

ÉTUDE DES VARIATIONS DES PARAMETRES THERMIQUES ET CHIMIQUES DU FLEUVE AUDE.

Résultats et interprétations du suivi des températures et de conductivités.



Exondation d'habitats rivulaires et de bans de galets sur l'Aude à Sallèles d'Aude et à Axat.

Table des matières

Introduction :

1. Présentation de la méthodologie :

- 1.1 Découpage par unités homogènes
- 1.2 Matériel utilisé et protocole de mise en place

2. Analyse des résultats :

- 2.1 Enregistreur thermique de Le Clat (Tronçon court-circuité).
- 2.2 Enregistreur multi paramètres de Nentilla.
- 2.3 Enregistreur multi paramètres de Belviane.
- 2.4 Enregistreur thermique de Couiza.
- 2.5 Enregistreur thermique de Carcassonne (Maquens)
- 2.6 Enregistreur thermique de Blomac
- 2.7 Enregistreur thermique de Sallèles d'Aude (Moussoulens)

3. Bilan et synthèse des suivis thermique sur le bassin de l'Aude en 2020 :

- 3.1 Suivis thermiques sur le bassin de l'Aude en 2020
- 3.2 Suivis de conductivité sur le bassin de l'Aude en 2020

Bibliographie

Introduction :

Avec un bassin versant d'une surface de près de 5 500km², l'Aude est le fleuve côtier le plus important de la Région Occitanie. La variété des milieux traversés lui confère une importante richesse spécifique. Cependant, la multiplication et parfois la superposition des usages associés aux ressources du fleuve (hydroélectricité, irrigation, sports d'eaux vives) ont entraîné une artificialisation totale de son régime hydraulique.

Aujourd'hui, le régime hydraulique de l'Aude est caractérisé par un fonctionnement par éclusées générant d'importantes fluctuations des débits instantanées en lien avec des lâchers d'eau limités dans le temps qui se superposent au débit naturel.

Les études menées dans le cadre du SAGE de la Haute vallée de l'Aude mettent ainsi en évidence un impact hydrologique des restitutions de l'usine de Nentilla dont l'extension est perceptible jusqu'à la mer avec un très faible amortissement en période estivale.

Les impacts génériques d'un régime d'éclusées sur la faune aquatique sont bien connus et peuvent s'expliquer par les effets hydrauliques de variations rapides des débits sur la quantité et la qualité de l'habitat aquatique. Les principaux enjeux sont :

- L'exondation des frayères
- Le piégeage / échouage de la faune aquatique
- L'instabilité hydraulique et les phénomènes de dérives forcées
- La perturbation de l'équilibre écologique en lien avec les variations brutales des paramètres physico-chimiques de l'eau.

À la demande du préfet de l'Aude, le SMMAR a été désigné comme animateur du Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE) qui fait état d'un déficit global de 37 Mm³ sur le bassin versant du Fleuve Aude. Afin de tendre vers un équilibre quantitatif, le document cible la nécessité de limiter le domaine d'influence des éclusées dans l'objectif de maintenir un débit de base plus élevé, permettre au milieu aquatique et aux préleveurs à l'aval d'avoir un débit le moins fluctuant possible.

Le Syndicat Mixte de la Haute Vallée de l'Aude porte désormais l'étude visant estimation des impacts des éclusées sur les écosystèmes aquatiques et préconisations de mesures visant réduction de leurs effets.

Fort des enjeux piscicoles majeurs que représente le fleuve Aude, la Fédération Départementale de Pêche de l'Aude s'est engagée en qualité de partenaire technique auprès du syndicat de bassin. Il a ainsi été acté que, dans un premier temps, la FDAAPPMA 11 mettra en place dès 2020 un suivi thermique de l'axe Aude au travers son réseau départemental.

En effet, une mortalité piscicole massive a été constatée lors des éclusées estivales de 2016 dans le secteur aval des gorges de pierre lys jusqu'à Couiza. Cette mortalité a été observée lors d'un pic de chaleur et un débit de base très faible conduisant à observer la dérive et l'échouage d'individus adultes morts par plusieurs dizaines. Les doutes subsistent aujourd'hui dans une combinaison de paramètres conduisant à une dégradation du compartiment biologique, il s'agit notamment de :

- Amplitude minimale/maximale des Q art. (au sens de l'indicateur de Courret)
- Variations intra journalières des T°C et Conductivité

Dès lors, l'objectif attendu de cette démarche est l'identification des fluctuations thermiques et physico-chimiques journalières, la délimitation des linéaires concernés et l'estimation de leur impact sur le milieu et les espèces.

1. Présentation de la méthodologie :

1.1 Découpage par unités homogènes :

La zone d'étude correspond à l'axe Aude depuis la retenue de Puyvalador en amont jusqu'à son embouchure en méditerranée. Un découpage par sections homogènes basé sur des critères hydro-biologiques a été préféré aux seuls critères hydromorphologiques de la BD SYRAH. À ce titre, la sectorisation induite par les contextes piscicoles du PDPG 11 semble tout à fait pertinente :

1. Puyvalador/Confluence Bruyante : Secteur court-circuité en amont des influences du bassin versant Ariégeois de la Bruyante et des modalités de gestion depuis grande pâture et lac du Laurenti. Le peuplement piscicole y est monospécifique (Truite Fario).

2. Confluence Bruyante/ Nentilla : Secteur court-circuité comprenant les apports depuis la branche Aude (Puyvalador et de la branche bruillante (Sortie usine d'Usson). Ce secteur est toujours largement dominé par la Truite Fario avec une présence marginale d'espèces d'accompagnement (Chabot, Vairon).

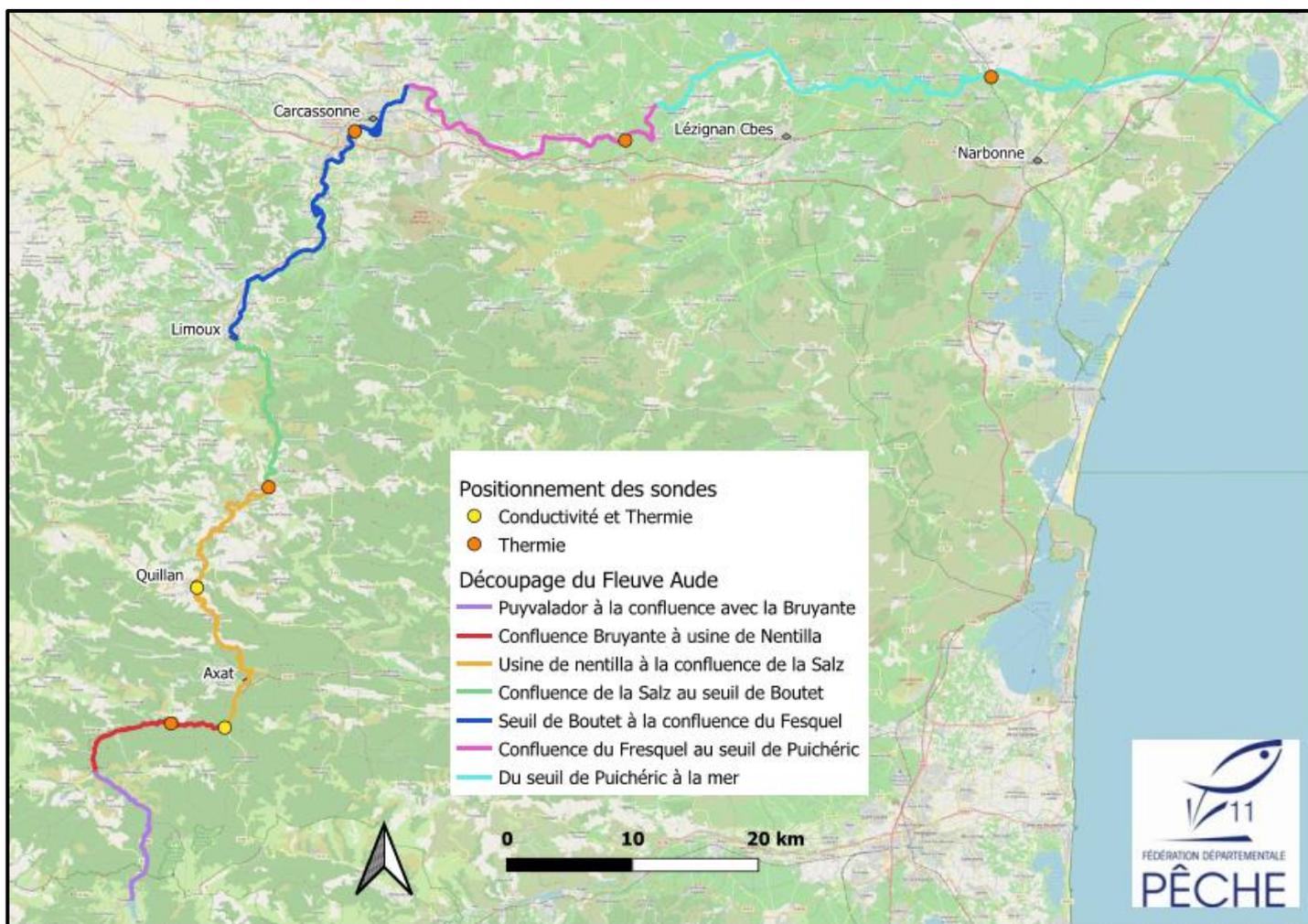
3. Nentilla / confluence Sals : Tronçon privilégié, le premier soumis aux fortes éclusées liées au classement de la centrale de Nentilla pour sa production de pointe. Les deux turbines, équipées pour 7 m 3/s chacune, peuvent fonctionner de manière séparée ou simultanée. C'est à partir de ce point que les lâchers pour l'eau vive sont réalisés ainsi que la grande majorité des volumes destinés à couvrir la tranche agricole dite la convention de Matemale. Ce secteur est caractérisé par un assemblage spécifique plus complexe toujours dominé par les salmonidés (Ombre Communs et Truites Fario).

4. Confluence Sals/ Limoux : zone de transition hydrogéomorphologique et biologique de la zone piémont vers la zone de plaine avec une apparition bien marquée des cyprinidés rhéophiles ainsi qu'une productivité plus importante et un changement de la répartition des populations L'ombre commun diminue drastiquement tandis que la truite se maintient. Une supposition forte sur l'apport d'eau chaude depuis la Sals devra être vérifiée dans le cadre du suivi thermique.

5. Limoux/ confluence Fresquel : Disparition progressive des salmonidés pour laisser place aux cyprinidés d'eau vive. Configuration morphologique de plaine avec chenaux secondaires actifs ou non, bras morts.... Il s'agit certainement du premier tronçon en se dirigeant vers l'aval ayant connu une profonde modification des berges, de la végétation et des macro formes alluviales depuis les crues d'Octobre 2018. Ce tronçon ayant été fortement remanié avec les crues de Janvier 2020. À ce titre même si l'étude hydromorphologique et sédimentaire réalisée par le SMAH HVA donne à l'aide du levé LIDAR certaines informations, il sera intéressant de se procurer un levé récent de photographie aériennes pour comparaison de l'évolution de la bande active et notamment des surfaces potentielles de frayères à cyprinidés restaurées mais potentiellement fragilisées par les éclusées

6. Confluence Fresquel/ barrage de Puichéric : Les crues de 2018 ont profondément modifié le compartiment physique de ce tronçon comme celui plus à l'aval. Tout comme celui à l'amont, il sera intéressant d'avoir une analyse diachronique sur certains secteurs présentant des intérêts biologiques et des indicateurs robustes. Par ailleurs, il s'agit d'un secteur soumis à de fortes influences anthropiques ayant un rôle dans les débits observés dans l'Aude. On retrouve en effet des lâchers réalisés par BRL depuis l'axe Fresquel correspondant aux volumes prélevés par VNF et le monde agricole. Par ailleurs, il s'agit également du tronçon court circuité de Marseillette permettant d'alimenter le canal nord et sud ainsi que l'ensemble du réseau gravitaire de l'étang asséché. Par ailleurs, il me semble que sur ce tronçon une étude micro-habitat avait été faite lors de l'étude volume prélevable du SMMAR en 2013.

7. Barrage de Puichéric / DPM => À l'image du 25 Juin dernier, où le débit à Moussoulens était tombé à 1 m³/s, il est incontestable que ce dernier tronçon est également soumis à de fortes variations. Ces propos sont également repris dans l'étude d'Ecogea. Aussi, ce tronçon nous intéresse particulièrement au travers de sa particularité en termes de peuplement piscicole et les migrateurs amphihalins qui fréquentent ces eaux durant une bonne partie de l'année. Les fortes variations nous laissent supposer d'une mauvaise condition d'incubation et de développement des œufs d'alose feinte au-delà même des qualités de supports de frayère de substitutions.



1.2 Matériel et Protocole de mise en place :

Dans un contexte organisationnel difficile, en lien avec les mesures sanitaires mises en place au cours de l'année 2020, les sondes ont été positionnées plus tardivement qu'initialement envisagé.

Ainsi, le choix a été fait de focaliser les enregistrements sur la période estivale (de Juin à Septembre) afin de prendre en compte la totalité de l'intervalle offrant une sensibilité accrue aux fluctuations journalières. Dans le cadre de cette première approche, les données obtenues permettront d'apprécier les maximas thermiques qui restent le paramètre prépondérant en termes de sélection des espèces piscicoles eurythermes. C'est aussi lors de cette période que les impacts potentiels des aménagements et activités anthropiques sont les plus sensibles.

Cinq sondes thermiques de type « HOBO Pendant Temp Logger » ont permis l'enregistrement de la température des cours d'eau et deux autres sondes « HOB0431 U24-001 » ont mesuré les variations de températures et de conductivité.

Ces dernières ont été immergées dans les cours d'eau et fixées à des supports solides et vraisemblablement inamovibles, préférentiellement les systèmes racinaires de la végétation rivulaire.

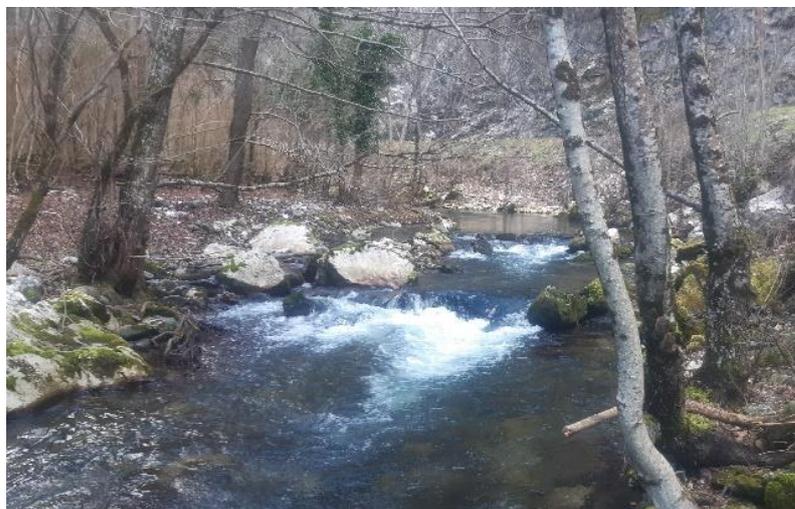
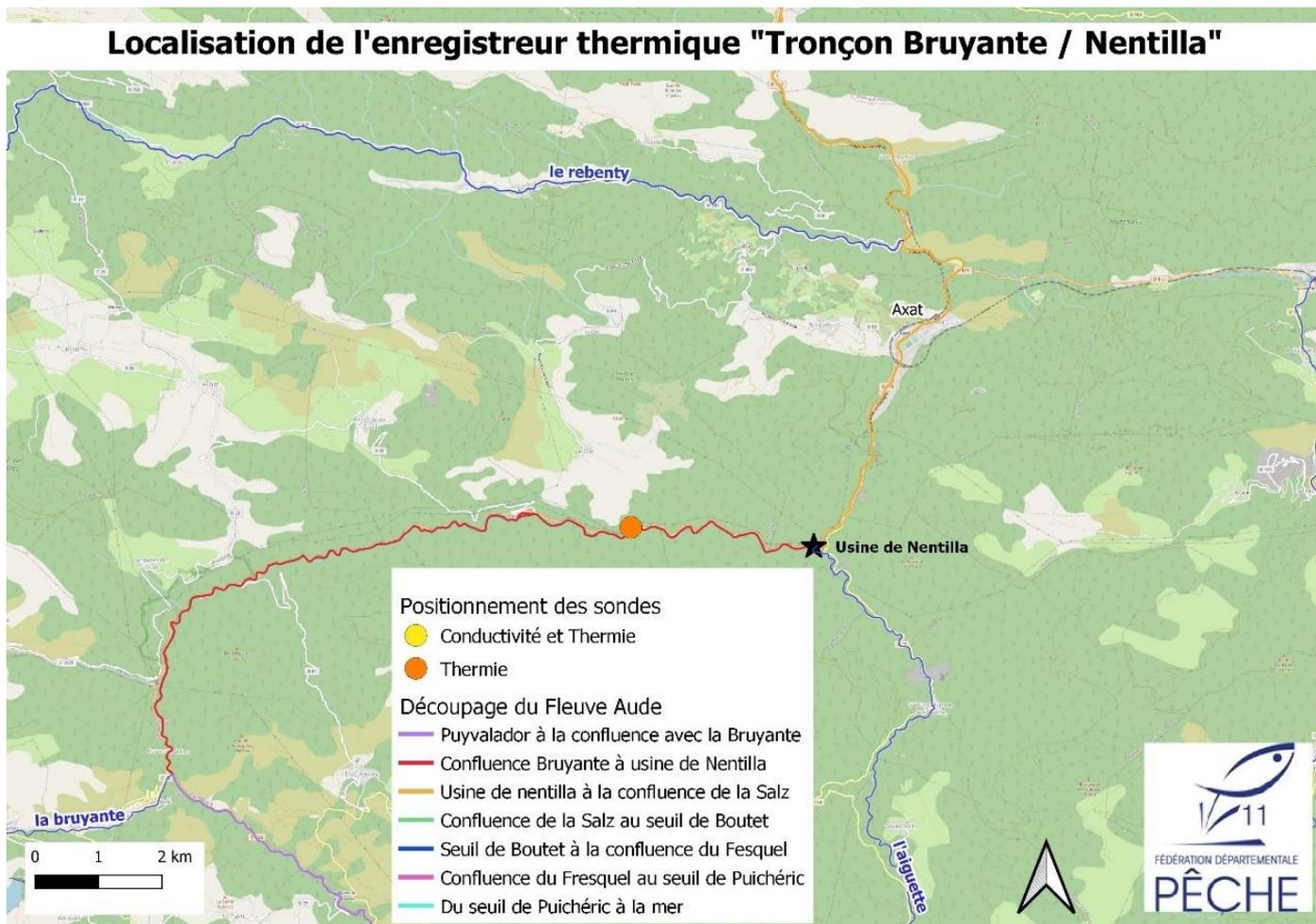
Chaque pose de sonde a fait l'objet du renseignement d'une « fiche descriptive » établie à cet effet. Il y est notamment identifié le site (Commune / Cours d'eau / lieu-dit / rive), décrit le support de fixation, la profondeur d'immersion et les coordonnées géographiques.

Après installation dans le cours d'eau, deux visites de contrôles ont été réalisées afin de s'assurer du bon fonctionnement des sondes et de leur immersion totale. Enfin, une campagne de relève a été effectuée mi-Septembre préalablement aux potentiels épisodes méditerranéens et à la remontée des niveaux d'eau.

2. Analyse des résultats :

2.1. Enregistrements thermiques du tronçon « Confluence Bruyante à l'usine Nentilla » :

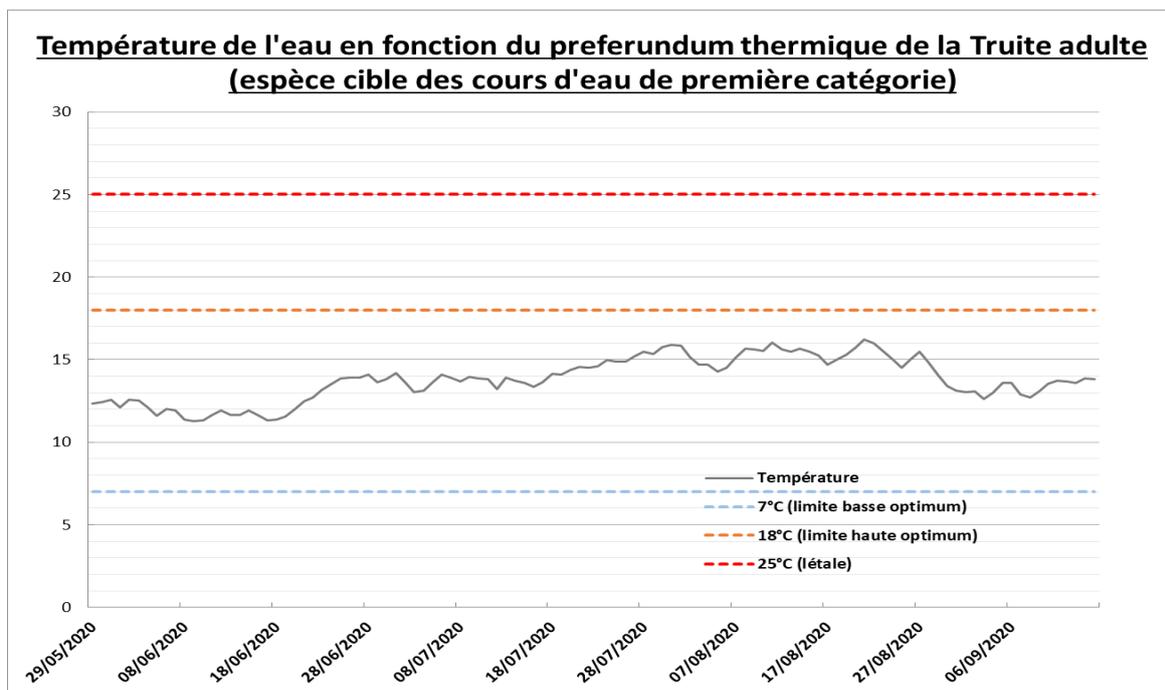
Pour des raisons de dysfonctionnement de la centrale hydroélectrique de Gesse en 2020, les mesures ont été réalisées en aval de la prise d'eau de l'usine Saint Georges. Ce tronçon était représentatif des débits associés aux tronçons court-circuités. L'analyse des enregistrements liés à cette station servira d'étalonnage vis-à-vis des sondes situées en aval et soumises aux lâchers de l'usine de Nentilla.



Analyse des données thermiques :

Fiche station macro thermie aude TCC.				
2020	Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	
	Date fin suivi	15/09/2020		13.8
	Durée (en j)	110		
	Températures élevées	T°C instantanée maximale		18.3
		T°C moy jour max		16.2
Date T°C maxi journalière			21/08/2020	
T°C des 30 jours les plus chauds			15.4	
Date T°C 30 jours les plus chauds			25/07/2020	
Températures faibles	T°C instantanée minimale		10.7	
	T°C moy jour min		11.3	
	Date T°C min journalière		09/06/2020	
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale		7.7	
	Amplitude thermique journalière maximale		3.9	

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude à Le Clat est de 13.8°C. La température a atteint au maximum 18.3°C le 21/08/2020 pour une température moyenne journalière de 16.2°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 3.9 °C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 15.4°C à partir du 27 juillet 2020.

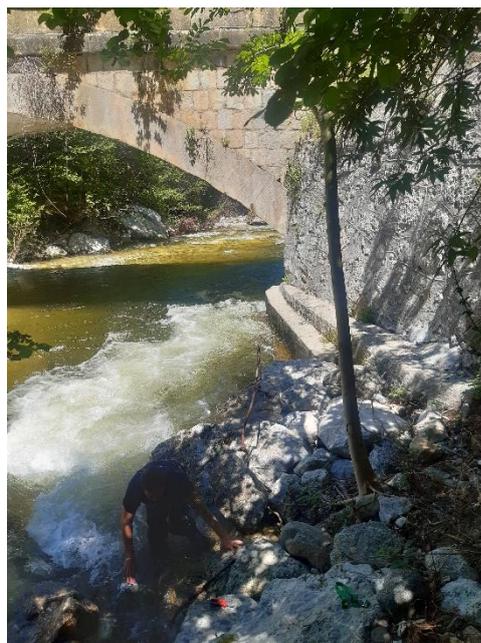
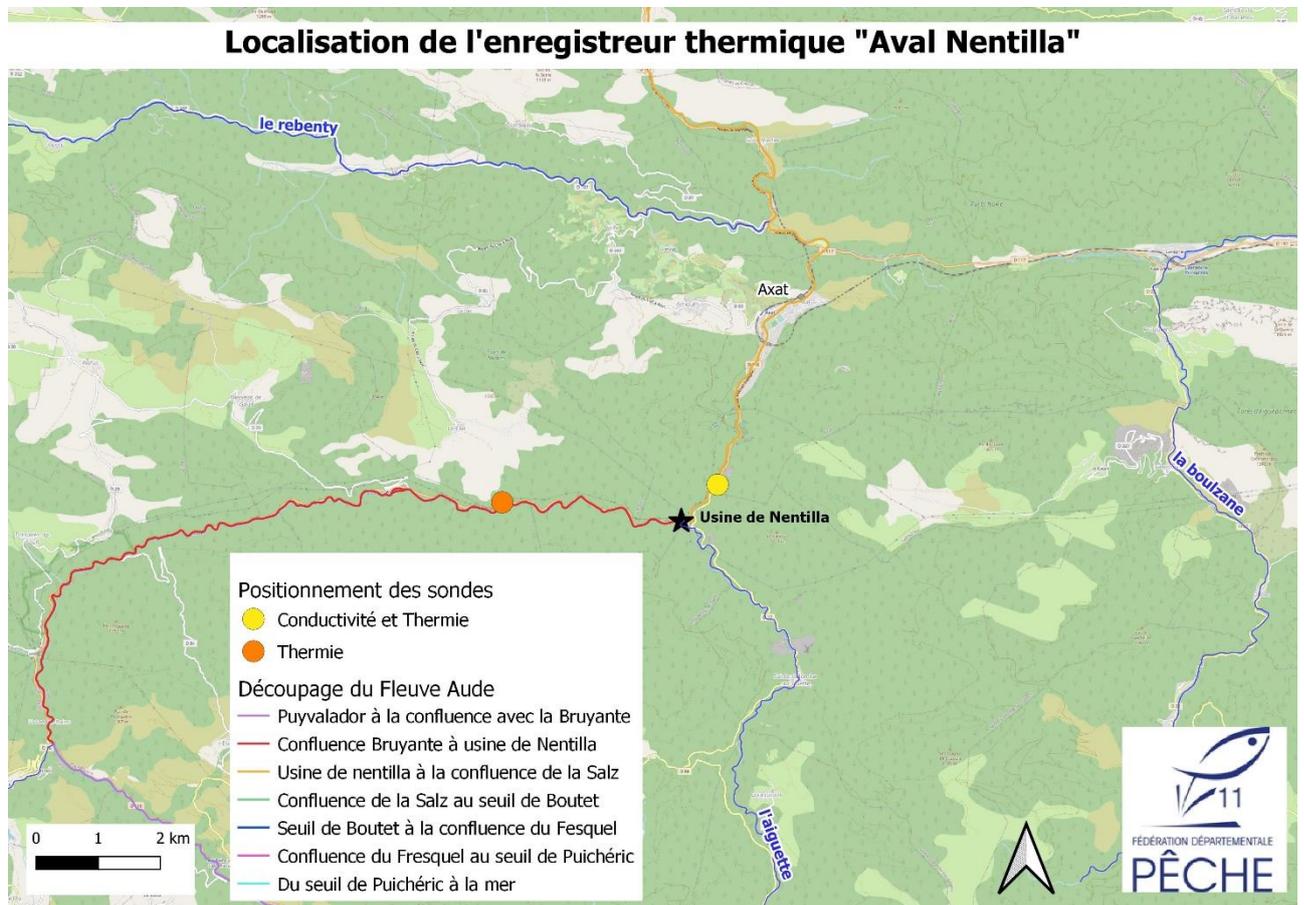


Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour la Truite Fario 100 % du temps. Ces relevés indiquent une gamme de température tout à fait adaptée au développement et au maintien de la phase adulte de l'espèce repère.

Comme attendu dans le tronçon court-circuité, les données brutes associées aux enregistrements ne laissent pas entrevoir d'autres fluctuations journalières que celles liés au réchauffement diurne.

2.2. Enregistrements thermiques et de conductivité en aval immédiat de l'usine Nentilla :

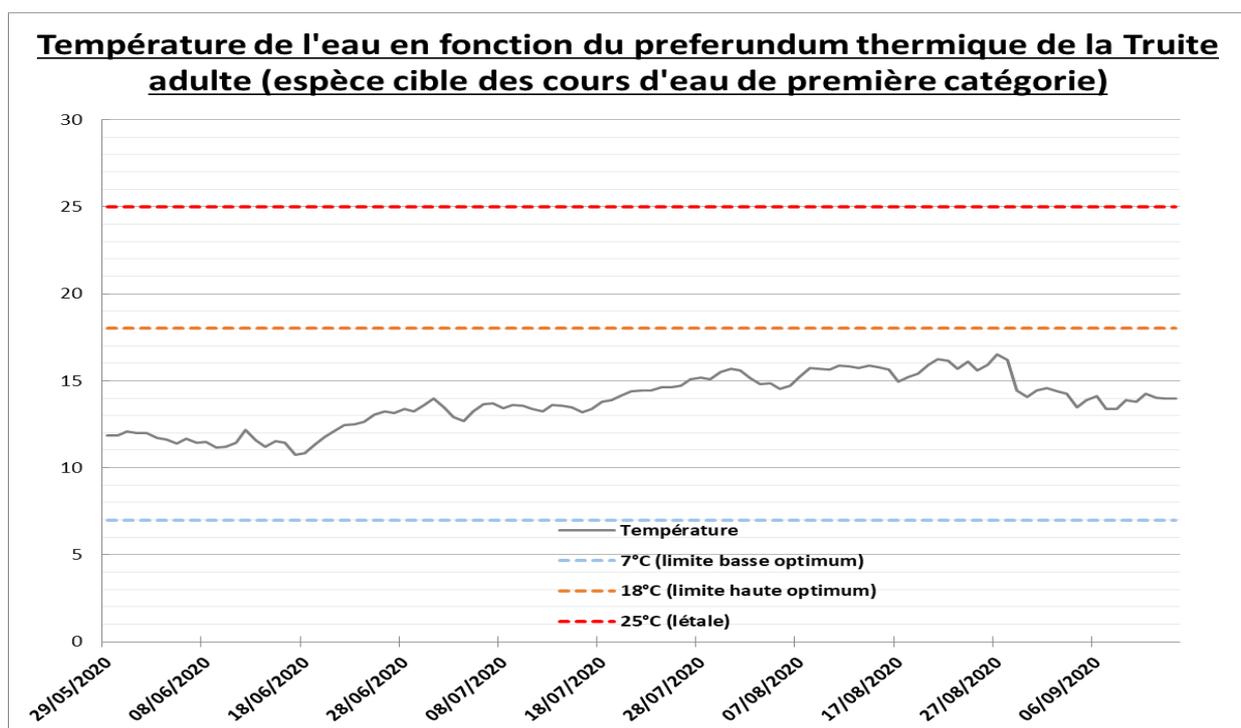
Cette sonde a été placée en aval immédiat de l'usine de Nentilla dans le but de mesurer précisément les caractéristiques associées aux eaux de lâchers depuis le lac de Puyvalador. La comparaison des divergences enregistrées avec la station précédente paraît pertinente du fait des faibles distances entre les deux sondes (environ 4 Km) et les modestes apports intermédiaires de l'Ayguette. Ainsi, le choix a été fait de mesurer les paramètres conductivité et température sur cette station.



Analyse générale des données thermiques :

Fiche station macro thermie aude nentilla.				
2020	Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	13.8
	Date fin suivi	14/09/2020		
	Durée (en j)	109		
	Températures élevées	T°C instantanée maximale		17.4
		T°C moy jour max		16.5
Date T°C maxi journalière			27/08/2020	
T°C des 30 jours les plus chauds			15.6	
Date T°C 30 jours les plus chauds			29/07/2020	
Températures faibles	T°C instantanée minimale		9.6	
	T°C moy jour min		10.7	
	Date T°C min journalière		17/06/2020	
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale		7.8	
	Amplitude thermique journalière maximale		3.7	

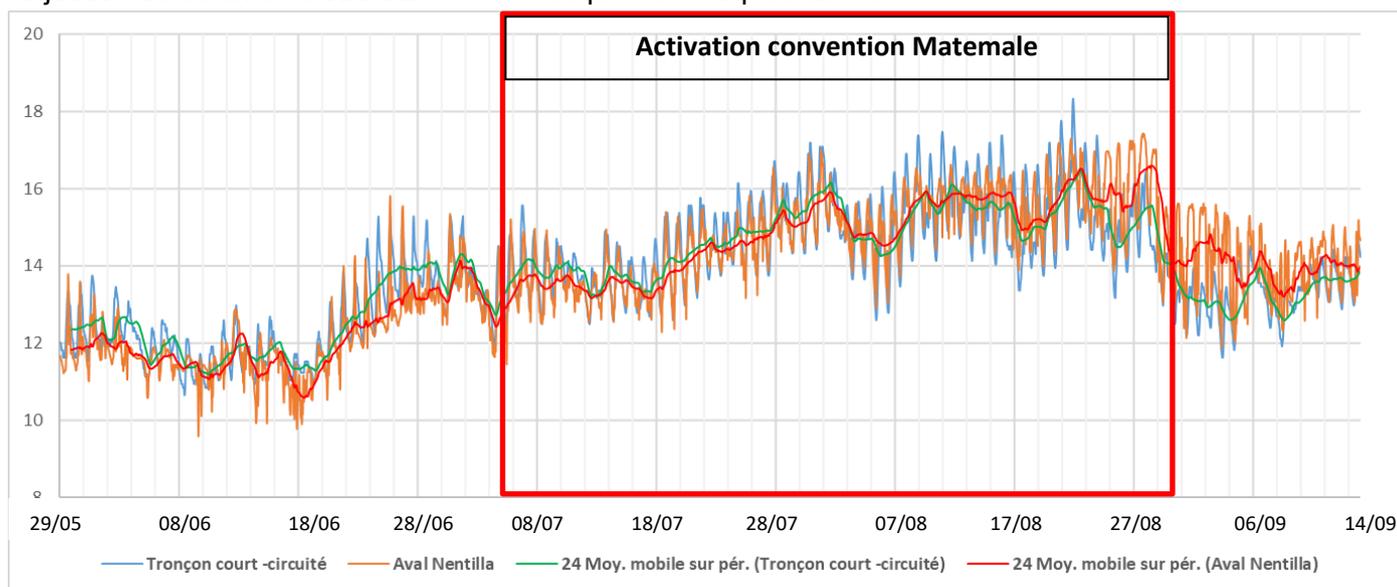
Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude en aval de Nentilla est de 13.8°C. La température a atteint au maximum 17.4°C le 27/08/2020 pour une température moyenne journalière de 16.5°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 3.7 °C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 15.6°C à partir du 29 juillet 2020.



Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour la Truite Fario 100 % du temps. Ces relevés indiquent une gamme de température tout à fait adaptée au développement et au maintien de la phase adulte de l'espèce repère. Les caractéristiques tendanciennes des données recueillies sur une période de 109 jours consécutifs sur les deux stations ne laissent pas entrevoir d'écart significatif.

Analyse comparative des données thermiques des sondes du tronçon court-circuité et de Nentilla :

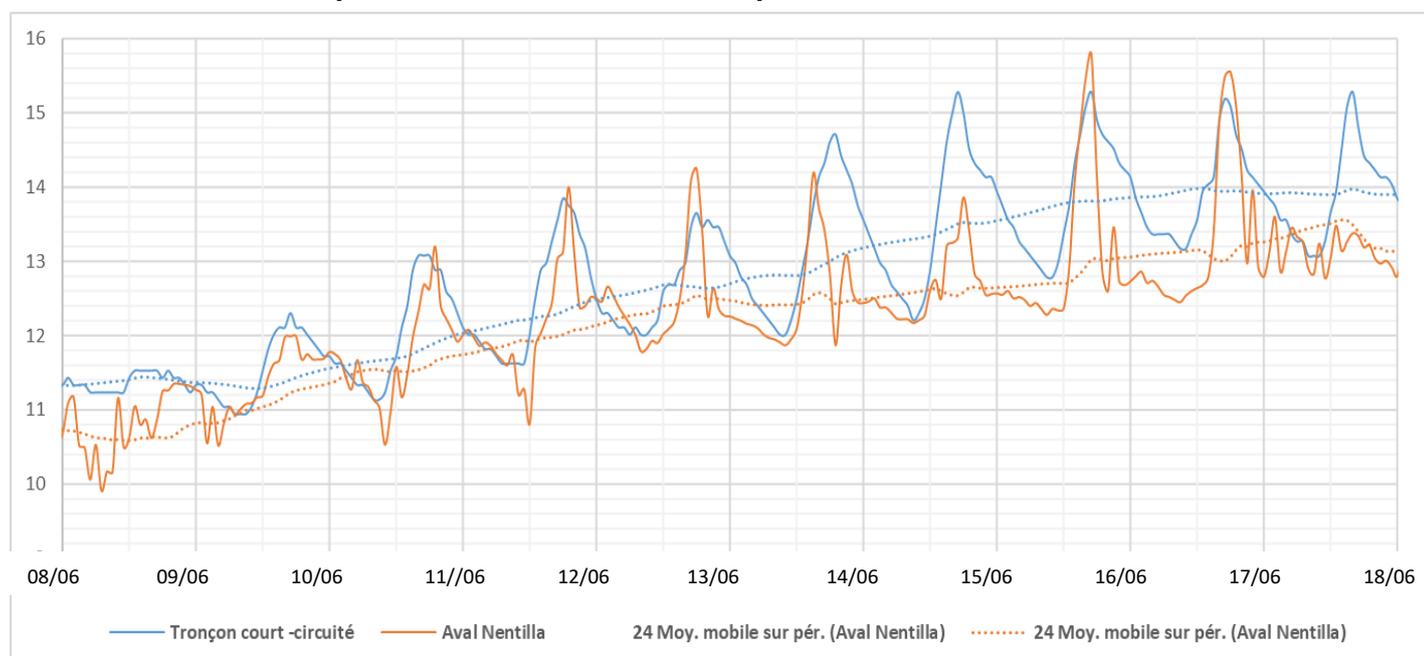
Une analyse des données enregistrées dans des pas de temps plus courts permet de mettre en évidence certaines disparités dans les graphiques. Ces différences correspondent aux signaux induits par l'injection de volumes d'eau aux caractéristiques thermiques différentes.



Dans l'intervalle de mesure, trois périodes correspondant chacune à des utilisations différentes de la ressource en eau depuis le lac de Puyvalador peuvent être distinguées :

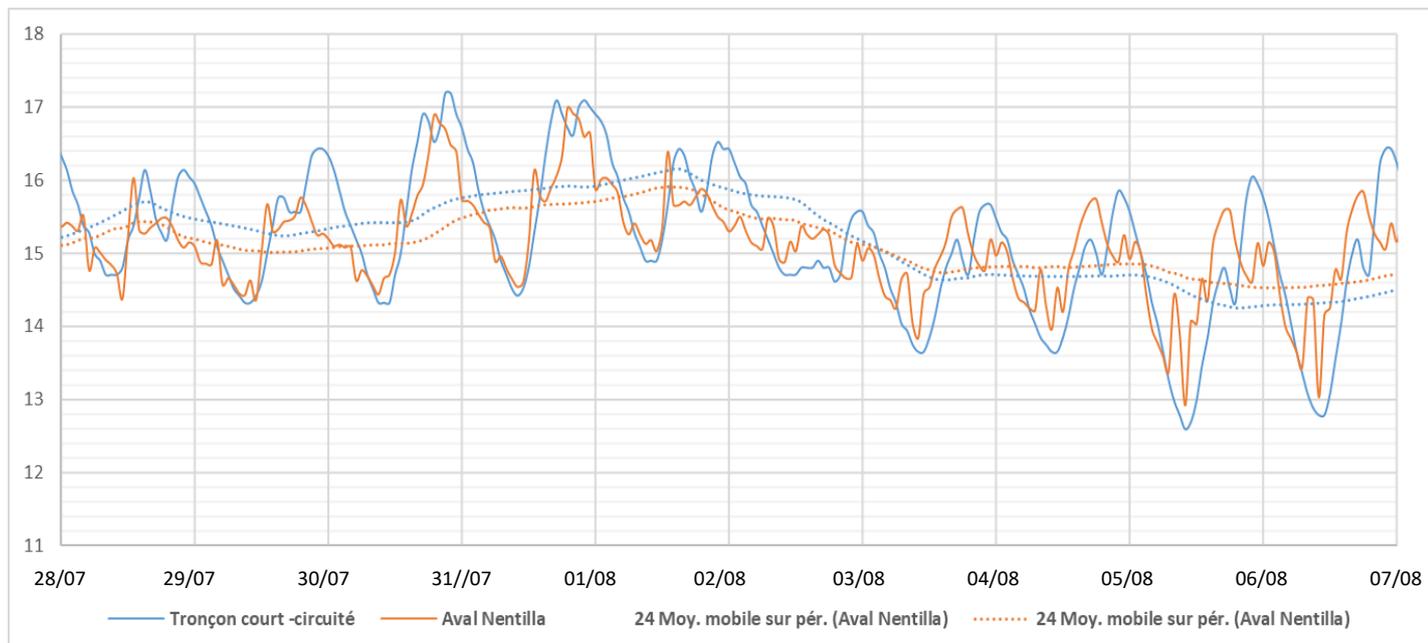
1. Du 29/05/2020 au 05/07/2020 : lâchers énergétiques de pointe.
2. Du 05/07/2020 au 31/08/2020 : lâchers énergétiques de pointe, activation de la convention Matemale et lâchers supplémentaires (sports d'eau vives à partir du 01/08).
3. Du 01/09/2020 au 14/09/2020 : lâchers énergétiques de pointe.

Comparaison des données thermiques du 08/06/20 au 18/06/2020 :



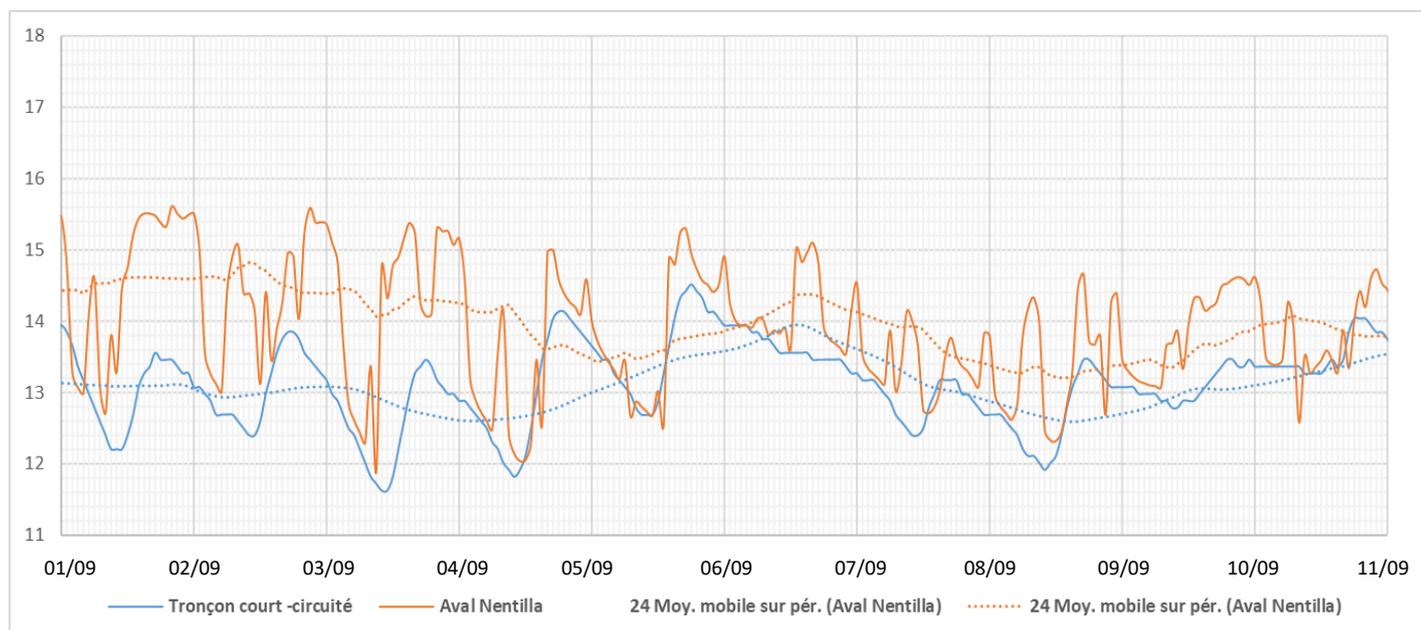
Sur la période considérée, les températures relevées en Aval de Nentilla se révèlent en moyenne plus fraîches que dans le tronçon court-circuité avec des écarts de 1°C en fin de période. Les amplitudes journalières paraissent aussi plus importantes sur le secteur de Nentilla (jusqu'à 3.2°C) avec des oscillations intermédiaires sur 24 heures.

Comparaison des données thermiques du 28/07/20 au 07/08/2020 :



Sur la période considérée, les températures moyennes tendent à s'homogénéiser et présentent de faibles écarts. Au-delà de l'alternance naturelle au réchauffement diurne (maxima vers 23h) et au refroidissement nocturne (mini vers 11h), des fluctuations infra-journalières de magnitudes modérées sont visibles sur les deux stations. Les perturbations thermiques apparaissent bien plus nombreuses et amples en aval de Nentilla (1 à 1.5°C).

Comparaison des données thermiques du 01/09/2020 au 10/09/2020 :



Sur la période considérée, les températures moyennes sont supérieures sur la station de Nentilla. D'importantes et multiples fluctuations infra-journalières sont perceptibles sur cette même station. L'amplitude de ces dernières devient significative avec des variations de 3°C sur des pas de temps d'une heure.

Analyse du paramètre conductivité :

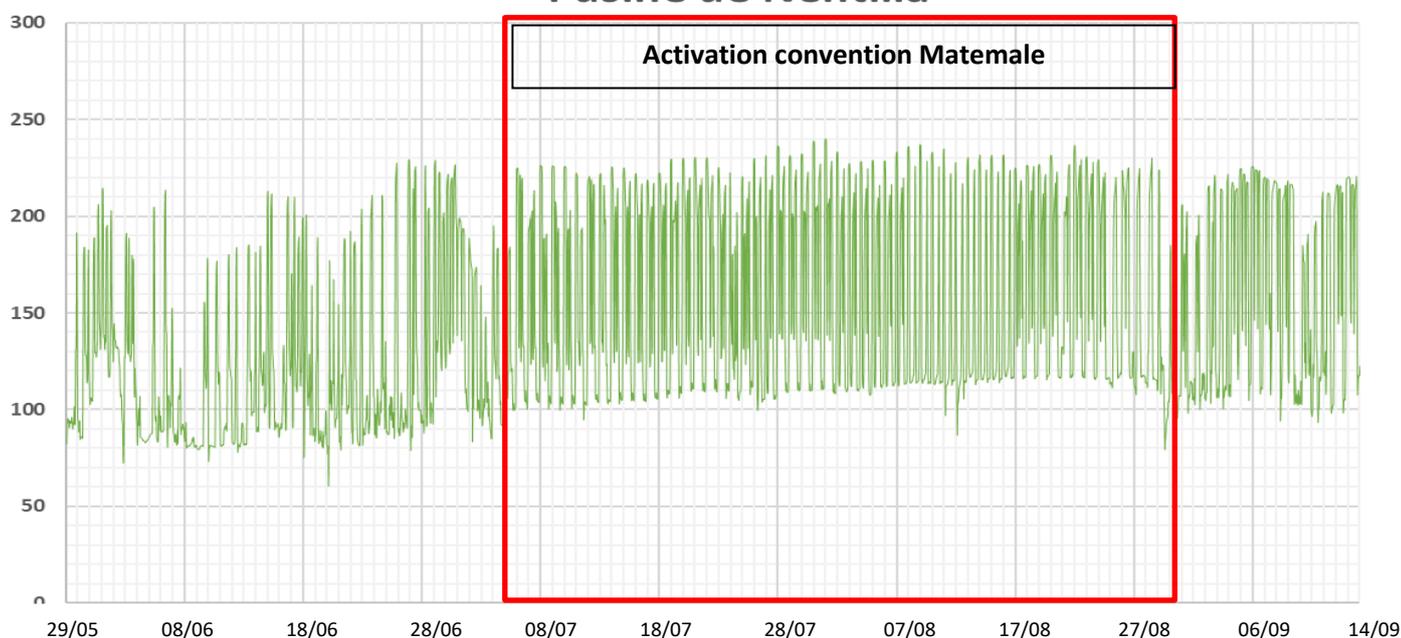
La conductivité électrique de l'eau donne une indication sur la minéralisation globale de cette eau. En effet, une eau riche en élément minéraux dissouts sous forme d'ions permettra une circulation facilitée du courant électrique.

La conductivité de l'eau dépendra de la solubilité du substrat sur lequel elle s'écoule. D'une manière générale, les roches sédimentaires riches en calcaire sensibles à la dissolution (ions Ca^{2+} CO_3^{2-}) entraineront une conductivité plutôt élevée. À l'inverse, les roches cristallines d'origine magmatique sont peu solubles et favorisent des eaux peu conductives.

La conductivité s'exprime en microsiemens par centimètre. Généralement, les gammes de conductivités de l'eau douce s'étendent de 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux les plus pauvres en ions, à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les plus riches. Dans le cadre de la présente étude, ce paramètre nous est apparu pertinent du fait des différences géologiques notables sur le bassin versant entre le secteur amont de Puyvalador (majoritairement cristallin) et le secteur aval (sédimentaire). Ainsi, des mesures directes confirment la faible conductivité des eaux issues de l'usine de Nentilla (80 / 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une conductivité plus élevée du bassin naturel (180 / 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Dans le cadre de notre étude, le signal associé aux variations de conductivité constitue un traceur constant et stable vis-à-vis de la détection des lâchers d'eau issus de Nentilla.

Variation de la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ en aval de l'usine de Nentilla



Fiche station		macro conducti aude nentilla.	
Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	147
Date fin suivi	14/09/2020		
Durée (en j)	109		
2020	Conductivités élevées	Conductivité instantanée maximale	240.3
		Conductivité moy jour max	210.7
		Date T°C maxi journalière	15/09/2020
Conductivités faibles	Conductivité instantanée minimale	61.5	
	Conductivité moy jour min	81.7	
	Date Conductivité min journalière	08/06/2020	
Amplitudes	Amplitude globale maximale	178.8	
	Amplitude journalière maximale	150.6	

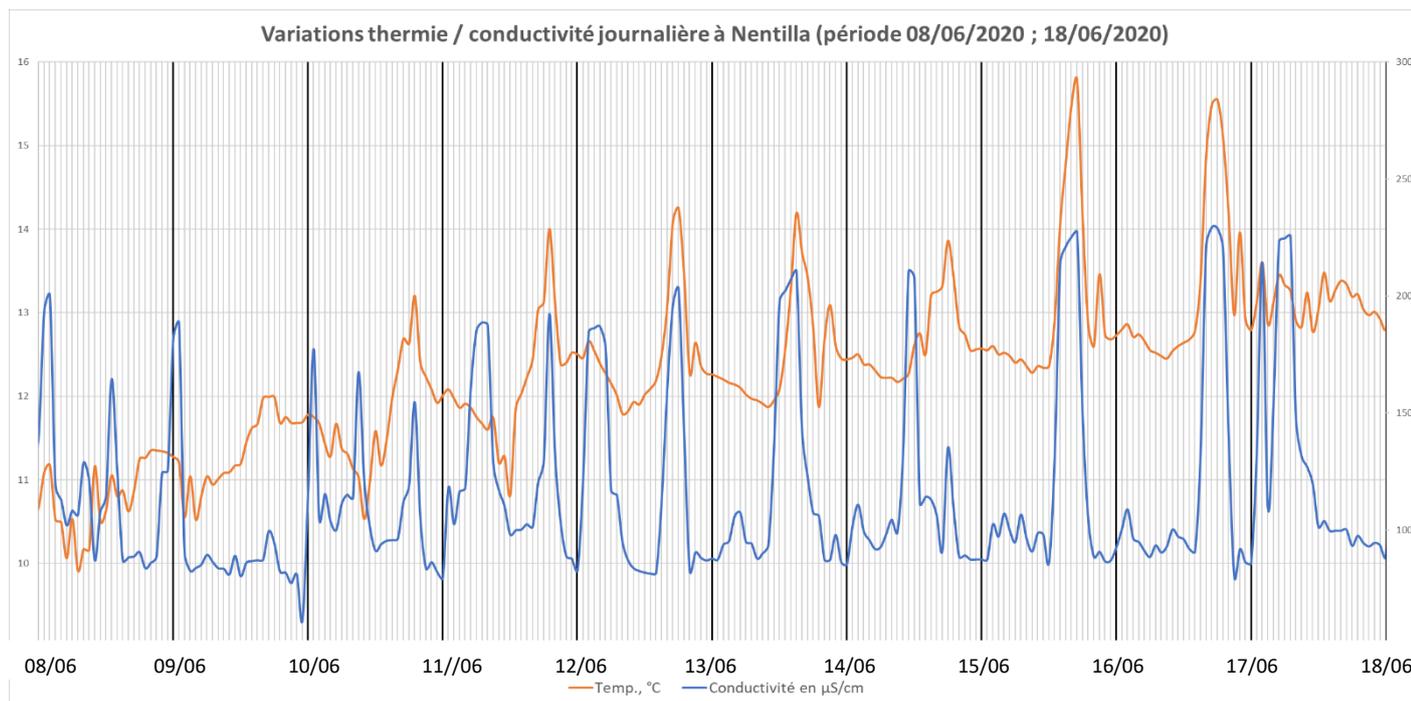
Sur la totalité de l'intervalle de mesure, l'enregistrement des variations de la conductivité met en évidence de fortes fluctuations infra-journalières. Pour les extrêmes, la conductivité fluctue entre 61.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 19/06/2020 à 22h00 au plus bas à 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ le 31/07/2020 à 19h00.

Les fluctuations infra-journalières ont des amplitudes 115 et 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur des pas de temps horaires.

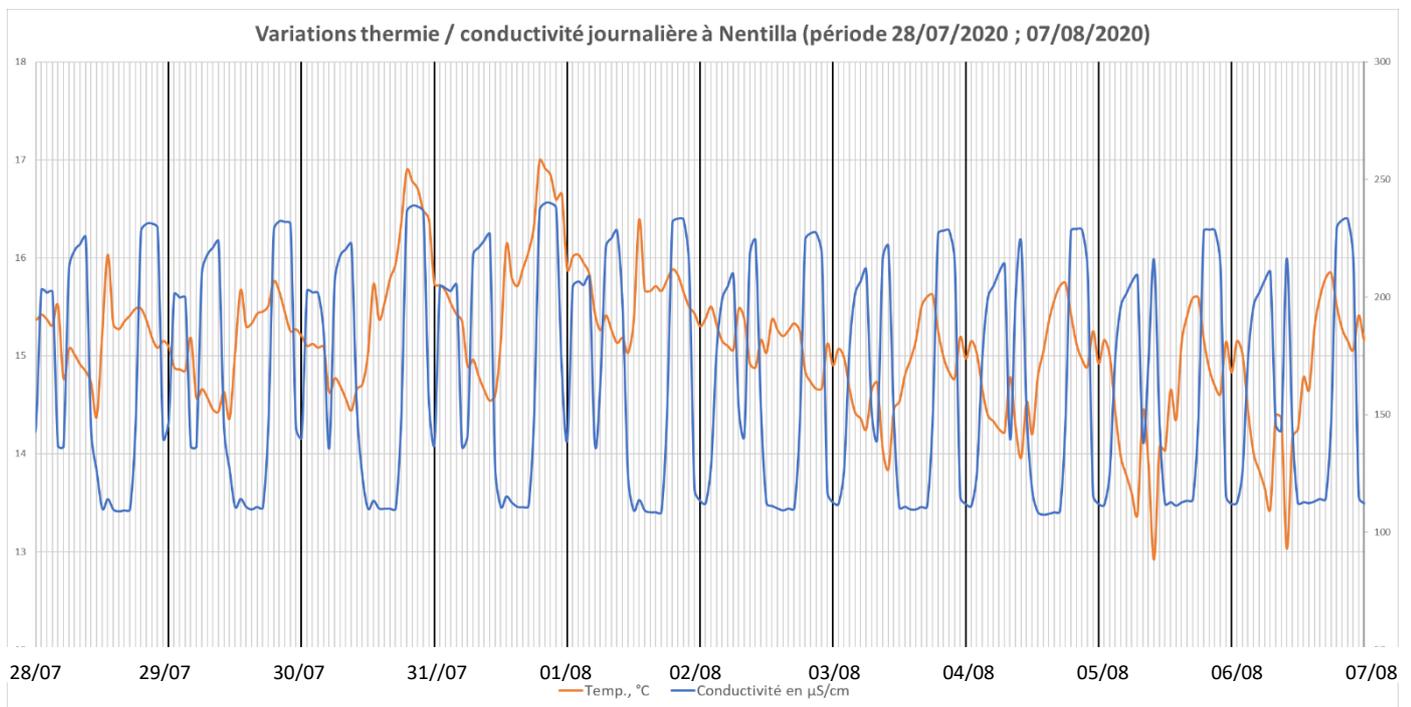
Croisement des mesures de conductivité et de thermie :

Une analyse par dizaine de jours peut être réalisée sur la base des trois périodes identifiées précédemment :

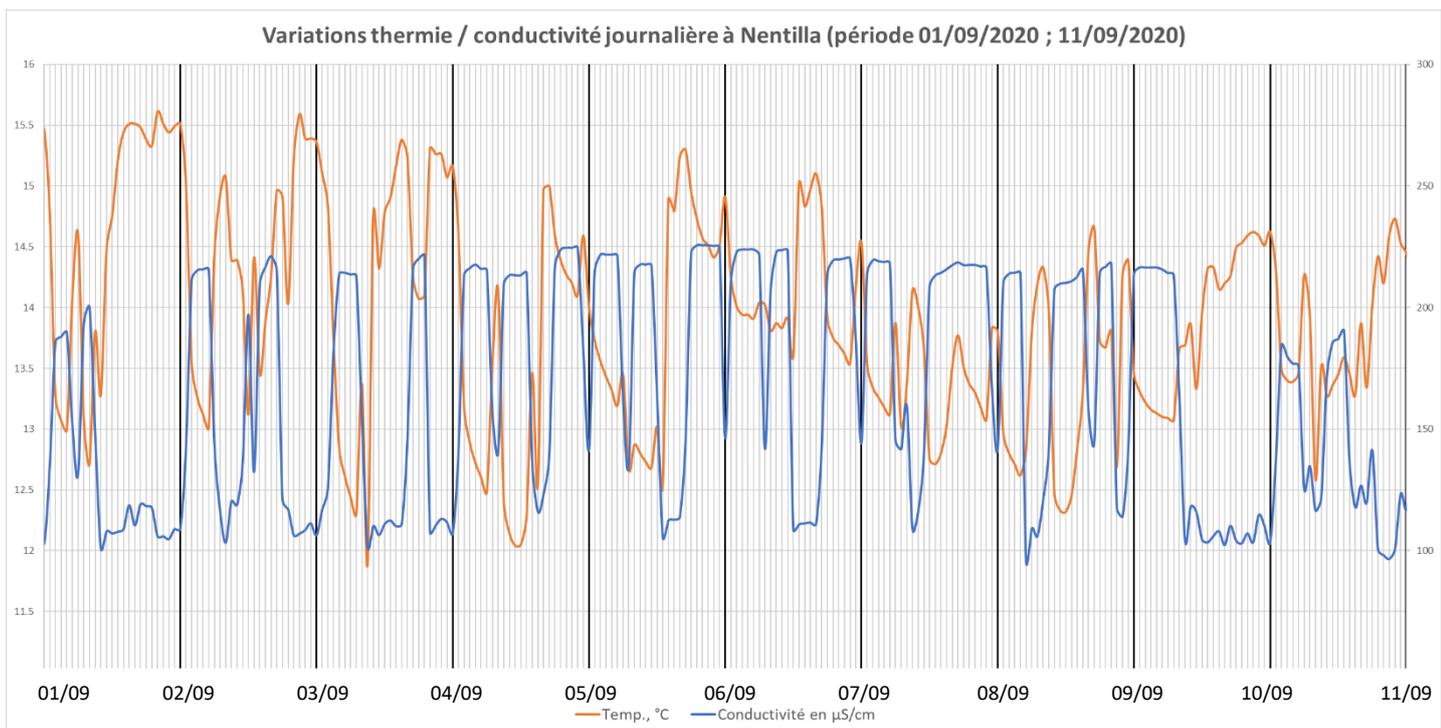
1. Du 29/05/2020 au 05/07/2020 : lâchers énergétiques de pointe.
2. Du 05/07/2020 au 31/08/2020 : lâchers énergétiques de pointe, activation de la convention Matemale et lâchers supplémentaires (sports d'eau vives à partir du 01/08).
3. Du 01/09/2020 au 14/09/2020 : lâchers énergétiques de pointe.



Sur cet intervalle de mesure, un lien peut être établi entre les fluctuations de conductivité et celles des températures. Malgré une forte variabilité naturelle du paramètre thermique (sensibilité au facteur météorologique : ensoleillement et température de l'air) une logique semble se dessiner : les conductivités basses (61.5 à 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont associées aux gammes de températures basses (baisse de 1 à 2.5°C sur des pas de temps horaires). Ainsi, les eaux issues des lâchers de l'usine de Nentilla induisent un rafraîchissement sensible. Cette conclusion corrobore les indices mis en évidence lors de la comparaison thermique réalisée entre la station de Nentilla et le tronçon court-circuité.



Sur l'intervalle du 28/07 au 07/08, la tendance générale tend à s'inverser. En effet, les conductivités basses tendent à être associées aux gammes de températures les plus hautes notamment en fin de période. Cette hausse apparait cependant modérée avec des fluctuations de l'ordre 1°C à 1.5 °C au pas de temps horaire.



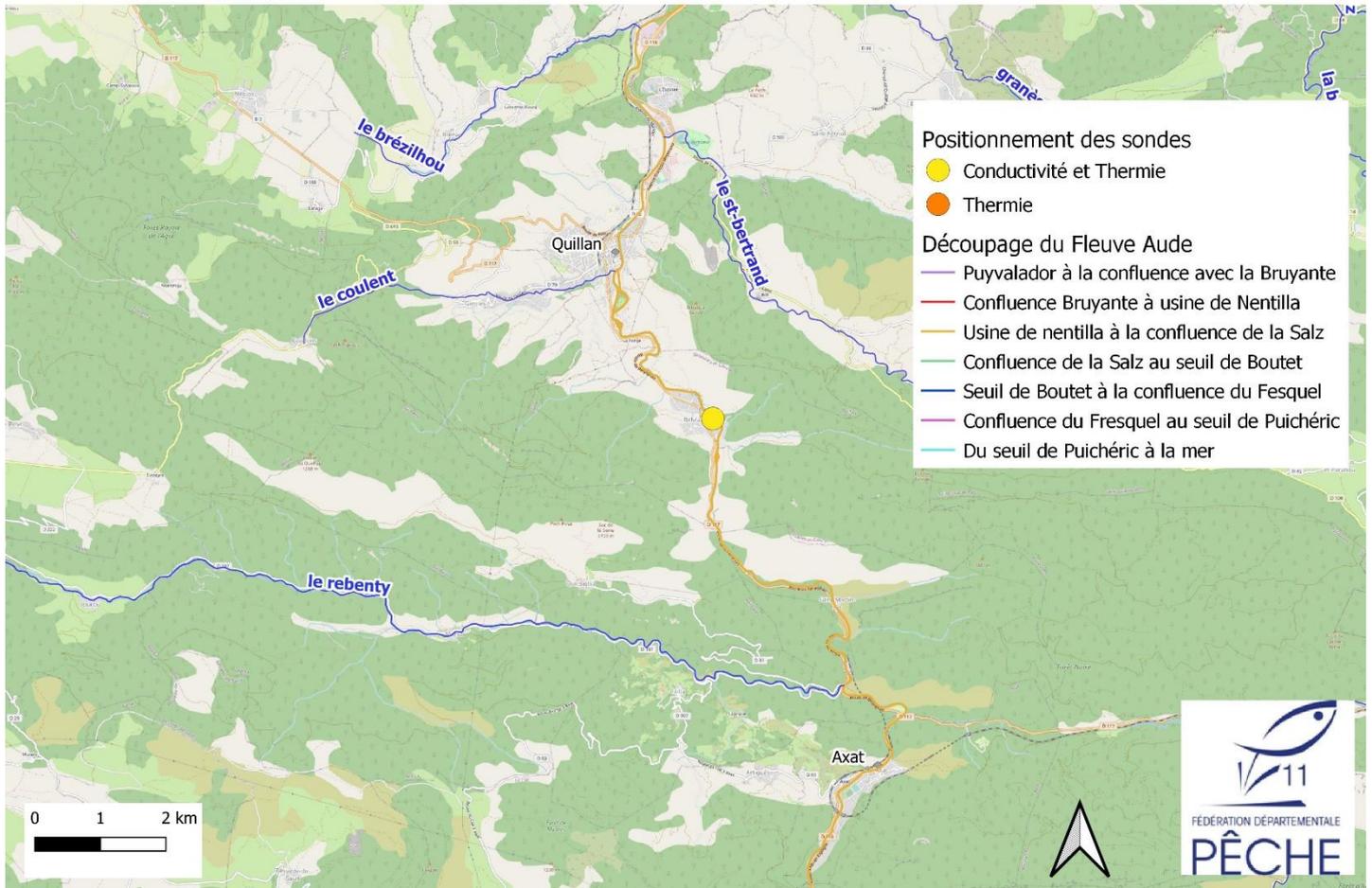
Cette dernière période confirme les éléments analysés précédemment. Les conductivités basses (100 à 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont associées aux gammes de températures hautes (hausse de 1 à 3°C). Par ailleurs, les fluctuations thermiques s'avèrent plus brutales sur des pas de temps horaires. Ainsi, les eaux issues des lâchers de l'usine de Nentilla induisent un réchauffement sensible. À l'inverse, les écoulements issus du tronçon court-circuité sont associés à des rafraîchissements. Les éléments analysés au travers de la comparaison des régimes thermiques des stations de Nentilla et du tronçon court-circuité démontrent aussi cette tendance.

2.3. Enregistrements thermiques à hauteur de Belviane et Cavirac :

Le choix de cette station est principalement motivé par sa position stratégique en aval de l'usine de Nentilla) mais aussi de la centrale de Saint Georges. Suite à l'épisode de mortalité de Juillet 2016, un protocole visant atténuation des effets des éclusées issues de Nentilla a été instauré par la réalisation de lâchers supplémentaires via la « branche Bruyante » (centrale de Saint Georges).

L'installation d'une sonde multi paramètres (conductivité / thermie) a pour objectif l'observation de la potentielle dilution des eaux issues de l'usine de Nentilla et la validation du protocole. Par ailleurs, la présence d'une station limnimétrique à proximité de l'enregistreur permettra la mise en évidence du lien entre les variations du débit et celle de la conductivité.

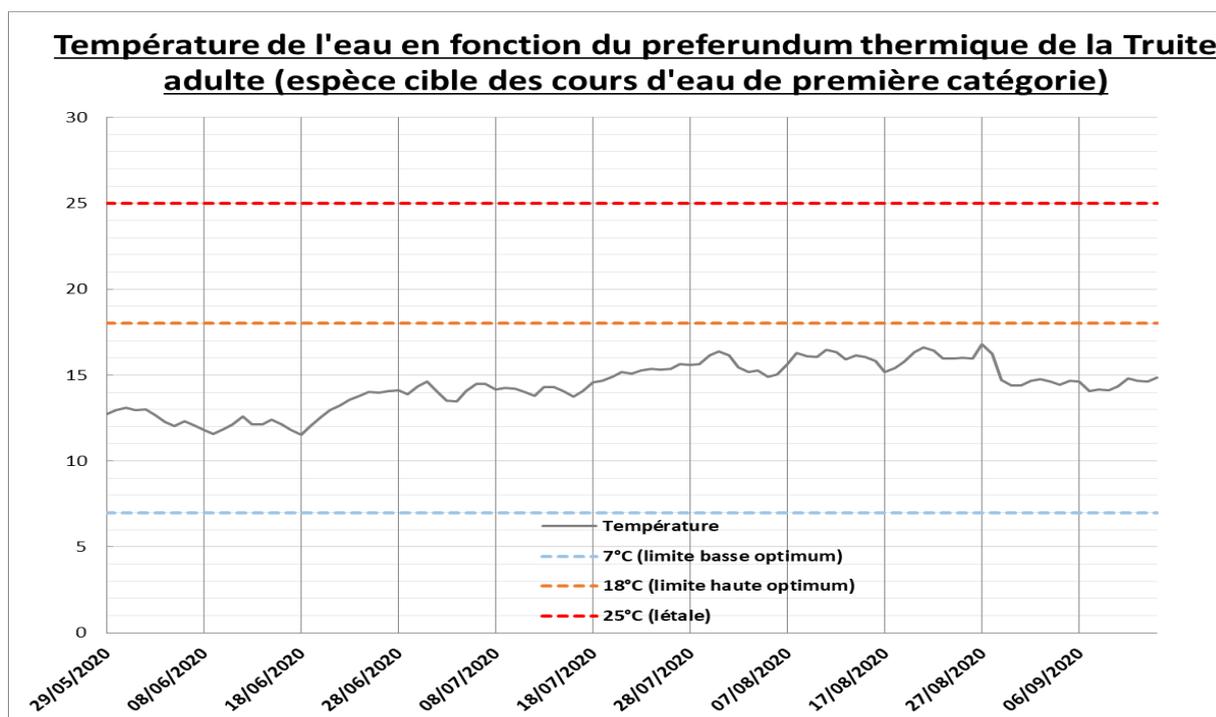
Localisation de l'enregistreur de "Belvianes et Cavirac"



Analyse générale des données thermiques :

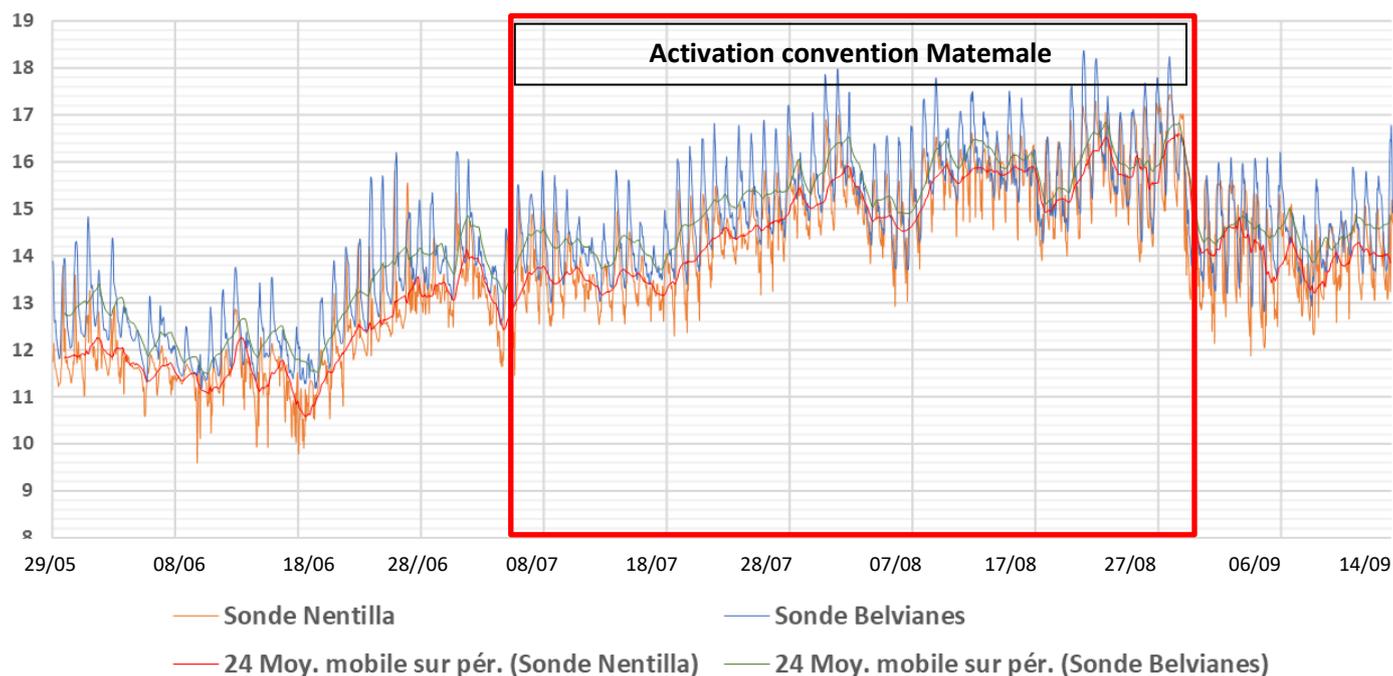
2020	Fiche station macro thermie aude belvianes.			
	Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	14.4
	Date fin suivi	14/09/2020		
	Durée (en j)	109		
	Températures élevées	T°C instantanée maximale	18.4	
		T°C moy jour max	16.8	
		Date T°C maxi journalière	27/08/2020	
		T°C des 30 jours les plus chauds	15.9	
		Date T°C 30 jours les plus chauds	29/07/2020	
	Températures faibles	T°C instantanée minimale	11.2	
		T°C moy jour min	11.6	
		Date T°C min journalière	18/06/2020	
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale	7.2		
	Amplitude thermique journalière maximale	3.5		

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude en aval de Nentilla est de 14.4°C. La température a atteint au maximum 18.4°C le 27/08/2020 pour une température moyenne journalière de 16.8°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 3.5 °C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 15.9°C à partir du 29 juillet 2020.



Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour la Truite Fario 100 % du temps. Ces relevés indiquent une gamme de température tout à fait adaptée au développement et au maintien de la phase adulte de l'espèce repère. Bien qu'un réchauffement modéré soit perceptible sur cette station, les écarts restent modestes vis-à-vis de la station de Nentilla. Un léger effet d'amortissement des amplitudes thermiques journalières et globales est perceptible.

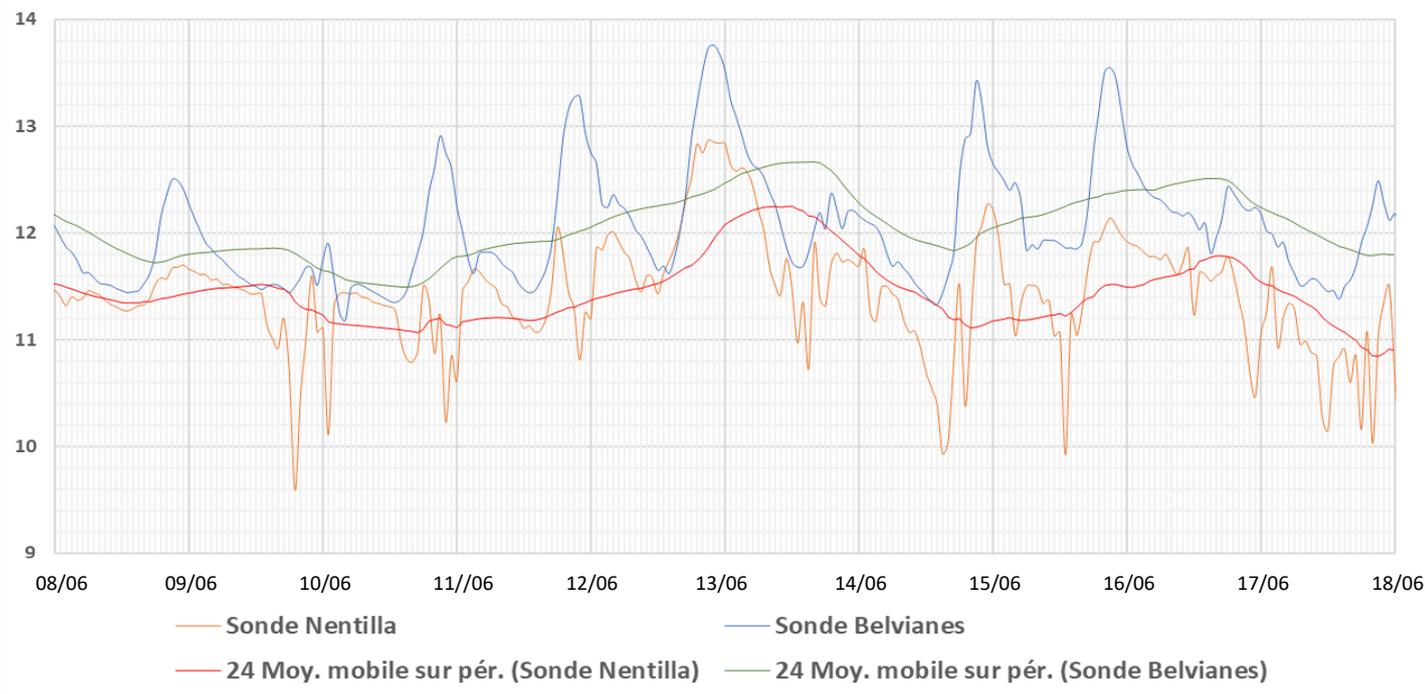
Evolution de la température sur les stations de nentilla et de Belviane



L'analyse générale des données enregistrées sur les deux stations confirme la tendance réchauffement de la station de Belviane sur l'ensemble de l'intervalle de mesure. En moyenne, les écarts journaliers sont de l'ordre de 0.5 à 1°C. Dans ce cas aussi une forte disparité temporelle est à souligner selon la période considérée.

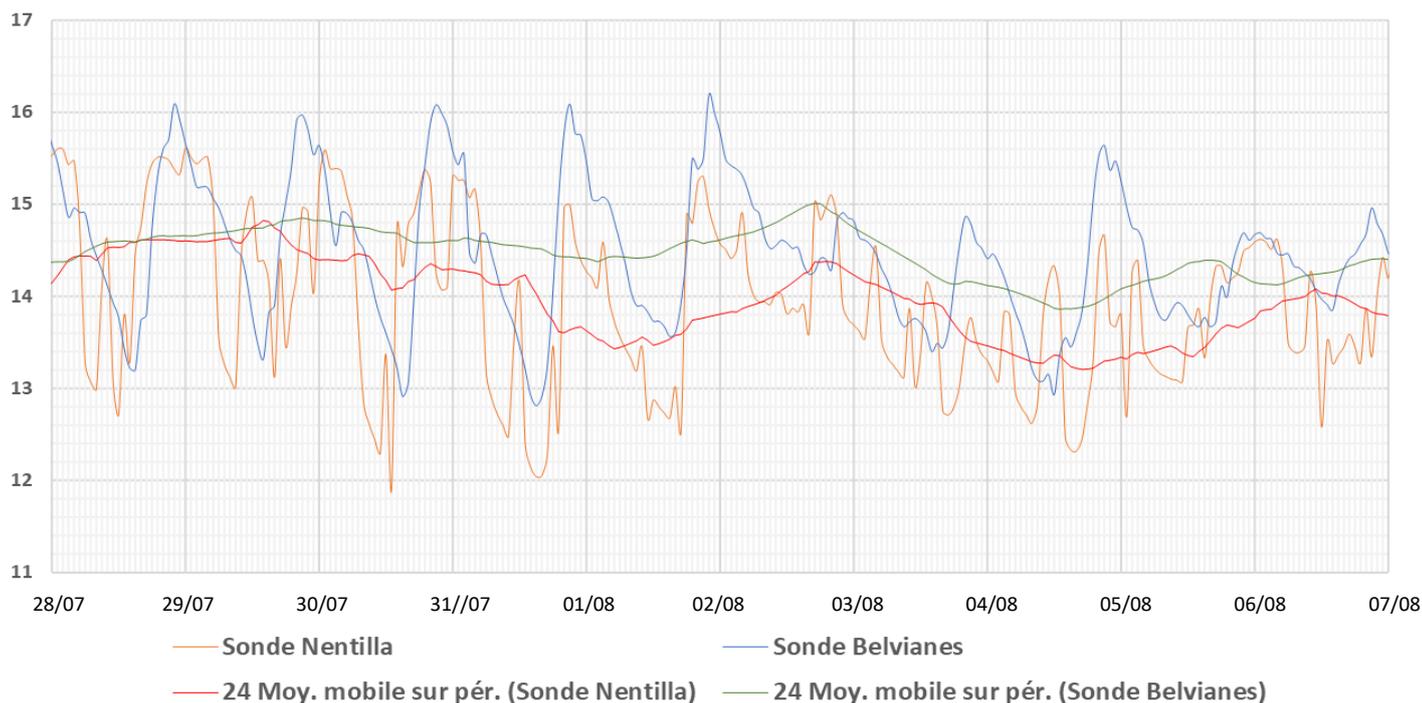
Sur trois périodes précédemment identifiées, les chroniques de données indiquent un phénomène de lissage des fluctuations infra-journalières perceptibles sur les courbes. Dans le détail, le phénomène de rafraichissement induit par les lâchers de Nentilla sur la période de Juin tend à s'estomper.

Comparaison des données thermiques du 08/06 au 18/06

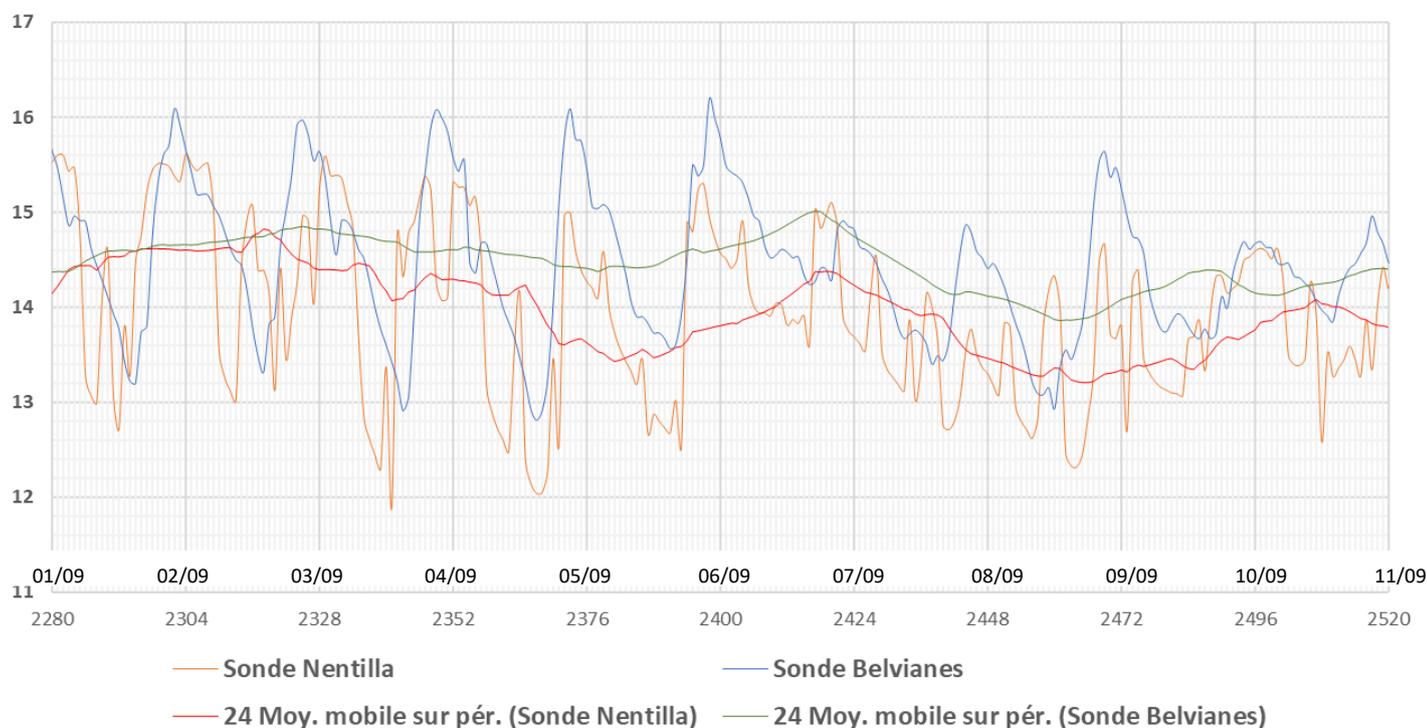


Pour les deux périodes suivantes, l'augmentation des températures de pointe introduit une exacerbation des amplitudes journalières pouvant atteindre 3 à 3.5 °C.

Comparaison des données thermiques du 28/07 au 07/08

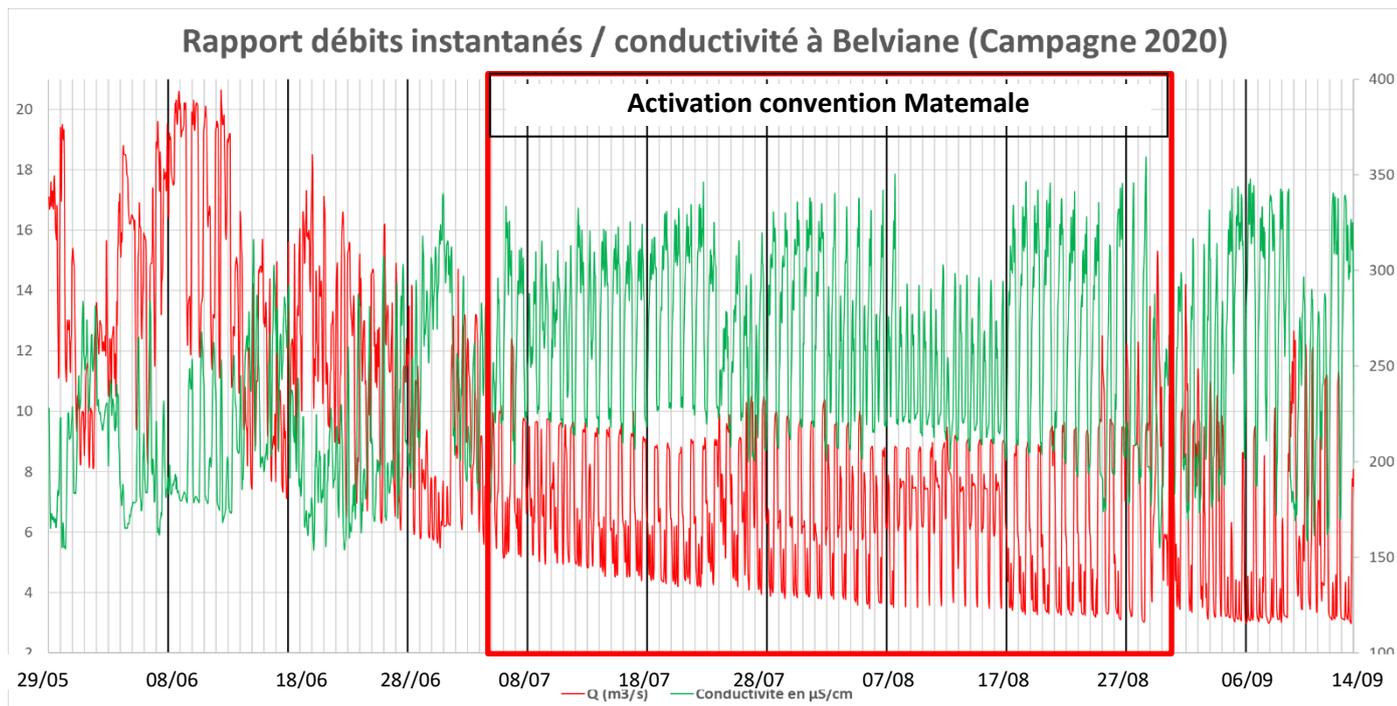


Comparaison des données thermiques du 01/09 au 10/09



Analyse du paramètre conductivité :

Le graphique ci-dessous illustre la relation débit instantané / conductivité sur la station de Belvianes et Cavirac. Ainsi, les bas débits sont systématiquement associés à des conductivités élevées et inversement. La corrélation entre les augmentations de débits liées aux éclusées de Nentilla et la baisse de conductivité de l'eau est établie.

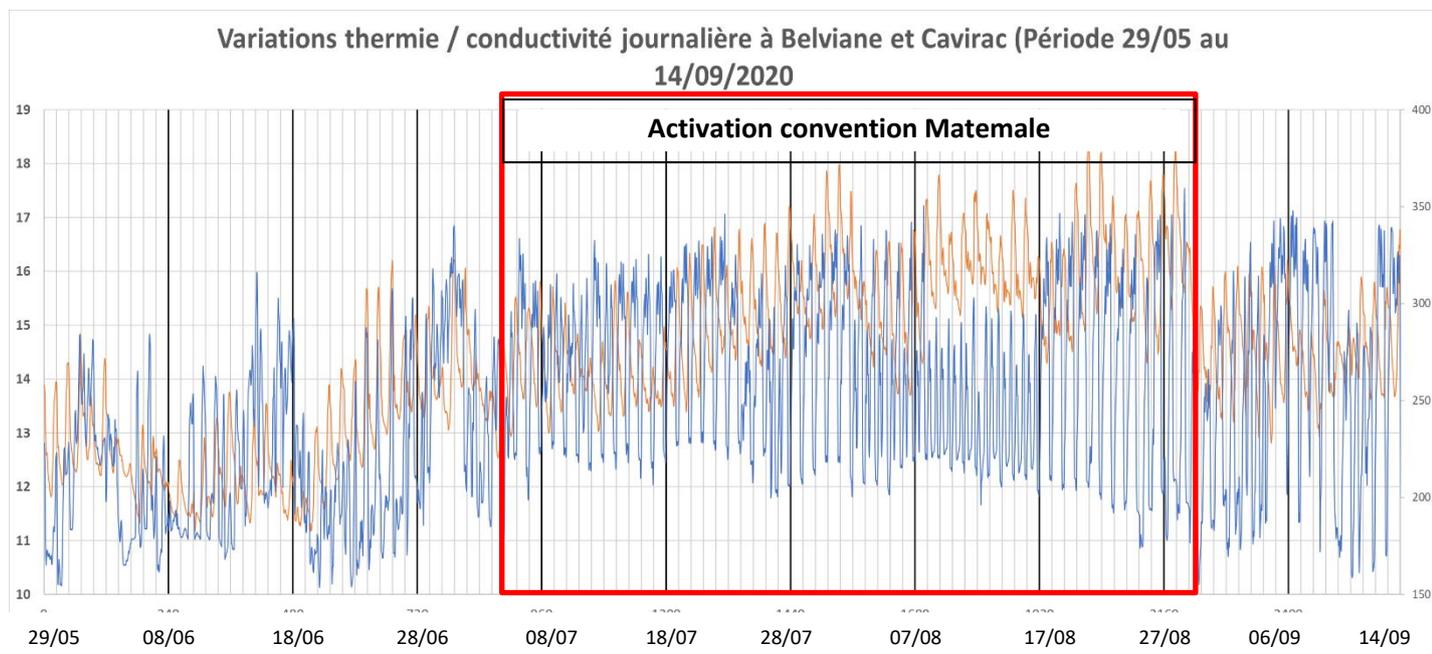


2020	Fiche station macro conducti aude belvianes.		
	Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée
	Date fin suivi	14/09/2020	
	Durée (en j)	109	
	Conductivités élevées	Conductivité instantanée maximale	358.5
		Conductivité moy jour max	308.5
		Date T°C maxi journalière	30/06/2020
	Conductivités faibles	Conductivité instantanée minimale	153.7
		Conductivité moy jour min	172.7
		Date Conductivité min journalière	04/06/2020
Amplitudes	Amplitude globale maximale	204.8	
	Amplitude journalière maximale	181.7	

Les données générales concernant la conductivité font ressortir une augmentation des amplitudes dans les variations journalières de conductivité par rapport à la station de Nentilla.

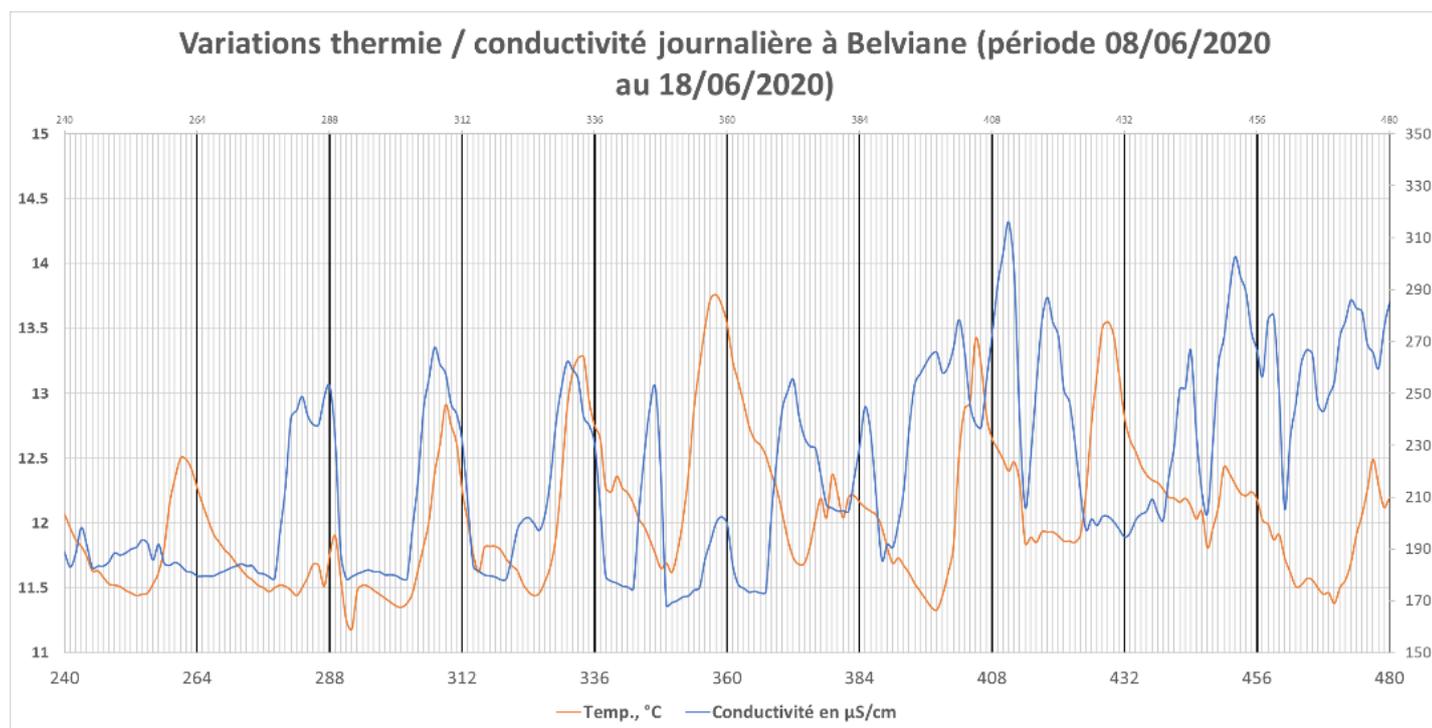
Les valeurs de conductivités moyennes et maximales sont en forte progression à hauteur de Belvianes et Cavirac (environ 100 µS/cm en moyenne).

Croisement des mesures de conductivité et de thermie :

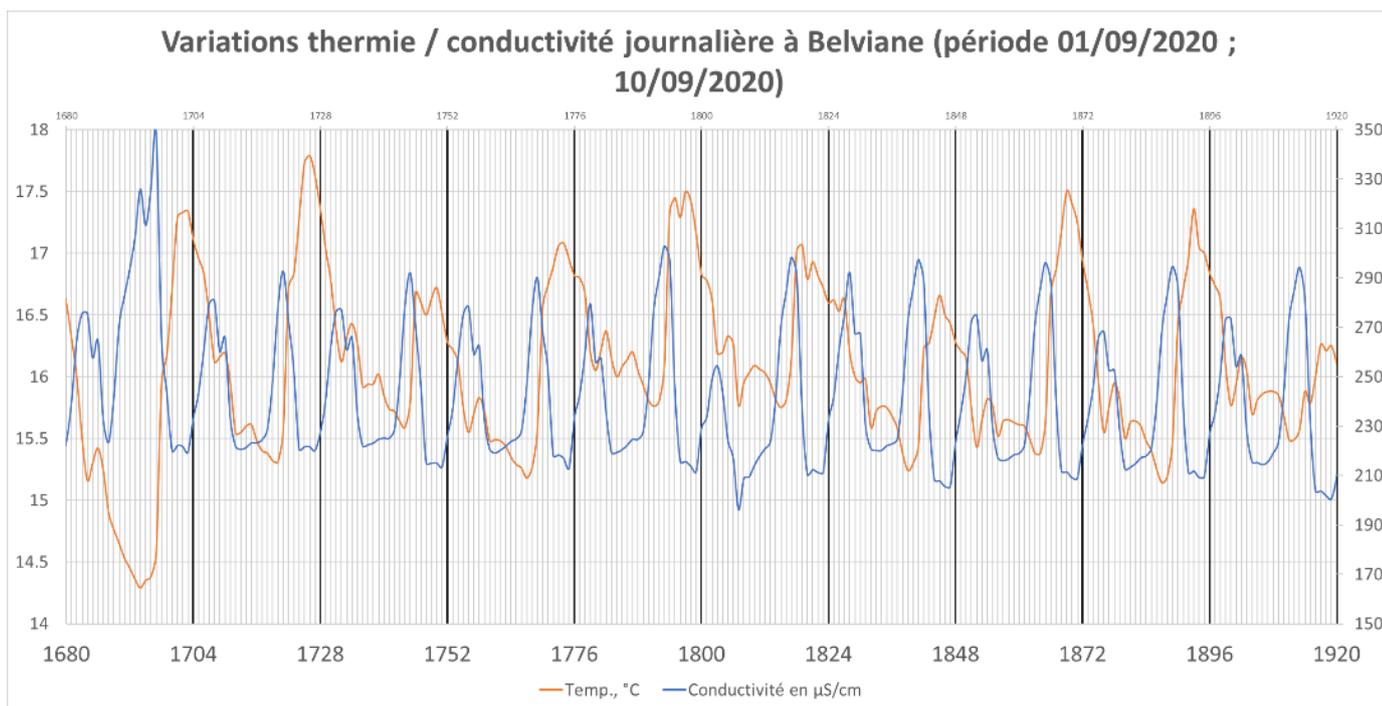


Sur l'intervalle de mesure, l'évolution des rapports entre les métriques thermiques et conductivités sont globalement similaires à ceux décrits pour la station de Nentilla :

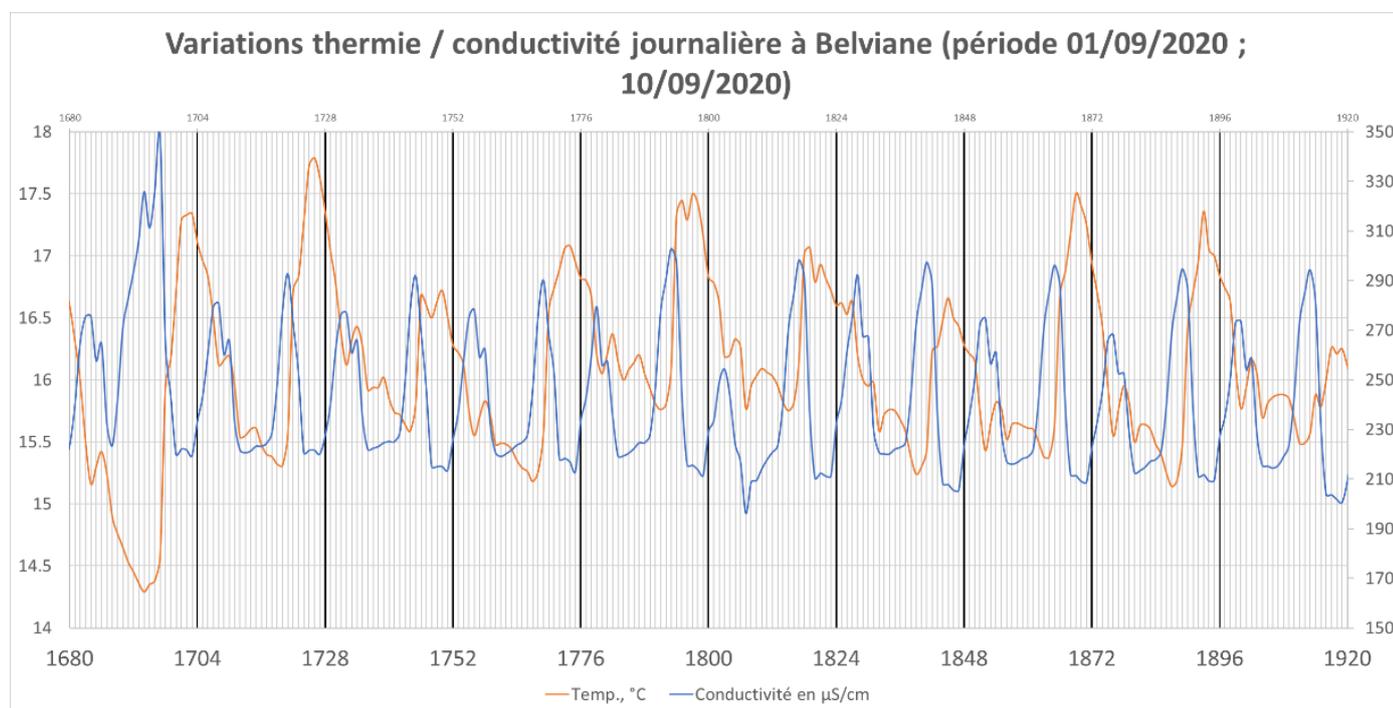
1. Du 29/05/2020 au 05/07/2020 : les baisses de conductivités semblent peu impactantes ou associées à de ténus rafraîchissements.



2. Du 05/07/2020 au 31/08/2020 : les baisses de conductivités sont associées à un réchauffement sensible de l'eau notamment en fin de journée.

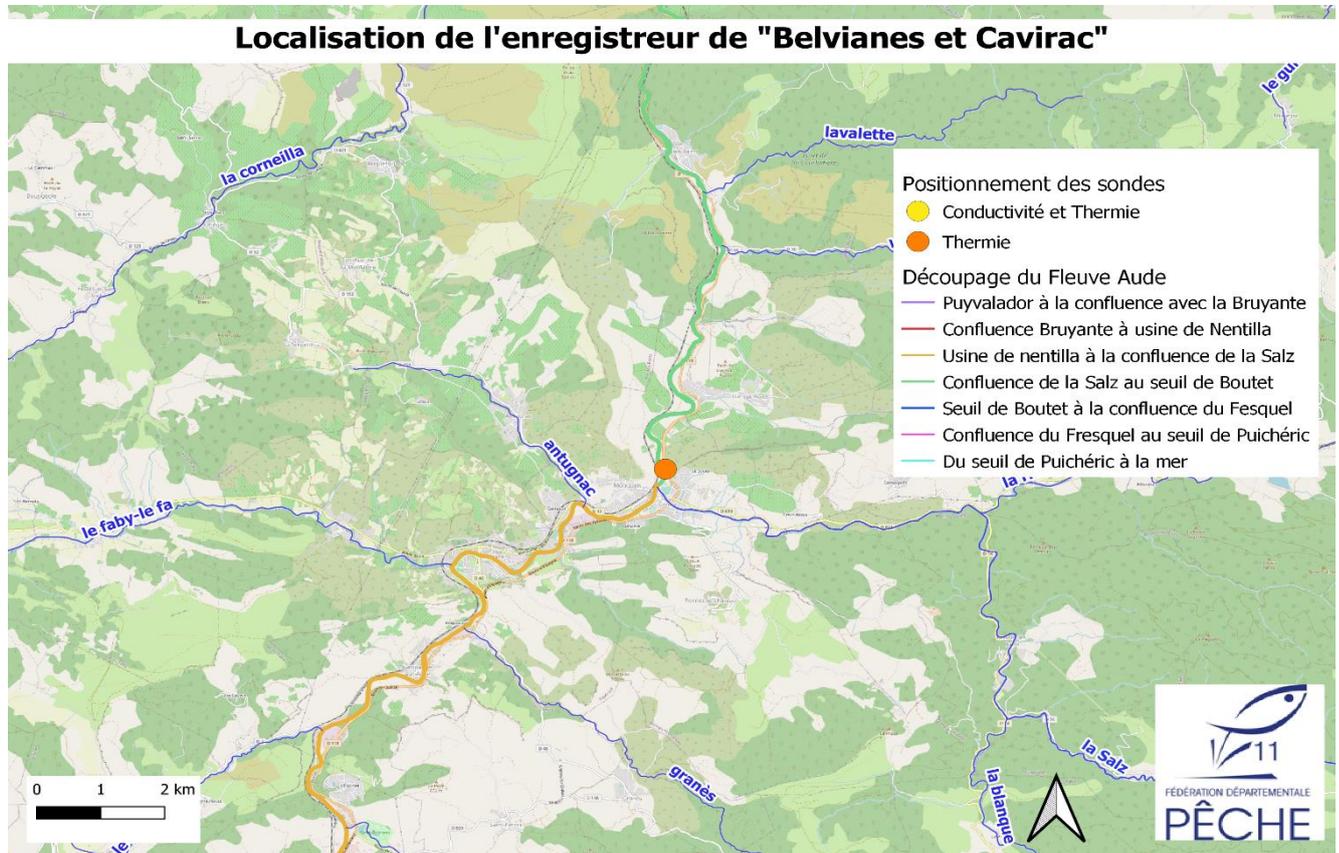


3. Du 01/09/2020 au 10/09/2020 : le phénomène de réchauffement induit par les lâchers (conductivités basses) tend à être amplifié sur cette période.



2.4. Enregistrements thermiques à hauteur de Couiza :

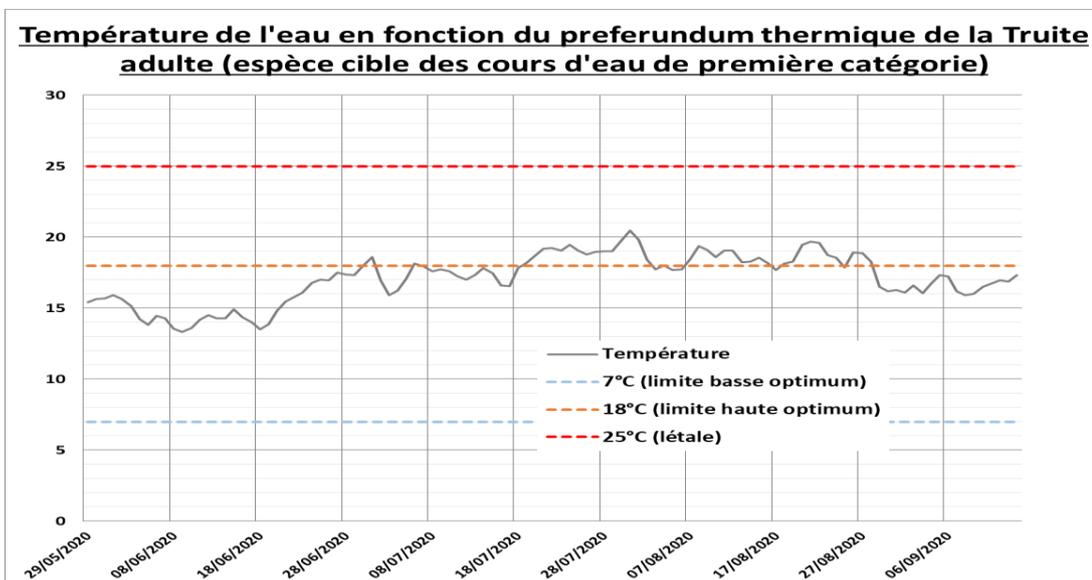
Les mesures thermiques associées à la sonde de Couiza ont pour objectif de fournir des indications concernant l'influence des apports de la Salz, principal « affluent chaud » de l'Aude dans sa haute vallée. D'un point de vue purement biologique, cette confluence marque une transition entre un domaine piscicole typiquement salmonicole (peuplements largement dominés par les salmonidés) et un domaine intermédiaire caractérisé par une augmentation significative des peuplements de cyprinidés d'eaux vives (Vairon, Vandoise, Chevesne, Goujon, ...).



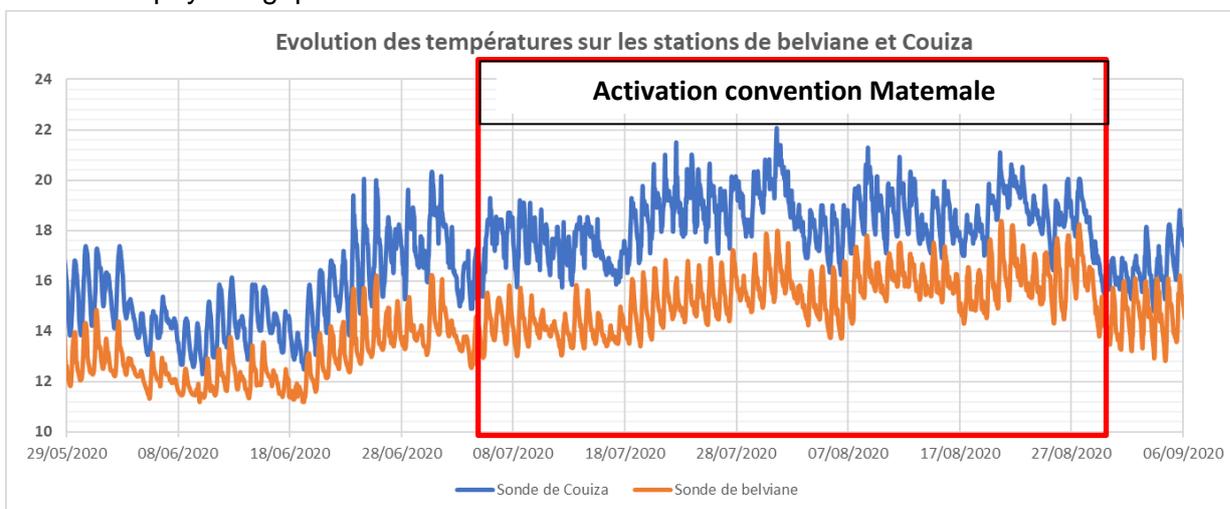
Analyse générale des données thermiques :

2020	Fiche station macro thermie aude couiza.			
	Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	17.1
	Date fin suivi	14/09/2020		
	Durée (en j)	109		
	Températures élevées	T°C instantanée maximale	22	
		T°C moy jour max	20.4	
		Date T°C maxi journalière	31/07/2020	
		T°C des 30 jours les plus chauds	18.8	
		Date T°C 30 jours les plus chauds	23/07/2020	
	Températures faibles	T°C instantanée minimale	12.3	
		T°C moy jour min	13.3	
		Date T°C min journalière	09/06/2020	
	Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale	9.7	
		Amplitude thermique journalière maximale	5.5	

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude à Couiza est de 17.1°C. La température a atteint au maximum 22°C le 31/07/2020 pour une température moyenne journalière de 20.4°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 5.5°C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 18.8°C à partir du 23 juillet 2020.



Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour la Truite Fario adulte 65.1 % du temps. A contrario, elle dépasse le seuil de confort pour l'espèce considérée 34.9 % du temps ce qui peut induire un état de stress physiologique.



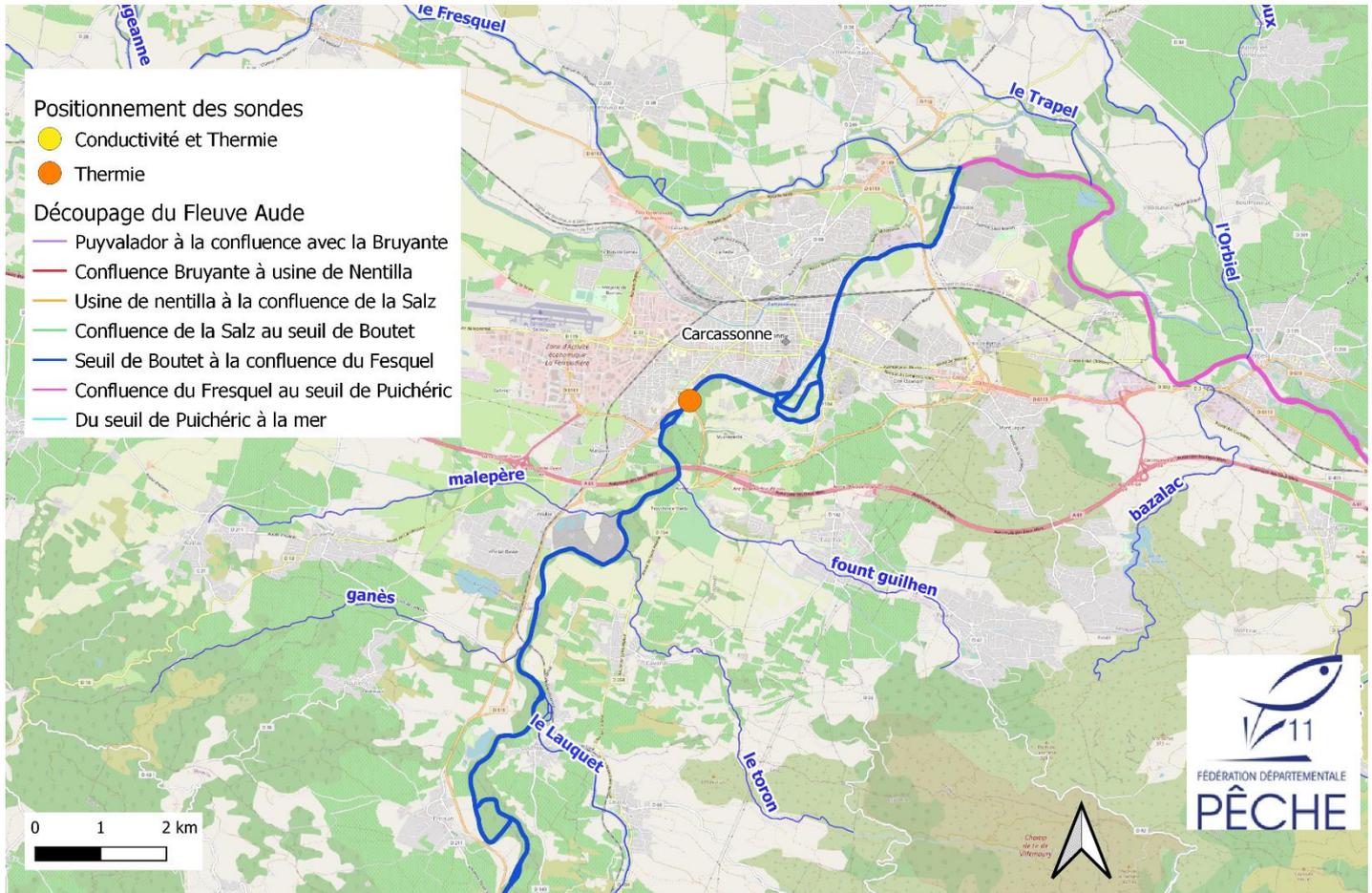
L'analyse comparative des stations de Belviane et Couiza atteste d'un sensible réchauffement de l'eau et d'une tendance à l'amplification des fluctuations journalières.

2.5. Enregistrements thermiques à hauteur de Carcassonne :

Il s'agit de la zone de sortie de massif du fleuve Aude. Ce dernier présente à hauteur de Carcassonne des peuplements piscicoles largement dominés par les cyprinidés rhéophiles (espèce repère : Toxostome). Cependant, les données d'inventaires confirment la présence marginale de Truites Fario et d'Ombres communs dont la colonisation vers l'aval semble attestée et durable.

En amont du point de mesure, le fleuve Aude reçoit les apports du Lauquet dont la tendance au fort réchauffement a été mesurée lors de l'été 2020.

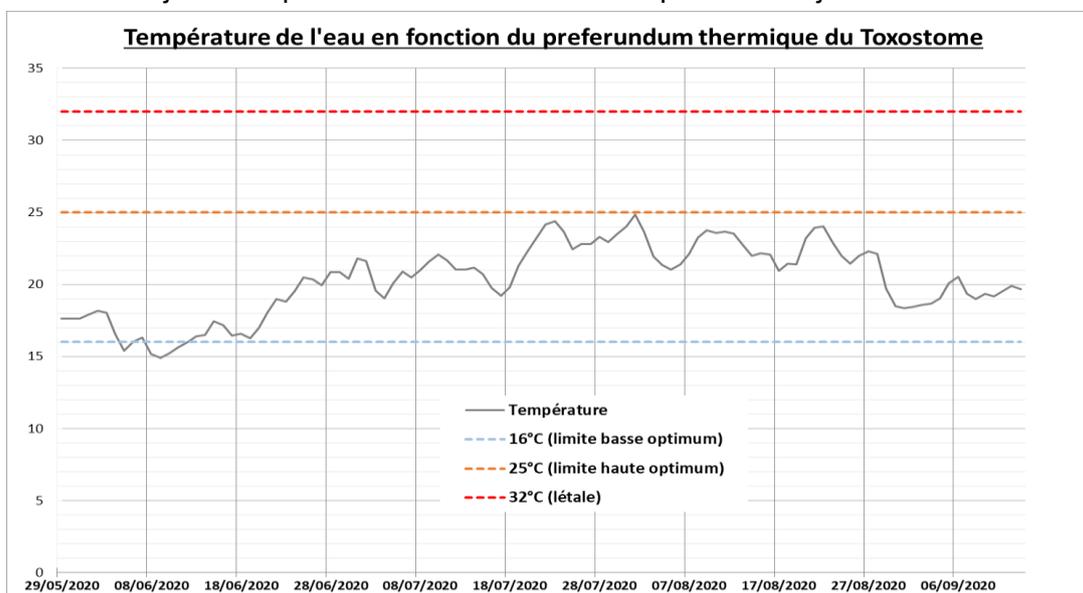
Localisation de l'enregistreur de "Carcassonne Maquens"



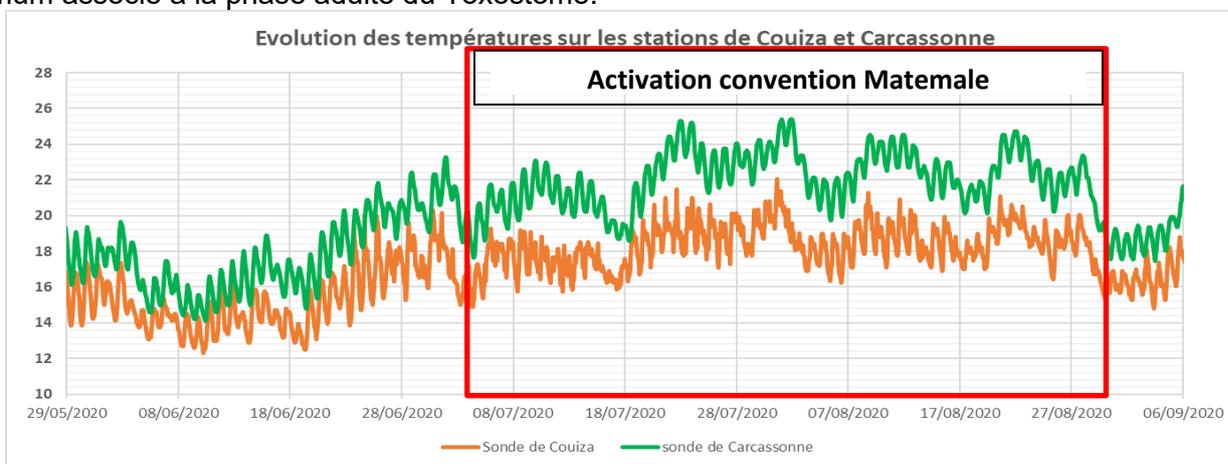
Analyse générale des données thermiques :

Fiche station		macro thermie aude carcassonne.	
Date début suivi	29/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	20.3
Date fin suivi	13/09/2020		
Durée (en j)	108		
Températures élevées	T°C instantanée maximale	25.4	
	T°C moy jour max	24.9	
	Date T°C maxi journalière	01/08/2020	
	T°C des 30 jours les plus chauds	22.8	
	Date T°C 30 jours les plus chauds	19/07/2020	
Températures faibles	T°C instantanée minimale	14.1	
	T°C moy jour min	14.9	
	Date T°C min journalière	09/06/2020	
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale	11.3	
	Amplitude thermique journalière maximale	3.7	

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude à Carcassonne est de 20.3°C. La température a atteint au maximum 25.4°C le 01/08/2020 pour une température moyenne journalière de 24.9°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 3.7°C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 22.8°C à partir du 19 juillet 2020.



Durant l'été 2020, la température de l'eau est optimale pour le Toxostome adulte 95.1 % du temps. Il est cependant possible de noter que les enregistrements sortent uniquement des limites basses de l'optimum associé à la phase adulte du Toxostome.



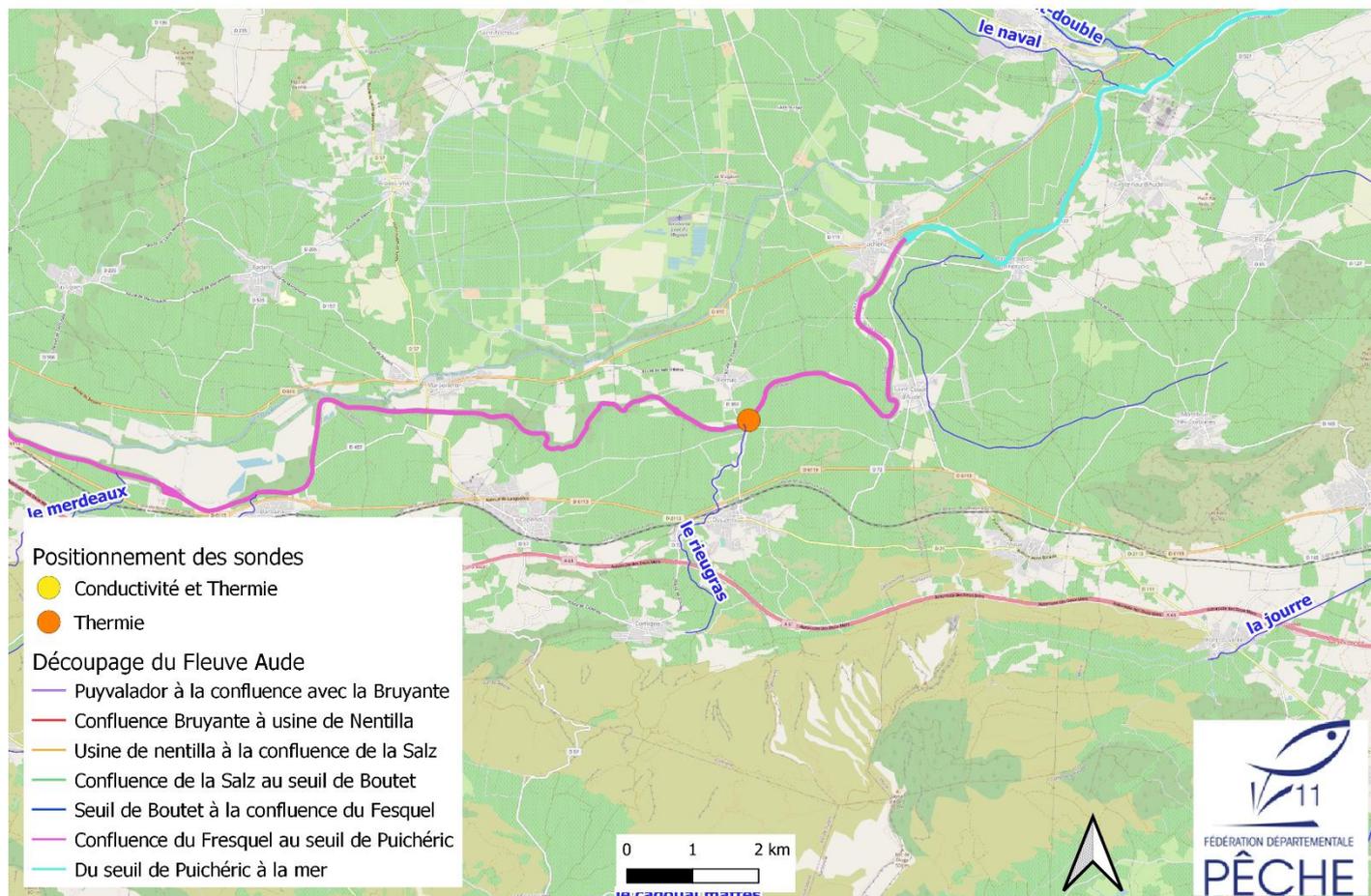
L'analyse comparative des graphiques de Couiza et Carcassonne laisse entrevoir un important réchauffement et une tendance au lissage des fluctuations infra-journalières (un seul pic journalier).

2.6. Enregistrements thermiques à hauteur de Pomas :

Sur le secteur de la moyenne vallée de l'Aude, les peuplements piscicoles commencent à afficher des caractéristiques clairement cyprinicoles avec l'émergence d'espèces inféodées aux milieux lenthiques chauds (Brèmes, Carassins Argentés, Carpes communes, Perches Fluviales...). Les cyprinidés rhéophiles restent néanmoins bien représentés en lien avec la présence de nombreux faciès d'écoulements courants. Le cortège de ces derniers constitue les espèces repères de ce contexte piscicole.

La sonde a par ailleurs été positionnée au droit du tronçon court-circuité de la prise d'eau de Marseillette.

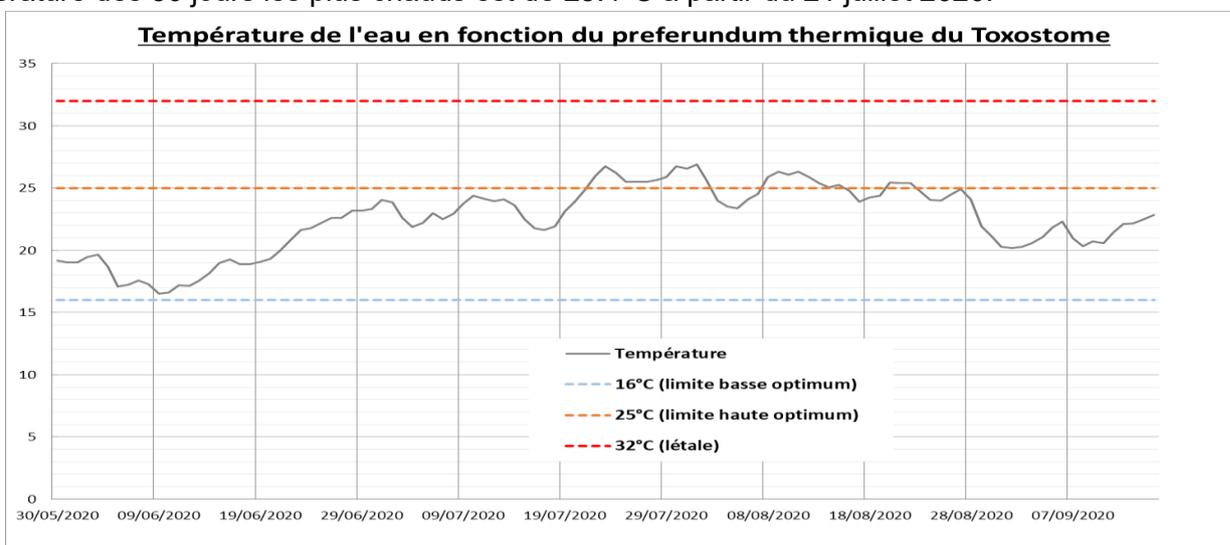
Localisation de l'enregistreur du "Pont de Blomac"



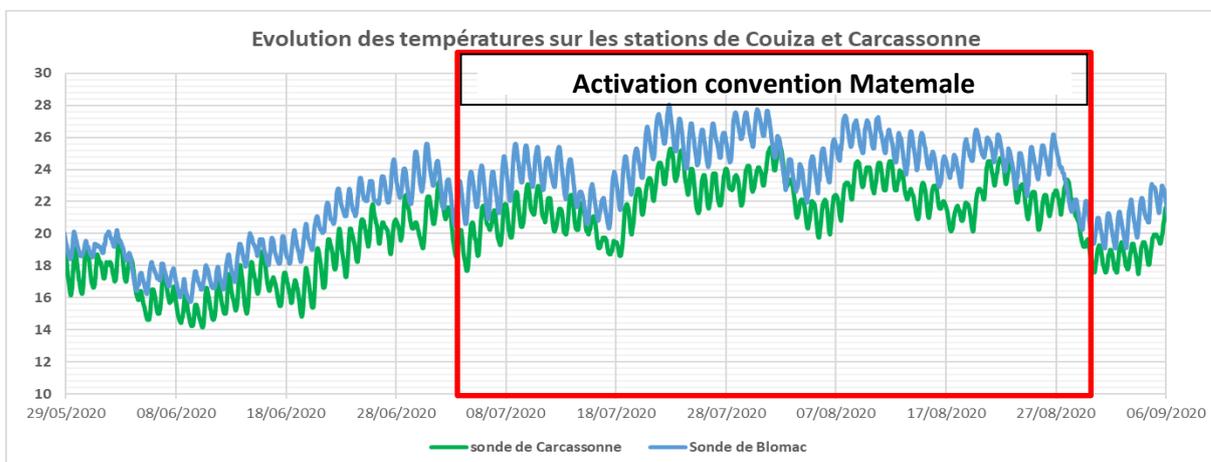
Analyse générale des données thermiques :

Fiche station macro thermie aude blomac.				
2020	Date début suivi	30/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	22.5
	Date fin suivi	15/09/2020		
	Durée (en j)	109		
	Températures élevées	T°C instantanée maximale		28.1
T°C moy jour max			26.9	
Date T°C maxi journalière			01/08/2020	
T°C des 30 jours les plus chauds			25.4	
Date T°C 30 jours les plus chauds			21/07/2020	
Températures faibles	T°C instantanée minimale		15.8	
	T°C moy jour min		16.5	
	Date T°C min journalière		09/06/2020	
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale		12.3	
	Amplitude thermique journalière maximale		3.6	

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude à Blomac est de 22.5°C. La température a atteint au maximum 28.1°C le 01/08/2020 pour une température moyenne journalière de 26.9°C. L'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 3.6°C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 25.4°C à partir du 21 juillet 2020.



Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour le Toxostome adulte 73.1 % du temps. Le graphique met en évidence un dépassement de 28 jours des optimums supérieurs pour la phase adulte du Toxostome. La maximale instantanée de 28.1°C demeure particulièrement élevée et probablement génératrice de stress.



L'analyse comparative des graphiques de Carcassonne et Couiza mettent logiquement en perspective un réchauffement graduel. Les paramètres d'amplitudes journalières semblent se stabiliser.

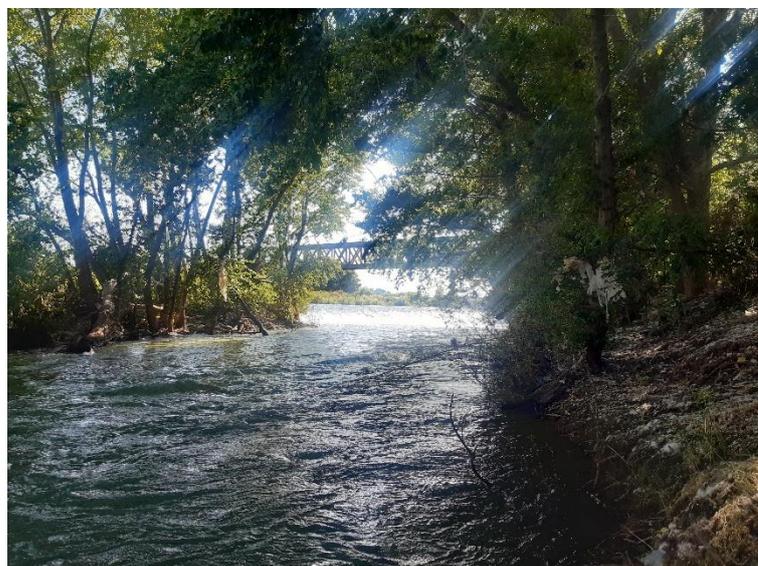
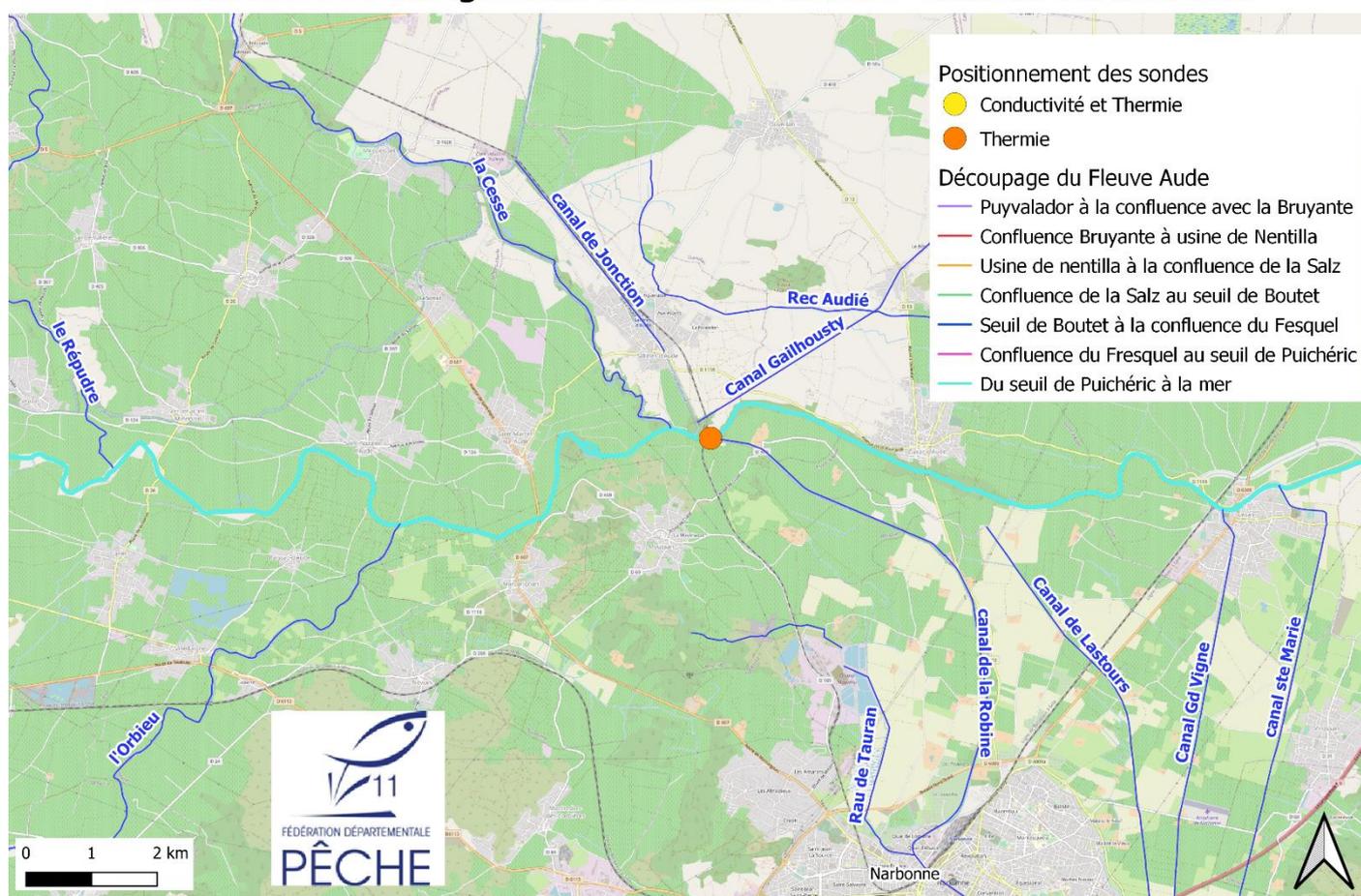
2.7. Enregistrements thermiques à hauteur de Sallèles d'Aude (Moussoulens):

Le site de Moussoulens correspond au point de fermeture du bassin versant du fleuve Aude. En effet celui-ci bénéficie en ce lieu des apports de ses derniers grands affluents (Orbieu et Cesse) ainsi que les éclusées issues du canal du Midi via le canal de Jonction. De par la grande variété de leurs origines, chacune de ces contributions induit potentiellement un niveau thermique différent.

Sur ce secteur, les enjeux piscicoles sont forts avec la présence de migrateurs amphihalins (Aloses de Méditerranée, Lamproie Marine) et le Brochet (espèce repère du contexte piscicole).

Enfin, il est notable que la période de mesure de cette sonde a été écourtée suite à l'enlèvement volontaire de sonde par des tiers en date du 18/08/2020.

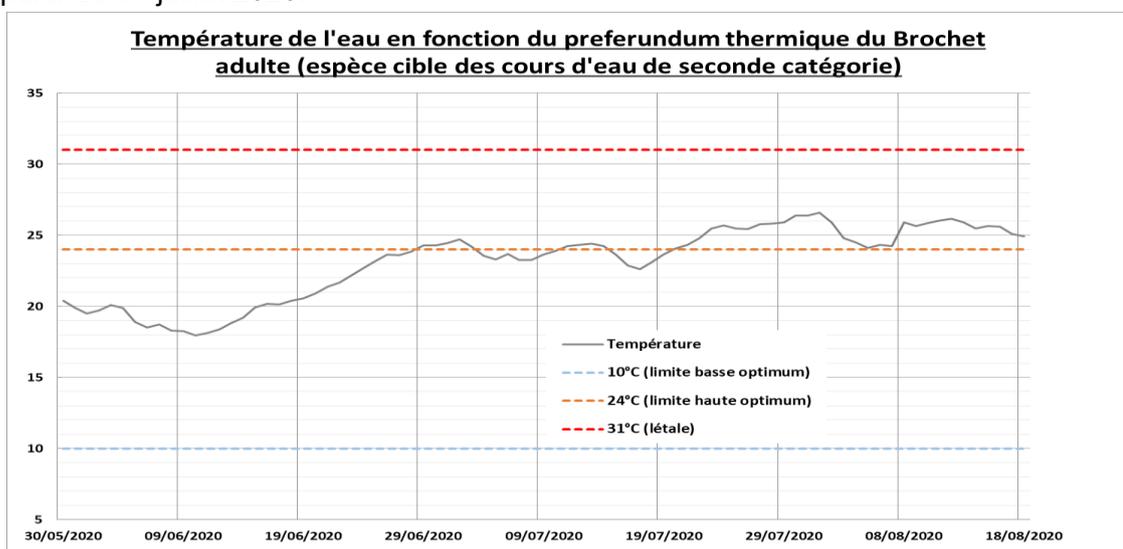
Localisation de l'enregistreur de Sallèles d'Aude "Seuil de Mousoulens"



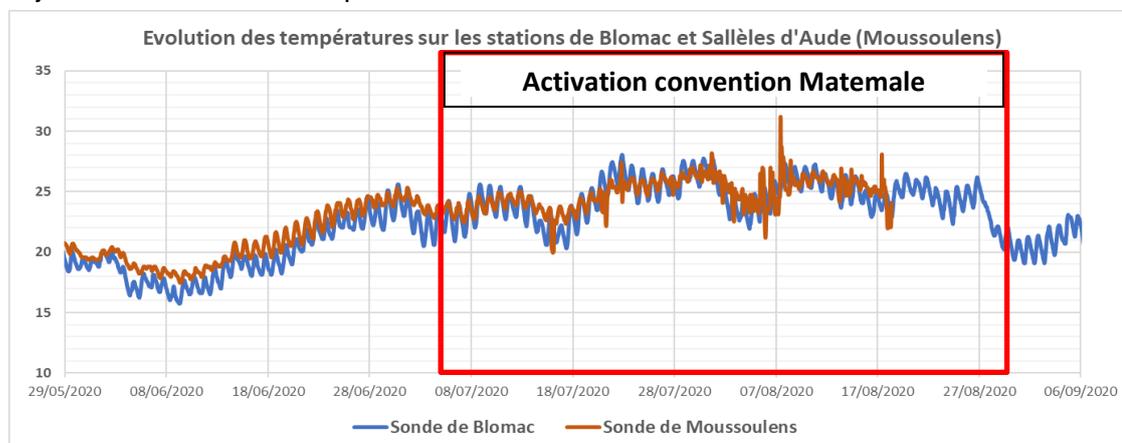
Analyse générale des données thermiques :

Fiche station macro thermie aude moussoulens.					
2020	Date début suivi	30/05/2020	Température moyenne de la période étudiée	23.1	
	Date fin suivi	18/08/2020			
	Durée (en j)	81			
	Températures élevées	T°C instantanée maximale		31.2	
		T°C moy jour max		26.6	
Date T°C maxi journalière			01/08/2020		
T°C des 30 jours les plus chauds			25.7		
Date T°C 30 jours les plus chauds			08/08/2020		
Températures faibles	T°C instantanée minimale		17.4		
	T°C moy jour min		17.9		
	Date T°C min journalière		10/06/2020		
Amplitudes thermiques	Amplitude thermique globale maximale		13.8		
	Amplitude thermique journalière maximale		8.1		

Sur la période considérée, la température moyenne de l'Aude à Moussoulens est de 23.1°C. La température a atteint au maximum 31.2°C le 08/08/2020 (probable exondation de la sonde entre 10h et 15h). La maximale instantanée de 27.9°C relevée le 01/08/2020 peut être considérée. La température maximale journalière est de 26.6°C le 01/08/2020. Hors exondation, l'amplitude thermique journalière maximale sur la période étudiée est de 5.8°C. Enfin, la température des 30 jours les plus chauds est de 25.7°C à partir du 17 juillet 2020.



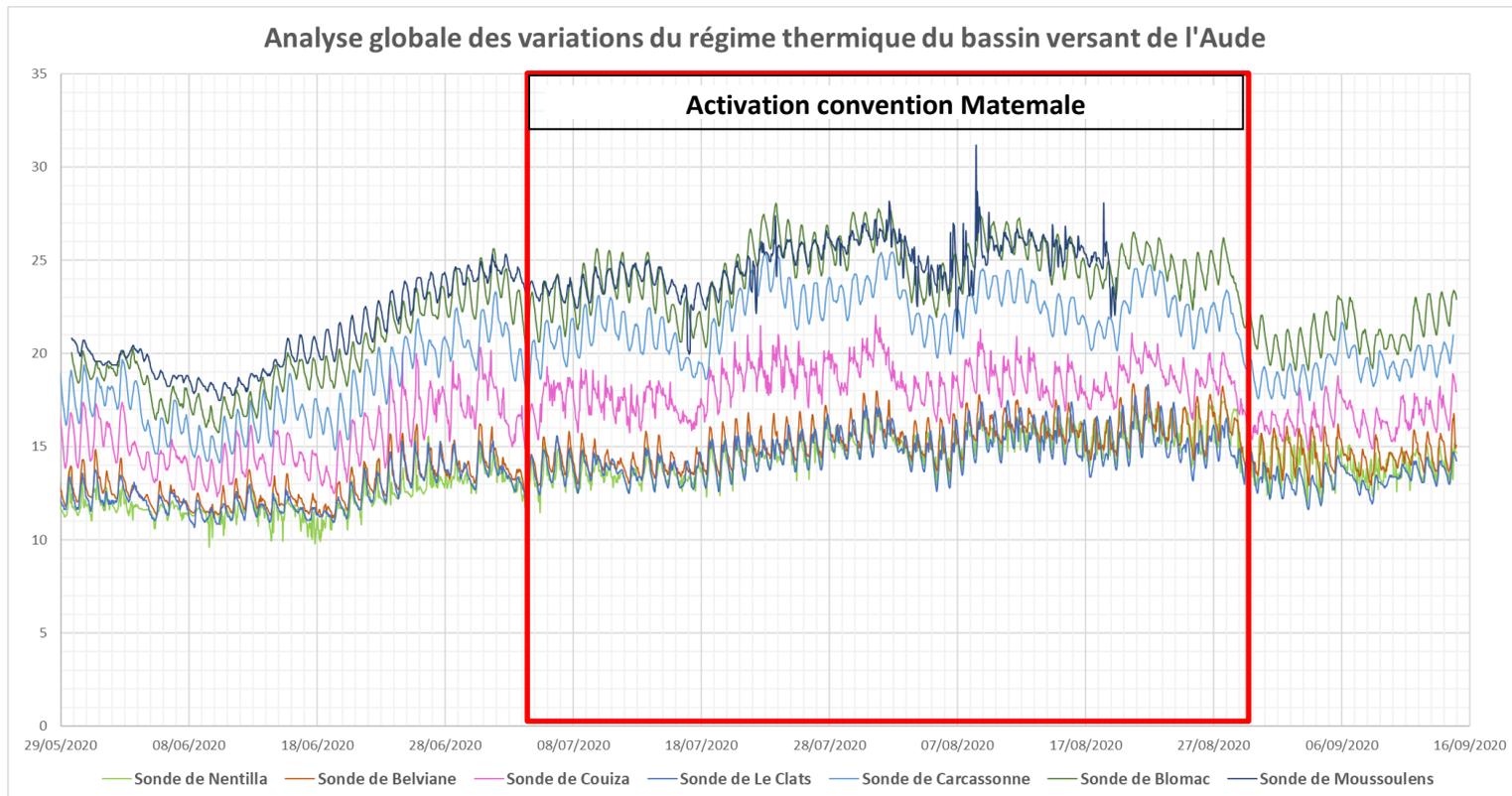
Durant l'étiage 2020, la température de l'eau est optimale pour le Brochet adulte 51.9 % du temps. Sans entrer dans des gammes thermiques extrêmes, l'optimum supérieur pour phase adulte du Brochet est dépassé 40 jours soit 48.1% du temps.



Les graphiques de Blomac et Moussoulens présentent de nombreuses analogies en termes de caractéristiques thermiques. Hors exondations, les amplitudes journalières tendent en moyenne à s'atténuer sur Moussoulens mais de faibles variations infra-journalières sont perceptibles notamment à partir d'août.

3. Bilan et synthèse des suivis sur le bassin de l'Aude en 2020

3.1. Suivis thermiques sur le bassin de l'Aude en 2020 :



D'une manière générale, l'analyse comparative des diagrammes ci-dessus confirme une tendance naturelle au réchauffement graduel de l'eau d'amont vers l'aval selon une variable longitudinale. Ainsi, les écarts entre les courbes du bas (sondes amont) et les courbes du haut (sondes aval) s'amplifient sur les périodes les plus chaudes.

Il est aussi à noter que les grandes inflexions des régimes thermiques de l'ensemble des stations sont surtout pilotées par les tendances climatiques du moment. Il est ainsi possible de percevoir les rafraîchissements notables survenus en Juin et début Septembre 2020, et de façon plus modérée Mi-Juillet et début Aout.

Sur le panel des sept stations, trois grands types de régimes thermiques peuvent être identifiés :

- Les stations amonts (Le Clat, Nentilla, Belviane) se caractérisent par des amplitudes globales moins prononcées et des températures maximales fraîches (inférieures à 19°C).
- Les stations avals (Carcassonne, Blomac et Moussoulens) présentent des amplitudes globales élevées et des maxima élevés (supérieures à 25°C).
- Enfin, la station de Couiza présente des caractéristiques intermédiaires associées à de fortes amplitudes journalières.

Ce constat tend à démontrer un réchauffement rapide des eaux du fleuve Aude à partir de Couiza (mais probablement vers Quillan) jusqu'à Carcassonne.

Ce fait peut être la conséquence de plusieurs facteurs dont les effets cumulés entrent en résonance : apports naturels des affluents (dont la Salz et le Lauquet), restitutions associées au lac de Quillan et effets cumulés des obstacles à l'écoulement (15 seuils entre Belviane et Couiza et 8 entre Couiza et Carcassonne).

En aval de la confluence avec le Fresquel (Blomac) les régimes thermiques n'évoluent que peu jusqu'au seuil de Moussoulens.

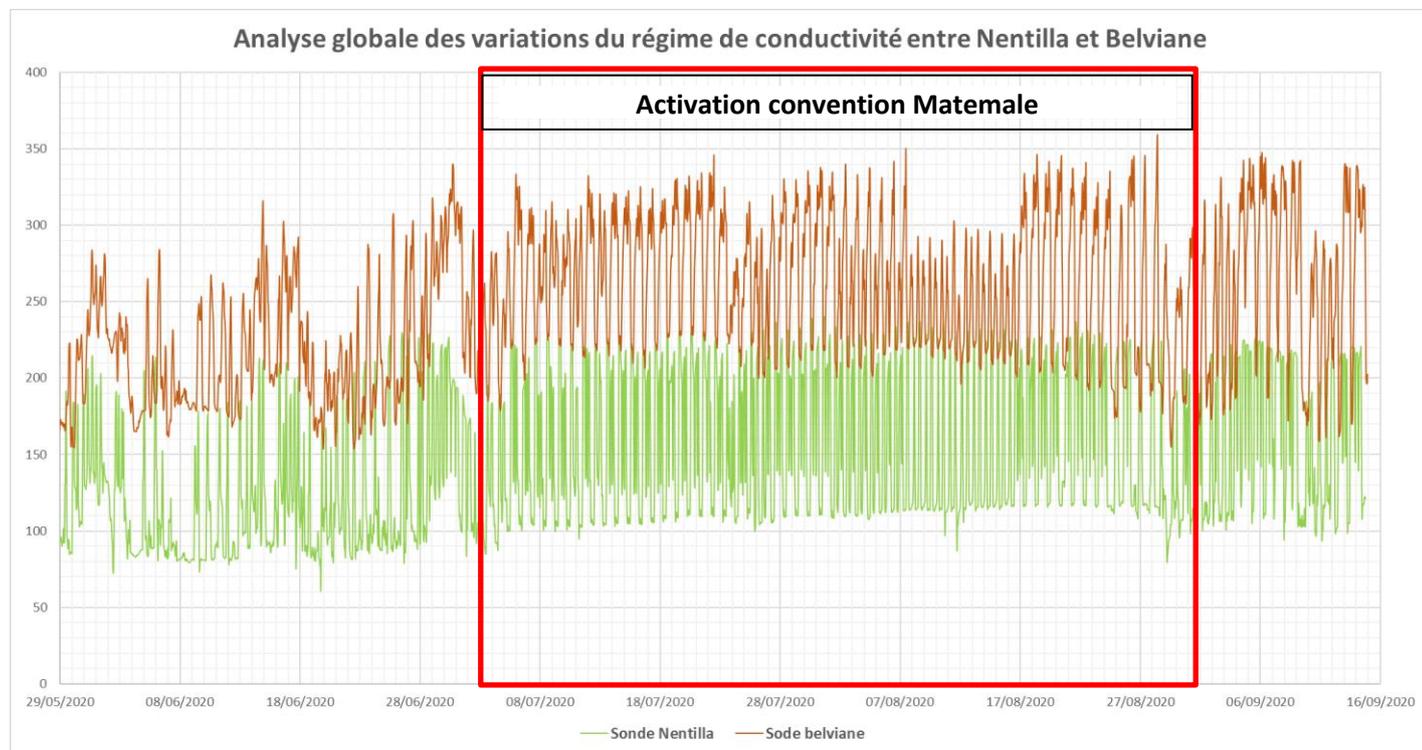
Dans le détail, l'impact lié à la gestion hydraulique réalisée depuis la centrale de Nentilla peut être mis en évidence en fonction de plusieurs éléments :

D'une part, les fluctuations infra-journalières associées aux lâchers sont perceptibles sur les stations de Nentilla, Belviane et Couiza (probablement jusqu'à Limoux). Ces dernières ne sont plus détectables à hauteur de Carcassonne.

D'autre part, des anomalies thermiques ont été mises en évidence sur les enregistrements de Nentilla et de Belviane. Celles-ci se traduisent par des tendances au refroidissement au mois de Juin (1 à 2 °C en moyenne) puis au réchauffement sur les mois d'Aout et Septembre. Cette augmentation peut atteindre 2.5 à 3.5°C en valeur instantanée par rapport à la température du « cours d'eau naturel » (sonde témoin de Le Clat).

Ces deux paramètres peuvent introduire des perturbations significatives dans le cycle de vie des espèces d'intérêt patrimonial présentes sur ce tronçon (Truite Fario et Chabot). Ce sont notamment les stades précoces de développement de ces taxons qui pourraient être les plus impactés sur des moments clés de leur développement. Les manifestations les plus probables sont des retards de développement en Juin et une exposition au stress induisant des mortalités jusqu'à tard dans l'arrière-saison automnale.

3.2. Suivis de conductivité sur le bassin de l'Aude en 2020 :



Les enregistrements réalisés sur les stations de Nentilla et de Belviane mettent en évidence une forte analogie entre les fluctuations mesurées.

De plus, comme démontré précédemment, une relation existe entre les variations du niveau de conductivité et des débits mesurés sur la station limnimétrique de Belviane. Il est ainsi admis que les hausses de débits correspondant au planning prévisionnel journalier des lâcher issus de Nentilla (source EDF) s'accompagnent systématiquement d'une baisse de la conductivité de l'eau.

L'origine de ces fluctuations peut être expliquée par l'hétérogénéité géologique des bassins versants drainés (postulat initial) :

- Bassin versant en amont de Puyvalador drainant un socle cristallin (eaux peu minéralisées et peu conductives).
- Bassin versant en aval de Puyvalador drainant des roches d'origine sédimentaire (eaux carbonatés conductives).

De cette façon, les mesures de conductivités peuvent être considérées comme un marqueur pertinent de la propagation des éclusées issues de Nentilla sur l'axe du fleuve Aude.

La comparaison entre les deux courbes illustre parfaitement l'effet des apports carbonatés naturels (résurgences et affluents intermédiaires) et peut être anthropiques (centrale de Rouze) situés entre les deux stations. Ainsi, les gammes de conductivités mesurées s'avèrent largement supérieures à hauteur de Belviane (100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en moyenne).

Pendant la période d'activation de la convention de Matemale, notamment entre le 08 et le 17 Aout les procédés de temporisation initiés depuis la branche Bruyante semblent limiter significativement les amplitudes journalières.

En dehors de cette période, la capacité inhibitrice des eaux peu conductrices de Nentilla n'est que peu altérée par la dilution avec l'enregistrement de fluctuations infra-journalières dont les oscillations restent globalement voisines.

Ce paramètre semble même s'amplifier sur la station aval à partir de Septembre (désactivation de la convention Matemale) en lien probable avec le tarissement des apports naturels intermédiaires en fin de période estivale (amplitudes journalières maximales : 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à Nentilla et 181 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à Belviane).

L'impact des fluctuations de la composition chimique de l'eau (paramètre conductivité) sur les populations piscicoles est, à ce jour, peu documenté. Il est cependant admis que la minéralisation de l'eau, notamment sa richesse en éléments Calcium et Magnésium dissous (exprimée par la mesure de la dureté totale) est un facteur prépondérant en termes de productivité du milieu.

L'injection répétée de volumes d'eau dépourvus de ces éléments aura donc tendance à induire une baisse de la productivité générale du cours d'eau. Cet aspect est de nature à impacter l'ensemble de la chaîne trophique et notamment ses niveaux supérieurs occupés par la faune piscicole. Les conséquences sur les populations résidentes peuvent se traduire à terme par une diminution des abondance globales (densité d'individus et biomasse).

Cette première campagne de suivi multi paramètres contribue à mettre en lumière une partie des conséquences mesurables de la gestion hydraulique artificielle du fleuve Aude. La forte complexité des interactions entre les facteurs naturels et anthropiques associés au bassin versant est ainsi démontrée.

D'une manière générale, les effets perturbateurs jusqu'alors supposés des lâchers de Nentilla évoqués lors des commissions du SAGE HVA sont aujourd'hui confirmés. Par ailleurs, parmi les mesures envisagés, l'utilisation de la branche Bruyante afin d'en limiter l'impacts semble fonctionner selon des modalités à éclaircir (période du 08/08 au 17/08/2020).

Finalement, une gestion raisonnée de la ressource en eau semble désormais nécessaire afin de limiter les impacts potentiellement délétères sur les nombreuses espèces patrimoniales du Fleuve Aude tant sur sa zone salmonicole que cyprinicole en aval.

Synthèse des éléments bibliographiques :

- Agence française pour la biodiversité – AFB, Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique - Expertise scientifique collective, Novembre 2017, 199 p
- CSP (DR8), Mars 2006. Indice Poisson Rivière (I.P.R).
- CSP 11, 1981, Schéma Départemental à vocation Piscicole 11.
- De Lury (1951). On the planning of experiments for the estimation of fish population. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 18, pp 281-307.
- Elie P. et Girard P., 2014, La santé des poissons sauvages: les codes pathologiques, un outil d'évaluation. Edit. Association Santé Poissons Sauvages ; 286 p.
- FDAAPPMA 11, Plan Départemental pour la Protection du milieu aquatique et la Gestion des ressources piscicoles (P.D.P.G.) du département de l'Aude (Février 2019).
- FDAAPPMA 11, Évaluation de l'impact des crues exceptionnelles d'Octobre 2018 sur les populations piscicoles, Février 2020.
- FDAAPPMA 30 (Octobre 2019) Réseau de suivi thermique de la Fédération de Pêche du Gard (30) Résultats et interprétation du suivi des températures pour l'année 2019, 187 p.
- FDAAPPMA 37 (Septembre 2011), ETUDE DE LA QUALITE THERMIQUE DES COURS D'EAU DE SIX BASSINS VERSANTS D'INDRE-ET-LOIRE, données 2009-2010, 95 p.
- FDAAPPMA 46 (Décembre 2011) ; ETUDE DE L'INFLUENCE THERMIQUE ET PISCICOLE DE SIX PLANS D'EAU SUR LES RUISSEAUX TRIBUTAIRES, suivis thermiques 2011 ; 73 p.
- KEITH P., PERSAT H., FEUNTEUN E., ALLARDI J., 2011. Les poissons d'eau douce de France.
- Mistarz M., 2018. Guide méthodologique pour la surveillance des habitats d'eau courante d'intérêt communautaire en vue du rapportage 2018 (Art. 17 DHFF). Rapport Patrinat 2018-2. UMS Patrimoine naturel - AFB/MNHN/CNRS. 61p.
- Nelva A., Pattee E., Perrin J. F., Persat H., Roux A. L. (1981) Structure et fonctionnement des écosystèmes du Haut-Rhône français. 25. Premières observations sur les populations piscicoles dans le secteur de Brégnier-Cordon. Verh. Internat. Verein. Limnol. 21. 1276-1282.
- Pont D., Delaigue O., Belliard J., Marzin A., Logez M. (2013) Programme IPR+. Révision de l'indice poisson rivière pour l'application de la DCE. IRSTEA, 208p.
- Roland-Meynard M. et al., 2019. Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité. Collection Guides et protocoles ; 190 pages.
- Raymond, J. & Degiorgi, F. (2000). Utilisation de l'ichtyofaune pour la détermination de la qualité des cours d'eau : Guide technique.
- TISSOT, SOUCHON, Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen ; 2011.
- Verneaux J (1977b), Biotypologie de l'écosystème "eaux courantes". Déterminisme approchée de l'appartenance typologique d'un peuplement ichtyologique.