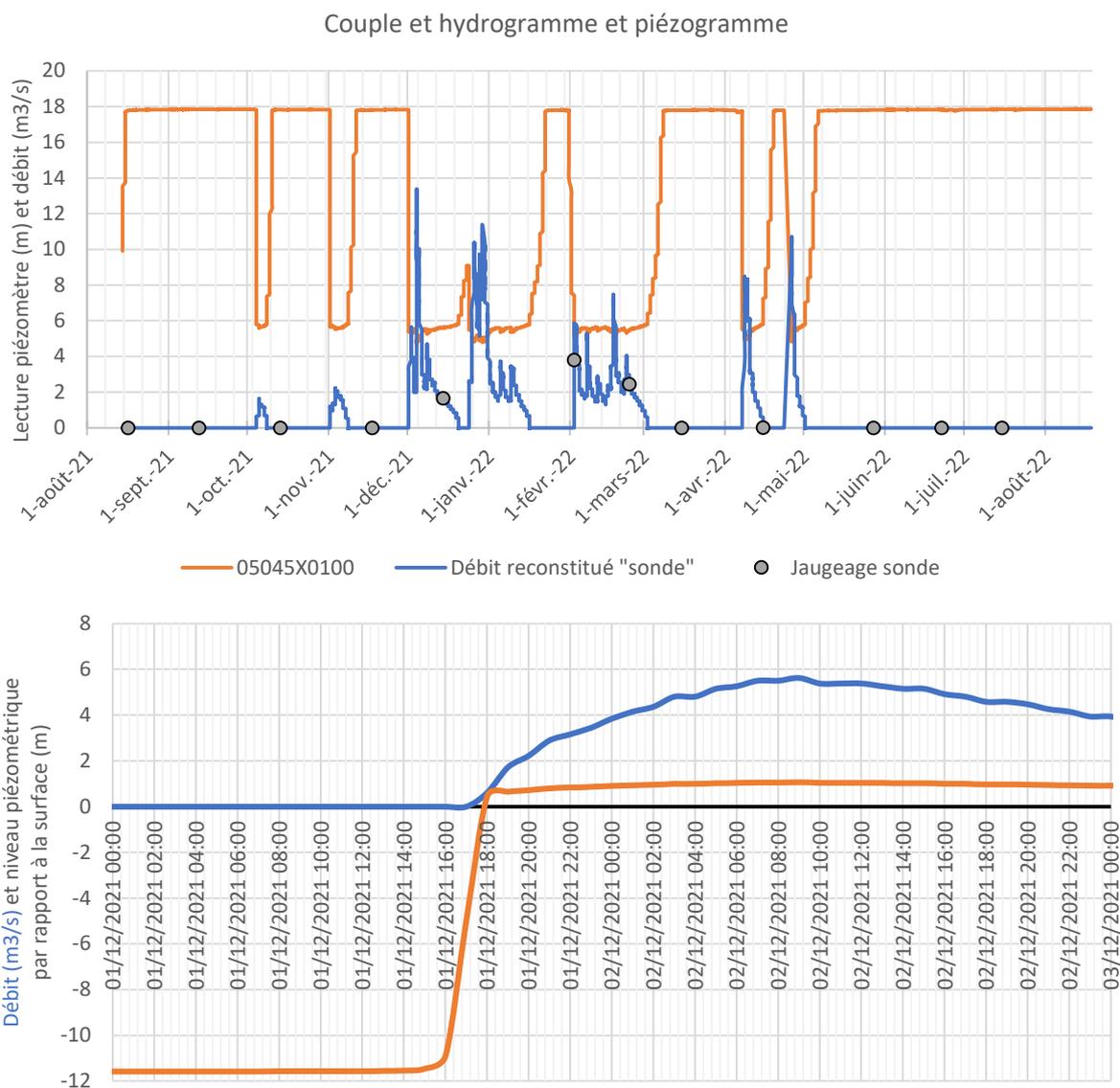


Figure 25. Hydrogramme de la Reverotte à l'aval du Puits de la Doye, et niveaux piézométriques du gouffre. En bas : Zoom sur la période du 01 au 02 décembre 2021.

Ce tronçon apical de la Reverotte (en aval du Puits de la Doye) fut à sec (puits absorbant) 74,0% du temps entre mi-août 2021 et mi-août 2022. Les 26% où des écoulements étaient présents (puits émissif) ont été répartis en 7 périodes d'une durée comprise entre 04 et 29 jours, lors des plus fortes instabilités hydrologiques. Les écoulements y sont alors généralement particulièrement dynamiques et instables (type pics).

Ce phénomène résulte du fonctionnement « vaclusien » du Puits de la Doye (débordement au-dessus du niveau de circulation dans le sous-sol), avec un remplissage et un débordement du conduit vertical s'opérant en quelques heures voire minutes (e.g. en moins de 2 heures le 01 décembre 2021).

A noter que même en étiage, il perdure un écoulement souterrain de quelques litres par seconde au fond du puits (essai de pompage du 10 juin 2000).

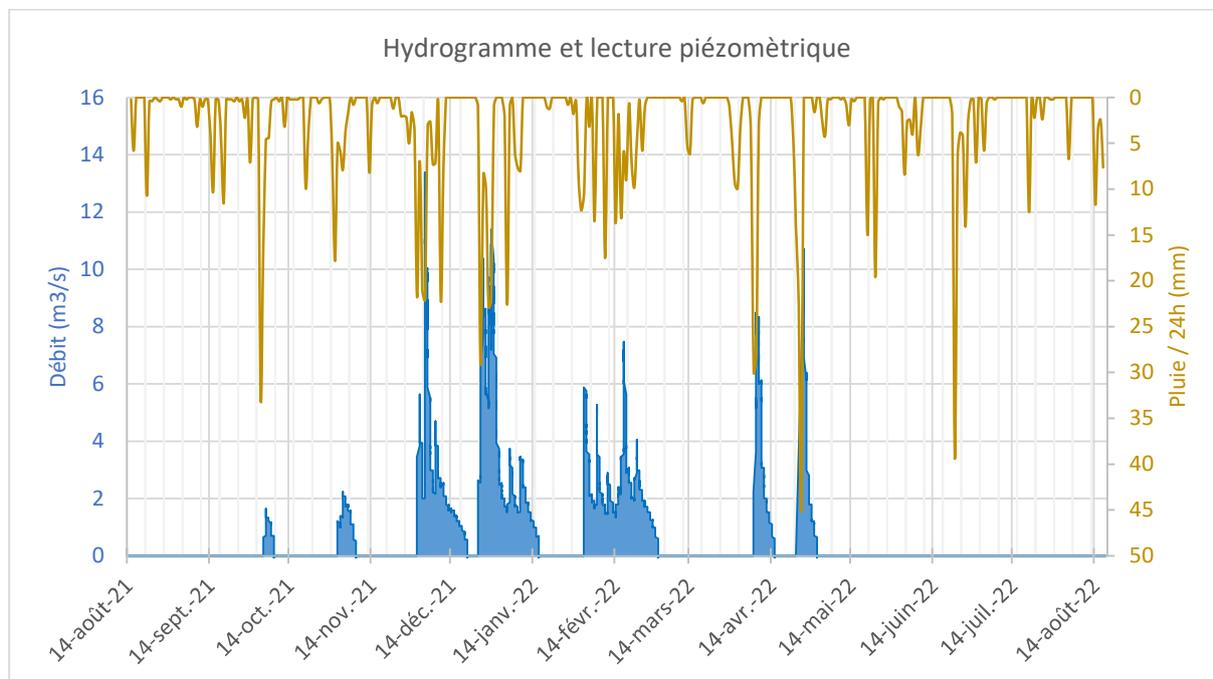


Figure 26. Vue générale de l'hydrogramme et du hyétogramme de la Reverotte à l'aval du Puits de la Doye.

La saisonnalité des précipitations est un facteur primordial pour évaluer l'effet que ces-dernières engendrent sur le débit de ce tronçon de la Reverotte. Ainsi, si des pluies de 10 à 20mm engendrent de brusques et fortes remontées des débits en période hivernale, en revanche, en période printanière et plus encore automnale, des niveaux de précipitations supérieurs sont nécessaires pour engendrer des effets hydrologiques souvent plus brefs et moins intenses. En période estivale, même des précipitations approchant les 40mm/24h (22/06/2022) ne sont pas suffisantes pour rendre le puits émissif.

Afin de caractériser ces différentes modalités de réponses hydrologiques, les chapitres suivants décrivent 4 événements pluie-débit (automnal avec début octobre 2021, hivernal avec début et fin décembre 2021, printanier avec début avril 2022).

4.4.1.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit

4.4.1.3.1. 01/10/2021-10/10/2021 (contexte automnal)

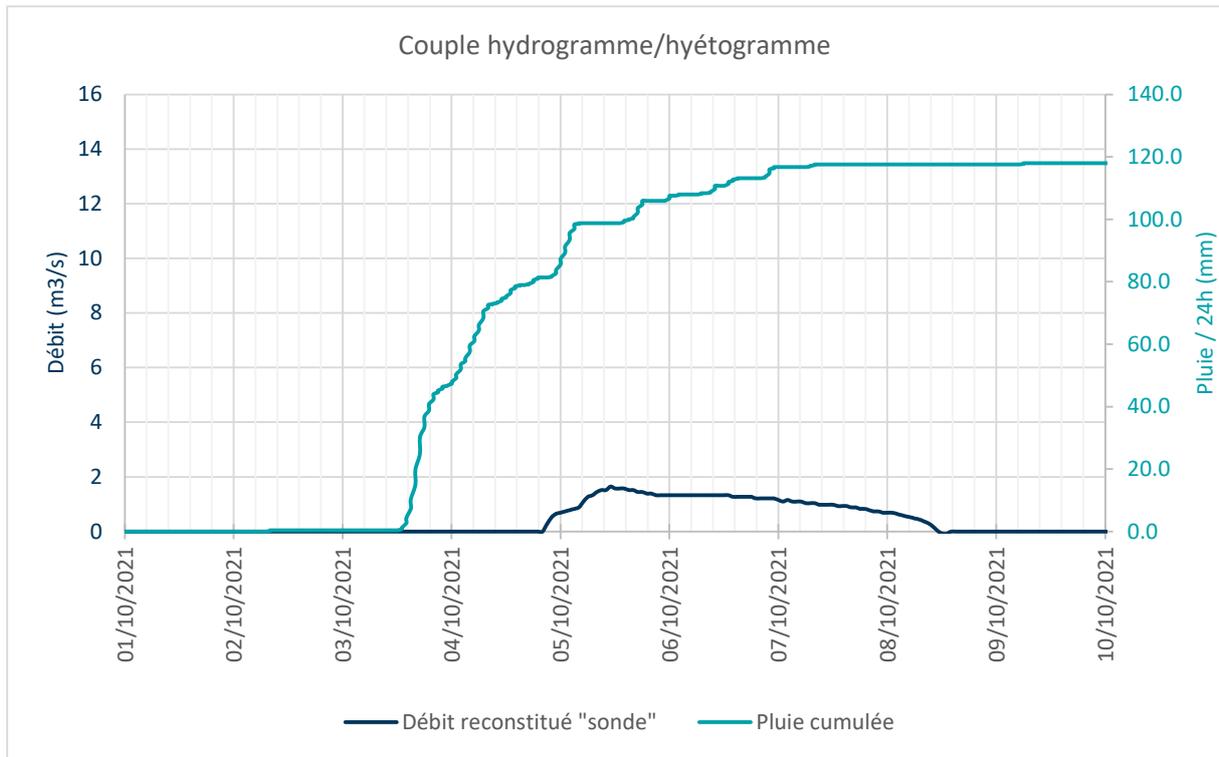


Figure 27. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en contexte automnal. Evènement isolé.

4.4.1.3.2. 30/11/2021-09/12/2021 (contexte hivernal)

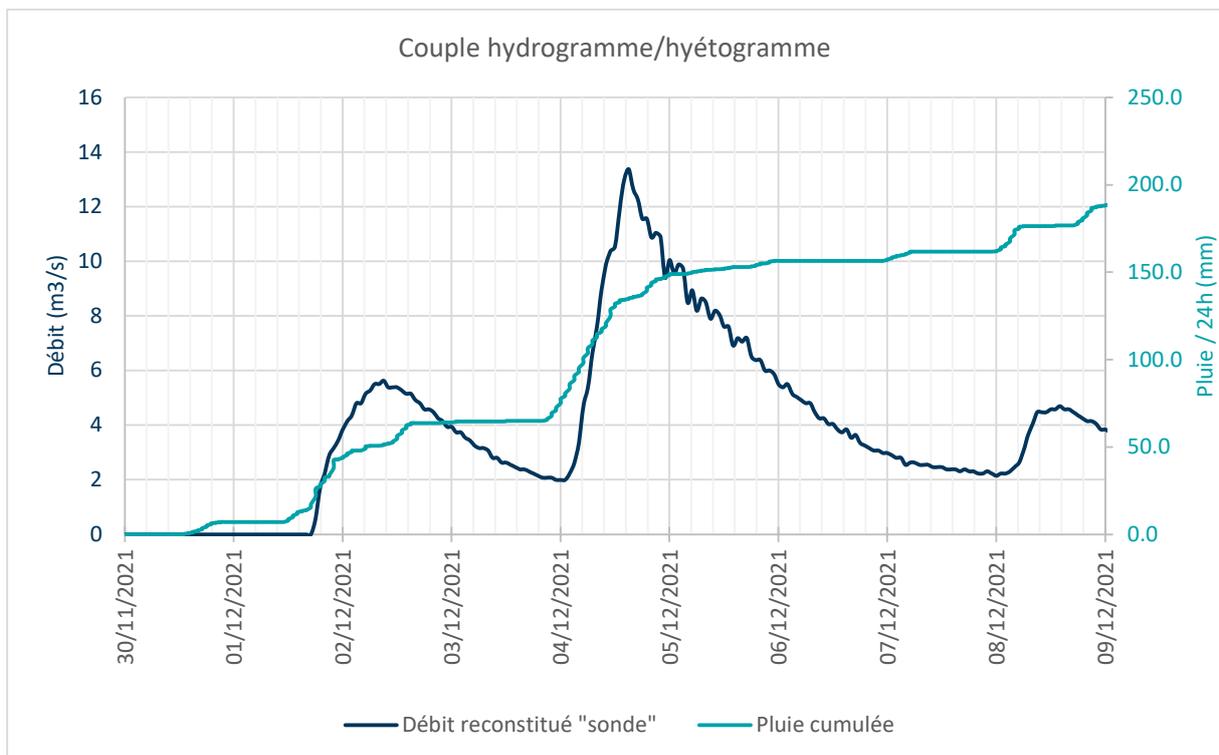


Figure 28. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en début de période hivernale. Succession de 2 événements rapprochés.

4.4.1.3.3. 22/12/2021-07/01/2022 (contexte hivernal)

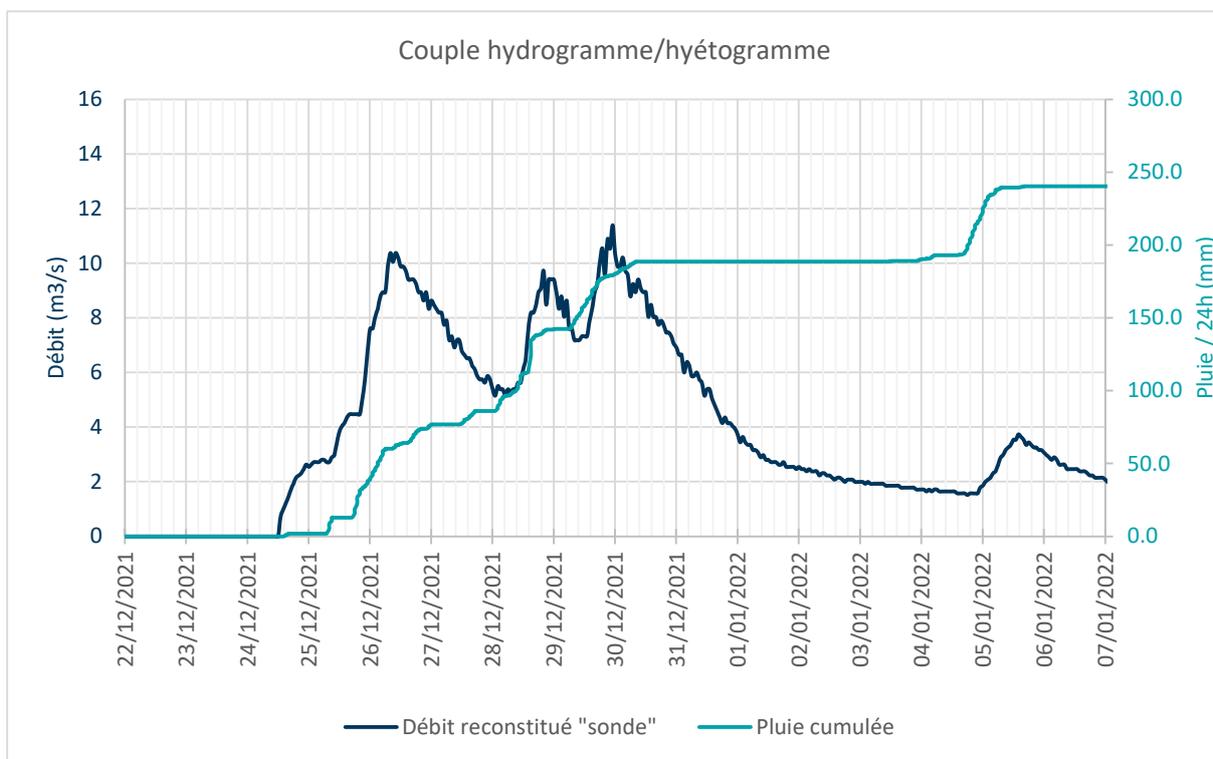


Figure 29. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en période hivernale. Succession de 3 événements se chevauchant.

4.4.1.3.4. 03/04/2022-16/04/2022 (contexte printanier)

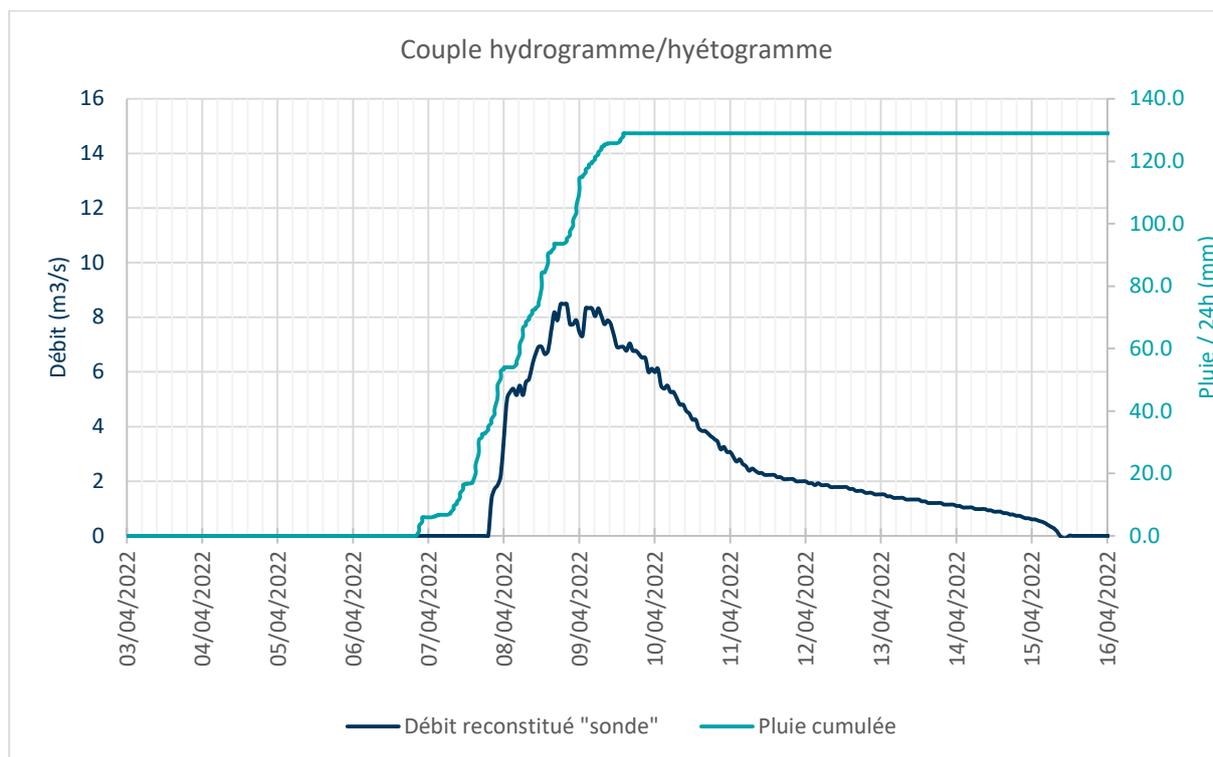


Figure 30. Pluie cumulée et réponse hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye en période printanière. Évènement isolé.

4.4.1.3.5. Caractérisation du fonctionnement hydrologique

	01/10/2021- 10/10/2021	30/11/2021- 09/12/2021	22/12/2021- 07/01/2022	03/04/2022- 16/04/2022
Temps de réponse (entre pics de pluie et de crue)	Environ 29h après le début de la pluie, environ 9h une fois le puits émissif	Environ 10h et 5h	Environ 5h (événements 2 et 3)	Environ 22h après le début de la pluie, environ 4h une fois le puits émissif
Temps de montée (courbe de crue)	16h	17h et 13h	41h (événement 1)	24h
Durée décrue (hors courbe de tarissement)	10h (courbe de tarissement >> courbe de décrue)	38h et 43h	48h (événement 3)	48h
Temps de concentration (courbe de crue + courbe de décrue)	26h	55h et 56h	Environ 90h	72h
Pluies cumulées nécessaires pour atteindre le pic de débit	98,6mm en 37h, i.e. 64mm/24h en moyenne (1,65 m3/s)	134,2mm en environ 4j, i.e. 33,5mm/24h en moyenne (13,4 m3/s)	177mm en environ 4,5j, i.e. 39mm/24h en moyenne (11,4 m3/s)	93,6mm en 34h, i.e. 66mm/24h en moyenne (8,5 m3/s)

Tableau 4. Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la Reverotte en aval du Puits de la Doye.

Les premiers évènements automnaux (qui succèdent aux longues sécheresses estivales) correspondent plutôt à des mises en charge du karst qu'à de réelles crues (durées brèves). Ils nécessitent donc un temps de pluie préalable (>24h) avant que les précipitations ne deviennent efficaces en termes de traduction de débit surfacique.

Les évènements hivernaux s'inscrivent dans des contextes pluvieux récurrents, d'où des mises en charges du karst rapides et des temps de réponses réduits (environ 5h). L'intensité et la durée des crues sont alors élevées, même en l'absence de précipitations particulièrement intenses.

En période printanière, on retrouve de nouveau un temps de pluie préalable nécessaire à la surcharge du karst avant de retrouver un phénomène de crue aux caractéristiques bien plus affirmées qu'en période automnale.

Par conséquent, le fonctionnement hydrologique de ce secteur apical de la Reverotte est dépendant à la fois de façon classique de l'efficacité saisonnière des pluies (évaporation, captation par la végétation), mais aussi de façon plus particulière d'un écrêtage « par le bas » des crues en lien avec la nécessité de saturer le karst au préalable d'écoulements surfaciques. Cette condition remplie, la réactivité du débit aux pluies est alors particulièrement rapide (environ 5h) et avec des temps de montée en crue fonction de la durée des précipitations (entre 13h et 41h dans les cas précédemment exposés).

4.4.1.4. Synthèse

La Reverotte est essentiellement alimentée en période de fortes eaux par les résurgences apicales dont le Puits de la Doye en constitue un exemple (avec la résurgence du Moulin et le Ru de Loray). Ces fortes eaux correspondent à des périodes de saturations récurrentes du réseau souterrain, et donc à une émissivité à la fois réactive et intense équivalente à des pics de crues.

Une illustration de ce fort lien entre émissivité de ces résurgences apicales et fortes eaux de la Reverotte est présenté par les graphiques suivants : que ce soit en 1990 ou en 2021-2022, il existe une nette corrélation entre nombre de jours de débords en tête de bassin et débits mensuels en fermeture de bassin.

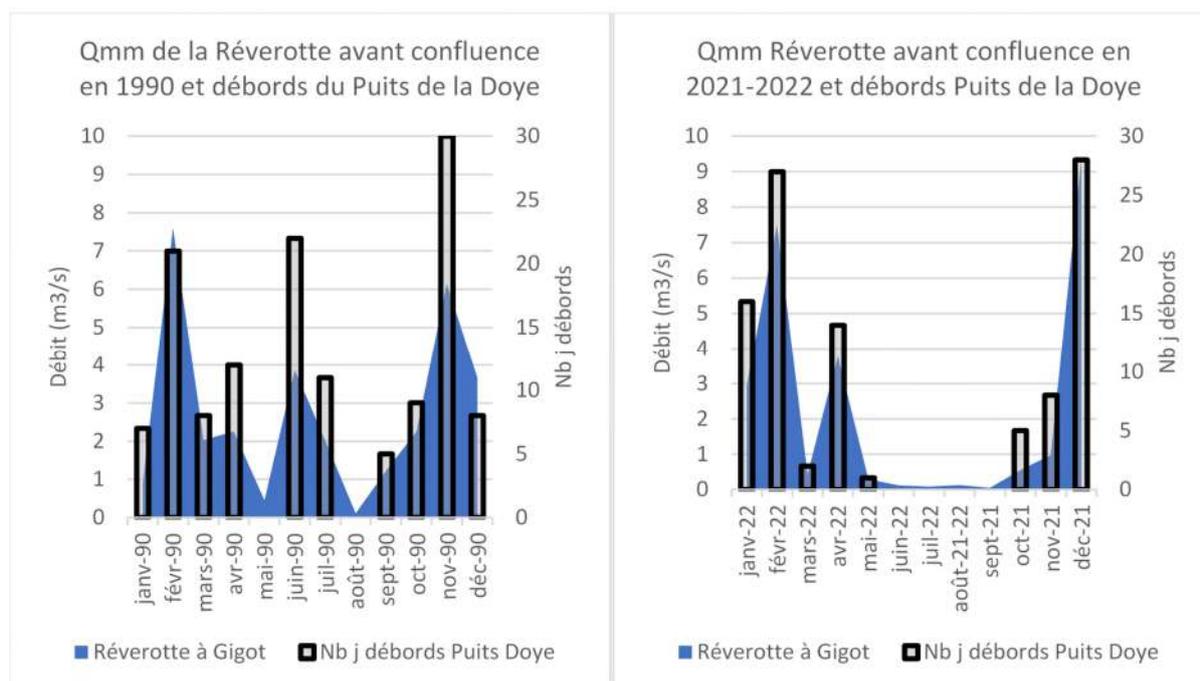


Figure 31. Juxtaposition des Qmm (débit mensuel moyen) de la Reverotte à Gigot et du nombre de jours par mois où le Puits de la Doye est émissif. Données issues de l'étude SRAE 1991 et de la présente étude.

En dehors de ces périodes de débords, un écoulement souterrain demeure pérenne au fond du Puits de la Doye, parfois de seulement quelques litres par secondes (essais de pompage, 2000). Compte tenu des infiltrations très proches des écoulements surfaciques de la source pérenne de la Reverotte (après la traversée de la couche de marnes imperméables du séquanien), il paraît hautement vraisemblable que ces écoulements souterrains en soient issus.

Le devenir de cette eau karstique se pose donc pour les périodes hors hautes-eaux (3/4 de l'année). L'étude SRAE 1991 fait état d'un traçage du puits de la Doye vers la source des 3 Pucelles, donc d'une capture des eaux d'un bassin versant par un autre (Haute-Reverotte vers Haut-Dessoubre), dans des proportions variables selon le contexte de hautes/basses eaux. Cette théorie est reprise dans l'étude Reilé 2005.

Néanmoins, plusieurs interrogations demeurent quant à cette hypothèse :

- Le traçage opéré en 1989 nécessiterait d'être confirmé : l'observation n'a pas été réitérée depuis (à notre connaissance). En outre, l'opération en question ne fut pas réalisée sans difficultés : une première opération avec 1kg de fluorescéine fut infructueuse, la seconde opération résultant de l'injection de 10kg de colorant, puis d'un délai de transfert relativement long (environ 10 jours), ne permettant donc pas de se prémunir d'un éventuel artefact lié à d'autres traçages (le bassin d'alimentation des 3 Pucelles étant très vaste). En

outre, les procédés de surveillance de l'époque étaient loin d'être aussi performants qu'avec les moyens technologiques actuels (e.g. enregistreurs et télétransmission).

- On sait aujourd'hui que le BV alimentant les 3 Pucelles est bien plus vaste que ce qui était suspectée à l'époque de l'étude SRAE 1991 (et sans lien réitéré avec la Haute-Reverotte). Il n'est donc plus « nécessaire » d'expliquer ce débit des 3 Pucelles par une capture totale ou partielle des eaux de la Haute-Reverotte. En outre, les faibles débits pérennes au fond du Puits (évalués lors de l'essai de pompage de 2000) ne seraient potentiellement que très peu contributifs aux débits d'étiage soutenus des résurgences des 3 Pucelles (CD Eau Environnement, 2020).
- Enfin, cette hypothèse irait à l'encontre de l'existence de plis au cœur marneux séparant les bassins du Haut-Dessoubre et de la Reverotte (vallées séparées par l'axe du faisceau). L'étude Reilé 2005 indique qu'une capture se ferait malgré cela par l'intermédiaire de la fracturation du sous-sol, tout en précisant que celle-ci n'est pas localisée à ce jour.

4.4.2. Partie médiane (sous Les Vaux)

4.4.2.1. Courbe de tarage

Cette station monitorée est localisée dans un secteur aux assècs fréquents (en aval du captage de la Sommette (Plainmont)). Le lit mineur est à la fois composé d'un matelas alluvial étoffé et mobile, et de contact direct avec la roche et ses failles. En conséquence, l'établissement de la courbe de tarage est compliqué par la nécessité de se restreindre aux périodes non à sec, mais aussi par la présence occasionnelle d'une hauteur d'eau sans débit associé (exurgence karstique vers la surface), et par les interactions avec le fond sédimentaire mobile (où est fixée la sonde enregistreuse).





Figure 32. Vues de la station monitorée le 15/03/2022. En haut : contact direct avec la roche en rive gauche du lit mineur (eau stagnante). En bas : illustration de la mobilité sédimentaire (sonde « déterrée »).

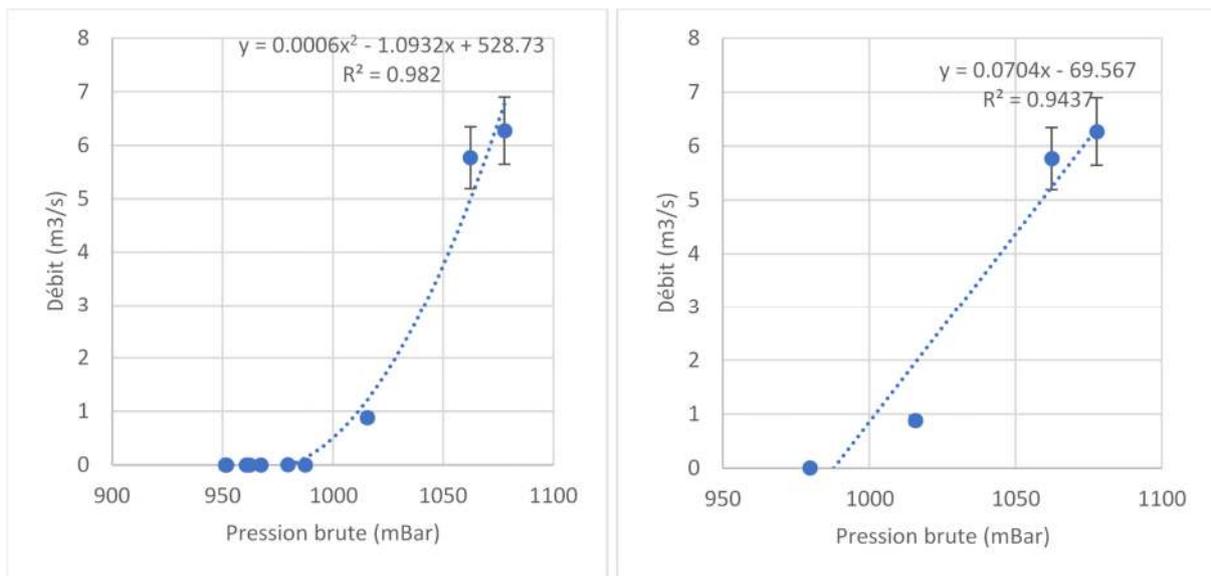


Figure 33. 2 modèles de tarage issus des enregistrements/jaugeages sous Les Vaux : modèle polynomiale toutes campagnes incluses (à gauche), régression linéaire basée sur les 4 campagnes non à sec (à droite).

2 types de modèles de tarage ont été construits à partir des enregistrements et jaugeages réalisés dans cette station. Le modèle polynomial permet d'obtenir un coefficient de détermination élevé (98,2%) mais présente l'inconvénient d'utiliser les différentes hauteurs d'eau à débit nul et d'être réajusté empiriquement. En outre, il tend à sur-évaluer l'intensité des pics de débits (avéré en comparant aux autres hydrogrammes construits).

Le modèle linéaire (celui finalement retenu pour les hydrogrammes) repose sur moins de données et est *a priori* moins bien affiné que le précédent (coefficient de détermination à 94,4%), mais il s'avère davantage extrapolable aux forts débits (sans ajustement empirique). Il tend néanmoins à projeter de faibles débits alors qu'il s'agit parfois d'eaux stagnantes...

4.4.2.2. Hydrogramme, hyétogramme et régime thermique

Ce secteur de la Reverotte fut à sec 57% du temps entre la mi-août 2021 et mi-août 2022. Les 43% du temps en eau furent réparties d'une part en une période principale continue comprise entre le 28/11/2021 et le 13/03/2022, et d'autre part des périodes printanières et automnales en eau de façon plus ponctuelle. A l'inverse, le lit mineur fut en permanence à sec avant le 3 octobre 2021 et après le 3 mai 2022.

Comparativement à l'hydrogramme de la Reverotte plus en amont (en aval du Puits de la Doye), ce tronçon sous Les Vaux s'avère davantage durablement immergé malgré de nouveau une typologie en « pics » dominante, un débit « de base » n'y étant observé que lors de la période hivernale.

Sur le plan thermique, ce fonctionnement hydrologique se traduit par un fonctionnement complexe mais informatif quant à son mécanisme :

- Lors des périodes d'assecs, la température de la sonde est alignée sur la température atmosphérique comme attendu (il ne s'agit donc pas là véritablement de la température de la Reverotte) ;
- Lors des périodes ennoyées, la température de l'eau est plus élevée que l'air en période hivernale et plus faible en été, avec *in fine* un caractère tamponné de l'eau entre 8,7 et 10,4°C, indiquant ainsi une forte connectivité avec les eaux souterraines ;
- Ce caractère tamponné tend à être un peu moins affirmé lorsque les niveaux d'eau demeurent relativement faibles : les faibles écoulements (voire stagnations) particuliers à ces périodes charnières confèrent alors davantage de perméabilité entre température de l'eau et de l'atmosphère (e.g. proche du gel début février 2022).

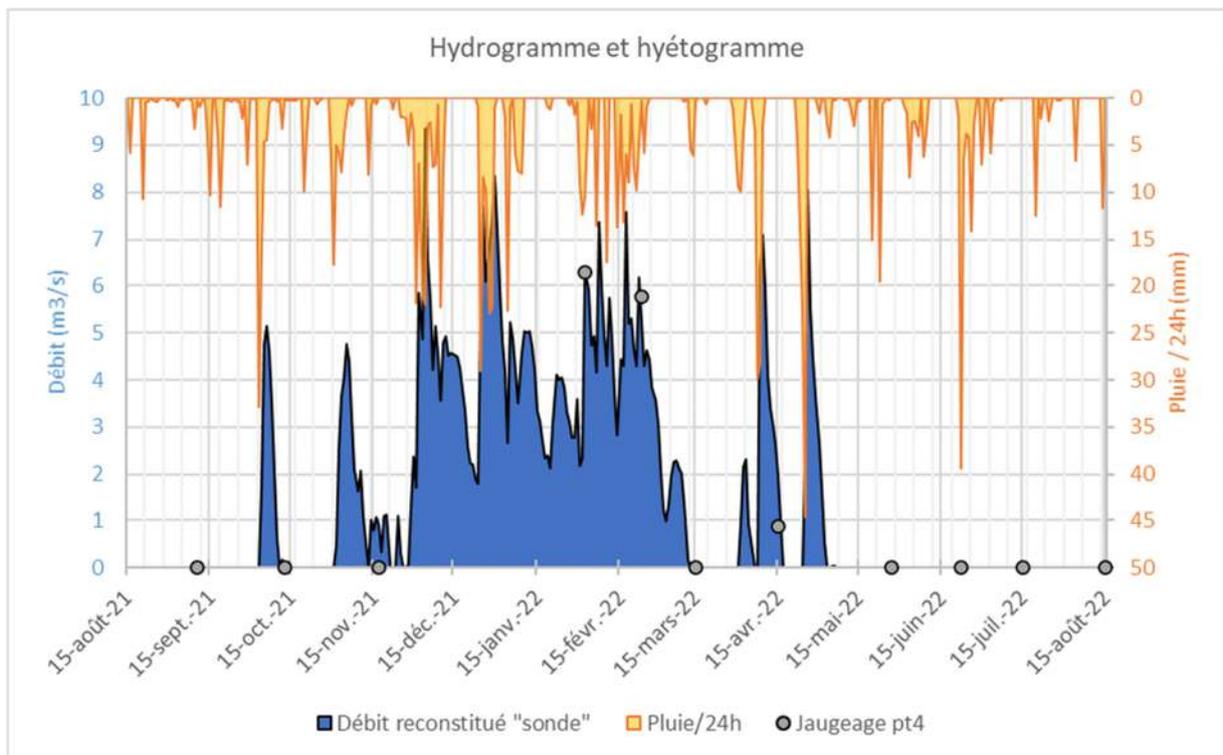


Figure 34. Hydrogramme de la Reverotte sous Les Vaux et hyétogramme associé.

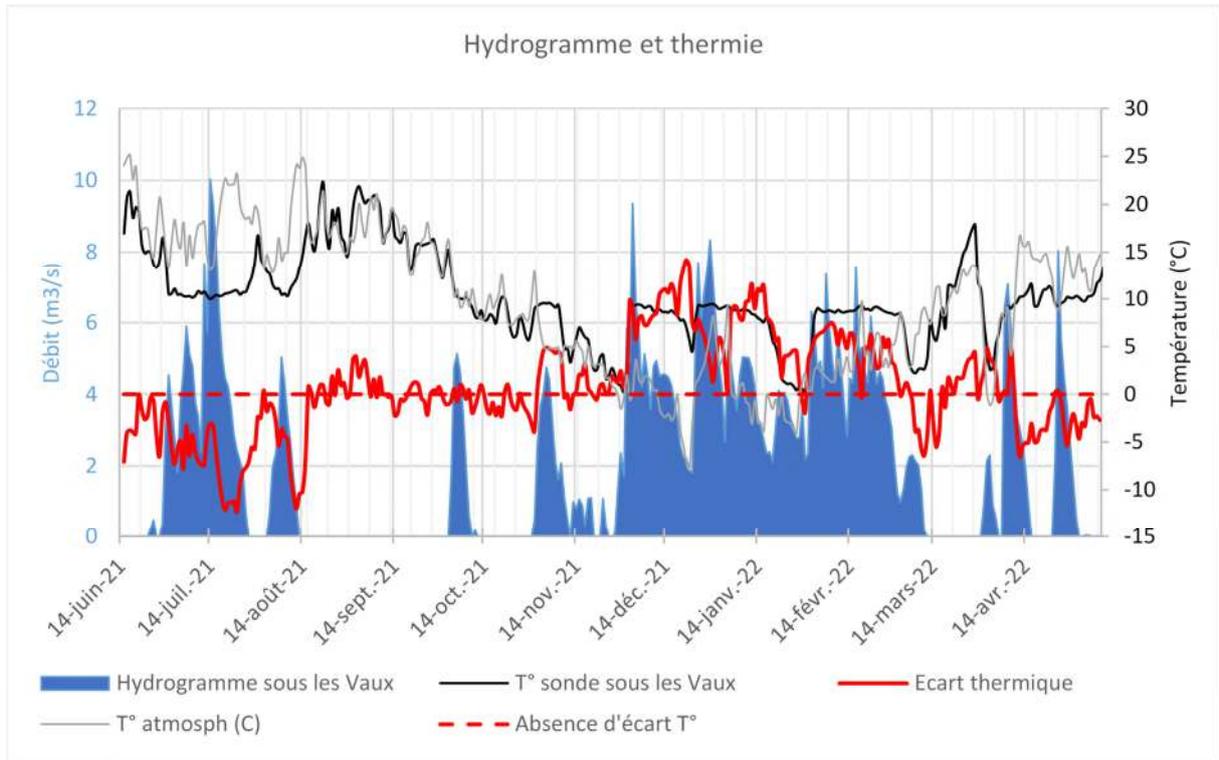


Figure 35. Mise en regard de l'hydrogramme avec la dynamique de la thermie de la Reverotte (température et écart avec la température atmosphérique).

4.4.2.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit

4.4.2.3.1. Contexte hivernal

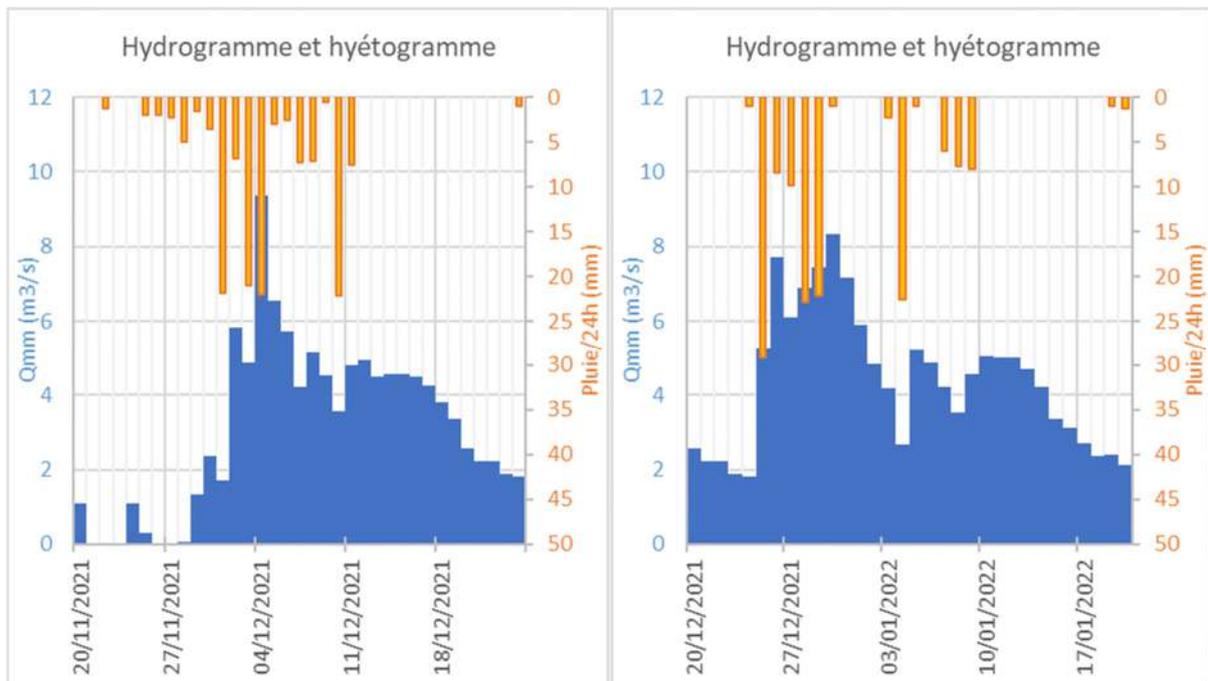


Figure 36. Evènements pluies-débits de début et fin décembre 2021 (résolution journalière).

La résolution des mesures ne permet pas ici de calculer des temps de réponses infra-journalières, mais permettent toutefois de souligner une nouvelle fois la très forte réactivité du milieu : les pics de débits se réalisent le jour-même ou au plus tard le lendemain des pics de pluviométrie.

Le karst sous-jacent étant déjà en permanence « chargé » lors de cette période hivernale, il n'est pas constaté de temps de « mise en charge » préalable, i.e. les premières pluies se traduisent d'ores-et-déjà par une augmentation du débit. Cette « efficacité » se traduit par d'importants pics hydrologiques ($>8 \text{ m}^3/\text{s}$) malgré des niveaux de précipitations plutôt modérés (mais récurrents).

4.4.2.3.2. Contexte printanier et automnal

Comme pour la période hivernale, on constate une forte réactivité du débit ($>1\text{j}$) aux précipitations printanières et automnales, une fois le temps de mise en charge du karst sous-jacent réalisé. Ce-dernier nécessite d'être un peu plus affirmé en sortie d'étiage (humidité récurrente plusieurs semaines précédentes) qu'en sortie d'hiver (1 à 2j de pluies suffisent à la faire devenir efficace).

Malgré des événements pluvieux moins durables qu'en période hivernale, la forte réactivité hydrologique du milieu combinée à des précipitations intenses (types événements orageux) engendre des pics de débit presque aussi élevés, mais nettement moins durables (7 à 9 jours entre les 2 assocs successifs).

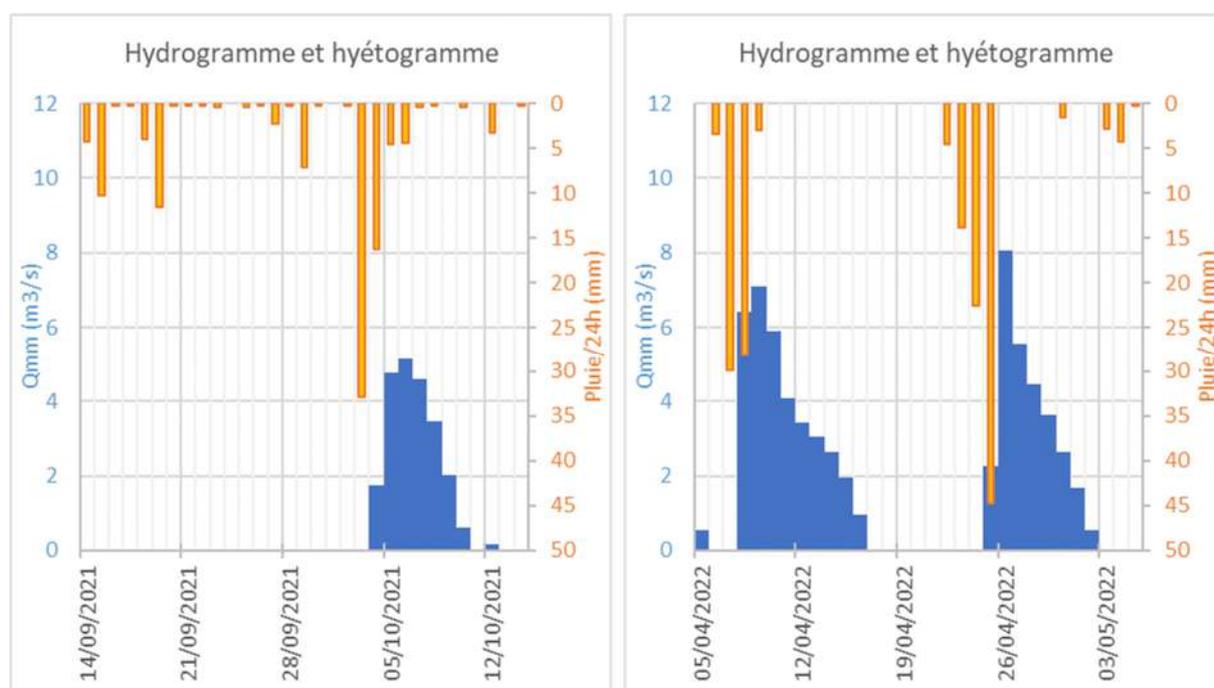


Figure 37. Evènements pluies-débits en octobre 2021 (sortie d'étiage estival) et avril 2022 (transition entre fortes eaux hivernales et étiage estival), avec une résolution journalière.

4.4.2.3.3. Contexte estival

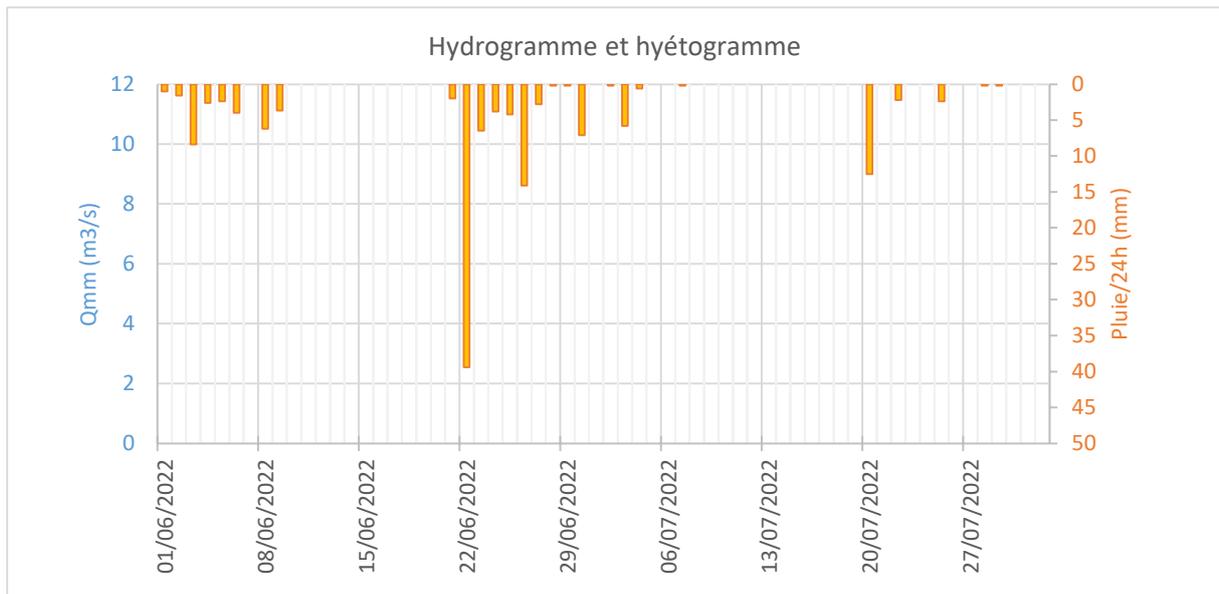


Figure 38. Evènements pluies-débits en juin-juillet 2022 (étiage estival), avec une résolution journalière.

En période estivale, la sous-saturation hydrologique du karst sous-jacent est telle que même des événements pluvieux intenses (approchant les 40mm/24h), suivi par plus d'une semaine de précipitations plus modestes, ne suffisent pas à mettre en charge le lit superficiel de la Reverotte dans ce tronçon.

Même en dehors de la sécheresse exceptionnelle de 2022, on constate des assecs estivaux durables (comme cela fut par exemple le cas 2021).

4.4.2.4. Synthèse

L'hydrologie de ce tronçon de la Reverotte en aval de Plainmont (très peu documenté dans la littérature contrairement au tronçon en amont de Plainmont) est en grande partie régi par le contact direct entre le lit mineur et le karst sous-jacent, i.e. par la capacité de ce dernier à être ou non captant des écoulements surfaciques en fonction de son degré de saturation hydrologique.

Localisé à une altitude plus basse que le tronçon à l'aval du Puits de la Doye, les fréquences et durées d'ennoyement du karst y sont plus élevées, conférant ainsi une saisonnalité encore plus marquée entre une période hivernale à écoulements pérennes et une période estivale en assecs marqués. Les périodes de transitions automnales et printanières demeurent sujettes à des épisodes de crues durant de l'ordre d'une semaine, et les longueurs du tronçon ennoyé y sont particulièrement variables (avec parfois des eaux stagnantes, i.e. débords du karst sans véritables écoulements surfaciques).



Figure 39. Vue du tronçon sous Les Vaux. A gauche : période de fortes eaux le 02/02/2022 (vue d'une afférence intermittente en rive gauche). A droite : en période d'assec le 15/07/2022 (contact direct du lit mineur avec le karst fracturé).

4.4.3. Fermeture de bassin (Gigot)

4.4.3.1. Courbe de tarage

Contrairement aux enregistrements thermiques, les mesures de la hauteur d'eau (pression) enregistrées par la sonde fixée sous le pont de Gigot ont été altérées et ne sont pas en l'état exploitables (dérangement du matériel, chute d'un arbre avec embâcles modifiant la ligne d'eau sous l'arche du pont pendant plusieurs mois...). Afin de construire un hydrogramme de cette station de la Reverotte (fermeture de bassin sans assec), la question de la pertinence d'une corrélation avec les débits du Dessoubre a été posée.

Une première approche a consisté à comparer les débits de ces deux cours d'eau à Gigot, juste avant leur confluence, à partir des données de l'étude SRAE 1991. La Reverotte y présente un débit plus modeste mais selon une proportion relativement pérenne (généralement entre le tiers et la moitié du débit du Dessoubre, respectivement en hautes et basses eaux). Une corrélation linéaire se dégage ainsi nettement entre les jaugeages des deux cours d'eau (coef. détermination à 96,4%).

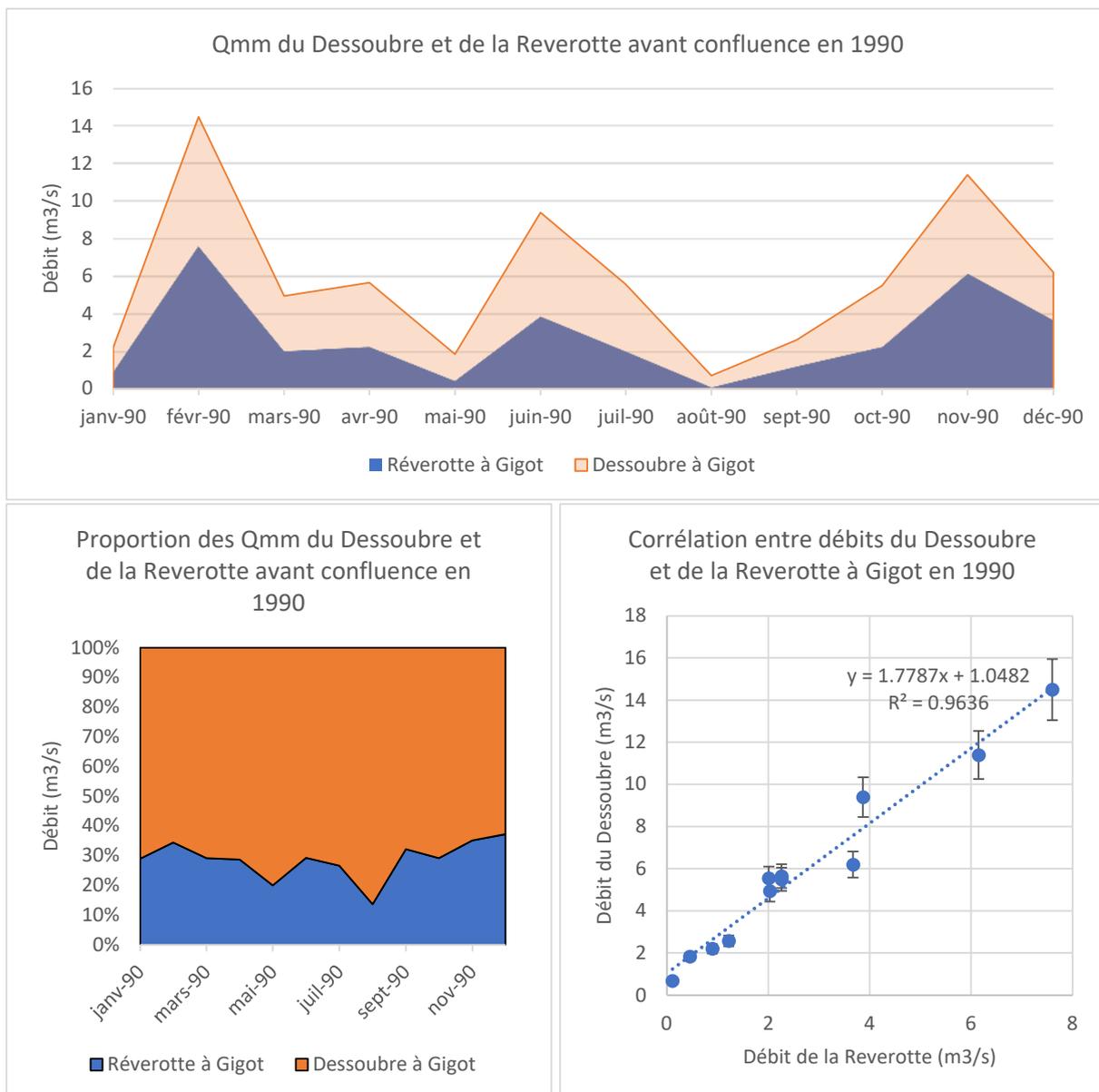


Figure 40. Relations entre hydrologie du Dessoubre et de la Reverotte à Gigot (avant confluence), données SRAE 1991.

La comparabilité des débits entre Reverotte et Dessoubre étant pertinente, la corrélation entre débits jaugés sur la Reverotte à Gigot en 2021-2022 d'une part, et le débit extemporané à la station limnimétrique de Rosureux d'autre part, a été investiguée.

La corrélation y fut encore plus forte (coef. détermination à 99,6%), peut-être parce qu'il s'agit là de débits instantanés et non pas de Qmm (débits mensuels moyens) comme pour les données de 1990. A noter toutefois que le jaugeage du 23/02/2022 a été exclu de cette base de données (output pouvant s'expliquer par une plus grande incertitude du jaugeage lors de très fortes eaux au niveau de cette fermeture de bassin).

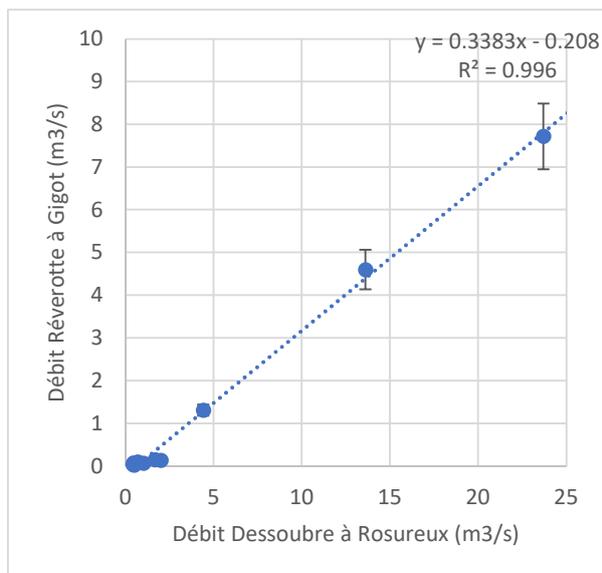


Figure 41. Corrélation entre débits de la Reverotte jaugés en 2021-2022 à Gigot et débits extemporanés enregistrés sur le Dessoubre à Rosureux.

Un léger réajustement de ce modèle (+0,03 m³/s) est toutefois nécessaire afin d'en accroître sa pertinence pour les plus faibles eaux. Ce modèle réajusté permet ainsi de transposer les débits mesurés à Rosureux à ceux de la Reverotte à Gigot. En outre, cette approche permet de disposer d'une forte résolution de la mesure (infra-horaire), et d'être utilisable sur l'ensemble de la période de fonctionnement de la station limnimétrique (passée et future).

4.4.3.2. Hydrogramme, hyétogramme et régime thermique

L'hydrologie de cette fermeture de bassin se distingue des 2 précédents hydrogrammes par l'absence d'assèchement, même épisodique et y compris lors de très fortes sécheresses comme en 2022. En revanche, elle s'en rapproche par la très forte instabilité, caractéristique de cours d'eau karstiques non tamponnés par une nappe sous-jacente.

Des pics de crues atteignant 25 à 30 m³/s sont estimés lors de la période hivernale investiguée. A noter que la crue de juillet 2021 y aurait dépassé les 30 m³/s. Il convient toutefois d'être prudent quant à ces valeurs chiffrées, s'agissant d'extrapolation du modèle (valeurs non encadrées par des jaugeages. Il apparaît toutefois, de nouveau, la très forte réactivité apparente de ces fortes eaux aux pluies les précédents.

En très basses eaux, une valeur plancher d'environ 0,030 m³/s est observée, corroborée par le jaugeage « au plus bas » du 15/07/2022 à 28,2 L/s, sans assec connu en cette fermeture de bassin.

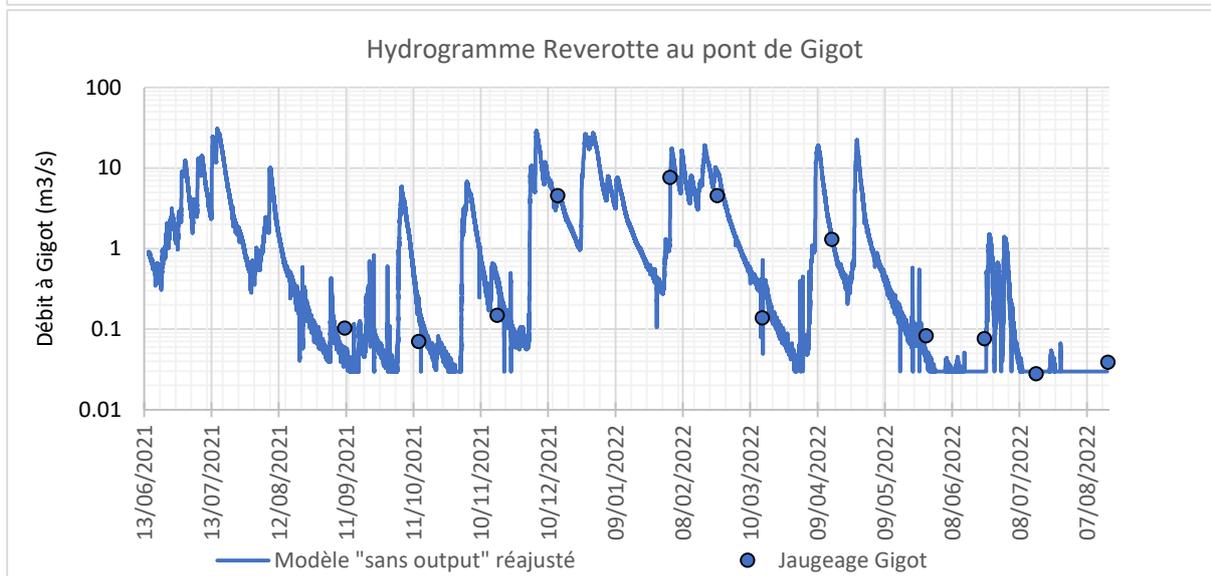
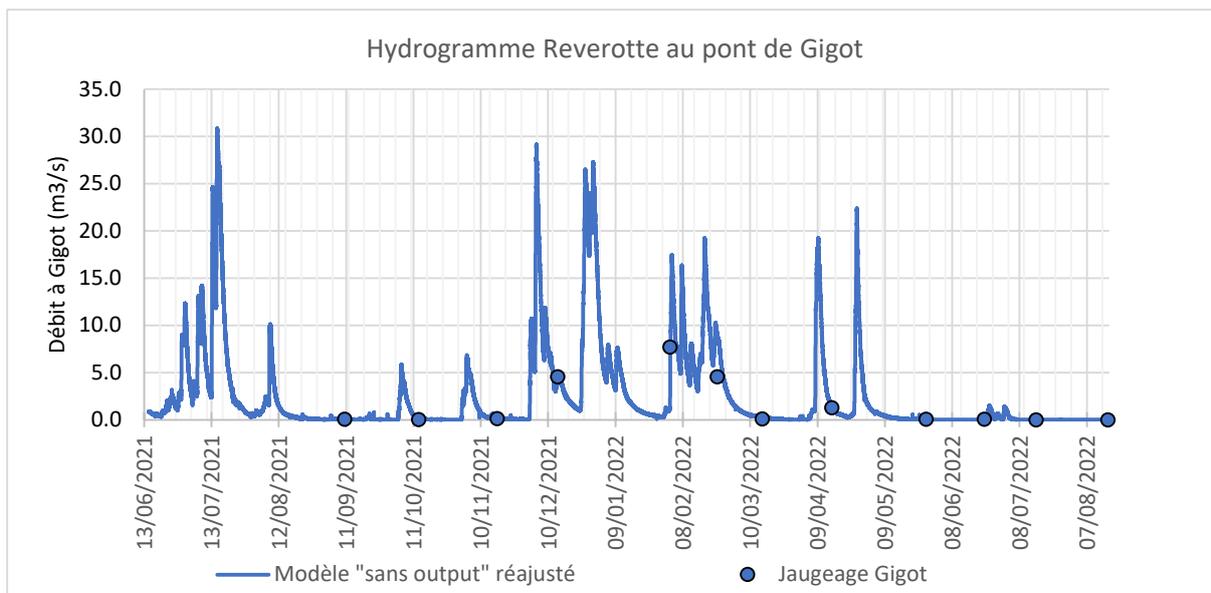


Figure 42. Hydrogramme de la Reverotte en fermeture de bassin (échelle linéaire en haut, échelle logarithmique en bas).

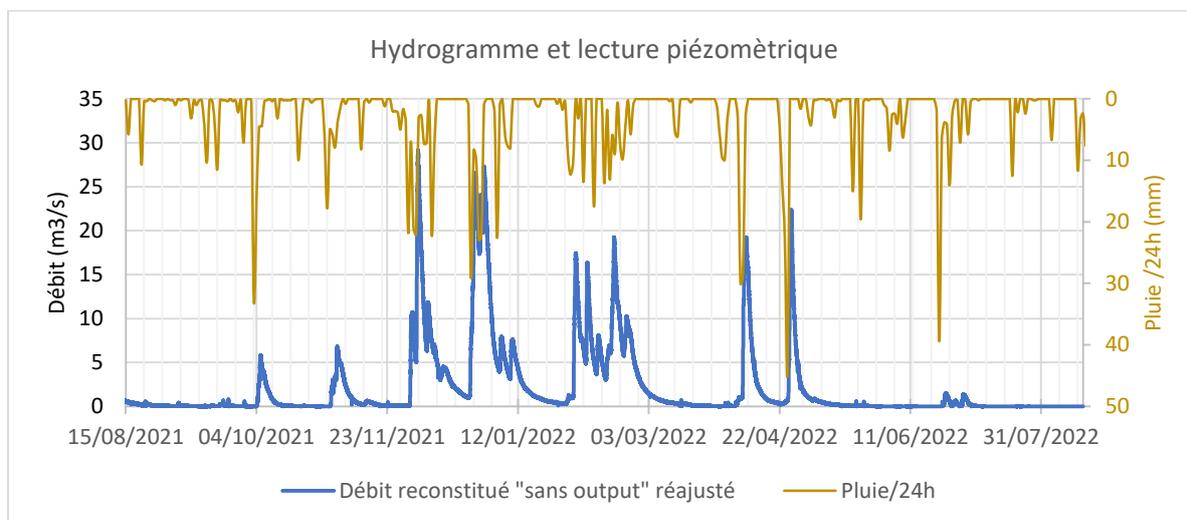


Figure 43. Hydrogramme et hyétogramme de la Reverotte en fermeture de bassin de mi-août 2021 à mi-août 2022.

En l'absence d'assec, la dynamique thermique co-enregistrée ne sera pas utile pour caractériser les différences de réponses liées aux exondations, mais demeure utile pour évaluer l'étroitesse du lien avec les eaux souterraines (tamponnées aux environ de 8-10°C) ainsi que pour son intérêt écologique direct pour l'hydrobiologie (en l'absence d'exondations récurrentes et durables).

En observant cette dynamique thermique (valeurs absolues et amplitudes journalières) en regard de la dynamique hydrologique concomitante, plusieurs observations sont formulées :

- La température de l'eau s'aligne avec la température de l'eau souterraine dès la remontée dès le début des hautes eaux, puis le phénomène perdure plusieurs semaines, engendrant parfois de forts écarts thermiques en quelques jours (e.g. +8,5°C en 6 jours de fin janvier à début février 2022 : +7,8°C en 2 jours fin décembre 2021) ;
- En dehors de ces périodes, la dynamique thermique suit les évolutions saisonnières : de <1°C fin janvier à plus de 20°C en été 2022 ;
- L'écart nyctéméral (entre jour et nuit) de la température est particulièrement affirmé lors des saisons transitoires (automne et plus encore printemps) ;

La sécheresse et les fortes chaleurs de l'été 2022 se sont traduit par une élévation de la température :

- Tmm30j (température moyenne maximale sur 30 jours consécutifs) : 18,7°C (du 10/07/2022 au 08/08/2022) ;
- Température moyenne sur 24h la plus élevée : 20,16°C le 20 juin 2022 ;
- Température instantanée la plus élevée : 21,12°C le 20 juin 2022.

Ces informations ne sont pas sur-évaluées, la chronique des données s'arrêtant à la mi-août 2022, et la sonde étant positionnée en permanence dans au moins 20cm d'eau et à l'ombre. Comparativement, la Tmm30j de 2021 ne devait vraisemblablement pas atteindre les 15°C. L'hydrologie de cette station joue ainsi un rôle majeur dans le développement de l'hydrobiologie de cette station, vis-à-vis de la faune salmonicole en particulier (réchauffement en périodes de fraies, limites de létalité en périodes estivales...).

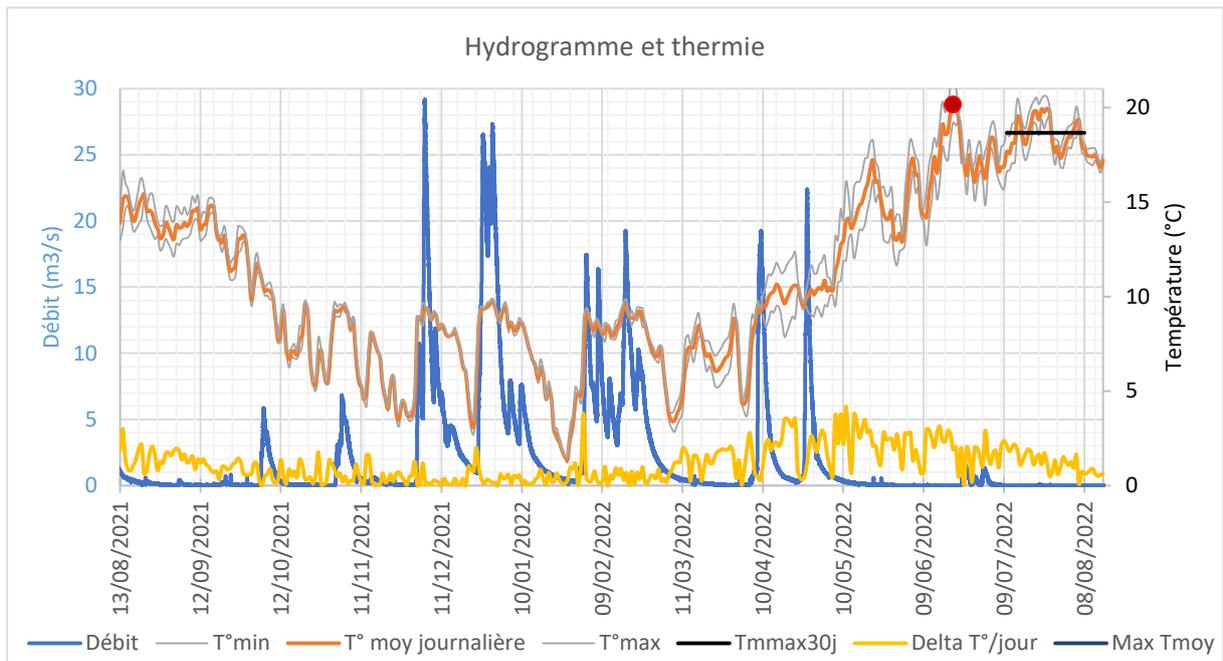


Figure 44. Thermie et variations nictédimales au regard de l'hydrologie de la Reverotte à Gigot.

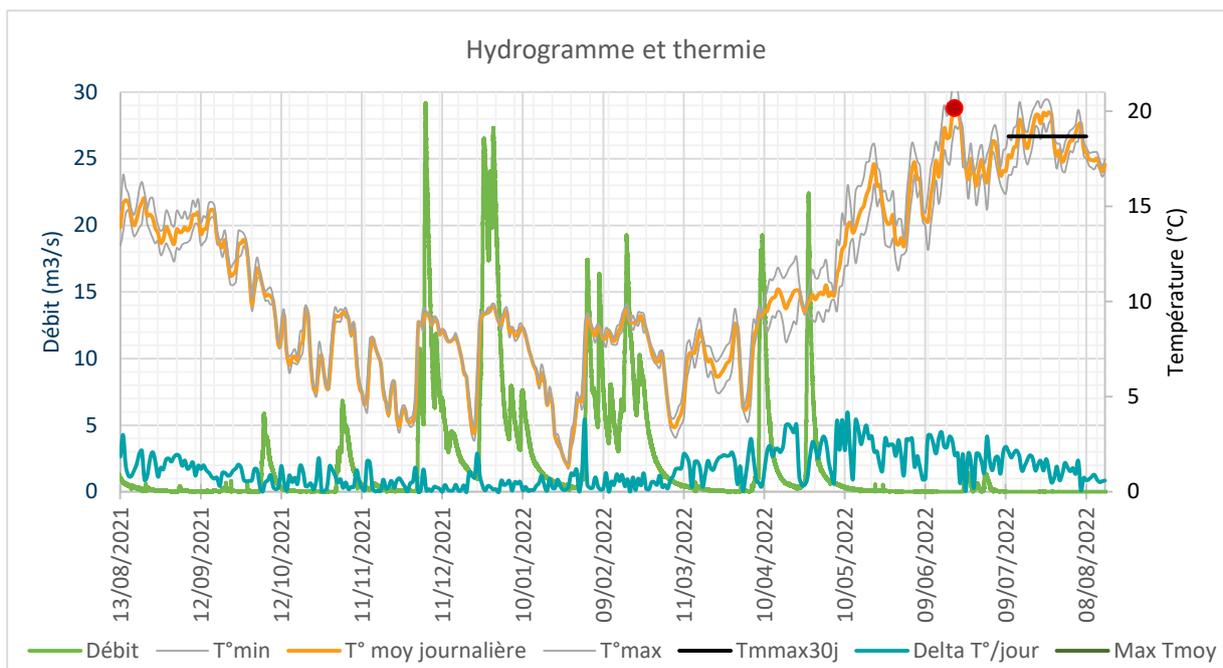
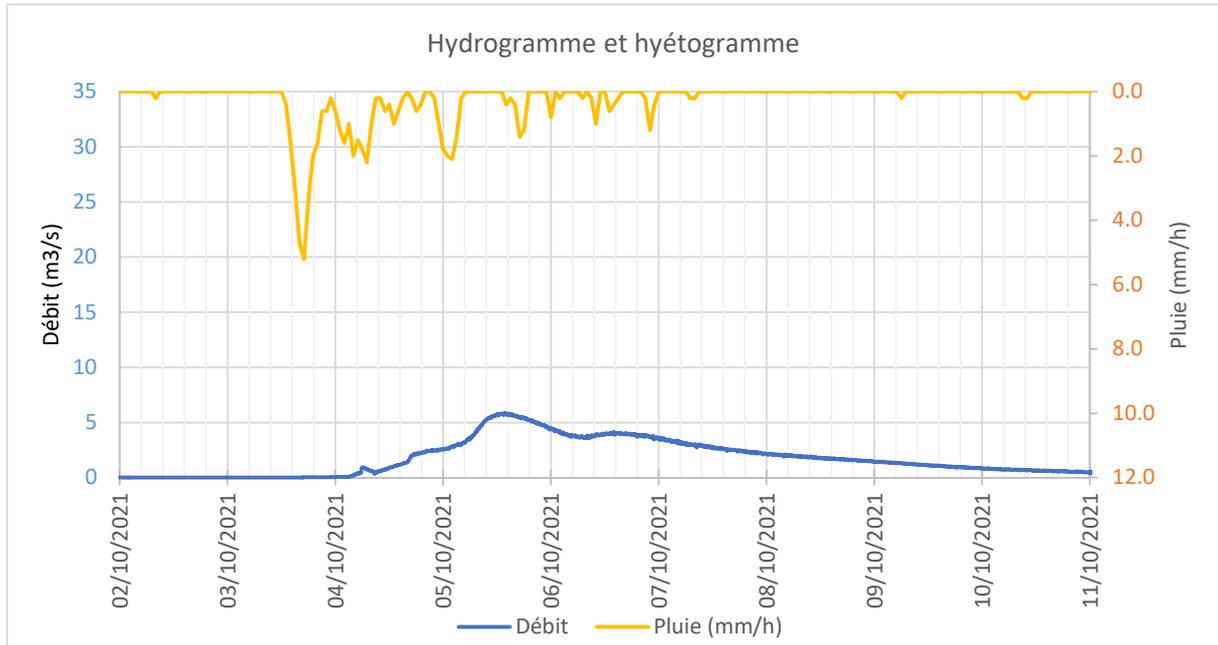


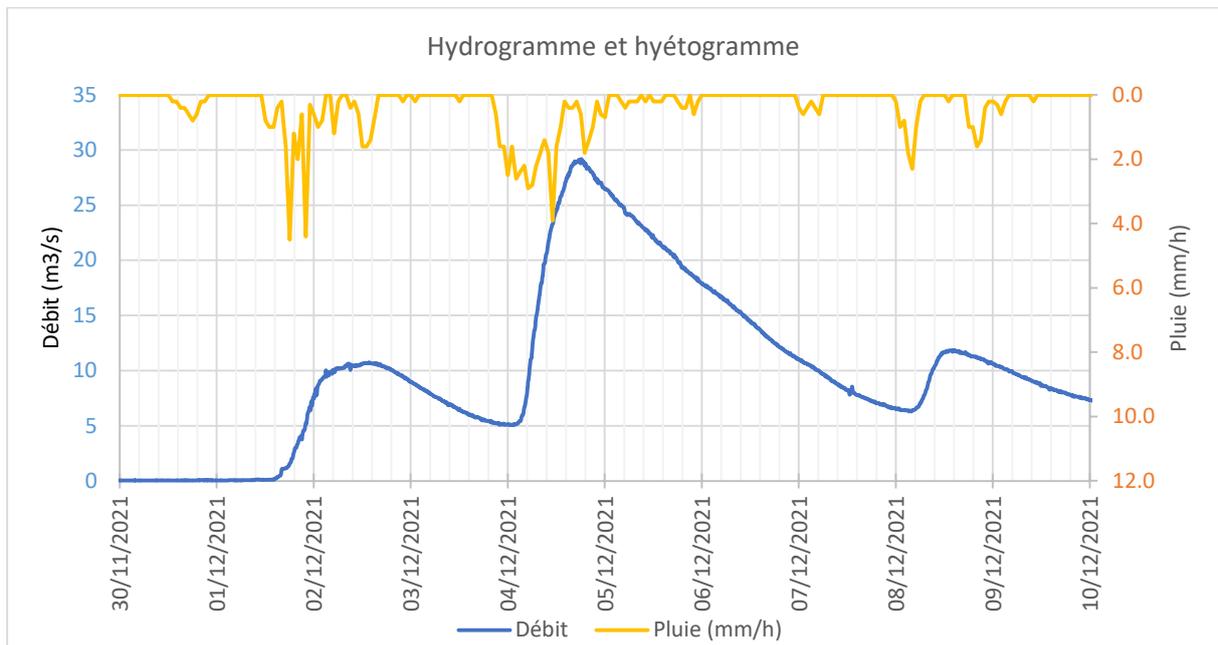
Figure 45. Thermie et variations nictédimales au regard de l'hydrologie de la Reverotte à Gigot.

4.4.3.3. Caractérisation d'évènements pluie-débit

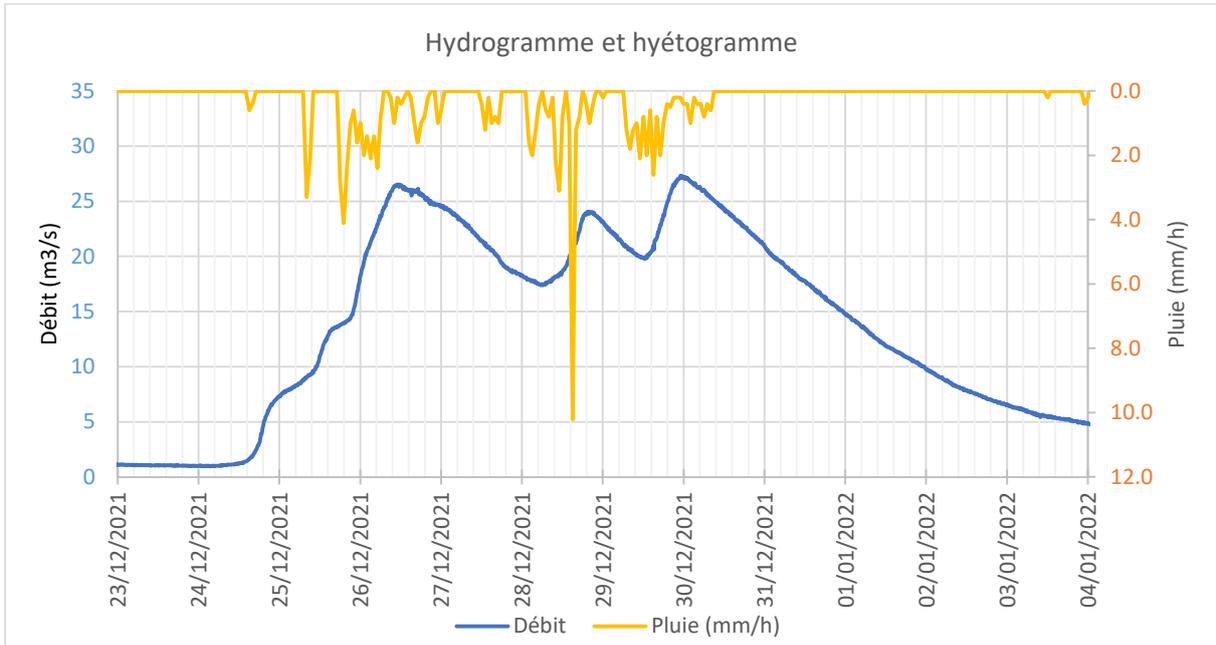
4.4.3.3.1. 02/10/2021-11/10/2021



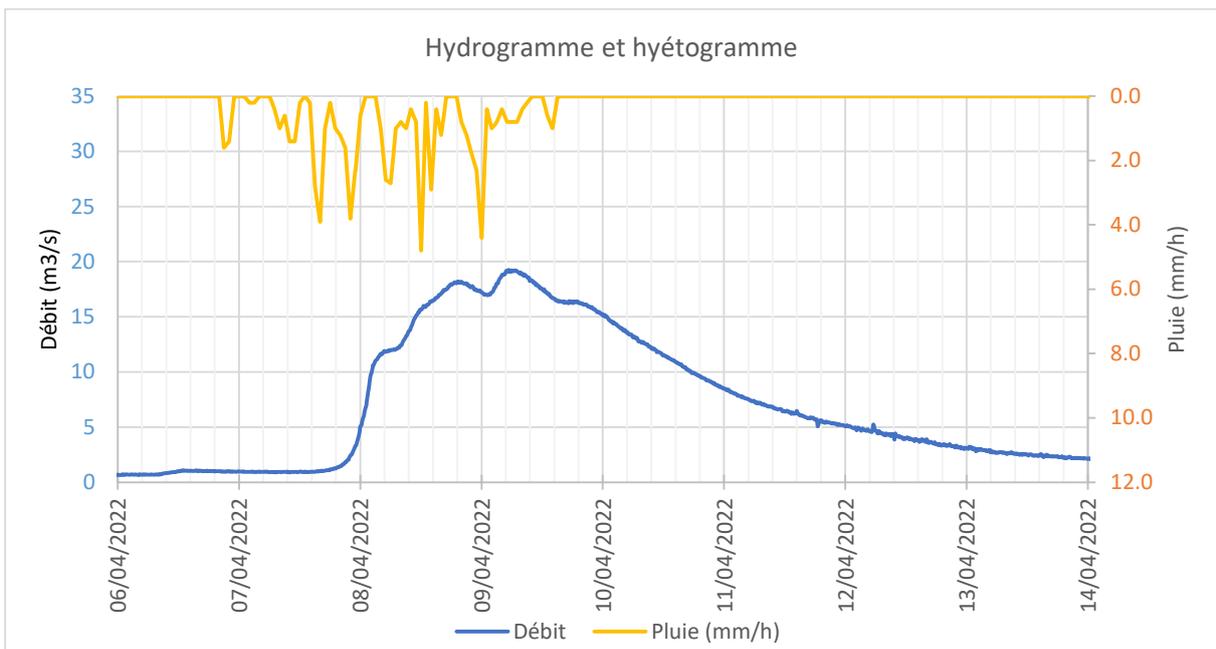
4.4.3.3.2. 30/11/2021-10/12/2021



4.4.3.3. 23/12/2021-04/01/2022



4.4.3.4. 06/04/2022-14/04/2022



4.4.3.3.5. Caractérisation du fonctionnement hydrologique

	02/10/2021- 11/10/2021	30/11/2021- 10/12/2021	23/12/2021- 04/01/2022	06/04/2022- 14/04/2022
Temps de réponse (entre pics de pluie et de crue)	Premières pluies non efficaces, puis environ 10h			
Temps de montée (courbe de crue)	Environ 27h	14h	Environ 24h	Environ 22h
Durée décrue (hors courbe de tarissement)	Environ 20h (courbe de tarissement >> courbe de décrue)	Environ 3,5j	Environ 4j	Environ 3,5j
Temps de concentration (courbe de crue + courbe de décrue)	Environ 48h	Environ 4j	Environ 5j	Environ 4,5j
Pluies cumulées nécessaires pour atteindre le pic de débit	98,8mm en 37h, i.e. 64mm/24h en moyenne (5,5 m3/s)	134,2mm en environ 4j, i.e. 33,5mm/24h en moyenne (28,8 m3/s)	177mm en environ 4,5j, i.e. 39mm/24h en moyenne (27,3 m3/s)	93,6mm en 34h, i.e. 66mm/24h en moyenne (19,1 m3/s)

Tableau 5. Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la Reverotte en fermeture de bassin.

Comme pour la partie amont du BV, et bien que la fermeture de bassin soit en permanence courante, il semble tout aussi nécessaire de disposer d'un temps de latence suffisant pour que des pluies soient « efficaces » en sortie d'étiage. Ceci corrobore l'hypothèse à la fois d'une alimentation se faisant essentiellement depuis les débords apicaux (et donc de leurs mises en charge), mais aussi d'un temps de circulation karstique beaucoup plus long pour se traduire en débits surfaciques qui alimenteraient directement dans la partie aval du BV.

Ceci expliquerait aussi des temps de réponse légèrement plus allongés qu'en tête de bassin, approximativement 1 à 2h, ce qui correspondrait à l'onde crue. Le temps de décrue nettement plus allongé en cette fermeture de bassin correspondrait pour sa part au temps nécessaire à transférer les flux additionnels provenant de la moitié aval du linéaire (débits plus élevés qu'à l'amont), aux arrivées surfaciques plus ou moins décalées et étalées dans le temps.

Par conséquent, le fonctionnement hydrologique de ce secteur distal de la Reverotte est intégrateur à la fois de phénomènes de surcharges karstiques apicales et rapides arrivant sous forme d'ondes de crues, mais aussi d'autres apports potentiellement aussi rapides via ses afférences aval, et d'une capacité de captation karstique des flux moins affirmée à cette altitude plus basse.

4.4.3.4. Synthèse

La partie distale de la Reverotte est donc régie en périodes de fortes eaux surtout par des phénomènes karstiques (débords apicaux et afférences aval) conduisant alors parfois à de brusques écarts thermiques et hydrologiques. En revanche, son positionnement en fermeture de bassin lui confère un plus grand bassin d'alimentation, d'où des temps de décrue puis de tarissement plus long. En période de plus basses eaux, on y retrouve un fonctionnement plus classique (i.e. moins directement inféodé aux eaux souterraines) mais néanmoins en permanence soutenu (absence d'assec même lors de fortes sécheresses).

4.4.4. Comparaison entre les 3 hydrogrammes

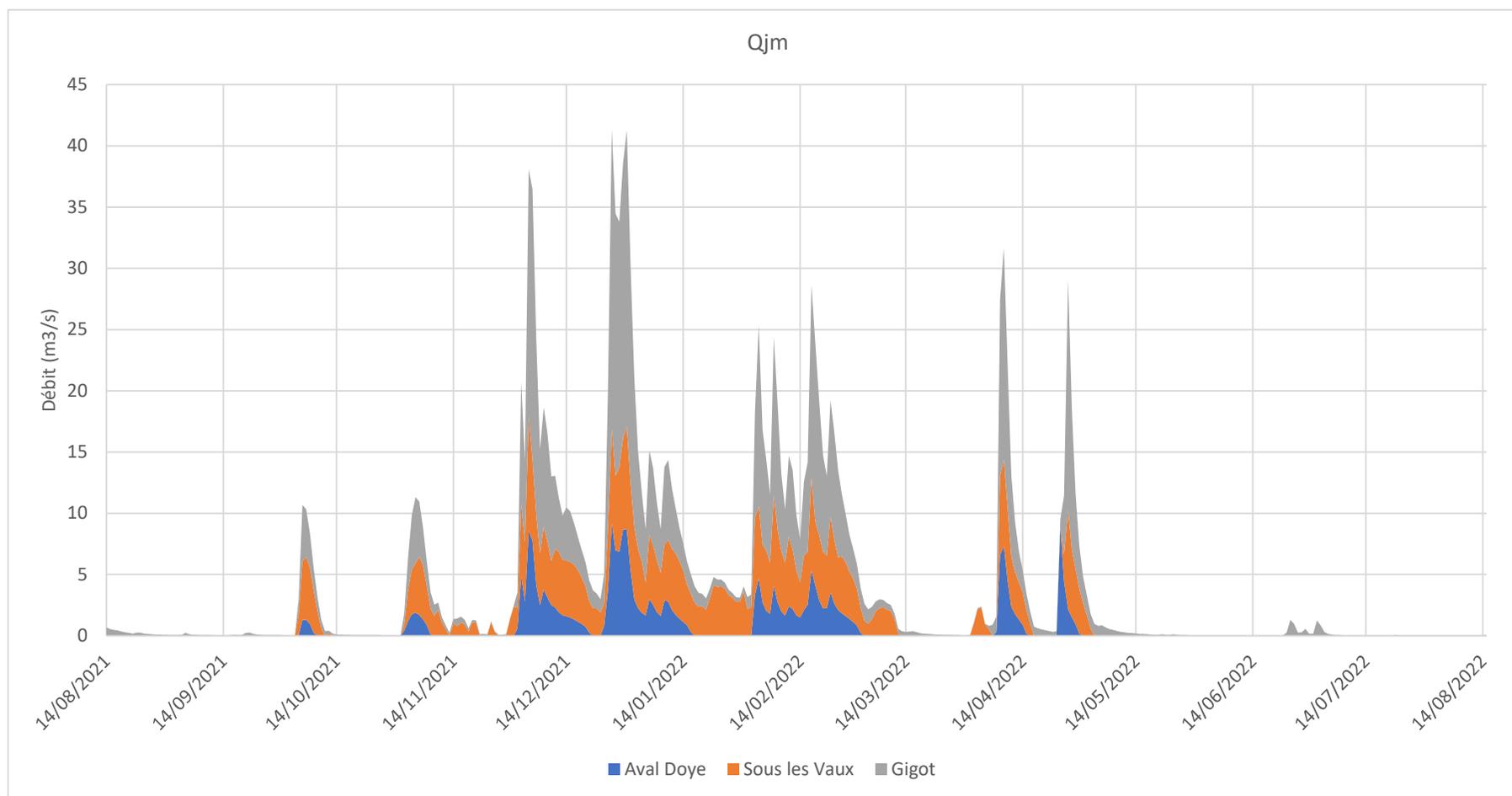


Figure 46. Superposition des hydrogrammes de la Reverotte en aval du Puits de la Doye (bleu), sous Les Vaux (orange) et à Gigot (gris).

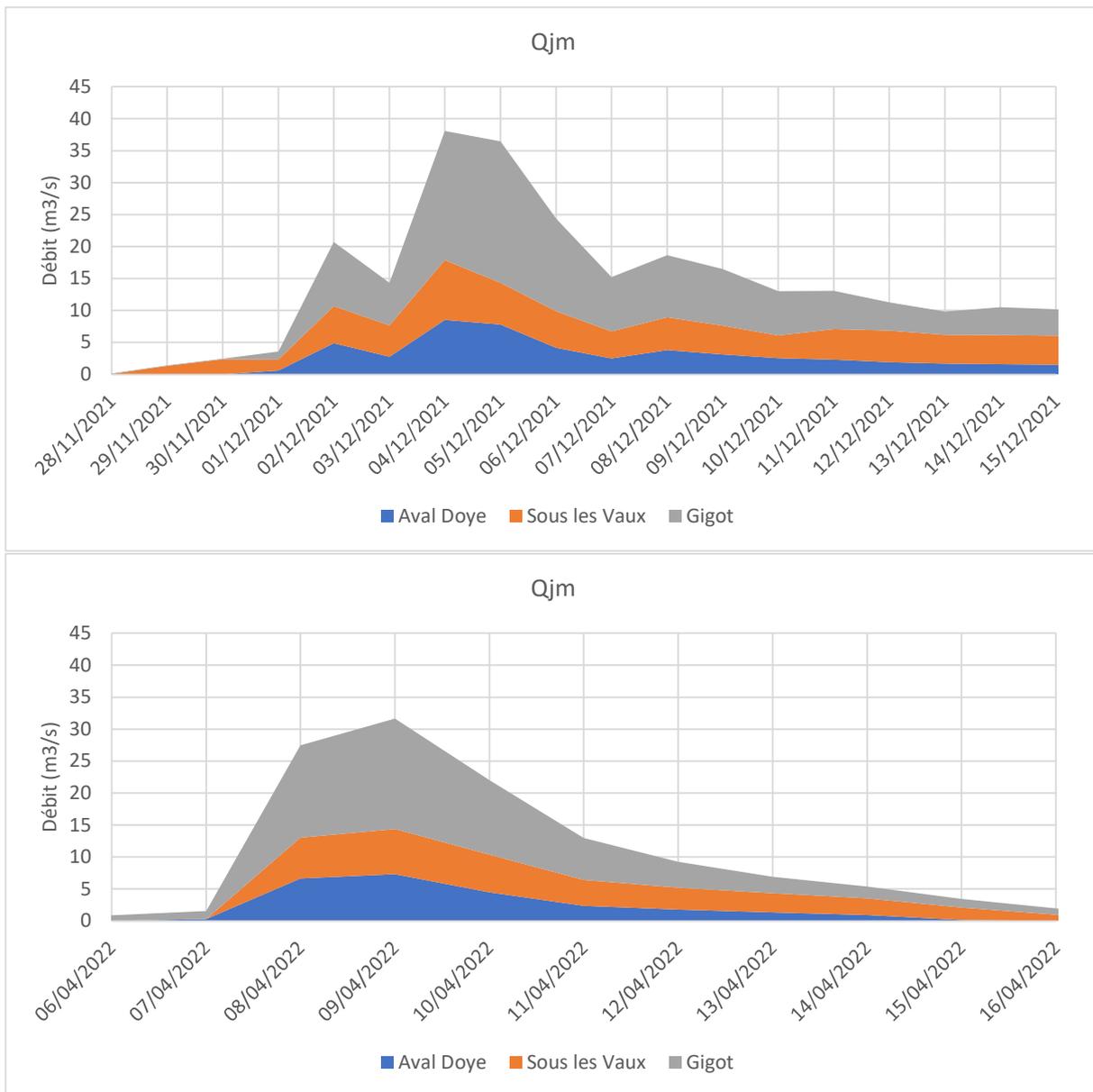


Figure 47. Comparaison des 3 hydrogrammes lors de 2 pics de crues : début décembre 2021 et avril 2022.

La première observation concerne la cohérence au moins relative des 3 modèles proposés, ceci malgré les approches différentes proposées.

En termes de dynamiques, on constate une grande proximité entre les deux secteurs en assés fréquents, avec toutefois des différences relatives aux débits générés et aux temps de tarissement suite aux décrues. Ainsi, par exemple, le tarissement ne s'effectue pas en période hivernale sous Les Vaux contrairement au secteur plus apical en aval du Puits de la Doye. Le phénomène semble globalement le même au niveau de Gigot, mais de façon encore plus accentuée : les pics de crues y sont plus intenses et il n'y est jamais observé de tarissement complet des écoulements surfaciques.

Les temps de réponses aux précipitations sont si courts qu'une résolution horaire est à peine suffisante pour évaluer l'effet d'onde de crue : le décalage entre tête et fermeture de bassin est de l'ordre de 1h, soit une vitesse moyenne d'environ 3,4 m/s qui serait nécessaire pour parcourir les 12,2 km de linéaire séparant les 2 points de mesures en période de crue. Cette vitesse paraît trop élevée pour être réaliste et ne rendrait de toute façon pas compte de l'accroissement longitudinal des débits. Il ne s'agit donc pas d'un « simple » débordement du Puits de la Doye qui

s'écoulerait ensuite de façon linéaire le long du lit mineur. Ceci est corroboré par le fait qu'en périodes de fortes eaux, le débit apical représente moins de 20% du débit de la fermeture de bassin.

En revanche, les débits de crue sous Les Vaux (5,15km en aval de la source) représentent de 40% à 90% des débits de la Reverotte en fermeture de bassin. Il s'agirait donc là d'apports géographiquement intermédiaires intermittents et plus ou moins diffus dans la moitié amont, s'activant en période de crues, et qui contribueraient de façon très significative aux débits total du cours d'eau. L'approche longitudinale tend à indiquer que l'origine dominante de ces apports en fortes eaux au niveau de la moitié amont du linéaire dépend du degré de saturation de l'épikarst : plus il est significatif, plus l'essentiel du débit sera apical.

Toutefois, il convient de ne pas omettre les flux provenant directement de la moitié aval du linéaire, et qui représentent généralement de l'ordre de 30% à 50% du débit total lors de crues. Ainsi, en fortes eaux, la Reverotte distale est à la fois alimentée par des résurgences plus ou moins apicales en fonction de l'intensité de la saturation du karst, mais aussi par d'autres arrivées plus aval (dont plusieurs affluents) elles aussi contributives de façon significatives.

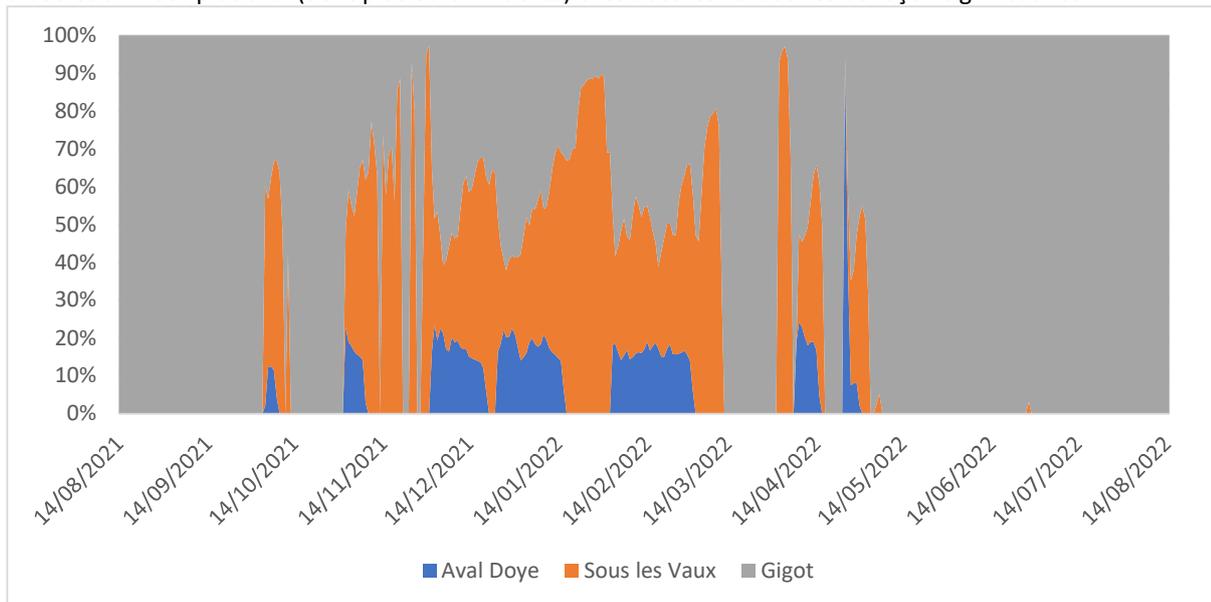


Figure 48. Dynamique des contributions des débits apicaux (Doye) et médians (Les Vaux) aux débits de la Reverotte en fermeture de bassin (Gigot).

Par conséquent, en fermeture de bassin, le temps de réponse est relativement court (notamment *via* les afférences géographiquement proches alimentées elles aussi par les épikarsts latéraux), mais pas autant qu'au niveau de la tête de bassin directement en contact avec les résurgences. Ces apports latéraux et apicaux s'additionnent alors en quelques heures, d'où là aussi des temps de montée en crue particulièrement courts (<24h).

Pour les mêmes raisons, les durées de décrues sont relativement similaires le long du linéaire, mais selon une intensité plus marquée au niveau de la fermeture de bassin. En revanche, les temps de tarissement sont proportionnés au degré et durée d'ennoiement du karst sous-jacent, donc plutôt faibles en tête de bassin, fluctuant selon la saison dans la partie médiane du linéaire, et plutôt longs en fermeture de bassin. Pour des raisons similaires, le soutien à l'étiage est proportionné au contact avec les karsts les plus basaux, i.e. essentiellement dans la seconde partie du linéaire.

4.5. SYNTHÈSE DE L'APPROCHE HYDROLOGIQUE

La période investiguée a permis de rencontrer à la fois des conditions hydrologiques « dans la normale » dont plusieurs épisodes de crues significatifs, mais aussi un étiage et une sécheresse exceptionnels. La combinaison d'une approche longitudinale et d'une approche temporelle dans ces conditions contrastées a permis d'affiner les connaissances sur le fonctionnement hydrologique de la Reverotte, ceci de façon d'autant plus pertinente que les projections climatiques à moyens termes tendent à indiquer que les événements extrêmes deviendront de plus en plus fréquents.

Sur le plan de la fonctionnalité hydrologique, la Reverotte est scindée en deux grandes entités :

- Une moitié amont du linéaire, aux assecs fréquents, alimentée par un épikarst occasionnellement saturé aux propriétés plus ou moins émissives ou captantes selon l'altitude et la saison ;
- Une moitié aval du linéaire, en eau pérenne, à la fois intégratrice des résurgences apicales et des afférences liées aux épikarst latéraux, mais aussi en contact avec un karst plus profond soutenant l'étiage.

Dans ce schéma global s'inscrivent plusieurs singularités plus ou moins structurantes et complexifiant cette première vision nécessairement simpliste, y compris en raisonnant à l'échelle du tronçon. Parmi les principales observations, on note :

- La présence de secteurs en eau pérenne dans la moitié amont du linéaire (source de la Reverotte en amont de la Doye, secteur de Plainmont). Il s'agit là d'écoulements captant les petits bassins versants surplombant l'aquifère supérieur au-dessus des marnes séquaniniennes. En hautes eaux, s'ajoute des débords massifs par saturation du karst sous-jacent à Plainmont (la source n'intègre pas ce karst sous-jacent et conserve un débit modéré).
- Même si l'approche par tronçons n'était pas destinée à affiner les localisations précises des pertes/résurgences, certaines ont pu être clairement identifiées : Puits de la Doye et proximité immédiate (captant ou émissif), résurgences du Moulin et ru de Loray (émissives), sources de Plainmont (émissives), contact avec le karst quelques centaines de mètres plus en aval (généralement captant), résurgences progressives à compter du pont de la route de Vermondans, puis des différents affluents de la Reverotte ;
- **Tendance à la captation d'une partie des débits à l'amont proche de Gigot en période de plus basses eaux (désaturation du karst le plus profond ?). Ce point est peut-être le plus préoccupant en termes de conséquences hydrobiologiques si les événements de sécheresses tels que 2022 venaient à se répéter fréquemment...**

Plus globalement, il est constaté qu'outre *via* les principales résurgences et affluents, l'alimentation de la Reverotte se fait par de multiples suintements plus ou moins marqués essentiellement visibles lors des fortes eaux, signes d'une omnipotence du karst dans le fonctionnement hydrologique de ce cours d'eau. D'autres suintements davantage pérennes sont observables dans la partie apicale du linéaire, *via* de petites sources drainant l'aquifère supérieur, sans être pour autant significatifs en termes de débit global.

A périmètre rapproché autour du lit mineur de la Reverotte, la principale interaction anthropique avec l'hydrologie est liée au captage de la Sommette d'une des sources pérennes de Plainmont. Néanmoins, comme évoqué précédemment, il s'agit là d'eau captant l'aquifère supérieur en période de basses eaux, donc peu génératrice de débit ; et, en hautes eaux, la part captée est négligeable eut égard aux très forts débits issus du trop-plein.

Demeure la question du devenir des eaux karstiques de la moitié amont du linéaire, qui ne peut être résumée à un simple transfert depuis le Puits de la Doye vers la source des 3 Pucelles dans le Haut-Dessoubre pour les raisons précédemment évoquées (hypothèse non vérifiée, et présentant des questionnements hydrogéologiques et quantitatifs). En appliquant le principe de la parcimonie, il paraît plus probable que ces eaux s'infiltreront en amont et servent à alimenter les couches plus profondes du karst alimentant la partie aval du linéaire.

Bibliographie citée :

SRAE, 1991. Le Dessoubre, délimitation et caractéristique du bassin d'alimentation, étude et apports, charges véhiculées et sources de pollution, influence sur les édifices biologiques.

CD Eau Environnement, 2020. Suivi de la qualité des eaux superficielles du département du Doubs, Focus sur le Haut-Dessoubre.

Cabinet Reilé, 2005. Etude des pertes de la Reverotte. Phase A : Diagnostic et propositions.

Alain GAUTHIER, Jean Marie FROSSARD, Pascal REILE. Rapport de pompage du 10/06/2000 : étude hydrogéologique, Puits de la Doye, Loray, vallée de la Reverotte.

5. IDENTIFICATION DES FACTEURS DE PRESSION ANTHROPIQUES SUR L'HYDROLOGIE

L'analyse du fonctionnement hydrologique a donc mis en avant des phénomènes d'étiage, voire d'assecs sur certains secteurs, qui se sont montrés particulièrement prononcés sur l'année 2022. La présente partie s'attache à identifier la part imputable de ces pressions aux facteurs anthropiques.

Il est entendu qu'en raison de la consistance essentiellement bibliographique de l'approche proposée ici, il sera difficile d'énoncer des chiffres précis quant à l'impact des facteurs anthropiques sur les débits, et notamment les débits d'étiage. Il s'agit alors d'avantage d'énoncer de grandes tendances en vue de cibler les axes d'actions prioritaires pour l'amélioration du fonctionnement hydrologique de la Reverotte.

5.1. LES CAPTAGES

Deux captages en eau potable sont référencés sur le bassin versant de la Reverotte (source : Déclarations d'Utilité Publique - ARS), (cf. carte page suivante) :

- **Captage de la source de la Doue**, sur la commune de Loray : débit maximal prélevé fixé à 7 m³/heure (168 m³/jour) et 160 m³/jour ;
- **Captage de la source « de Plainmont »**, sur la commune de la Sommette : débit maximal prélevé fixé à 70 m³/jour et 26 000 m³/an.

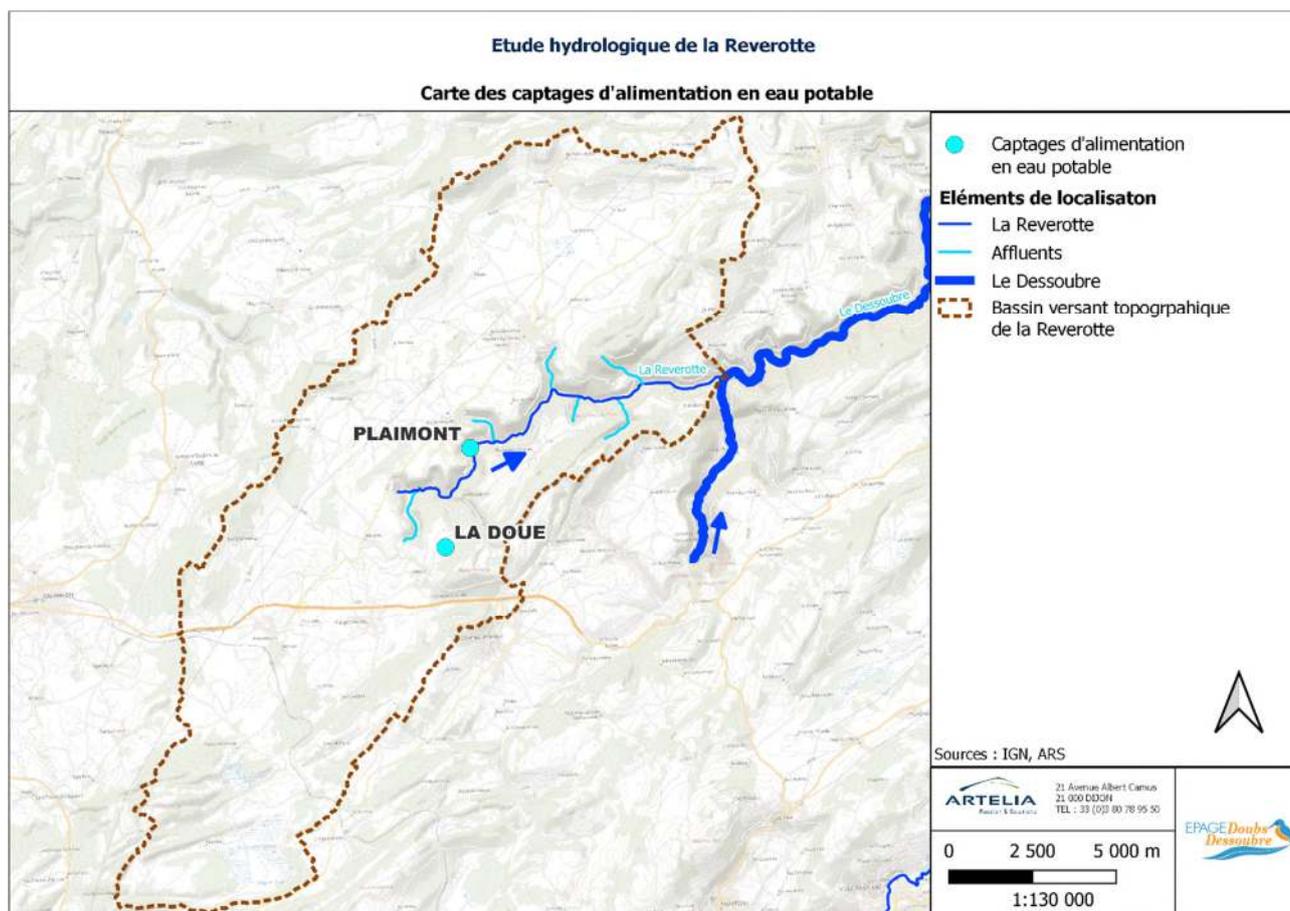


Figure 49. Carte des captages d'alimentation en eau potable

En combiné, ces deux stations représentent un prélèvement de 2.8l/s. Cette valeur représente environ entre 3.5% et 7% du débit mesuré à la confluence en période de basses eaux (de l'ordre de 0.04 - 0.08 m³/s). En période de moyennes eaux, le débit prélevé est négligeable en comparaison des débits de la Reverotte.

Ainsi, même en considérant l'hypothèse que la totalité du débit prélevé aurait directement participé au débit de la Reverotte, les prélèvements n'ont pas d'incidence significative sur l'hydrologie du cours d'eau :

- En étiage : les débits mesurés sur la Reverotte sont si bas que l'apport venant des sources captées n'apporterait aucun gain significatif sur l'hydrologie ;
- En moyennes eaux : le débit prélevé est négligeable.

Par conséquent, il apparaît que les prélèvements en eau potable sur le bassin versant ne figurent pas parmi les principaux facteurs de pression anthropiques sur l'hydrologie.

5.2. LES USAGES AGRICOLES

Comme le montrent les figures ci-après, l'assolement du bassin versant est essentiellement voué à l'activité agricole (60% de la surface totale). Les prairies y occupent une place importante (38% de la surface totale).

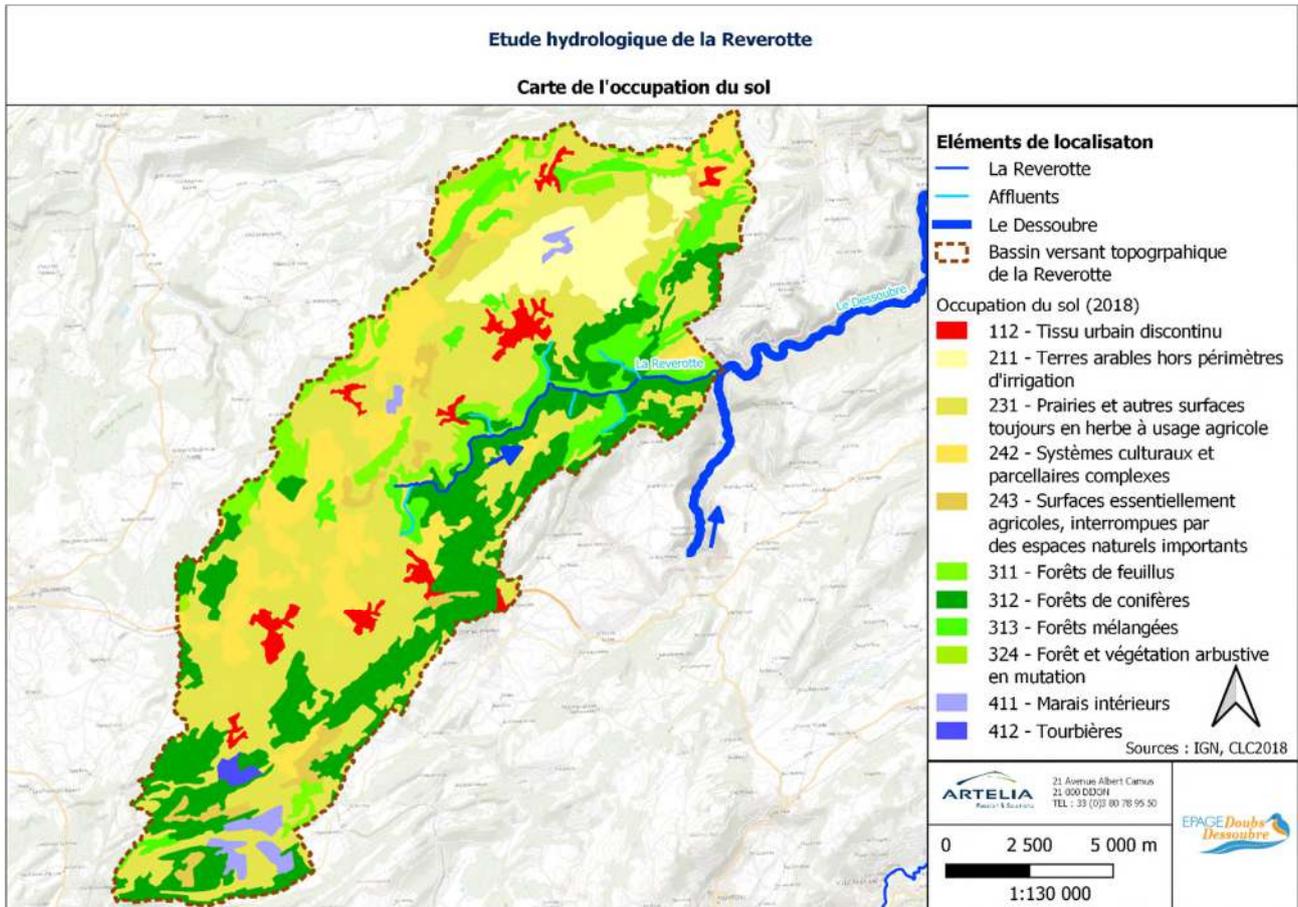


Figure 50. Carte de l'occupation du sol (CLC2018)

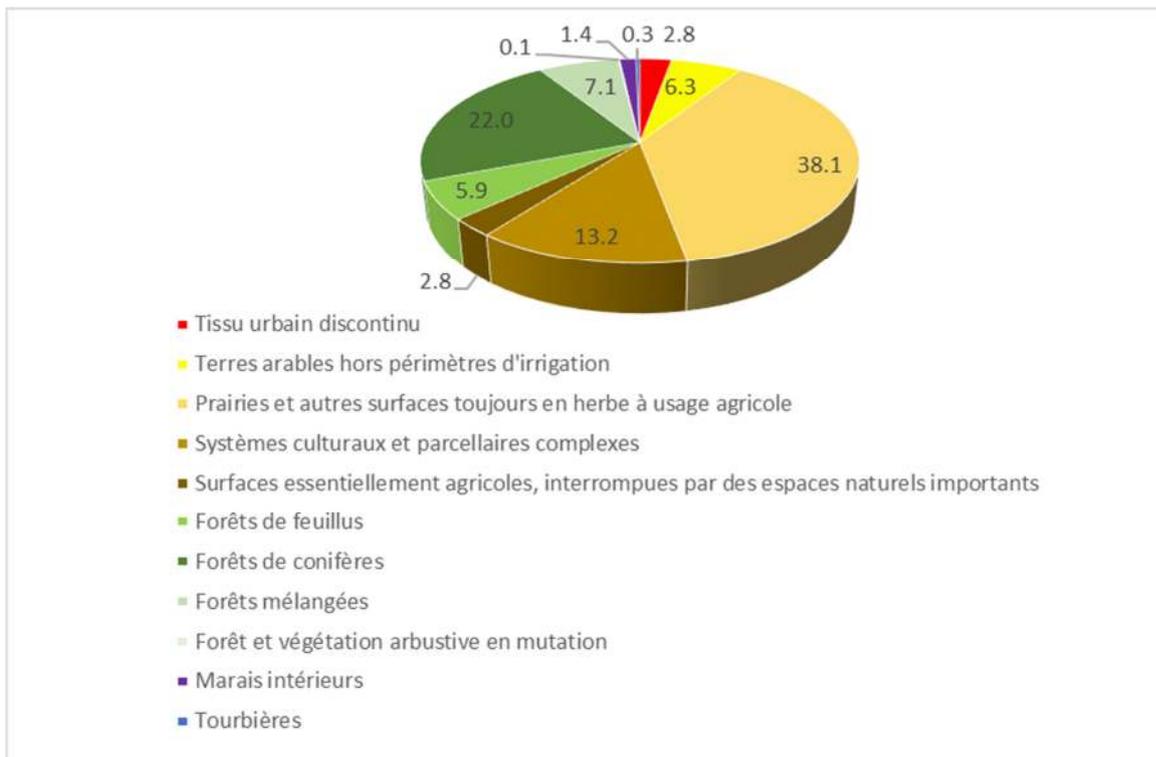


Figure 51. Graphique de l'occupation du sol (CLC2018)

L'essentiel de l'activité agricole sur le bassin versant concerne l'élevage de bovins (vaches laitières essentiellement).

En effet, selon le site de l'Agreste (agreste.agriculture.gouv.fr), les communes situées sur le bassin versant comptaient environ 11 000 bovins en 2010 au total. Nb : donnée à valeur d'ordre de grandeur dans la mesure où les limites des communes ne recoupent pas celles du bassin versant.

Ces élevages figurent parmi les principaux utilisateurs de la ressource en eau, en effet une vache laitière consomme en moyenne entre 40 et 120l d'eau par jour. En combiné, cela représente un prélèvement de 440 à 1320m³ d'eau par jour, soit entre 8 et 24% du débit mesuré en moyenne en période de basses eaux en fermeture de bassin (de l'ordre de 60l/s). Note : les points de prélèvements agricoles n'ont pu être obtenus dans le cadre de cette étude.

Il n'est pas pour autant assuré que les prélèvements en lien avec l'abreuvement du bétail aient une incidence sur les débits de la Reverotte. En effet :

- Les prélèvements en nappe n'ont pas nécessairement une incidence directe sur les débits des cours d'eau, d'autant plus en contexte karstique ;
- Les volumes prélevés par les bovins sont en partie « réinjectés » dans le bassin versant par les rejets directs des bovins (déjections) et les rejets des laiteries. Le Département du Doubs a été sollicité sur le sujet : il s'avère que les stations d'épuration de Dompnel (500 EH), Loray (678 EH) et Pierrefontaine-les-Varans (1 704 EH) traitent à la fois les effluents communaux et les effluents des fromageries.

Le principal déficit pourrait venir de fromageries traitant du lait venant du bassin versant de la Reverotte mais dont le point de rejet se situerait à l'extérieur du bassin versant, mais cette donnée n'a pu être obtenue à ce stade. Pour mémoire, le produit fini ne représente environ que 10% du lait brut.

5.3. LE COUVERT FORESTIER

5.3.1. L'évolution du couvert forestier

5.3.1.1. Méthode

Les zones forestières ont été digitalisées sur la base de photographies aériennes sur les années 1950 et 2019 selon les modalités techniques suivantes :

- Digitalisation à l'échelle 1/5000 ;
- Digitalisation des espaces forestiers d'un seul tenant d'une surface supérieure ou égale à 1000m² (nb : une emprise de moins de 1000m² en 1950 mais supérieure à 1000m² en 2019 n'est pas comptabilisée, afin de ne pas augmenter le taux d'évolution de façon artificielle) ;
- Exception faite des haies arbustives qui seront analysées séparément ;
- Exception faite des zones forestières diffuses et clairsemées.

5.3.1.2. Résultats

La surface totale des zones forestières a augmenté de 11 140m² entre les deux dates, soit une évolution de +20%. L'évolution est plutôt stable aux abords directs du cours d'eau : ils étaient en effet déjà très végétalisés en 1950 en raison des fortes pentes de la vallée (donc non exploitables pour les besoins agricoles).

Tableau 6. Evolution des surfaces forestières du bassin versant entre 1950 et 2019

Aire 1950	Aire 2019	Evolution (abs.)	Evolution (%)
56 979.9	68 120.8	11 140.9	19.6%

Cette dynamique est représentative de l'évolution à l'échelle métropolitaine, en particulier à la suite de l'exode rural d'après-guerre et de la modification des pratiques agricoles. Sur le bassin versant de la Reverotte, les nouvelles surfaces forestières sont essentiellement des plantations de résineux en bordure de forêts déjà existantes.

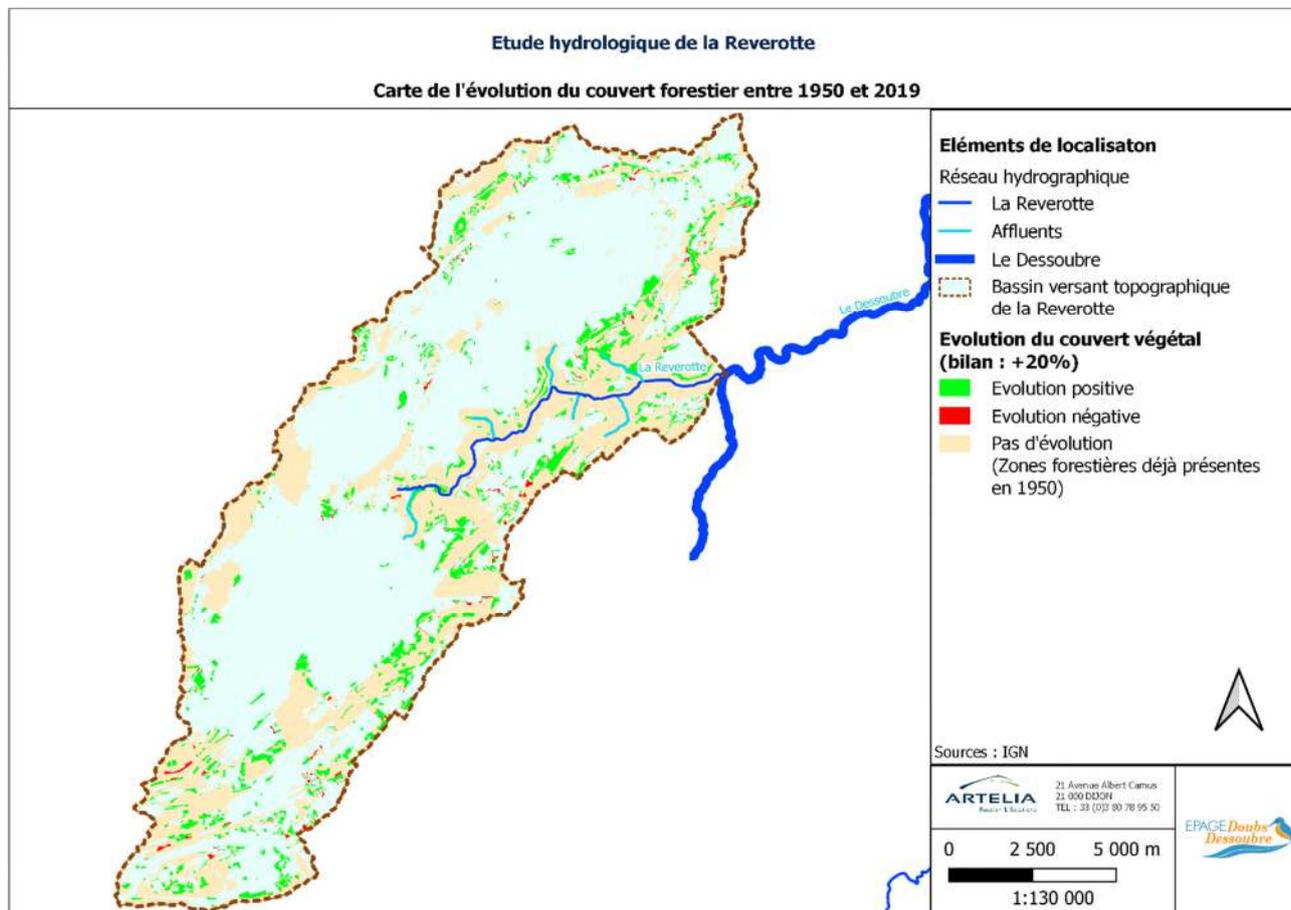


Figure 52. Carte de l'évolution du couvert forestier entre 1950 et 2019

5.3.2. Caractéristiques actuelles du peuplement forestier

Au total, selon la donnée CorineLandCover, les forêts de résineux concernent environ 22% de la surface du bassin versant, contre 13% pour les forêts de feuillus et les forêts mélangées combinées (cf. carte ci-après).

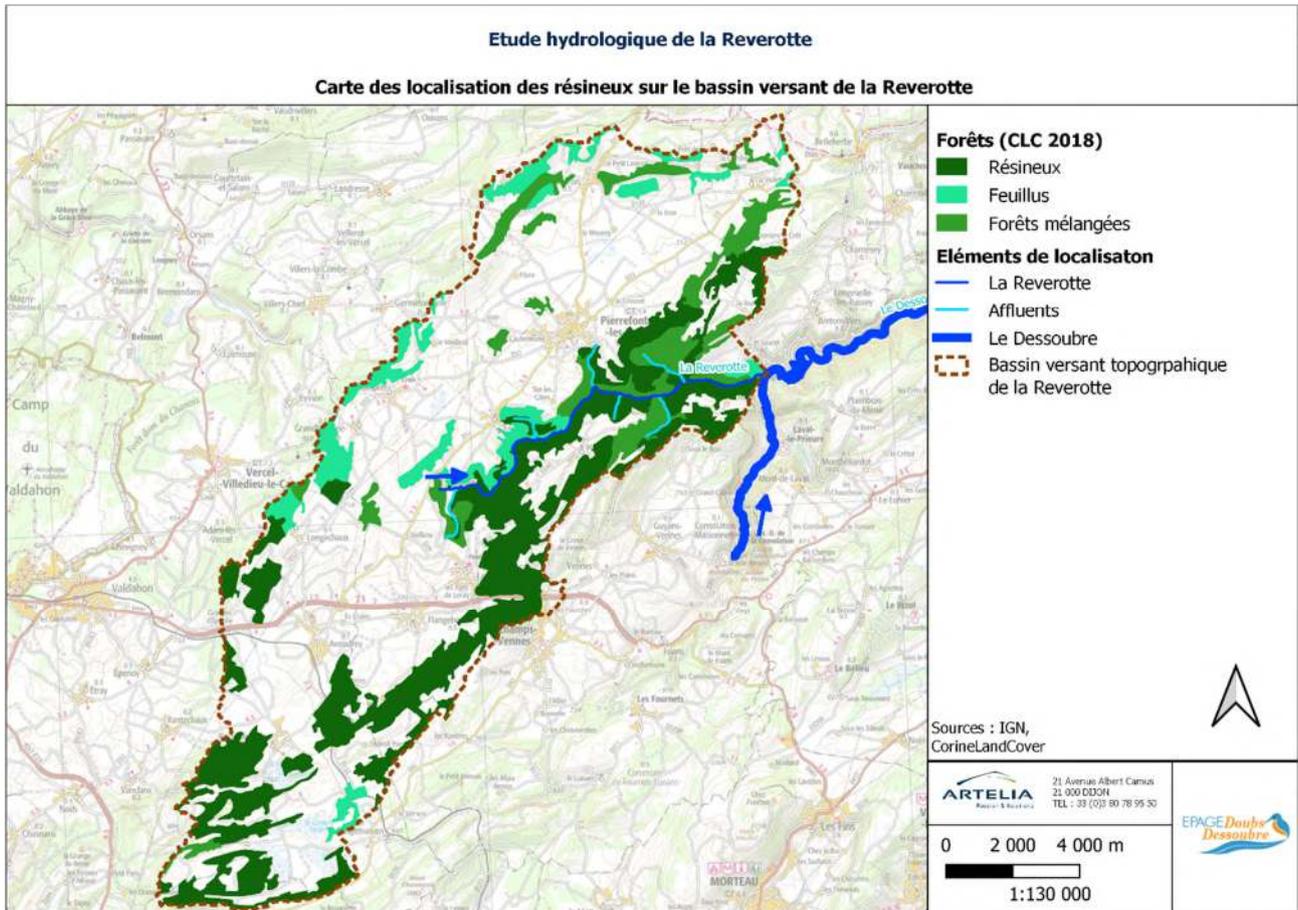


Figure 53. Carte des résineux du bassin versant de la Reverotte

Les forêts de résineux ont par ailleurs fait l'objet d'un diagnostic détaillé à l'échelle de la vallée par le cabinet CE3E (cf. carte ci-après). Il apparaît que quelques versants sont occupés par ces plantations, et que le lit du cours d'eau est souvent bordé par ces espèces, qui ne correspondent pas au peuplement attendu en berges.

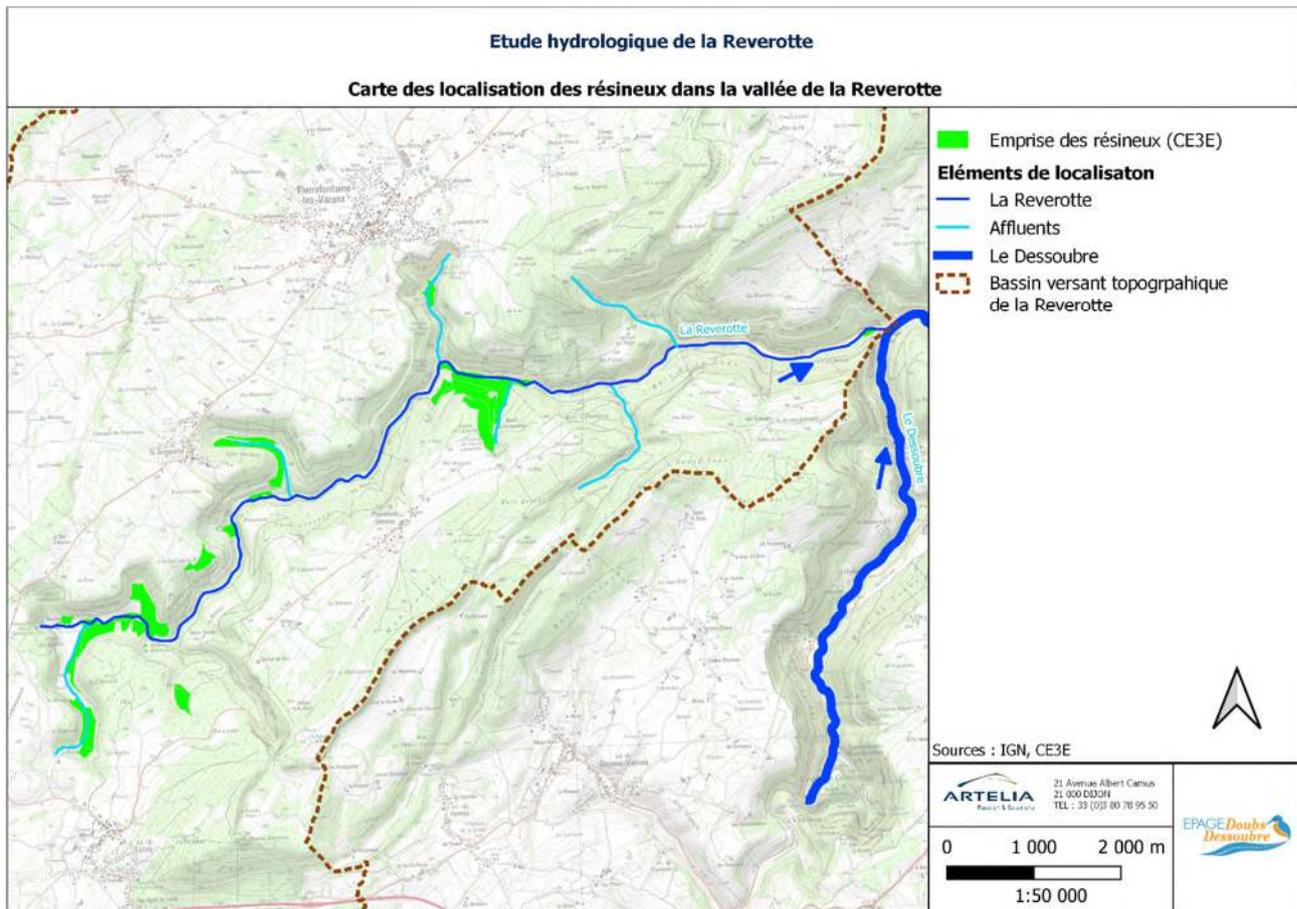


Figure 54. Carte des résineux situés sur les versants de la vallée (source de la donnée : CE3E)

5.3.3. Etat des connaissances sur l'incidence de la forêt sur l'hydrologie

L'évaluation des incidences des dynamiques énoncées plus haut sur le fonctionnement hydrologique de la Reverotte est un exercice délicat. En effet l'incidence de la végétation sur le débit des cours d'eau est mal connue, d'autant plus en secteur karstique. Dans le cas de forêts de conifères, il semble que la surface du couvert forestier évolue en corrélation inverse avec les débits écoulés (cf. graphique ci-après) : en d'autres termes, plus un bassin versant a été déboisé, plus les débits sont importants.¹

¹ Cosandey Claude. La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ?. In: Annales de Géographie, t. 104, n°581-582, 1995. pp. 7-25

FIGURE 4

RELATIONS ENTRE L'ACCROISSEMENT DES DÉBITS ANNUELS ET LE TAUX DE DÉBOISEMENT (d'après Bosch et Hewlett, 1982)

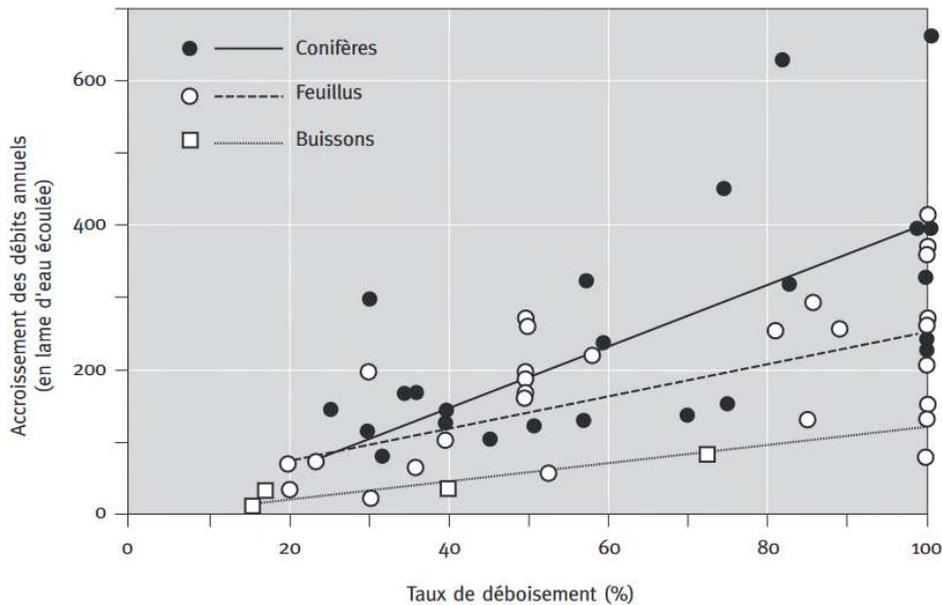


Figure 55. Graphique de la relation entre taux de déboisement et débits annuels (Cosanday, 2006, d'après Bosch Helwett, 1982)

Les résineux sont réputés pour leur importante consommation en eau du fait de leur croissance rapide. Ils auraient notamment une capacité d'interception des précipitations plus forte et une période de transpiration plus longue que les forêts de feuillus².

Outre l'impact potentiel sur l'hydrologie et l'hydromorphie des sols, ces espèces provoquent une acidification des sols, ce qui est dommageable pour le milieu.

5.3.4. Application au bassin versant de la Reverotte

En toute logique, l'augmentation du couvert forestier pourrait avoir provoqué une légère diminution des débits de la Reverotte. Seulement les données produites dans le cadre de la publication dont le graphique précédent est issu sont très dispersées, ce qui démontre l'importance d'autres facteurs propres au cycle de l'eau dans le bassin versant.

Il est possible de conclure que les forêts de résineux peuvent réduire l'écoulement annuel, mais il est impossible d'estimer une valeur. Les processus en jeu sont en effet bien trop complexes, et les études ayant cherché à obtenir ce type de données ont montré des résultats très disparates. Ainsi, il est loin d'être assuré que le couvert forestier et plus particulièrement les plantations de résineux figurent parmi les principales variables de contrôle de l'hydrologie de la Reverotte.

Toutefois, la présence de résineux aux abords directs du cours d'eau est en décalage franc avec le peuplement attendu sur ce type d'écosystème. Ces plantations sont donc un facteur de pression pour la faune et la flore locale : elles seront à gérer en priorité.

² Dupraz C., Didon Jean-François, Lelong François. Rapport I.6. : Effet de la végétation sur le bilan hydrologique et sur les bilans hydrochimiques. Exemple des bassins versants comparatifs du Mont Lozère. In: L'impact des activités humaines sur les eaux continentales. Dix neuvièmes journées de l'hydraulique, Paris 9-11 septembre 1986. Tome 1, 1986;

5.3.5. Tendances de l'évolution des peuplements à l'horizon 2070

Il est vraisemblable que les peuplements forestiers connaîtront des évolutions en lien avec le changement climatique. Le site [Climessence.fr](http://climessence.fr) (ONF, OFB) donne des tendances à l'horizon 2070 (cf. figures ci-après). L'épicéa commun est amené à disparaître du bassin versant à l'horizon 2070 selon le scénario le plus pessimiste. Les conditions restent compatibles pour le pin douglas dans le cadre du scénario intermédiaire, mais sont globalement incompatibles dans le cadre du scénario pessimiste. Une réflexion sera donc engagée sur ce point au sein du programme d'actions.

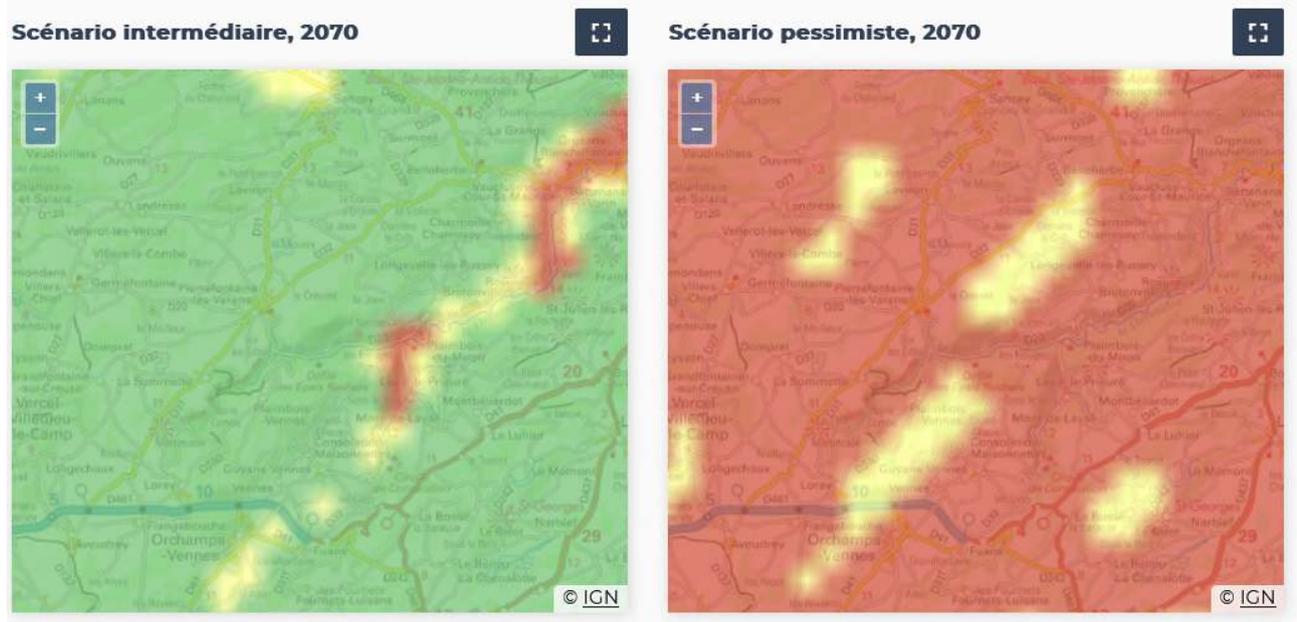


Figure 56. Extrait de cartographie sur l'évolution de l'épicéa à l'horizon 2070 (climessence.fr)

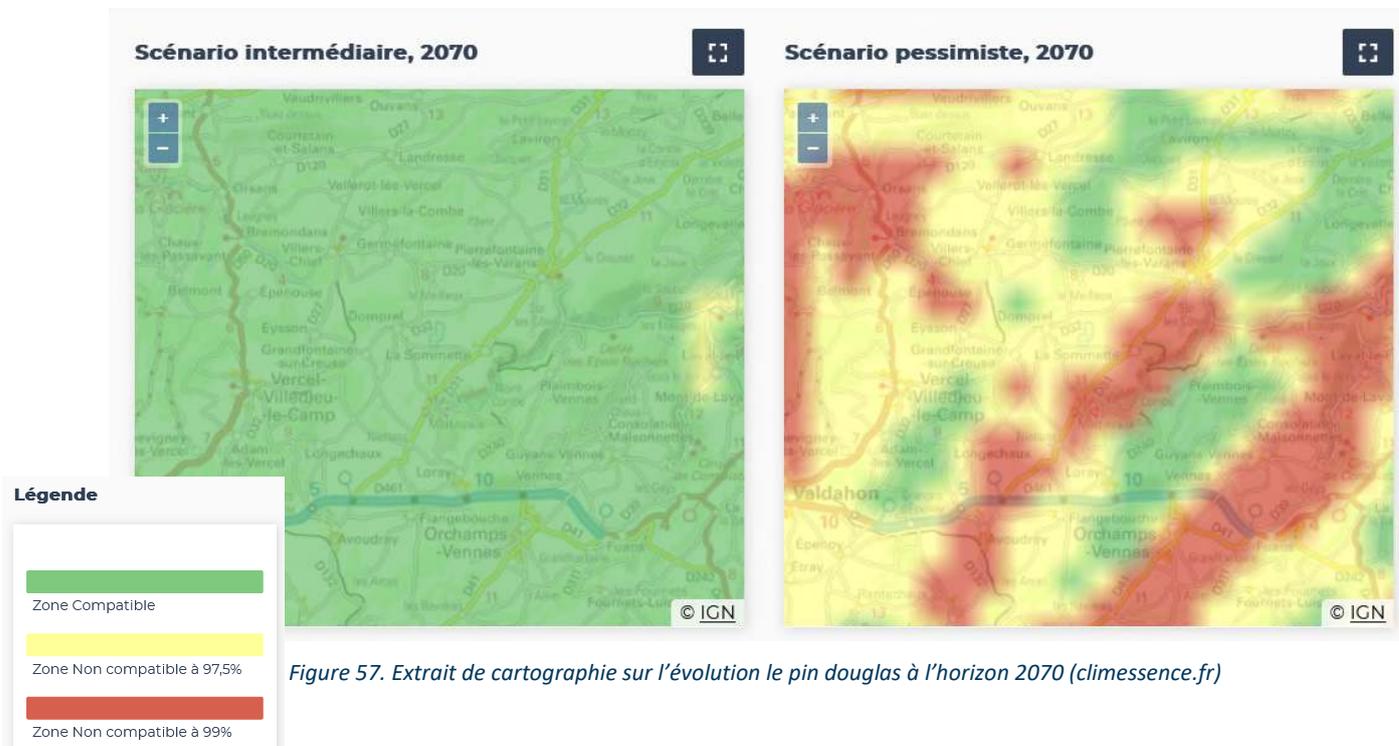


Figure 57. Extrait de cartographie sur l'évolution le pin douglas à l'horizon 2070 (climessence.fr)

5.4. LES OUVRAGES TRANSVERSAUX

5.4.1. Le blocage du transit sédimentaire

Les réponses du cours d'eau face aux aménagements anthropiques peuvent avoir une incidence sur les débits, en particulier via l'incision du lit qui peut mettre à nu la roche mère et ainsi favoriser l'apparition de nouvelles pertes.

Environ une dizaine de moulins sont localisés sur les documents anciens (environ 12 sur la carte de Cassini, 4 sur la carte de l'état-major), principalement sur son cours amont.

Historiquement, les pertes situées en amont des moulins étaient souvent comblées afin de maintenir un débit suffisant dans le lit du cours d'eau. L'abandon des ouvrages et des pratiques associées pourrait avoir contribué à la réémergence naturelle de certaines pertes, et donc à un rétablissement du régime hydrologique de la Rivière sur les tronçons naturellement concernés par les pertes.

Encore aujourd'hui, une multitude de petits aménagements est retrouvée tout au long du linéaire (cf. carte ci-après).

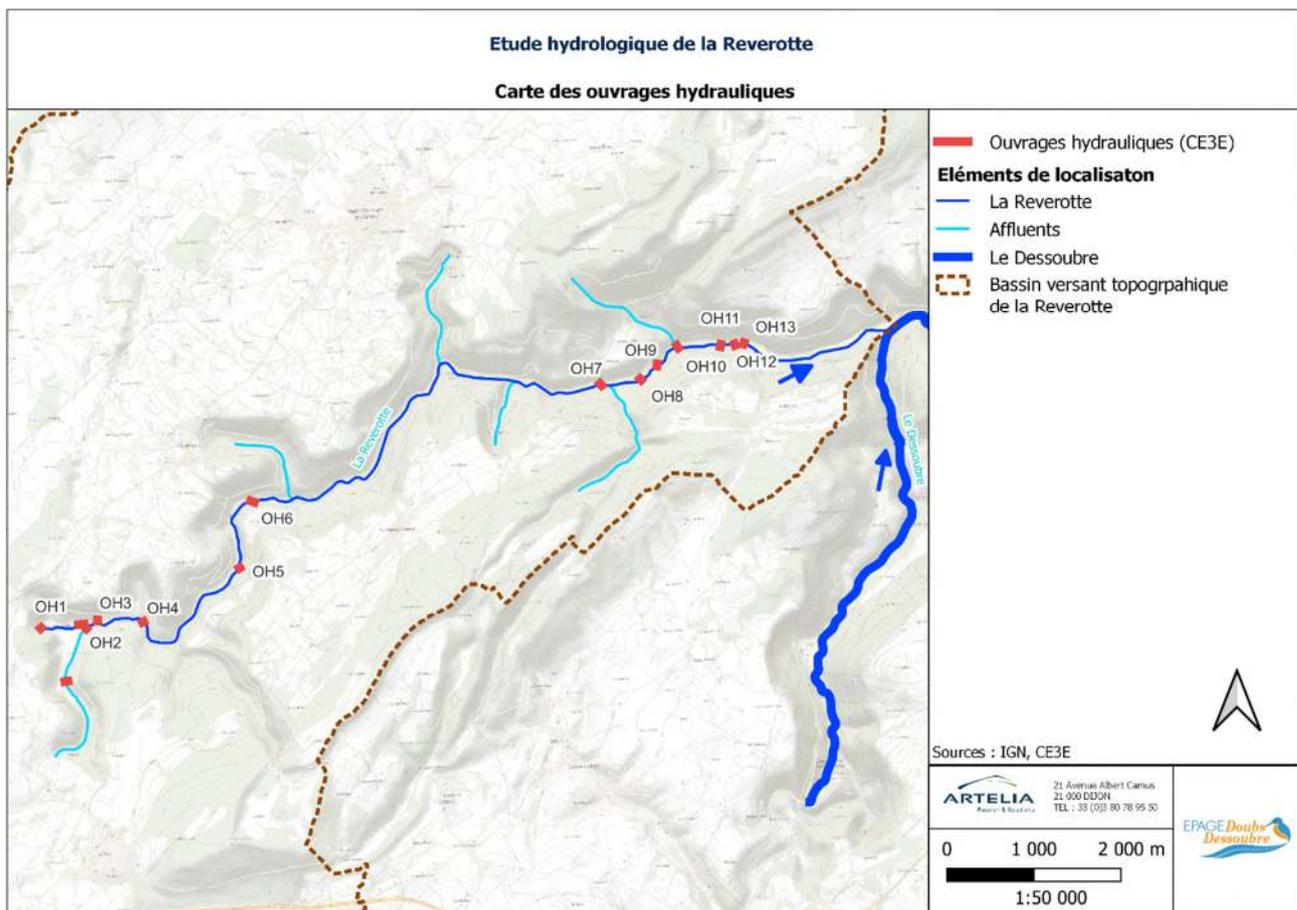


Figure 58. Carte des ouvrages hydrauliques (source de la donnée : CE3E)

Dans le cadre de l'étude hydromorphologique de la Reverotte (CE3E), les ouvrages suivants ont été identifiés comme pouvant présenter un obstacle au transport sédimentaire :

Ouvrage	Impact sur le transport solide	Remous solide (volume)
OH1 - Seuil n°1 : source de la Reverotte ;	Moyen	ND
OH1bis : passage busé ;	Fort	ND
OH1ter : seuil du moulin de Martinvaux ;	Fort	ND
OH2 : seuil n°2 « canalisation »	Fort	ND
OH2bis : Pont de Martinvaux et suite de la canalisation	Fort	ND
OH3 : ancien seuil	Fort	ND
OH4 : seuil	Fort	ND
OH5 : seuil	Fort	85m3
OH5bis : passage à gué	Fort	14m3
OH6 : seuil	Fort	896m3
OH7 : seuil	Fort	706m3
OH8 : seuil	Fort	854m3
OH9 : seuil	Fort	187m3
OH9 : seuil	Fort	ND
OH10 : seuil	Fort	186m3
OH12 : seuil	Fort	443m3
OH13 : seuil	Moyen	ND

Tableau 7. Liste des seuils impactant le transport solide (source : CE3E)

Bien qu'il s'agisse essentiellement de petits ouvrages, leur nombre important laisse pressentir un impact sur le transport sédimentaire au global. **Ainsi, le volume stocké total évalué par CE3E est de 3371m3.** A titre de comparaison, ce volume représente une épaisseur de sédiments d'environ 5cm sur la totalité du linéaire de la Reverotte (hypothèse d'une largeur moyenne en fond de 5m).

Sur la base des données à disposition, il est difficile d'évaluer si la Reverotte connaît (ou a connu) une dynamique d'incision en lien avec ces aménagements. L'affouillement des culées du pont de Martinvaux semble indiquer que la rivière s'est incisée sur des secteurs ponctuels (cf. figure ci-après), mais il est impossible en l'état de nos connaissances de lier l'affouillement du pont à une dynamique plus globale, celle-ci pouvant être causée par des phénomènes locaux compte tenu des contraintes hydrauliques au droit des ouvrages. D'autre part, les repérages de terrain n'ont permis de visualiser aucun signe d'incision significatif sur la majorité du cours d'eau la Reverotte (hors éventuellement le secteur aval, mais qui est d'avantage lié à l'incision du Dessoubre).



Figure 59. Affouillement des fondations du pont de Martinvaux (source : CE3E)

Autre préoccupation potentielle : les protections de berge présentes empêchent la mobilité du cours d'eau et donc la mobilisation des sédiments présents en berge, ce qui peut ainsi constituer une cause de déficit sédimentaire. Elles concernent 850m de berge environ (source : CE3E), soit 3% du linéaire de berge : ainsi, cet enjeu reste mineur.

La suppression ou le réaménagement des ouvrages impactant devra être intégrée au programme d'actions afin de freiner une éventuelle incision du cours d'eau, à moins qu'il soit prouvé qu'ils soient situés directement au droit d'une faille. De manière générale, les zones de remous solide sont peu étendues en raison de la forte pente du cours d'eau : il est donc attendu que la suppression des seuils ne causera pas l'apparition de nouvelles pertes par remobilisation du substrat.

5.4.2. L'évaporation des eaux

Les zones de remous sont classiquement visées comme responsables de l'accroissement de l'évaporation des eaux. En effet, ces zones correspondent le plus souvent à des zones lenticulaires surchauffées.

Sur la Reverotte, les zones de retenues restent relativement ponctuelles et sont le plus souvent peu soumises à l'ensoleillement en raison du couvert forestier. Dans ces conditions leur impact sur l'hydrologie de la Reverotte est jugé faible voire nul.

5.5. LA DEGRADATION DES ZONES HUMIDES

Le bassin versant compte un certain nombre de milieux humides (prairies humides, tourbières, etc.) Celles-ci sont localisées sur la carte ci-après.

Classiquement, les milieux humides jouent sur les débits à l'échelle du bassin versant : en stockant les eaux de manière temporaire à la suite des épisodes pluvieux et en fonction des interactions avec la nappe d'accompagnement, elles permettent de lisser les débits sur une période plus longue et apportent ainsi un soutien en période de basses eaux.

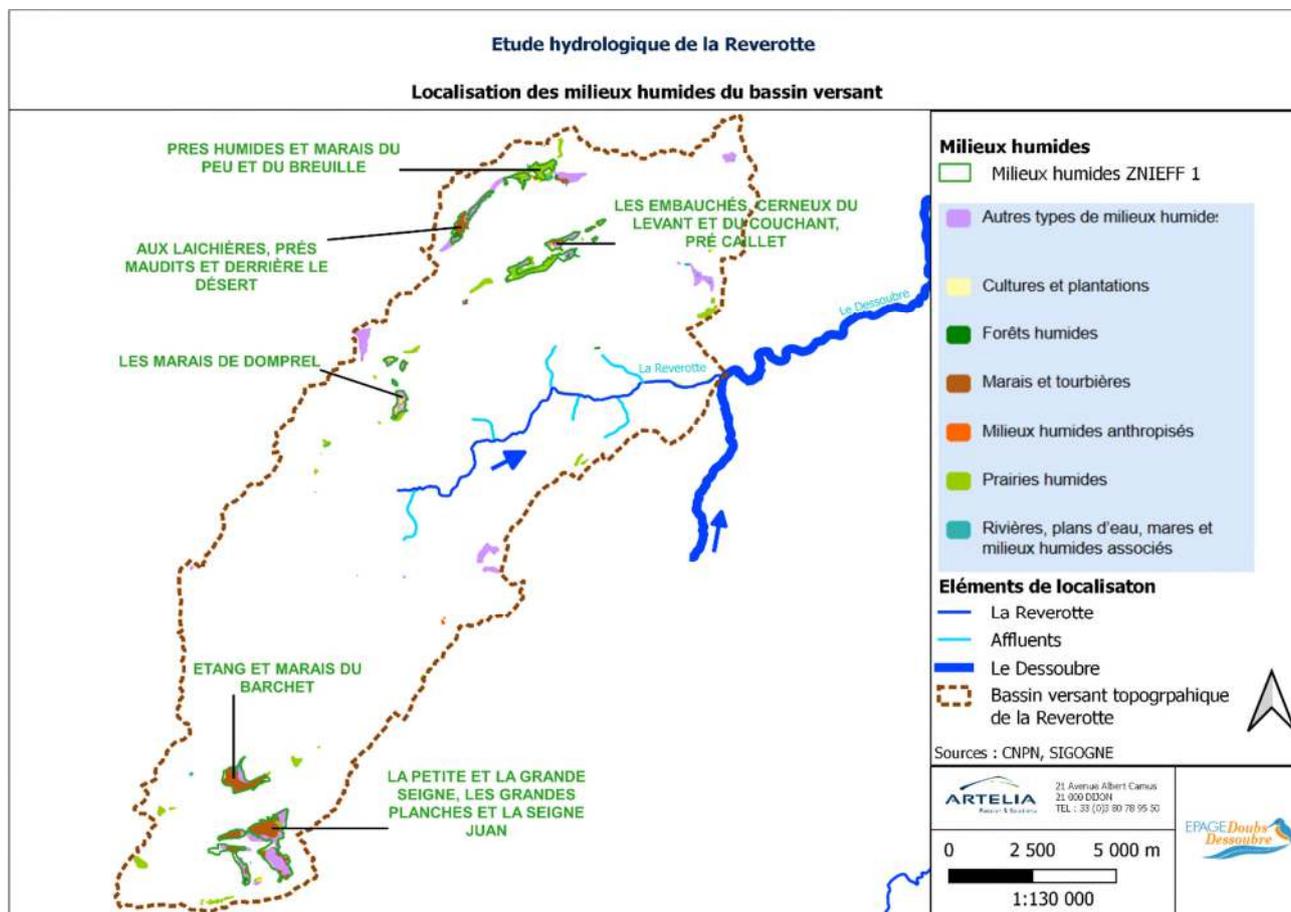


Figure 60. Carte de localisation des milieux humides

La plupart de ces milieux humides ont fait l'objet d'une classification en ZNIEFF, il est ainsi possible d'en synthétiser les principaux enjeux de conservation :

Nom	Identifiant	Facteurs d'évolution de la zone
La petite et la grande Seigne, les grandes planches et la Seigne juan	430002314	Route Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Pâturage
Etang et marais du Barchet	430020286	Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Mise en eau, submersion, création de plan d'eau Plantations, semis et travaux connexes Eutrophisation Fermeture du milieu
Les marais de Dompriel	430002320	Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Mise en eau, submersion, création de plan d'eau Pratiques et travaux forestiers Fermeture du milieu

Les embauchés, Cerneux du levant et du couchant, pré Caillet	430002317	Rejets de substances polluantes dans les sols Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Mise en eau, submersion, création de plan d'eau Pâturage Suppressions ou entretiens de végétation Pratiques et travaux forestiers Fermeture du milieu
Aux Laichières, prés maudits et derrière le désert	430002315	Route Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Mise en eau, submersion, création de plan d'eau Pâturage Pratiques et travaux forestiers
Prés humides et marais du peu et du breuille	430020287	Comblement, assèchement, drainage, poldérisation des zones humides Traitements de fertilisation et pesticides Plantations, semis et travaux connexes Chasse Fermeture du milieu

Tableau 8. Liste des milieux humides classés en ZNIEFF1

Les zones notées en vert bénéficient aussi du statut de protection Natura 2000 : « Vallées du Dessoubre, de la Reverotte et du Doubs »

Ainsi, les principaux facteurs de pression sur les milieux humides sont :

- Les drainages ;
- Les remblaiements, et les prélèvements de matériaux en tourbière ;
- La fermeture des milieux suite à l'arrêt de l'activité de pâturage ;
- Le surpâturage ;
- Certaines activités socio-économiques : agriculture, exploitation forestière, chasse.

A titre d'exemple, un tiers de la surface de la tourbière « La petite et la grande Seigne, les grandes planches et la Seigne juan » est dégradé par le pâturage. Les marais du Barchet ont été équipés de drains qui perturbent son hydrologie. Le site « Aux Laichières, prés maudits et derrière le désert » a fait l'objet de creusement de mares et de plantations de conifères, etc. (source : INPN).

Dans une optique d'amélioration du fonctionnement hydrologique de la Reverotte, il sera particulièrement intéressant d'intervenir sur les drains, les zones remblayées en milieux humides et les plantations de conifères.

5.6. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le ministère chargé de l'écologie a piloté une étude prospective intitulée « Explore 2070 », dont les objectifs principaux sont :

- Evaluer les impacts du changement climatique sur les hydrosystèmes et la ressource en eau à échéance 2070 pour la France entière ;
- Elaborer des stratégies possibles d'adaptation.

Il existe un point de calcul au droit de la station hydrométrique sur le Dessoubre à Rosureux, les résultats sont présentés ci-après :

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel													
moyens																										
Qobs POD (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-													
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-													
Δ min (%)	-17	-7	-7	+1	-18	-18	-41	-48	-48	-66	-60	-69	-73	-75	-84	-75	-78	-73	-60	-78	-39	-60	-23	-33	-30	-33
Δ med (%)	+20	+15	+27	+35	-5	+2	-9	-20	-25	-41	-25	-32	-51	-48	-80	-65	-64	-65	-22	-52	-1	-23	-4	-2	-11	-14
Δ max (%)	+41	+35	+64	+70	+34	+24	+11	+10	+1	-11	-4	-22	-22	-20	-21	-6	-35	-44	-17	-30	+33	+9	+17	+13	-6	-8
5 ans secs																										
Qobs POD (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-													
Qsim (climat obs) POD (m ³ /s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-													
Δ min (%)	-22	-16	-39	-31	-35	-35	-53	-64	-54	-62	-71	-63	-82	-59	-87	-43	-87	-50	-73	-65	-45	-69	-38	-56	-35	-40
Δ med (%)	+21	+29	+40	+52	-1	-4	+5	-16	-26	-30	-42	-48	-54	-39	-75	-35	-81	-35	-48	-60	+5	-46	-15	-18	-11	-14
Δ max (%)	+73	+67	+147	+128	+72	+69	+45	+36	+35	+5	-17	-37	-34	-26	-32	-11	-45	-25	-7	-36	+53	-4	-2	-6	-5	-5

Tableau 9. Evaluation des tendances évolutives des débits à l'horizon 2070 sur le Dessoubre à Rosureux (OFB)

Il faut noter que ces données comportent un haut niveau d'incertitude par leur vocation prospective à long terme. Il est cependant possible d'en retenir les tendances générales suivantes :

- Des débits moyens évoluant à la baisse entre Mars et décembre : jusqu'à -80% sur le mois d'Août. Les étiages seront par ailleurs plus intenses : QMNA5 diminué entre -25 et -68% ;
- Des débits moyens évoluant à la hausse sur les mois de Janvier et Février.

Avec un coefficient annuel de -11 à -14% (suivant le modèle utilisé), il en ressort que l'impact du changement climatique se manifestera en majorité par une modification de la répartition des débits sur l'année, avec des crues plus prononcées et récurrentes, et des étiages plus intenses. C'est en effet ce qu'indique la fiche de données, à savoir une occurrence des étiages de +6 à +12 jours annuels, et une occurrence des crues de +24 à +37 jours annuels (valeurs médianes).

Il est probable que le changement climatique exerce d'ores et déjà une incidence sur les débits de la Reverotte, ainsi l'analyse de l'évolution de la pluviométrie se révélerait ici pertinente. Malheureusement, aucune station à proximité immédiate ne propose de séquences de données historiques sur le site de Météo France (la station la plus proche étant la station de Pontarlier, à 58km du site et situé dans un contexte différent).

Il est donc probable que le changement climatique devienne à l'avenir le facteur anthropique le plus déterminant concernant les débits d'étiages de la Reverotte.

6. BILAN DU DIAGNOSTIC

Les débits de la Reverotte sont principalement influencés par le **contexte karstique**, dont les failles captent une grande partie du débit en été en fonction des secteurs.

Sur le plan de la fonctionnalité hydrologique, nous retiendrons que la Reverotte est scindée en deux grandes entités :

- **Une moitié amont du linéaire, aux assecs fréquents**, alimentée par un épikarst occasionnellement saturé aux propriétés plus ou moins émissives ou captantes selon l'altitude et la saison ;
- **Une moitié aval du linéaire, en eau pérenne**, à la fois intégratrice des résurgences apicales et des afférences liées aux épikarst latéraux, mais aussi en contact avec un karst plus profond soutenant l'étiage.

Retenons aussi la **tendance à la captation d'une partie des débits à l'amont proche de Gigot** en période de plus basses eaux. Ce point est peut-être le plus préoccupant en termes de conséquences hydrobiologiques si les événements de sécheresses tels que 2022 venaient à se répéter fréquemment.

Les principaux facteurs anthropiques de la variation des débits ont été étudiés. Peu d'entre eux peuvent être quantifiés en termes d'incidence.

Il ressort que les **stations de pompage ne réduisent pas spécifiquement les débits du cours d'eau**. Par ailleurs, les ouvrages hydrauliques ne semblent pas avoir une incidence significative d'un point de vue morphologique, même si le volume de sédiments stockés dans les retenues justifie une intervention en faveur du bon fonctionnement morphosédimentaire. Les autres volets potentiellement impactant sont l'artificialisation des milieux humides, et la présence d'épicias en berge. Bien entendu, **le changement climatique est vraisemblablement voué à jouer un rôle de plus en plus prégnant**, mais il est à l'heure actuelle impossible de donner des chiffres certains quant à ce facteur.

La suite du présent rapport s'attache donc à **dresser des pistes d'actions en faveur d'une amélioration du fonctionnement hydrologique de la Reverotte, ou a minima pour une plus grande résilience du milieu face aux facteurs de pression ne pouvant être résolus directement**.



B. PROGRAMME D' ACTIONS

1. PHILOSOPHIE DU PROGRAMME D' ACTIONS

Le programme d'actions a pour vocation de proposer des actions en faveur du fonctionnement hydrologique. Pour autant, la posture proposée est de **ne proposer que des actions se basant sur un rétablissement des processus naturels du cours d'eau et de son bassin versant**, dans une logique de restauration globale du cours d'eau qui se cristallise à travers la **labélisation « rivière sauvage » de la Reverotte**.

Ainsi les aménagements lourds et vecteurs d'artificialisation ne seront donc pas abordés ici, il s'agit notamment du colmatage des failles, de l'aménagement ou de la rehausse de barrages, etc. En effet ces aménagements pourraient avoir des répercussions négatives inattendues dans le cas du colmatage des failles, et impacter négativement les paramètres biologiques et la résilience de la rivière dans le cas des seuils et autres aménagements.

Enfin, le programme d'actions ne sera pas uniquement focalisé sur le cours d'eau en lui-même, mais proposera aussi des pistes de réflexion à l'échelle du bassin versant.

1.1. PRECISIONS QUANT AU NIVEAU DE RENDU AVANT-PROJET SOMMAIRE

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que le présent rendu vise uniquement à proposer de grands principes d'aménagements et leurs incidences, et si possible les coûts associés.

Par conséquent, les éléments de dimensionnement et de chiffrage donnés dans la suite de ce rapport restent des ordres de grandeur.

1.2. HIERARCHISATION DES INTERVENTIONS

La hiérarchisation des interventions dépend des potentialités de l'action et du degré de priorité de la thématique concernée.

Par conséquent, un phasage des actions est proposé en plus du degré de priorité. Les actions seront réparties dans les trois catégories suivantes :

- **Priorité haute : court terme (5 ans) ;**
- **Priorité moyenne : moyen terme (10 ans)** - ce niveau de phasage désigne des **actions moins prioritaires sur le plan écologique ou plus complexe à réaliser compte tenu du contexte local**. Elles sont destinées à être réalisées une fois que la première partie du plan de phasage (court terme) sera mise en œuvre.
- **Priorité faible : long terme (15 ans)** - ce dernier niveau concerne des actions peu prioritaires car moins intéressantes sur le plan écologique.

2. FICHES ACTIONS

Dans un souci de bonne lisibilité du rapport, les fiches actions sont à retrouver en annexes du présent document.

Le tableau suivant présente la synthèse du programme d'actions :

Tableau 10 – Synthèse du programme d'actions

  			
Action	Priorité	Intitulé de l'action	Estimation financière €HT
1	Haute	Fiche action n°1 : préservation et restauration des zones humides du bassin versant	ND
2a	Faible	Fiche action n°2a : suppression/ réaménagement des ouvrages ayant une incidence sur le transport sédimentaire, secteur amont	91 908.00 €
2b	Moyen	Fiche action n°2b : suppression/ réaménagement des ouvrages ayant une incidence sur le transport sédimentaire, secteur "la Sommette"	65 067.00 €
2c	Moyen	Fiche action n°2c : suppression/ réaménagement des ouvrages ayant une incidence sur le transport sédimentaire, secteur aval	87 285.00 €
3	Haute	Fiche action n°3 : gestion des plantations de résineux	ND
Total €HT			244 260.00 €
Total €TTC			293 112.00 €



ANNEXE 1

FICHES ACTIONS