



Fédération de l'Allier pour la Pêche
et la Protection des Milieux
Aquatiques

Jun 2023

ETUDE DE L'IMPACT DES SEUILS SUR LE RECHAUFFEMENT DES EAUX DE LA SIOULE DANS SA TRAVERSEE DU DEPARTEMENT DE L'ALLIER

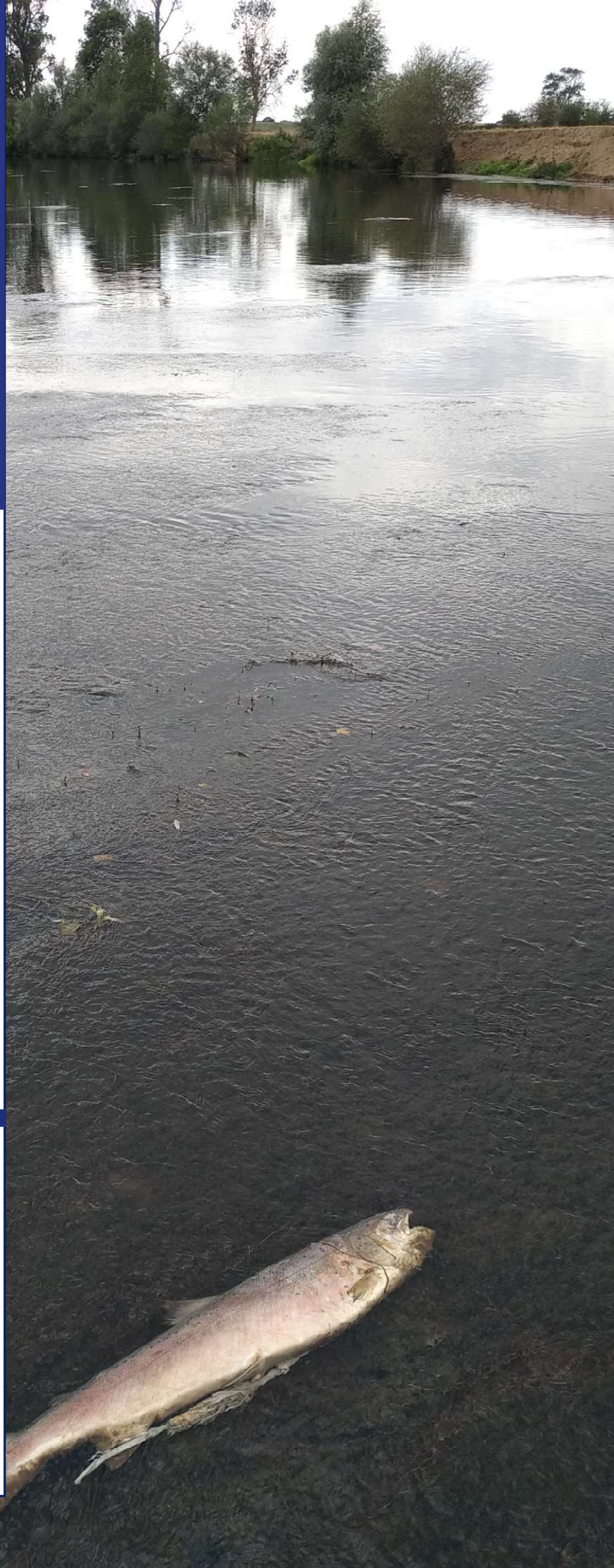
-
RESULTATS 2022



FÉDÉRATION NATIONALE
PÊCHE



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



Mise en place du suivi et analyse des données

Thibaut ROSAK

Responsable technique – Fédération de l'Allier pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
06 78 66 13 78 - fede03.rosak6@orange.fr

Direction

Mickael LELIEVRE

Directeur – Fédération de l'Allier pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
06 08 92 81 34 - fede03.lielievre@orange.fr

SOMMAIRE

1	PREAMBULE	5
2	MATERIEL ET METHODE	6
2.1	LES ENREGISTREURS THERMIQUES.....	6
2.2	DEFINITION DU PLAN DE POSE.....	7
2.3	CAS PARTICULIERS ET CHOIX METHODOLOGIQUES	9
2.4	SYNTHESE DU PLAN DE POSE 2022.....	12
2.5	CHOIX DES DONNEES TRAITÉES	14
3	RESULTATS 2022	15
3.1	EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE CHAUDE	15
3.2	EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE CHAUDE, HORS ETIAGE.....	19
3.3	EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE FROIDE	21
4	SIMULATIONS ET PERSPECTIVES	23
5	BILAN	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse du plan de pose 2022.....	12
-------------------------------------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aperçu cartographique et photographie aérienne du secteur du seuil de Jenzat.....	7
Figure 2 : Repérage du premier écoulement lotique présent à l'amont du seuil de Jenzat.....	8
Figure 3 : Schéma-type d'implantation des enregistreurs thermiques au niveau d'une succession de portions libres et influencées.....	8
Figure 4 : Positionnement final des 41 sondes thermiques utilisées pour l'analyse 2022.....	13
Figure 5 : Représentativité des portions libres et influencées de la Sioule dans sa traversée du département.....	14
Figure 6 : Impact de l'augmentation des Tm30j max sur les densités de population des alevins et adultes de truites fario.....	14
Figure 7 : Débits de la Sioule à Ebreuil durant les trois périodes analysées en 2022.....	15
Figure 8 : Evolution amont → aval des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude....	16
Figure 9 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la Tmp de la Sioule en période chaude.....	16
Figure 10 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la Tm30j max de la Sioule en période chaude.....	17
Figure 11 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions cumulées des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude.....	17
Figure 12 : Evolution amont → aval de la Tmp au sein de chacune des portions de la Sioule en période chaude.....	18
Figure 13 : Evolution amont → aval de la Tm30j max au sein de chacune des portions de la Sioule en période chaude.....	18
Figure 14 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude.....	19
Figure 15 : Evolution amont → aval de la Tmp de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales.....	19
Figure 16 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales.....	20
Figure 17 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions cumulées de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales.....	20
Figure 18 : Evolution amont → aval de la Tmp au sein de chacune des portions de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales.....	21
Figure 19 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales.....	21
Figure 20 : Evolution amont → aval de la température moyenne de la Sioule en période froide.....	22
Figure 21 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes de la Tmp de la Sioule en période froide.....	22
Figure 22 : Evolution hypothétique de la Tm30j max de la Sioule durant l'été 2022 en l'absence de seuil.....	23
Figure 23 : Simulation de l'impact thermique des seuils sur la population de truite fario de la Sioule.....	23
Figure 24 : Evolution hypothétique de la Tm30j max de la Sioule durant l'été 2022 en l'absence de portions libres.....	24

1 PREAMBULE

Elément central du fonctionnement des milieux aquatiques, la température de l'eau influence directement la quantité d'oxygène soluble dans l'eau et régit notamment l'activité et le cycle biologique des poissons. Depuis les premiers travaux d'Huet (années 50) destinés à comprendre l'organisation longitudinale des peuplements de poissons parmi les hydrosystèmes d'eau courante, elle occupe généralement une place centrale au sein des différents concepts biotypologiques de zonation piscicole. En effet, les poissons présentent, en tant qu'animaux à sang froid, une sensibilité importante à la température des eaux. C'est en particulier le cas des espèces sténothermes d'eaux froides telles que la truite fario, l'ombre commun, le saumon atlantique et le chabot, qui sont présentes au sein du linéaire de la Sioule dans sa traversée du département de l'Allier.

À la suite d'épisodes répétés de sécheresse et de canicule qui, sur les parties basses du cours de la Sioule, ont notamment provoqué des mortalités importantes de saumons atlantiques durant l'été 2020, et dans un contexte de réchauffement climatique et de remise en question systématique de la notion de continuité écologique, il nous semblait important d'évaluer l'impact des seuils sur le réchauffement d'un cours d'eau. Aussi lorsque la FDPPMA 63 nous a informé de son projet d'étude de l'effet cumulé sur la thermie de la Sioule du complexe hydroélectrique de Fades/Queuille et de la succession de seuils présents sur la partie puydômoise de la rivière, nous avons souhaité nous y associer et étendre cette étude à la partie bourbonnaise de la rivière.

Sur son parcours bourbonnais, la Sioule, affluent rive gauche majeur de l'Allier, constitue un cas d'étude particulièrement intéressant puisqu'elle combine une densité importante de seuils (l'étude en recense 17 en 50 km), une multiplication récente de projets et de demandes de renouvellement d'autorisation de production d'énergie hydroélectrique qui tendent à pérenniser à long terme l'existence de ces seuils, et un peuplement de poissons qui, depuis les secteurs salmonicoles des gorges de Chouvigny, évolue progressivement vers un peuplement intermédiaire dominé par les cyprinidés rhéophiles.

En apportant des éléments chiffrés permettant de confirmer ou d'infirmer l'effet négatif supposé des retenues sur la thermie des cours d'eau, ce travail de connaissance doit permettre d'anticiper d'éventuelles dégradations et de proposer des solutions pour préserver les peuplements piscicoles thermosensibles de la Sioule, qui au-delà du fort intérêt halieutique qu'ils représentent, sont constitués pour partie d'espèces patrimoniales ayant notamment justifié la désignation du site Natura 2000 « Basse Sioule » (FR8301017).

2 MATERIEL ET METHODE

Dans le but d'évaluer l'effet cumulé des seuils sur le réchauffement des eaux, notamment en période estivale lorsque les populations de poissons thermosensibles sont les plus vulnérables, nous avons tout d'abord défini les portions de la Sioule « libres » (c.-à-d. où les écoulements ne sont pas ralentis par un seuil) et les portions « influencées » par leur présence. Ce travail a tout d'abord été réalisé par photo-interprétation, puis il a été confirmé sur le terrain lors de la pose des enregistreurs thermiques autonomes également appelés « sondes » dans la suite de ce document.

Les sondes ont été installées avant l'été 2021 en limite de chacune de ces portions. Elles ont enregistré jusqu'à la fin d'été 2022 une mesure de température instantanée toutes les heures. Les données acquises durant l'été 2021 ont fait l'objet d'un rapport spécifique (Rosak T., *Etude de l'impact des seuils sur le réchauffement des eaux de la Sioule dans sa traversée du département de l'Allier – Résultats 2022, aout 2022, 23p.*).

Outre les nettes différences de « comportement thermique » des portions libres et influencées de la Sioule qu'elle a mis en évidence, cette première phase d'exploitation de données avait également pour but d'affiner le plan de pose des sondes et d'améliorer la représentativité et la fiabilité des données acquises en 2022. Les adaptations protocolaires et choix analytiques faits sont clairement décrits dans la suite de ce document.

Les données acquises durant l'ensemble de cette étude ont été traitées à l'aide du programme d'analyse NERIUS, développé en 2016 par S. LAVERDURE.

2.1 LES ENREGISTREURS THERMIQUES

Les enregistreurs thermiques utilisés sont des HOBO Pendant temp UA-001-64. Ils sont de petites dimensions (58mm x 33mm x 23mm, 18 grammes) et étanches jusqu'à 30 mètres de profondeur. Alimentés par une pile bouton à remplacer généralement chaque année, ils possèdent une capacité de stockage de données variable suivant le pas de temps utilisé pour les mesures (ici toute les heures). Leur sensibilité de mesure est de 0,1°C et la lecture des données se fait de manière optique. Enfin il conviendra de tenir compte de leur précision de mesure (env. +/- 0,5°C), en particulier lors de la comparaison des températures instantanées.



Ci-dessus : enregistreur thermique utilisé dans le cadre de cette étude – **Ci-contre** : enregistreur inséré dans son boîtier PVC de protection et fixation de l'ensemble sur un support dur naturel (ici des racines immergées)



Les emplacements choisis doivent permettre de minimiser l'influence des paramètres « extérieurs » susceptibles de dégrader la qualité des mesures (p.ex. faibles vitesses d'écoulement et profondeurs d'immersion, exposition au soleil, risque d'envasement ou d'ensablement), tout en fournissant des supports solides et discrets limitant le risque de perte de données (p.ex. arrachement des enregistreurs en période de hautes eaux, vol ou dégradation du matériel). La satisfaction de ce double objectif a nécessité quelques (rares) « compromis » et adaptations protocolaires lors de l'implantation des 51 enregistreurs thermiques installés dans le cadre de cette étude. Ils sont clairement mis en évidence dans la suite de ce document.

2.2 DEFINITION DU PLAN DE POSE

Le positionnement des enregistreurs a débuté par une recherche cartographique et un travail de photo-interprétation visant à dissocier les portions libres des portions influencées. Les limites entre ces portions sont soit des seuils, soit, dans le sens amont → aval, le dernier faciès d'écoulement de type « courant » recensé avant une retenue de seuil. Ces zones où la vitesse de courant est supérieure à 30 cm/s sont généralement repérables sur photographie aérienne par les formes hydromorphologiques caractéristiques qui les accompagnent et/ou par une coloration « blanchâtre » due aux déformations de la surface de l'eau causées par les turbulences (cf. Figure 2).

L'exemple-type du secteur du seuil de Jenzat (03) sur la Sioule est présenté dans les figures suivantes :

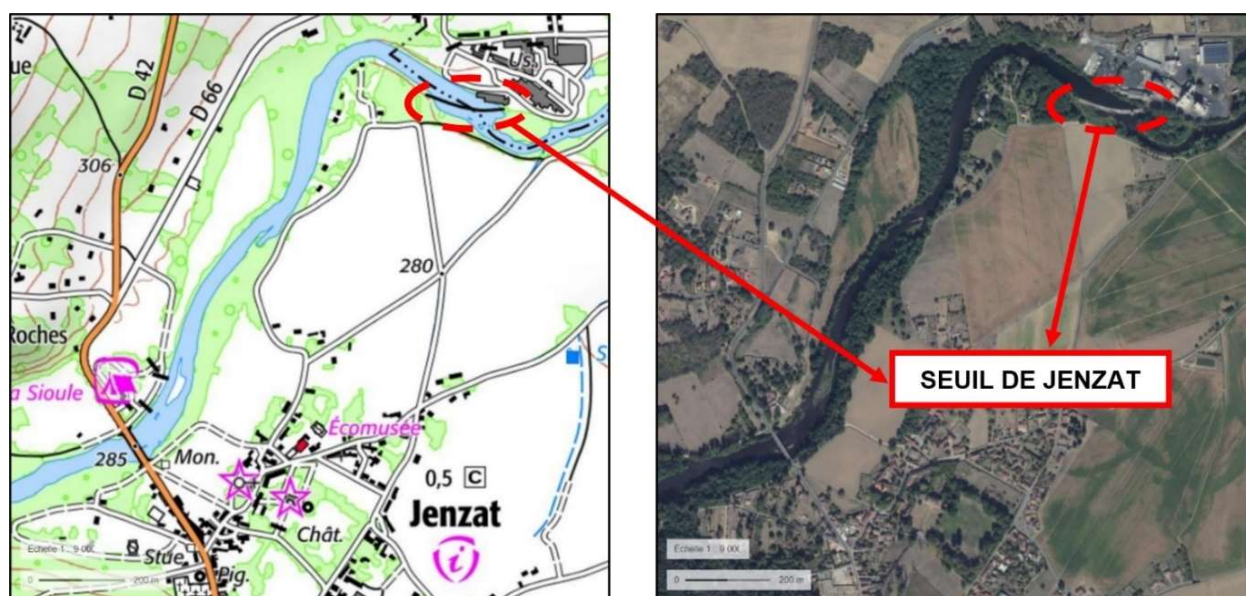


Figure 1 : Aperçu cartographique et photographie aérienne du secteur du seuil de Jenzat

Ce travail d'identification cartographique a ensuite été confirmé sur le terrain ce qui a permis de préciser certaines limites et de définir l'implantation des enregistreurs thermiques dans les secteurs les plus complexes de la Basse Sioule, caractérisés par des affluences importantes ou par la présence de centrales hydroélectriques et des tronçons court-circuités, canaux d'amenée, de décharge et de fuite associés.

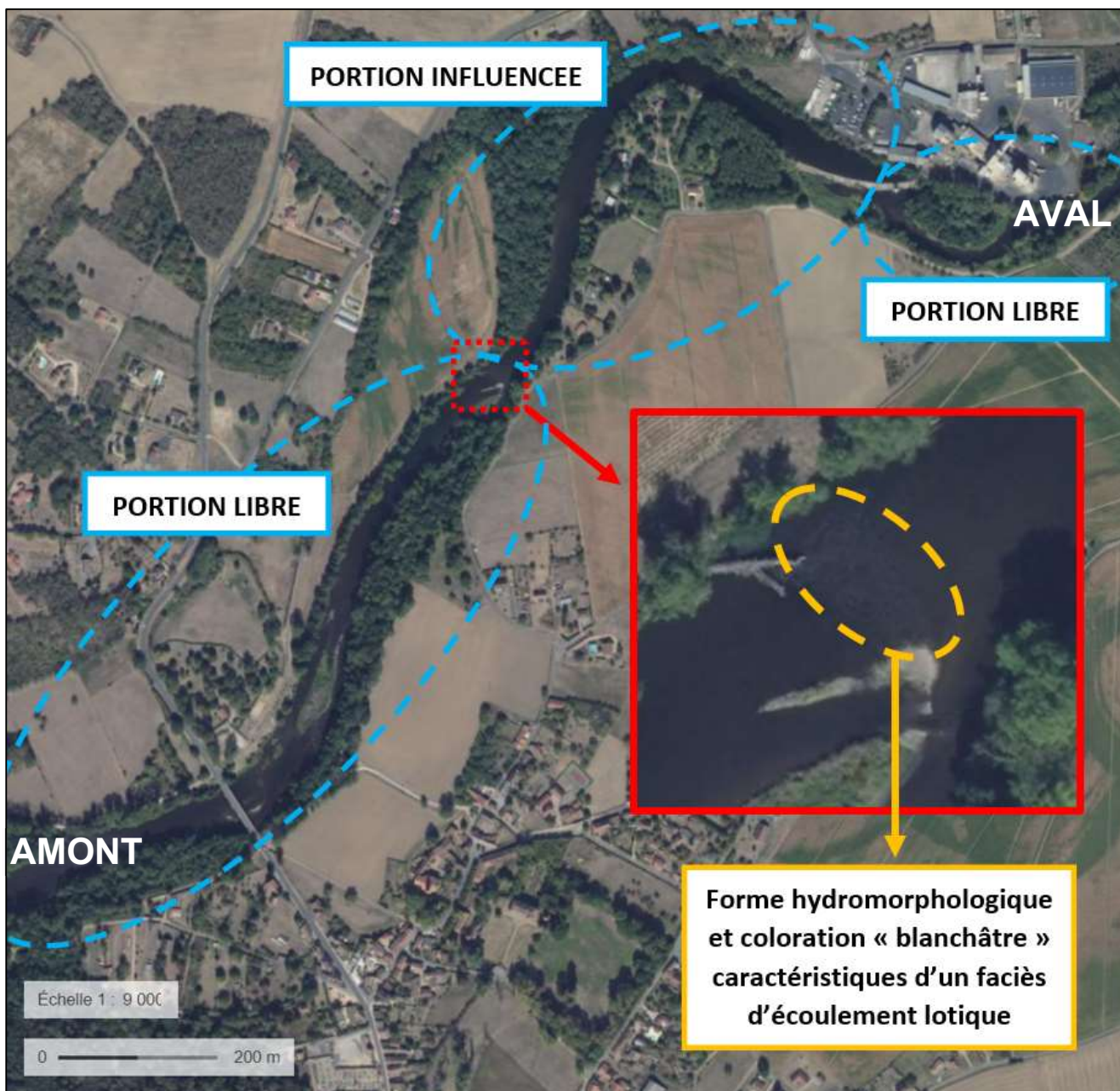


Figure 2 : Repérage du premier écoulement lotique présent à l'amont du seuil de Jenzat

Dans cette configuration « classique » où les portions libres et influencées se succèdent entrecoupées de seuils, l'implantation-type des enregistreurs thermiques est présentée dans la figure suivante :

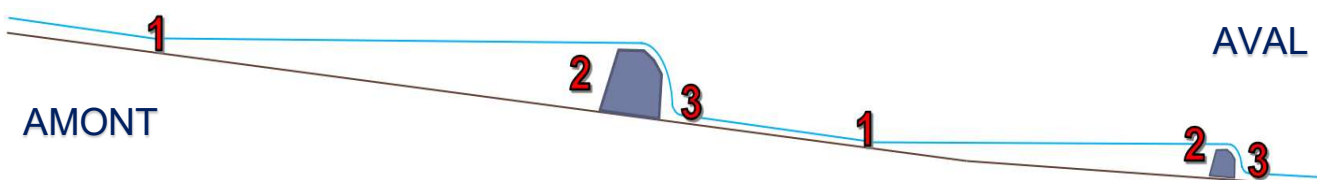


Figure 3 : Schéma-type d'implantation des enregistreurs thermiques au niveau d'une succession de portions libres et influencées

Pour tenir compte de la possible homogénéisation de la température de l'eau par brassage à l'aval immédiat des seuils, il a été décidé de considérer comme température au droit d'un seuil la moyenne des températures mesurées par les enregistreurs thermiques positionnés de part et d'autre de ce seuil (c.-à-d. les enregistreurs « 2 » et « 3 » du schéma ci-dessus).

Ainsi, dans la logique amont → aval de la configuration-type présentée précédemment :

- Comparer aux températures mesurées par un enregistreur « 1 » les moyennes des températures mesurées par les enregistreurs « 2 » / « 3 » qui suivent permet de caractériser l'évolution de la température de l'eau dans la portion influencée qu'ils délimitent ;
- Comparer aux moyennes des températures mesurées par les enregistreurs « 2 » / « 3 » les températures mesurées par l'enregistreur « 1 » qui suit permet de caractériser l'évolution de la température de l'eau dans la portion libre qu'ils délimitent.

Dans la pratique les différents seuils ont été numérotés et le référencement des sondes est constitué des abréviations suivantes :

- « amé » = amont éloigné (correspond à la sonde « 1 » du schéma-type de la Figure 3)
- « amp » = amont proche (correspond à la sonde « 2 » du schéma-type de la Figure 3)
- « avp » = aval proche (correspond à la sonde « 3 » du schéma-type de la Figure 3)

Ainsi, une sonde référencée « 13_amp » signifie qu'elle est située à l'amont proche du seuil d'Aubeterre (cf. Tableau 1). Dans le cas de seuils se succédant rapidement, une sonde peut à la fois caractériser la température à l'aval proche du seuil amont, et la température au départ de la portion influencée par le seuil aval (p. ex. sonde « 1_avp_2_amé »).

NB : Des sondes référencées « avé » (aval éloigné) ont été intégrées au plan de pose 2021 pour permettre de mieux comprendre le fonctionnement thermique de certains secteurs complexifiés par la présence d'aménagements hydroélectriques (Moulin Infernal, Aubeterre, Entremiolles, Champagne). Etant donné qu'elles n'encadrent pas des portions « libres » ou « influencées », ces sondes ne sont pas retenues pour caractériser le fonctionnement thermique de ces portions lors de l'analyse 2022.

2.3 CAS PARTICULIERS ET CHOIX METHODOLOGIQUES

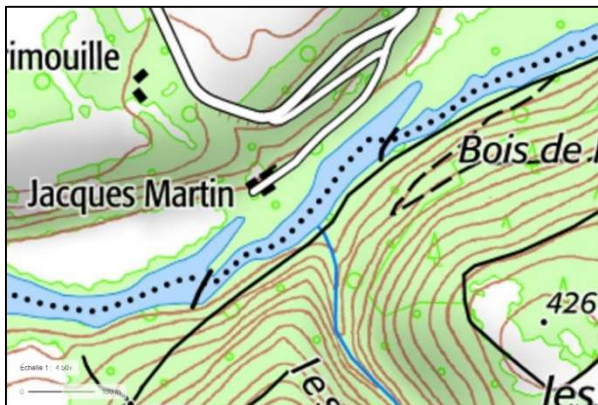
Le plan de pose « type » (cf. Figure 3) a dû être adapté à la configuration de secteurs présentant les particularités suivantes :

- **Cas particulier du seuil du Moulin des Valignards :** dans le secteur des Valignards la Sioule se partage naturellement en deux bras principaux dont un est partiellement influencé par le seuil associé au moulin. Le secteur influencé (en orange sur la carte ci-dessous) représente moins de 20% de l'ensemble des écoulements de ce secteur qui sera donc pris en compte en tant que portion libre dans la suite de l'analyse ;



Configuration de la Sioule dans le secteur du Moulin des Valignards

- **Deux seuils rapprochés sans portion libre significative les séparant :** c'est le cas des seuils 4 et 5 (lieu-dit « Jacques Martin ») et 6 et 7 (microcentrale de Neuval). Dans cette situation ce sont les seuils situés le plus à l'aval qui ont été équipés de sondes thermiques ;

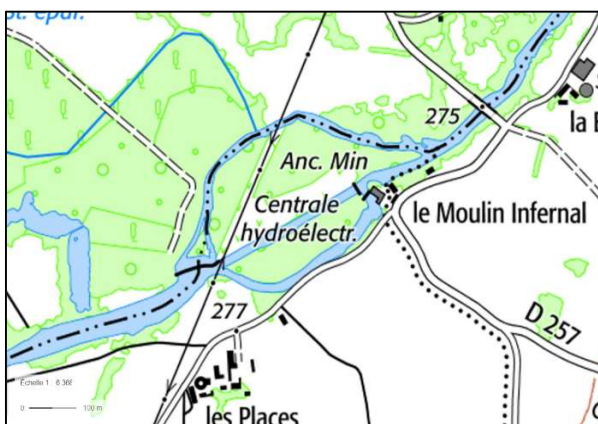


Succession de deux seuils rapprochés au niveau du lieu-dit « Jacques Martin »



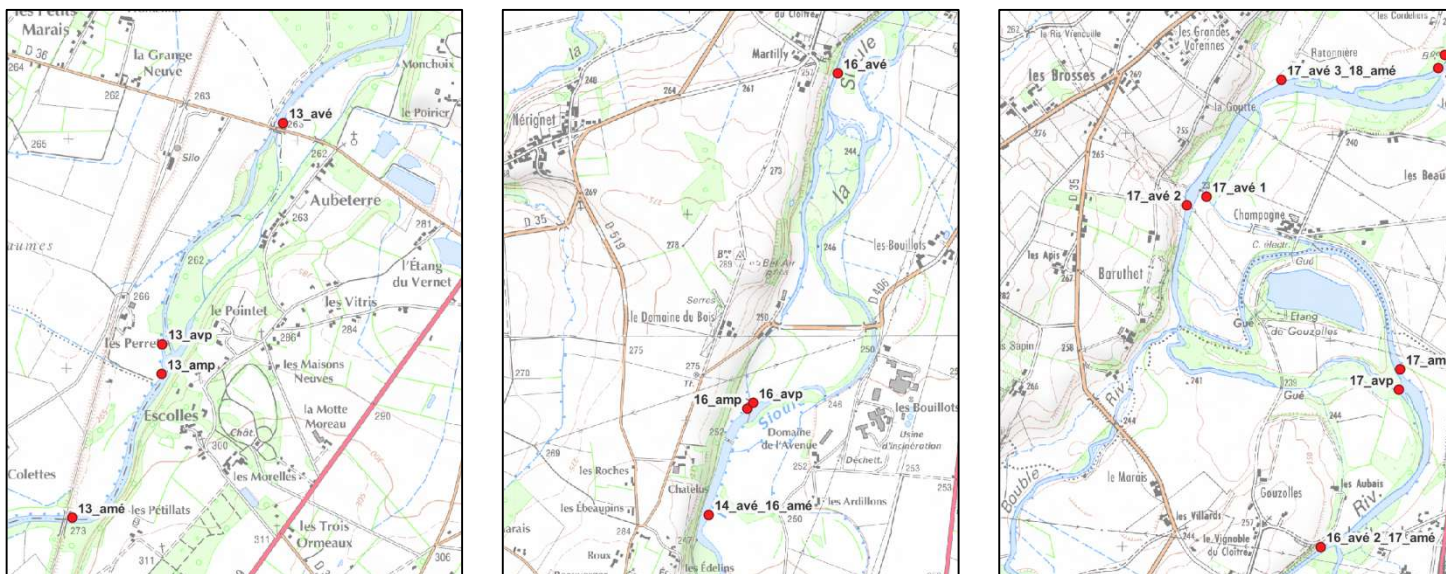
Succession de deux seuils rapprochés alimentant la microcentrale de Neuviel

- **Deux seuils espacés sans portion libre significative les séparant** : C'est le cas entre les seuils du plan d'eau et du pont d'Ebreuil, et entre les seuils du lieu-dit « Jacques Martin » et de la microcentrale de Neuviel. Dans cette situation deux portions influencées par des seuils se succèdent et la sonde « avp » située à l'aval proche du premier seuil sert également de sonde « amé » pour le seuil suivant. Autrement dit, elle caractérise autant la thermie à la fin de la première portion influencée, que la thermie au départ de la suivante ;
- **Prise en compte de la complexité de certains aménagements hydroélectriques** : les microcentrales de Moulin Infernal, Aubeterre, Grottes, Entremiolles et Champagne sont des secteurs complexes caractérisés par la présence, entre les seuils et la restitution des eaux turbinées, de canaux d'amenée (parfois plusieurs par microcentrale), de canaux de décharge, de canaux de fuite, et de tronçons court-circuités de la Sioule.



Configuration de la Sioule au droit de la microcentrale de Moulin Infernal

Ces secteurs combinent donc des portions libres et des portions influencées, de longueurs variables. L'intégration de sondes supplémentaires (notées « avé » pour aval éloigné) au plan de pose 2021 a permis de mieux comprendre leur fonctionnement thermique et de déterminer s'ils devaient être exclus de l'analyse, ou pris en compte en tant que portions libres ou influencées.



Plan de pose 2021 au droit des aménagements hydroélectriques d'Aubeterre, d'Entremiolles et de Champagne

Les températures mesurées au droit de ces secteurs montrent que leur fonctionnement thermique est comparable à celui de secteurs libres et qu'ils peuvent donc être considérés comme tels dans la suite de ce rapport. Ce constat n'est pas surprenant si on considère 1/ la faible représentativité des portions influencées en leur sein (10% du linéaire à Aubeterre et à Entremiolles, 15% aux Grottes et 20% à Champagne), et 2/ la faiblesse des débits transitant en période estivale dans les portions influencées de ces microcentrales, l'essentiel du débit constituant le débit réservé transitant dans les tronçons court-circuités (libres) de la Sioule.

On notera que les dispositions prises à l'issue de la première période d'analyse (2021) pour sécuriser les données et fiabiliser les résultats ont permis de récupérer les données de 49 des 50 sondes équipant la Sioule au début de l'été 2022. La sonde située à l'amont proche du seuil de la microcentrale de Moulin Infernal a été arrachée lors de travaux de terrassement réalisés durant l'été dans ce secteur. Exceptionnellement, seules les données enregistrées par la sonde située à l'aval immédiat de ce seuil caractérisent la thermie de la Sioule dans ce secteur.

L'intégralité du linéaire bourbonnais de la Sioule participe donc à l'évaluation, en 2022, de l'impact des seuils sur le réchauffement des eaux.

2.4 SYNTHÈSE DU PLAN DE POSE 2022

Le tableau suivant recense les 41 sondes finalement retenues pour qualifier l'évolution thermique des portions libres et influencées de la Sioule en 2022.

Tableau 1 : Synthèse du plan de pose 2022

Seuil concerné (et numéro)	Référence sonde	PK réel (km)	PK simplifié	Distance (km)	
				Libre	Influencée
Plan d'eau d'Ebreuil (1)	1_omé	0,00	0,00	0,75	0,75
	1_amp	0,70			
Plan d'eau (1) et pont d'Ebreuil (2)	1_avp_2_omé	0,80			
Pont d'Ebreuil (2)	2_amp	1,30	1,33	0,58	
	2_avp	1,35			
Moulin des Valignards (3)	3_omé	2,60	2,60	1,27	
	3_amp	3,10			
	3_avp	3,20			
Lieu-dit Jacques Martin (4-5)	4&5_omé	6,30	6,30	3,15	3,15
	4&5_avp_6&7_omé	7,10			
Microcentrale de Neuvial (6-7)	6&7_amp	8,85	9,03	1,93	
Microcentrale de Neuvial (6-7) et lieu-dit Tressots (8)	6&7_avp_8_omé	9,20			
Lieu-dit Tressots (8)	8_amp	9,95	10,00	0,97	
	8_avp	10,05			
Microcentrale de Jenzat (11)	11_omé	14,60	14,60	4,60	
	11_amp	15,60			
	11_avp	15,85			
Microcentrale de Moulin Infernal (12)	12_omé	17,05	17,05	1,32	
	12_avp	17,80			
Microcentrale d'Aubeterre (13)	13_omé	22,15	22,15	4,35	
	13_amp	22,95			
	13_avp	23,10			
Microcentrale des Grottes (14)	14_omé	28,21	28,21	5,18	
	14_amp	28,70			
	14_avp	28,90			
Microcentrale d'Entremiolles (16)	16_omé	30,90	30,90	2,10	
	16_amp	31,42			
	16_avp	31,46			
Microcentrale de Champagne (17)	17_omé	34,30	34,3	2,86	
	17_amp	35,45			
	17_avp	35,33			
Microcentrale de la Carmone (18)	18_omé	38,70	38,7	3,31	
	18_amp	39,55			
	18_avp	39,60			
Microcentrale du Moulin de la ville (19)	19_omé	40,50	40,5	0,92	
	19_amp	41,05			
	19_avp	41,35			
Microcentrale de Moulin Breland (20)	20_omé	44,90	44,9	3,70	
	20_amp	46,10			
	20_avp	46,30			
Amont confluence Allier		50,30	50,30	4,10	

NB : Les informations détaillées relatives au positionnement et aux caractéristiques de vitesse de courant, de profondeur d'immersion, d'ombrage et de tendance à l'envasement/ensablement de ces sondes sont fournies en annexe.

Finalement c'est donc le fonctionnement thermique de 12,9 km de portions de la Sioule influencées par des seuils et de 37,4 km de portions libres qui a pu être mesuré en 2022.

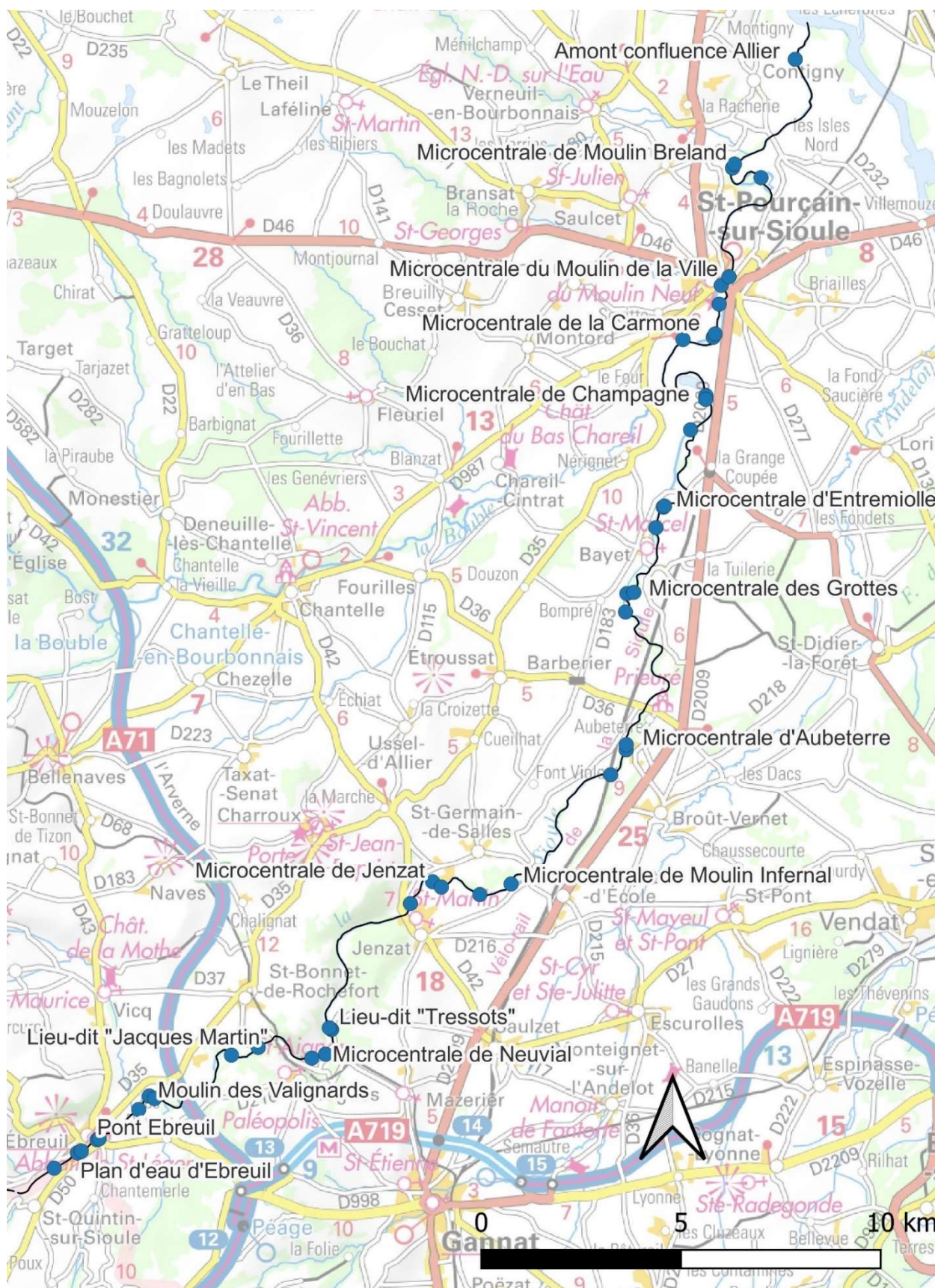


Figure 4 : Positionnement final des 41 sondes thermiques utilisées pour l'analyse 2022

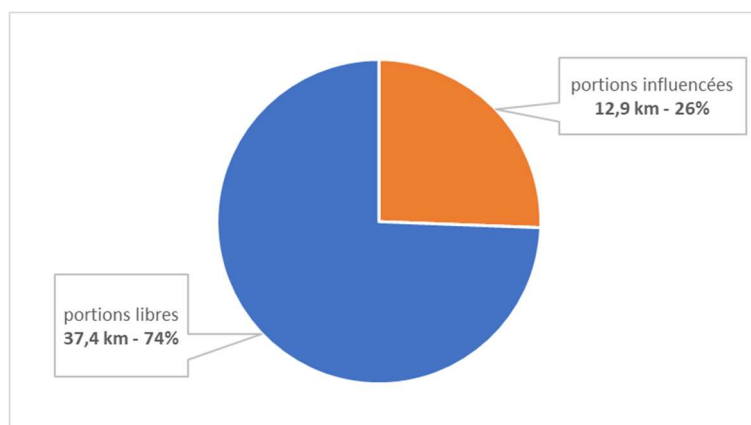


Figure 5 : Représentativité des portions libres et influencées de la Sioule dans sa traversée du département

2.5 CHOIX DES DONNEES TRAITÉES

Les quatre variables thermiques caractéristiques pressenties au départ de l'étude pour faire l'objet des analyses étaient :

- La température instantanée maximale ($T_i \text{ max}$)
- La température moyenne journalière maximale ($T_{mj} \text{ max}$)
- La température moyenne des 30 jours les plus chauds ($T_{m30j} \text{ max}$)
- La température moyenne de la période (T_{mp})

L'analyse des données 2021 (cf. rapport dédié) a montré que les caractéristiques thermiques traduisant des valeurs de long terme ($T_{m30j} \text{ max}$, T_{mp}) présentaient les évolutions les plus linéaires et exploitables. Dans le but d'évaluer l'effet des seuils sur le réchauffement des eaux de la Sioule, c'est sur ces variables que l'analyse doit se baser d'autant plus qu'elles sont généralement considérées par la communauté scientifique comme structurantes pour les populations de truite fario. La $T_{m30j} \text{ max}$ constitue notamment une variable thermique de référence et de nombreux auteurs (Elliot, 1995 ; Elliot et Hurley, 1998 ; Baran et al., 1999 ; Baran et Delacoste, 2005) estiment qu'au-delà d'une $T_{m30j} \text{ max}$ de 17,5-18°C, les impacts sur les populations sont avérés, en particulier sur les truitelles de l'année. Au-delà de ce seuil de température, le rendement énergétique de l'espèce devient défavorable si bien que l'énergie apportée par l'alimentation est plus faible que celle dépensée pour capturer les proies. Ce phénomène engendre donc un amaigrissement des individus, des mortalités progressives et continues, ainsi que des dévalaisons possibles vers des milieux encore moins favorables.

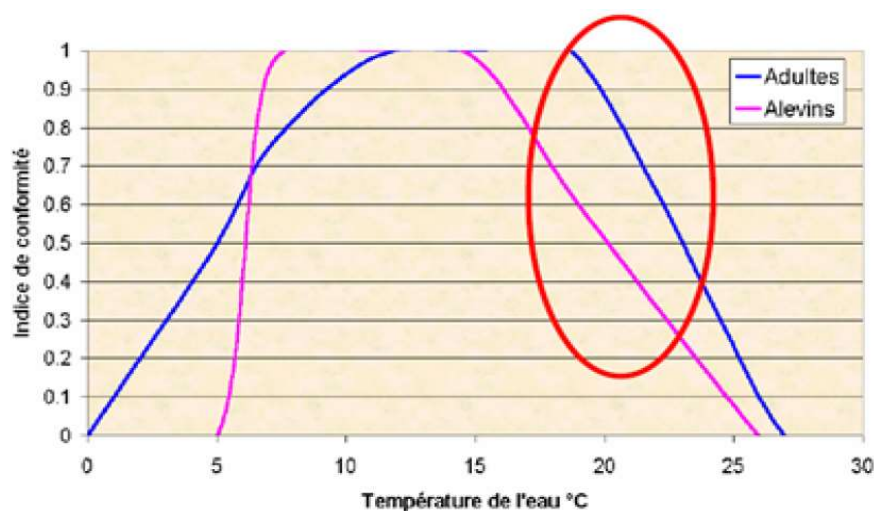


Figure 6 : Impact de l'augmentation des $T_{m30j} \text{ max}$ sur les densités de population des alevins et adultes de truites fario (source : FDPMA 69)

3 RESULTATS 2022

L'influence des seuils sur le réchauffement des eaux de la Sioule a été analysée au cours de trois situations distinctes :

- **En période « chaude »**, de juin à septembre 2022 (débit moyen = 5,4 m³/s à Ebreuil) ;
- **En période « chaude » mais hors débit d'étiage**. Cette situation peu fréquente a été rencontrée du 26 juin au 4 juillet 2022 (débit moyen = 25,6 m³/s à Ebreuil) ;
- **En période « froide »**, du 15 novembre 2021 au 15 mars 2022 (débit moyen = 25,9 m³/s à Ebreuil).

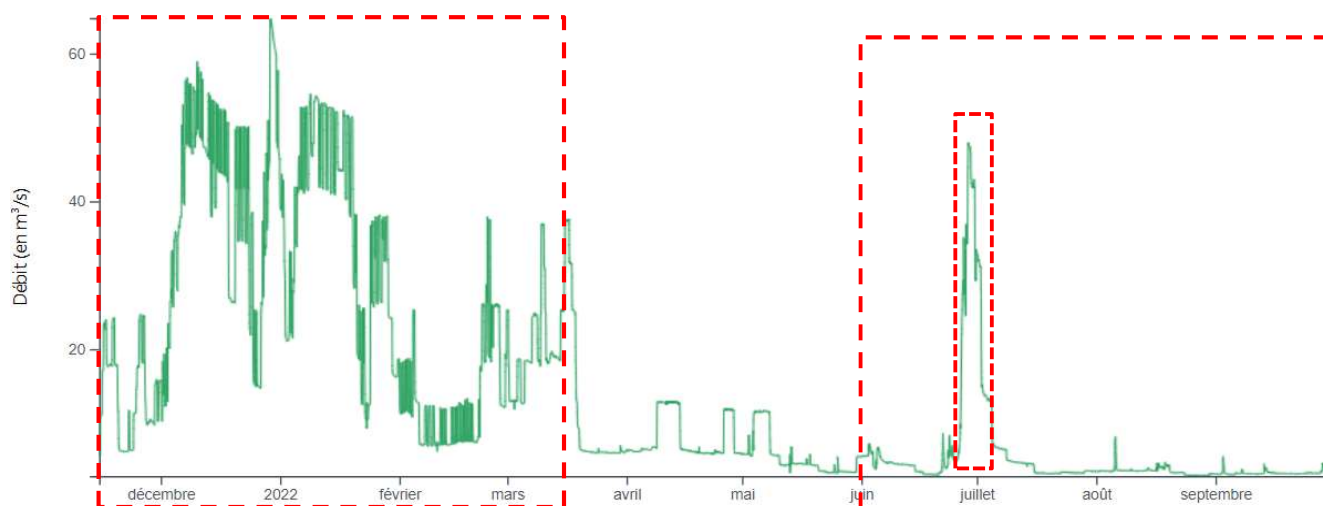


Figure 7 : Débits de la Sioule à Ebreuil durant les trois périodes analysées en 2022

Les périodes analysées permettent donc de qualifier la thermie de la Sioule et l'impact des seuils sur le réchauffement des eaux durant l'été 2022 qui, au contraire de l'été 2021, a été exceptionnellement chaud et sec. Ainsi une chaleur durable s'est installée sur la France durant tout l'été, ponctuée par trois vagues de chaleur du 15 au 19 juin, du 12 au 25 juillet puis du 31 juillet au 13 août, remarquables notamment par leur intensité et par leur durée. Le mois de juillet a été exceptionnellement sec et ensoleillé. Les températures sont restées supérieures aux normales la quasi-totalité de l'été. Elles ont été en moyenne 1 à 3 °C au-dessus des valeurs saisonnières sur la majeure partie du pays. Elles ont été remarquablement chaudes lors des vagues de chaleur, notamment le 18 juin où la température maximale moyenne sur la France a atteint 36,2 °C, record pour un mois de juin, puis le 18 juillet où elle a atteint 37,6 °C, record absolu tous mois confondus.

À l'échelle de la France et de la saison, la température moyenne de 22,7 °C a été supérieure à la normale de 2,3 °C, plaçant l'été 2022 au deuxième rang des étés les plus chauds sur la période 1900-2022 derrière l'été 2003 (+2,7 °C) et devant l'été 2018 (+1,5 °C).

3.1 EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE CHAUDE

Les graphiques suivants caractérisent l'augmentation amont → aval de la Tmp et de la Tm30j max mesurée entre juin et septembre 2022 :

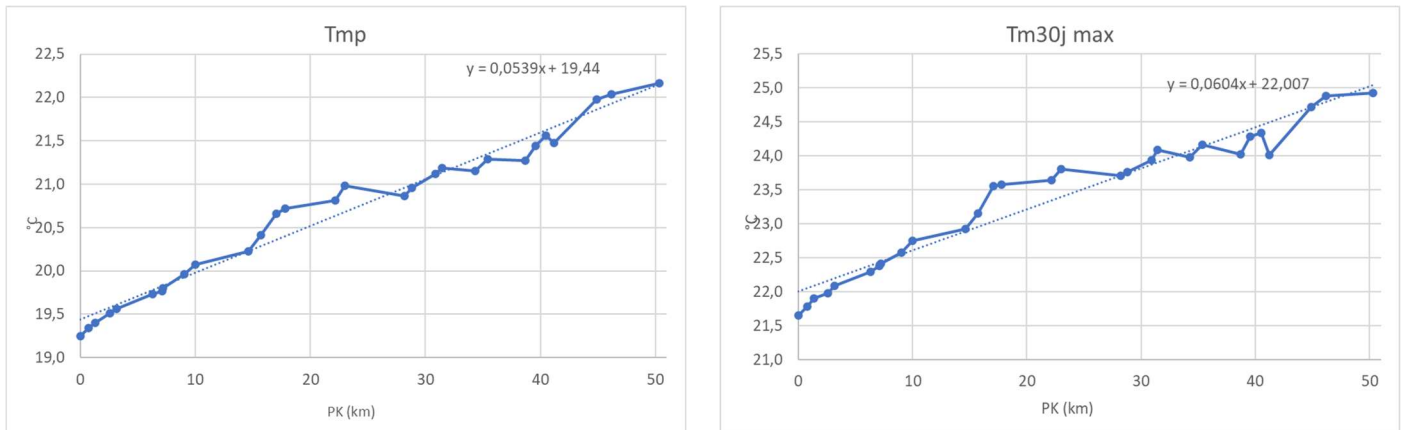


Figure 8 : Evolution amont → aval des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude

Sans distinguer les portions influencées des portions libres, les températures estivales entre l'amont (plan d'eau d'Ebreuil) et l'aval (confluence avec l'Allier) augmentent de :

- 2,9°C concernant la Tmp, soit environ 0,5 degré pour 10 km
- 3,3°C concernant la Tm30j max, soit environ 0,6 degré pour 10 km

Ces valeurs sont respectivement 15% et 25% supérieures à celles relevées durant l'été 2021 qui avait été nettement moins chaud et sec que l'été 2022.

Les graphiques suivants présentent les contributions respectives des portions libres (en bleu) et des portions influencées (en orange) au réchauffement amont → aval des Tm30j max et Tmp mesurées entre juin et septembre 2022 :

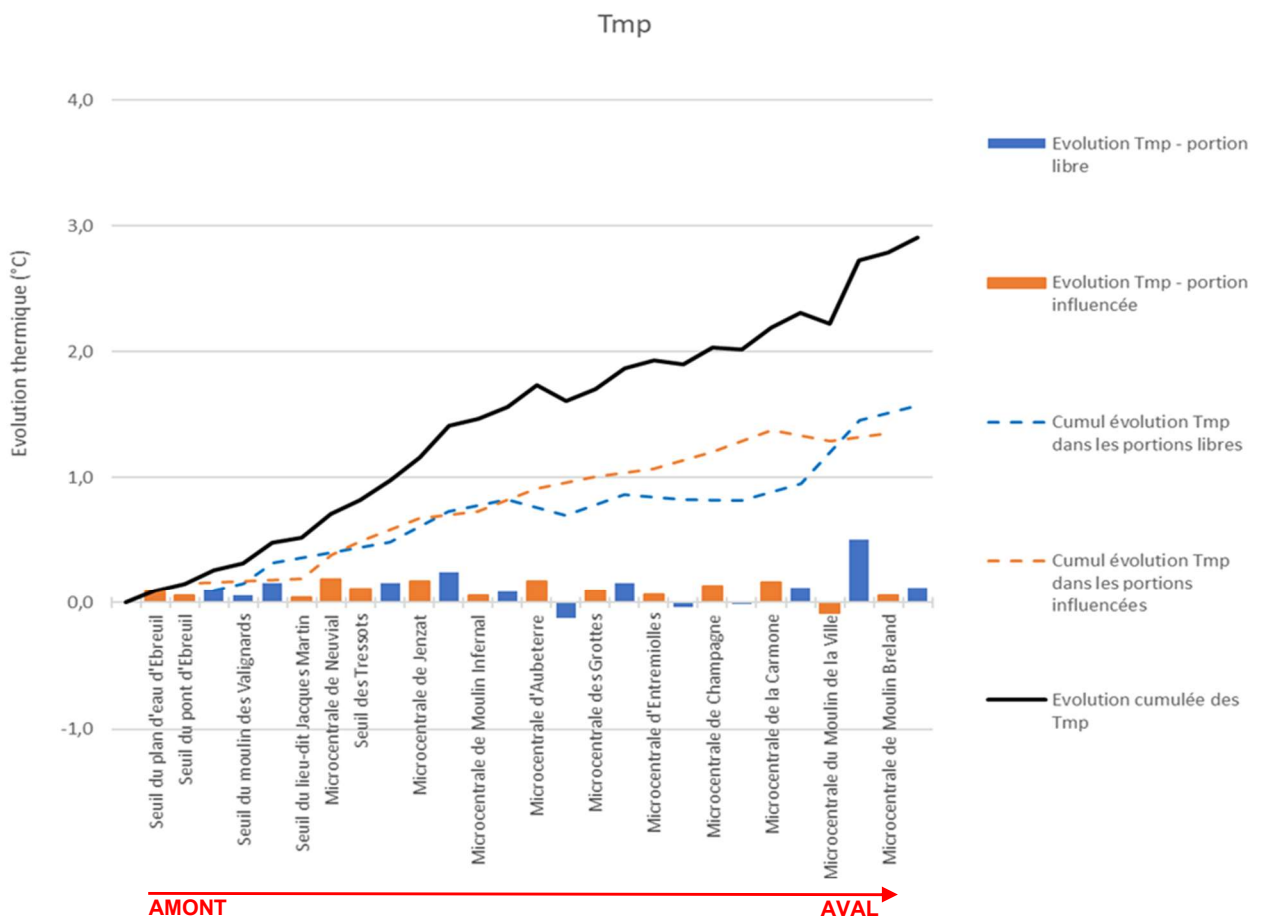


Figure 9 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la Tmp de la Sioule en période chaude

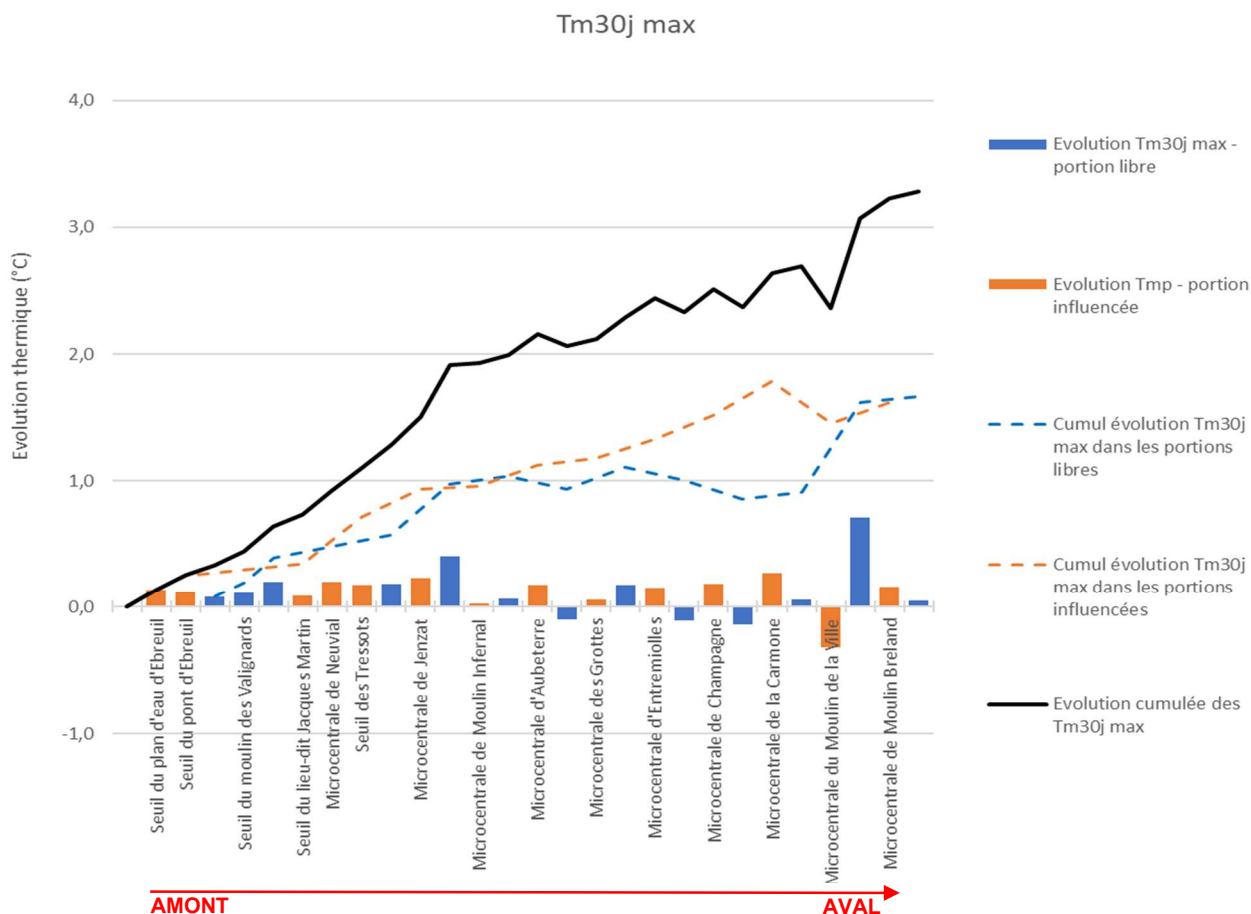


Figure 10 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la Tm30j max de la Sioule en période chaude

Ces deux graphiques indiquent une répartition globalement égale des contributions des portions libres et influencées au réchauffement des eaux de la Sioule. Cette répartition était moins équilibrée durant la période chaude analysée en 2021, au cours de laquelle les portions influencées contribuaient à hauteur de 62% au réchauffement des eaux de la Sioule. Cette différence s'explique probablement par le fait que les adaptations du plan de pose 2022 présentées précédemment permettent d'inclure la totalité des portions libres de la Sioule (37,4 km) dans l'analyse 2022 alors que seulement 30,2 km de portions libres participaient à l'analyse 2021.

Les graphiques suivants constituent une autre manière d'illustrer les contributions comparables des portions libres et influencées de la Sioule au réchauffement des eaux :

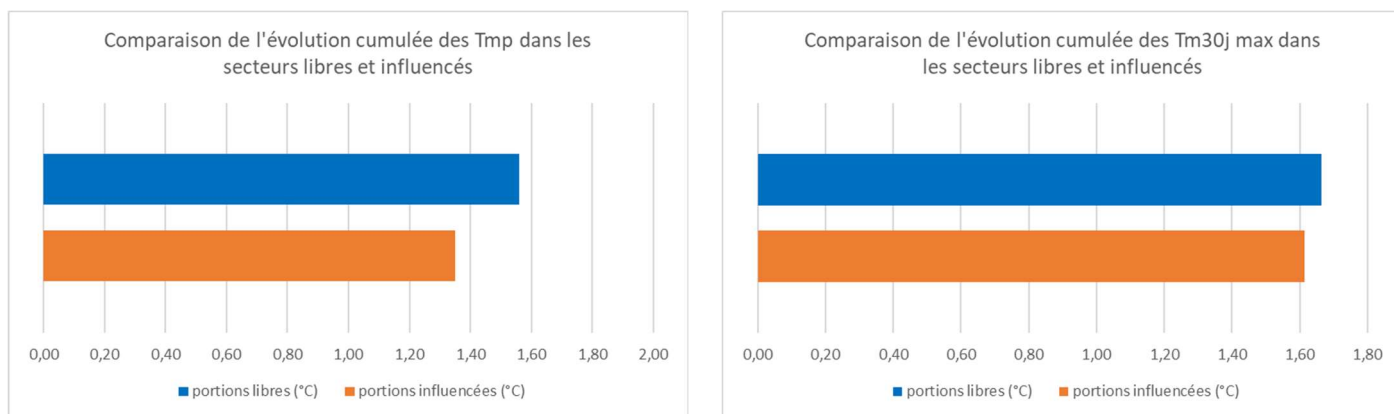


Figure 11 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions cumulées des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude

Ces résultats pourraient indiquer l'absence d'impact des seuils sur le réchauffement des eaux mais ils ne tiennent pas compte des longueurs respectives des portions libres et influencées utilisées pour l'analyse. Or l'importance du réchauffement d'une portion de cours d'eau, qu'elle soit libre ou influencée, est bien évidemment étroitement liée à sa longueur. Dans le cas qui nous intéresse ici, les portions influencées utilisées pour l'analyse représentent 12,9 kilomètres alors que les portions libres représentent 37,4 kilomètres. Ainsi, pour analyser uniquement l'influence du caractère libre ou influencé des écoulements sur le réchauffement des eaux, il convient de s'affranchir de l'influence de la longueur des différents types de portions en les comparant à longueur égale, arbitrairement fixée à 10 km dans les graphiques suivants :

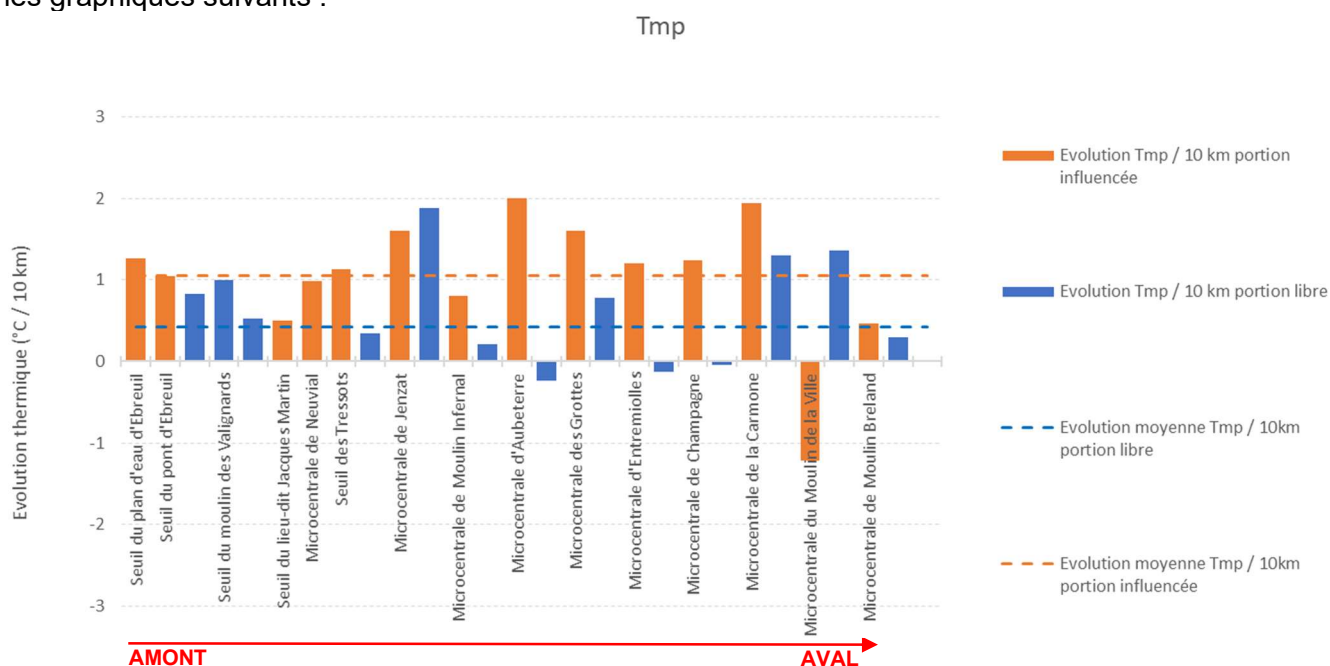


Figure 12 : Evolution amont → aval de la Tm au sein de chacune des portions de la Sioule en période chaude

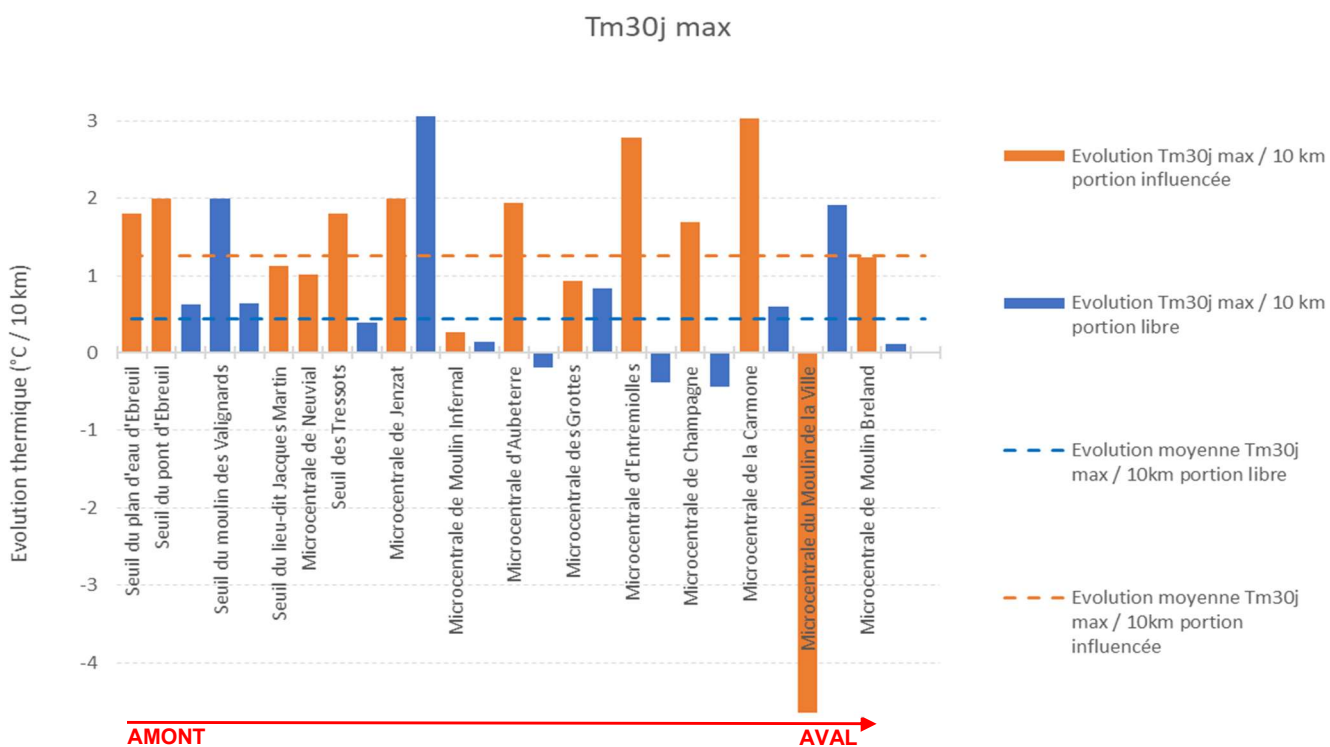


Figure 13 : Evolution amont → aval de la Tm30j max au sein de chacune des portions de la Sioule en période chaude

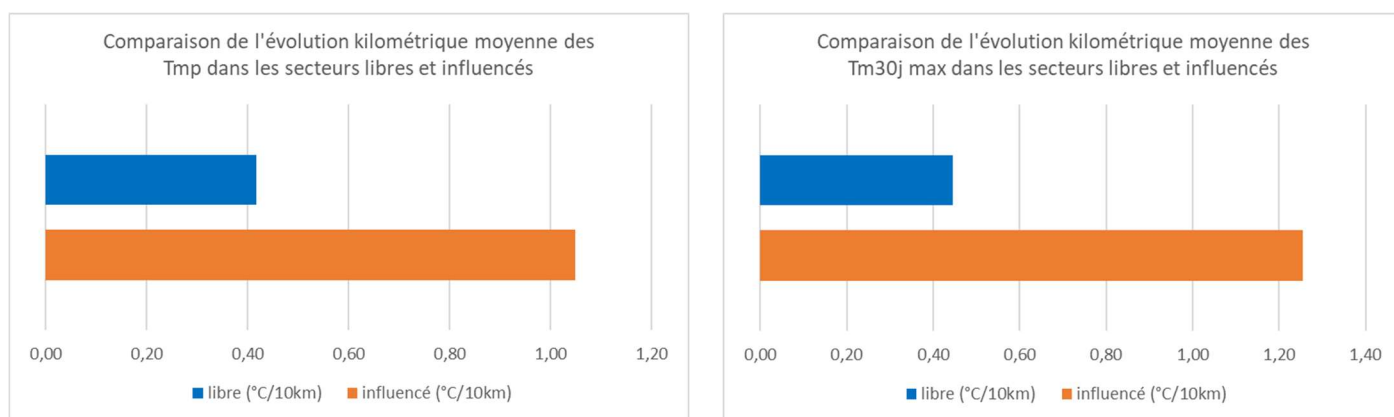


Figure 14 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes des températures caractéristiques de la Sioule en période chaude

Ces graphiques montrent qu'à longueurs égales, les portions de la Sioule influencées par des seuils se réchauffent 2,5 à 3 fois plus que les portions libres.

3.2 EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE CHAUDE, HORS ETIAGE

Durant l'été 2022 seule la période s'étalant du 26 juin au 4 juillet a été caractérisée par des débits supérieurs aux valeurs caractéristiques de débit d'étiage (cf. Figure 7). Durant cette période le débit moyen de la Sioule à Ebreuil atteint 25,6 m³/s, alors que sur la période juin-septembre il vaut 5,4 m³/s.

Etudier l'évolution amont → aval de la température moyenne de la Sioule durant ces neuf jours permet donc de mesurer l'impact du débit sur le réchauffement estival des eaux. Seule l'évolution de la Tmp est analysée car par définition la Tm30j max n'est pas calculable sur une période inférieure à 30 jours.

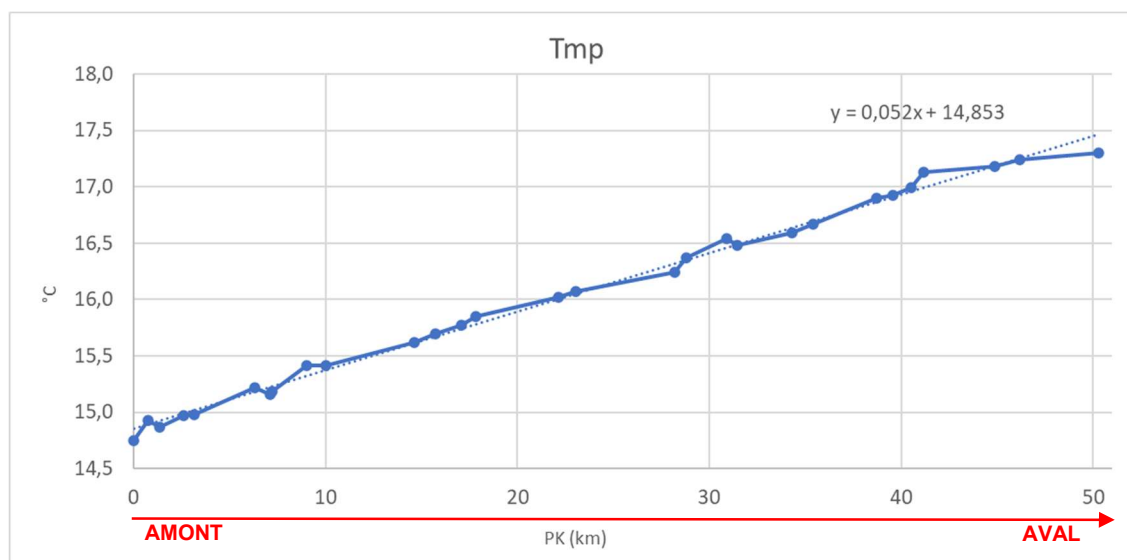


Figure 15 : Evolution amont → aval de la Tmp de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales

Sans distinguer les portions influencées des portions libres, l'augmentation de la Tmp vaut environ 0,52 degré pour 10 km, soit une valeur comparable à celle mesurée de juin à septembre 2022 (0,54 °C/10 km). On notera en revanche une température moyenne nettement plus fraîche et conforme aux exigences des salmonidés puisqu'elle est 2,5 °C à 3 °C inférieure à celle mesurée durant toute la période chaude. Les apports plus importants d'eau fraîche provenant du barrage de Queuille et les températures de l'air globalement moins importantes durant cette période expliquent cette différence majeure de température moyenne.

Les graphiques suivants présentent la contribution respective des portions libres et influencées de la Sioule au réchauffement global des eaux durant cette période :

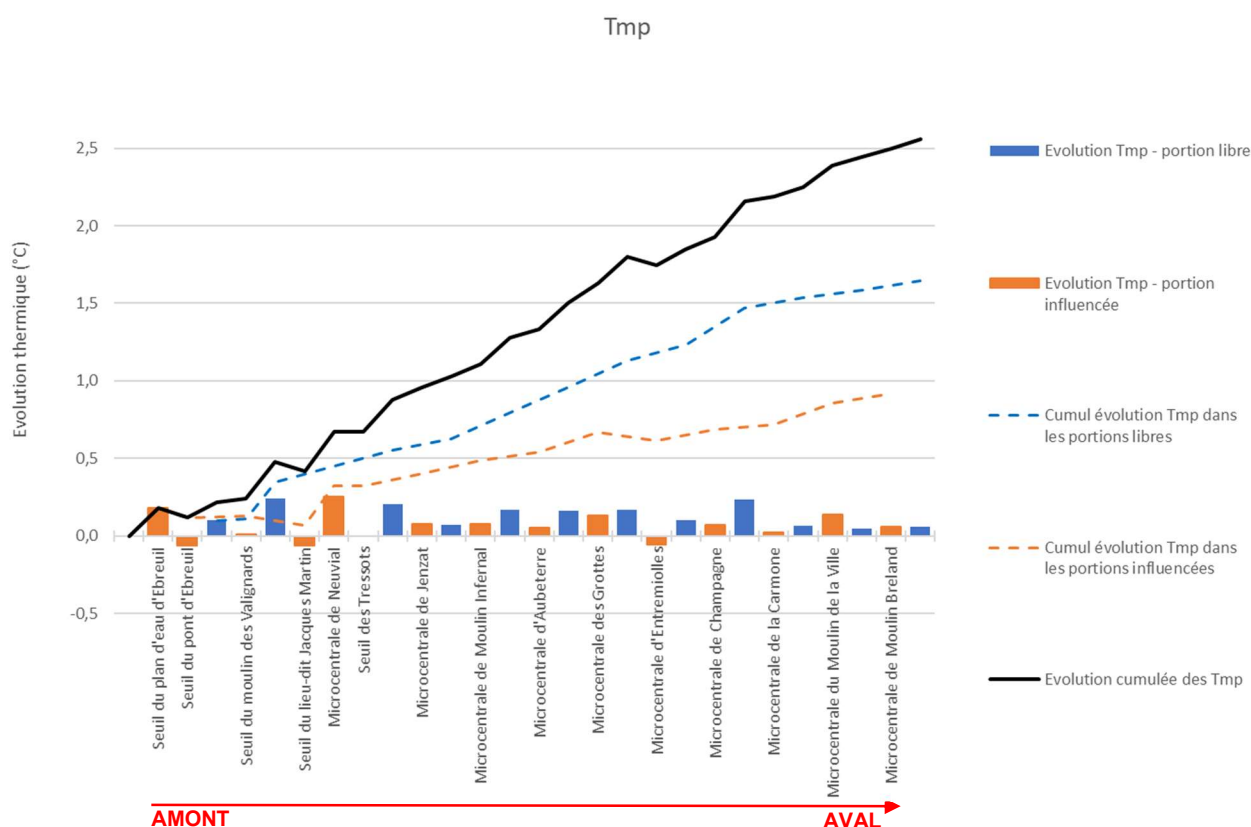


Figure 16 : Contributions des portions libres et influencées à l'évolution globale de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales

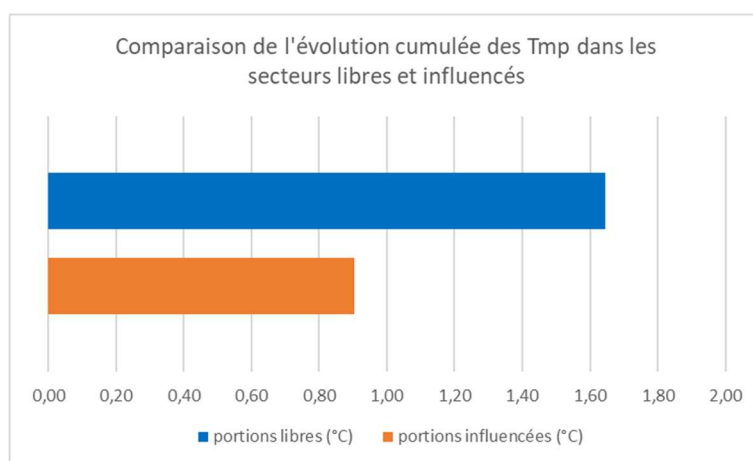


Figure 17 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions cumulées de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales

Ces deux graphiques montrent que durant la période estivale de « hautes eaux », les portions influencées, qui représentent 26% du linéaire étudié, ont contribué à hauteur de 36% au réchauffement de la Sioule. **Comme le montrent les figures suivantes, le réchauffement de la Sioule durant cette période est environ 60% plus important dans les portions de la Sioule influencées par des seuils que dans les portions libres.**

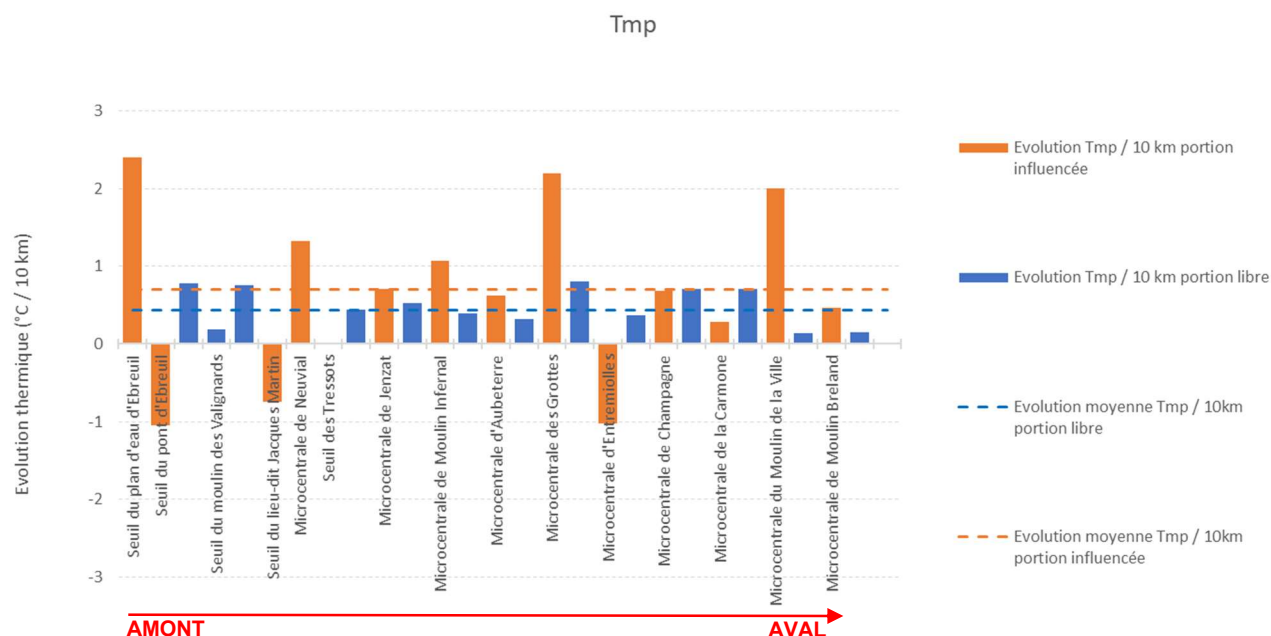


Figure 18 : Evolution amont → aval de la Tmp au sein de chacune des portions de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales

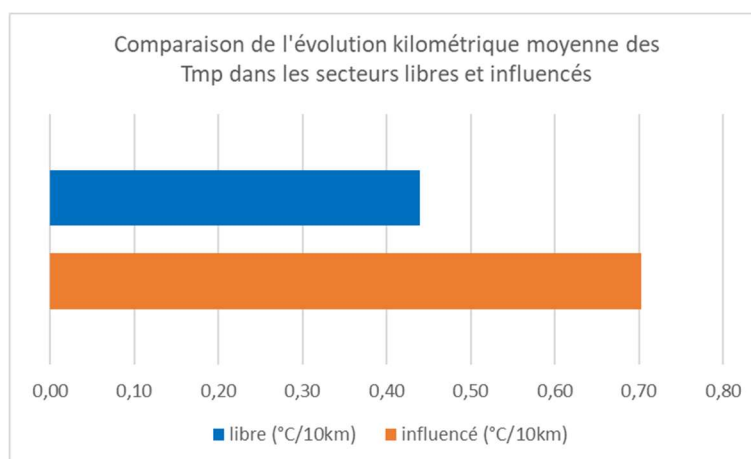


Figure 19 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes de la température moyenne de la Sioule en période de « hautes eaux » estivales

Si l'impact négatif des seuils sur le réchauffement des eaux est toujours nettement mis en évidence par ces résultats, il est également nettement moins important que sur l'ensemble de la période estivale (cf. Figure 14). **Sur la base des données relevées durant cette courte période de « hautes eaux » estivales, il apparaît donc que l'augmentation du débit réduit l'impact négatif des seuils sur la thermie de la Sioule.**

3.3 EVALUATION DE L'IMPACT THERMIQUE DES SEUILS EN PERIODE FROIDE

Le graphique suivant présente l'augmentation amont → aval de la Tmp mesurée entre le 15 novembre 2021 et le 15 mars 2022 :



Figure 20 : Evolution amont → aval de la température moyenne de la Sioule en période froide

Sans distinguer les portions influencées des portions libres, l'augmentation de la température moyenne de la Sioule vaut environ 0,05 °C pour 10 kilomètres, soit une valeur dix fois inférieure à celles relevées en période estivale. Les températures de l'air basses, les débits plus importants et l'ensoleillement moindre en période hivernale limitent fortement l'augmentation de la température des eaux de la Sioule.

Il n'en demeure pas moins intéressant de constater qu'y compris dans ces conditions, les portions de la Sioule influencées par des seuils se réchauffent proportionnellement nettement plus que les portions libres qui, durant la période considérée, ont plutôt eu tendance à abaisser la température de l'eau :

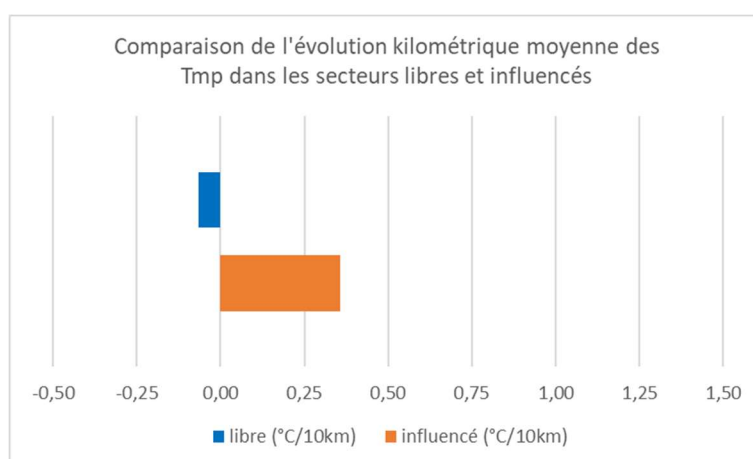


Figure 21 : Comparaison en fonction du type de portion considéré des évolutions kilométriques moyennes de la T_{mp} de la Sioule en période froide

4 SIMULATIONS ET PERSPECTIVES

Le graphique suivant compare l'évolution amont → aval de la Tm30j max durant l'été 2022 et l'évolution de la Tm30j max durant cette même période dans l'hypothèse où la Sioule serait totalement libre, exempte de seuil :

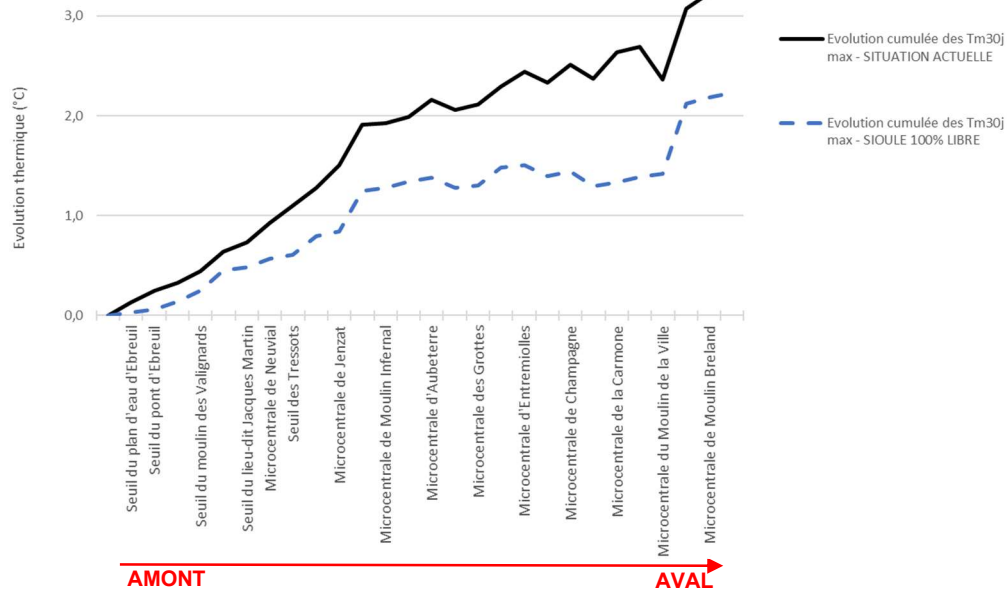


Figure 22 : Evolution hypothétique de la Tm30j max de la Sioule durant l'été 2022 en l'absence de seuil

En conditions réelles le secteur de la microcentrale hydroélectrique de Jenzat est un secteur « charnière » de la Sioule puisqu'il est situé à proximité immédiate de sa limite 1^{ère}/2^{ème} catégorie piscicole, et que c'est dans ce secteur que des truites natives sont encore assez régulièrement capturées par les pêcheurs où lors des inventaires piscicoles réalisés par la FDPPMA 03. Enfin c'est également le secteur à partir duquel les chances de survie des saumons atlantiques durant leur arrêt de migration estival s'améliorent significativement (comm. pers. Logrami).

Ainsi en reportant sur la courbe fictive « Sioule 100% libre » les conditions thermiques mesurées durant l'été 2022 à Jenzat, on s'aperçoit que dans l'hypothèse d'une Sioule exempte de seuil, ces conditions ne seraient rencontrées qu'au niveau de Saint-Pourçain-sur-Sioule, soit environ 25 km à l'aval (!).

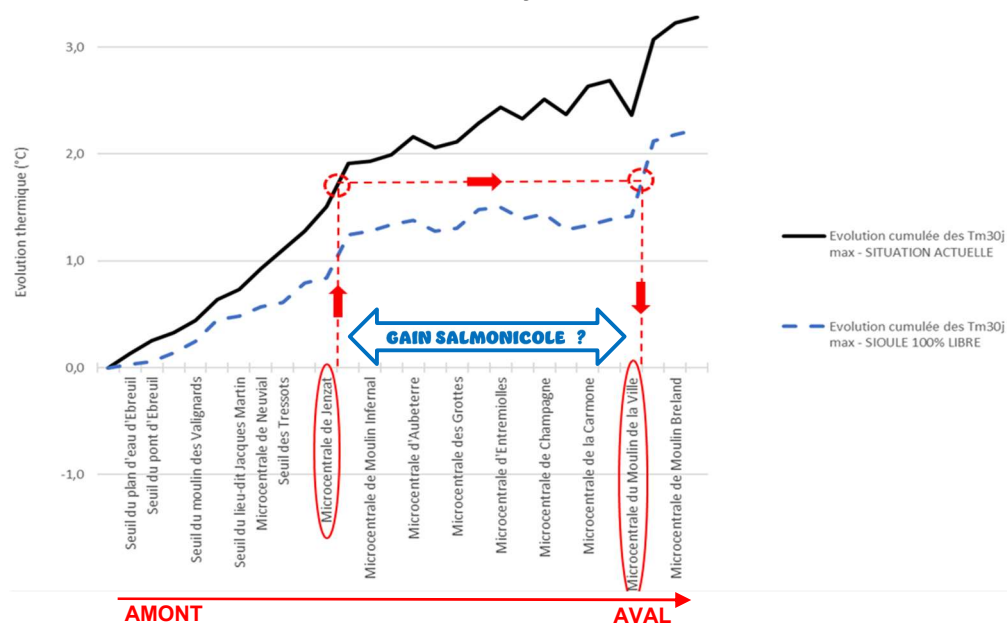


Figure 23 : Simulation de l'impact thermique des seuils sur la population de truite fario de la Sioule

Le graphique suivant présente l'évolution amont → aval théorique de la Tm30j max durant l'été 2022 dans la situation (très) hypothétique où l'intégralité du linéaire bourbonnais de la Sioule serait constitué de portions influencées par des seuils :

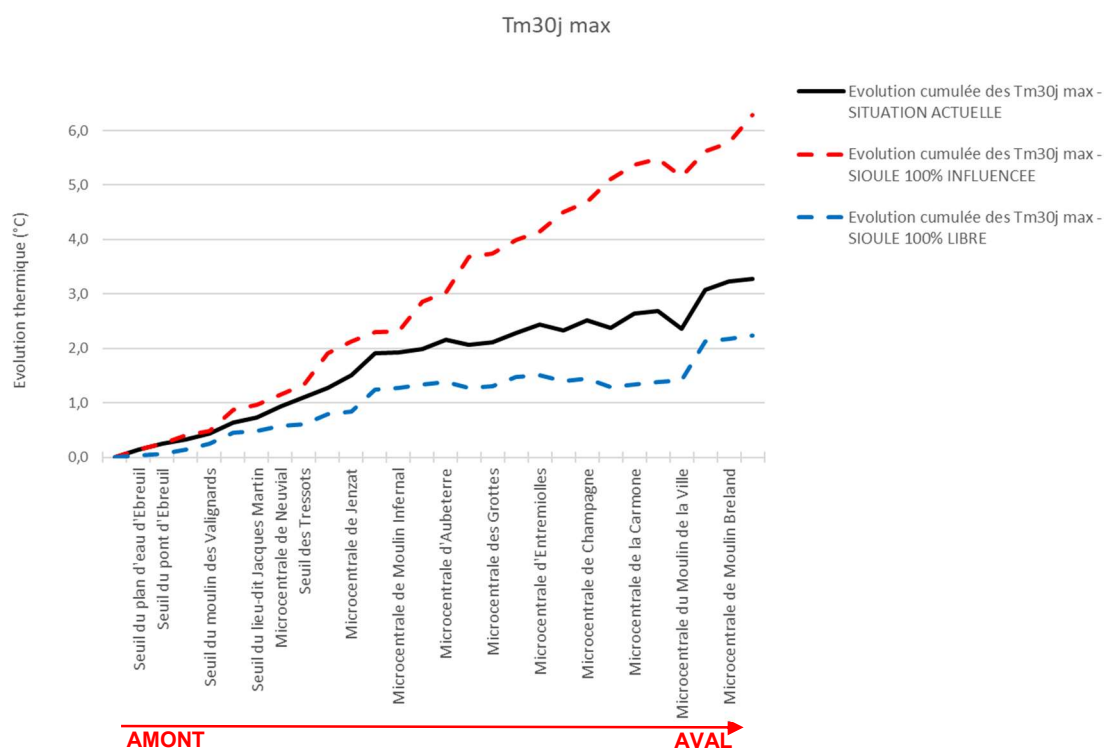


Figure 24 : Evolution hypothétique de la Tm30j max de la Sioule durant l'été 2022 en l'absence de portions libres

La simulation « Sioule 100% influencée » demeure particulièrement théorique puisque 1/ elle est très éloignée de la situation réelle où les portions influencées ne représentent qu'un quart du linéaire de la Sioule, et 2/ elle considère l'accroissement de la Tm30j comme potentiellement infini car uniquement dépendant de la longueur influencée, alors qu'en réalité la Tm30j max serait progressivement « plafonnée » par les valeurs de températures de l'air.

5 BILAN

Elément central du fonctionnement des milieux aquatiques, la température de l'eau influence directement la quantité d'oxygène soluble dans l'eau et régit notamment la distribution, l'activité et le cycle biologique des poissons qui présentent, en tant qu'animaux à sang froid, une sensibilité importante vis-à-vis de ce paramètre. C'est en particulier le cas des espèces sténothermes d'eaux froides telles que la truite fario, l'ombre commun, le saumon atlantique et le chabot, qui sont présentes au sein du linéaire de la Sioule dans sa traversée du département de l'Allier.

Outre son peuplement piscicole patrimonial, particulièrement attractif d'un point de vue halieutique et qui, depuis les secteurs salmonicoles de Chouvigny, évolue progressivement vers un peuplement intermédiaire dominé par les cyprinidés rhéophiles, la Sioule combine une densité importante de seuils et une multiplication récente de projets et de demandes de renouvellement d'autorisation de production d'énergie hydroélectrique qui tendent à pérenniser à long terme l'existence de ces seuils.

Réalisée à la suite d'un épisode massif de mortalité de saumons atlantique (2020) et dans un contexte de réchauffement climatique et de remise en cause systématique de la notion de continuité écologique, cette étude couvre deux périodes estivales consécutives (2021 et 2022). Elle quantifie l'impact des seuils sur le réchauffement des eaux de la Sioule dans sa traversée du département de l'Allier.

L'analyse des données thermiques issues de la première période d'acquisition (été 2021) a dégagé une tendance indiquant un réchauffement environ trois fois plus important des portions influencées par rapport aux portions libres. Elle a surtout permis d'affiner le plan de pose des enregistreurs thermiques dans le but de fiabiliser les données collectées et de maximiser le linéaire de la Sioule pris en compte pour la seconde période d'analyse (été 2022).

Ainsi, parmi le parc de 50 sondes thermiques initialement déployé en 2021, les données provenant de 41 d'entre elles ont été utilisées pour caractériser la thermie 2022 de l'intégralité du linéaire bourbonnais de la Sioule, soit 37,4 km de portions libres et 12,9 km de portions influencées par la présence de seuils.

Trois situations de débit et de température de l'air différentes ont été analysées et les résultats montrent clairement l'impact très négatif des seuils sur la température des eaux puisque :

- **En période « chaude »** (juin à septembre 2022, débit moyen = 5,4 m³/s à Ebreuil), les données acquises indiquent qu'à longueurs égales, **les portions de la Sioule influencées par des seuils se sont réchauffées 2,5 à 3 fois plus que les portions libres (!)** ;
- **En période « chaude » hors débit d'étiage** (26 juin au 4 juillet 2022, débit moyen = 25,6 m³/s à Ebreuil), les données acquises indiquent qu'à longueurs égales, **le réchauffement des portions de la Sioule influencées par des seuils est environ 60% plus important que celui des portions libres** ;
- **En période « froide »** (15 novembre au 15 mars 2022, débit moyen = 25,9 m³/s à Ebreuil), les données acquises indiquent **un réchauffement environ 10 fois moins important qu'en période chaude**, mais toujours nettement plus important dans les portions de la Sioule influencées par des seuils que dans ses portions libres.

Enfin une analyse prospective a également mis en évidence que dans l'hypothèse d'une Sioule exempte de seuil, les caractéristiques thermiques réellement mesurées durant l'été 2022 dans le secteur de Jenzat (limite 1^{ère}/2^{ème} catégorie piscicole) auraient été rencontrées environ 25 km plus à l'aval, au niveau de Saint-Pourçain-sur-Sioule. Dès lors, le gain potentiel concernant les populations de salmonidés et, d'une manière générale, l'ensemble de l'écosystème, semble considérable. Sans ouvrages et donc sans retenues, le secteur salmonicole serait largement étendu en termes de linéaire et notamment de zones de frayères potentiellement favorables pour l'espèce saumon atlantique.

En mesurant l'évolution des températures dans les portions libres et influencées de la Sioule, cette étude a permis de quantifier l'impact des seuils sur le réchauffement d'une rivière emblématique du département, et qui présente un peuplement patrimonial particulièrement sensible à l'élévation des températures de l'eau. Elle permet de rappeler la nécessité **1/ de favoriser la suppression des seuils** en encourageant l'abandon des droits d'eau et la reconnaissance d'état de ruine de certains ouvrages, **2/ d'éviter la création de nouveaux aménagements et la pérennisation des seuils actuels par un équipement hydroélectrique systématique**, et **3/ de poursuivre la mise en conformité des dispositifs de franchissements piscicoles** en dénonçant l'idée qu'elle soit conditionnée à la création de nouvelles microcentrales hydroélectriques.

L'étude illustre également une nouvelle fois la corrélation positive entre le débit et le maintien de températures conformes aux exigences minimales des salmonidés, rappelant l'importance d'agir pour une meilleure prise en compte des débits biologiques dans les règlements d'eau associés au fonctionnement du complexe hydroélectrique Fades/Queuille, dans les documents de planification de la gestion durable des ressources en eaux et des milieux aquatiques (SAGE Sioule, futur PTGE) et dans les outils d'analyse qui les accompagnent (étude HMUC).

ANNEXE

REFERENCE SONDE	PK (km)	X (L93)	Y (L93)	COURANT (coefficient*)	PROFONDEUR D'IMMERSION A L'ETIAGE (m)	OMBRAGE (coefficient*)	VASE/SABLE (O/N)
1_amé	0,00	705886	6556486	0,66	0,3	0,66	N
1_amp	0,70	706469	6556865	0,33	1	0,33	O
1_avp_2_amé	0,80	706567	6556913	1	0,3	0,66	N
2_amp	1,30	706957	6557195	0,33	0,7	0,66	N
2_avp	1,35	707013	6557221	0,66	0,6	1	N
3_amé	2,60	707999	6557949	0,33	0,6	0,33	N
3_amp	3,10	708266	6558287	0,33	0,6	1	N
3_avp	3,20	708395	6558223	1	0,6	0,66	N
4&5_amé	6,30	710319	6559308	0,33	1	0,66	N
4&5_avp_6&7_amé	7,10	711107	6559581	0,33	0,3	0,33	N
6&7_amp	8,85	712332	6559234	0,33	1	1	N
6&7_avp_8_amé	9,20	712673	6559332	0,33	0,5	1	N
8_amp	9,95	712826	6559946	0,33	0,3	0,66	N
8_avp	10,05	712769	6559990	0,33	0,7	1	N
11_amé	14,60	714799	6563093	0,66	0,6	0,66	N
11_amp	15,60	715354	6563637	0,66	1	0,33	N
11_avp	15,85	715572	6563505	0,66	0,8	1	N
12_amé	17,05	716534	6563318	0,66	0,3	1	N
12_avp	17,80	717317	6563583	1	0,7	1	N
13_amé	22,15	719807	6566333	1	0,4	1	N
13_amp	22,95	720196	6566958	0,33	0,7	0,66	O
13_avp	23,10	720200	6567088	0,66	0,6	1	N
14_amé	28,21	720180	6570407	1	0,7	1	N
14_amp	28,70	720214	6570869	0,66	0,6	0,66	N
14_avp	28,90	720389	6570900	0,33	0,5	0,33	N
16_amé	30,90	720941	6572517	0,33	1	0,66	O
16_amp	31,42	721127	6573030	0,66	0,8	0,66	N
16_avp	31,46	721156	6573058	1	0,8	0,33	N
17_amé	34,30	721807	6574967	0,66	0,6	1	N
17_amp	35,45	722192	6575825	0,33	0,6	0,66	N
17_avp	35,33	722186	6575727	1	0,6	1	N
18_amé	38,70	721617	6577227	0,66	0,6	1	N
18_amp	39,55	722376	6577283	1	1	0,33	N
18_avp	39,60	722422	6577365	1	0,7	0,66	N
19_amé	40,50	722523	6578112	0,66	0,9	0,66	N
19_amp	41,05	722575	6578582	0,33	0,5	0,66	O
19_avp	41,35	722770	6578797	0,66	0,7	0,33	N
20_amé	44,90	723569	6581277	0,33	0,8	0,66	N
20_amp	46,10	722856	6581519	0,33	0,6	0,66	N
20_avp	46,30	722907	6581617	1	0,25	0,66	N
Amont confluence Allier	50,30	724427	6584240	0,66	0,3	0,66	N

* Un coefficient d'ombrage (ou de courant) égal à 0,33 signifie un ombrage (ou un courant) nul à faible, un coefficient égal à 0,66 signifie un ombrage (ou un courant) faible à moyen, et un coefficient égal à 1 signifie un ombrage (ou un courant) moyen à fort.