

Fiche action D 1.2
*Observatoire thermique des cours d'eau et
des nappes alluviales*

Rapport annuel 2021-2022

Décembre 2022



72 rue Riquet - Bat A
31000 Toulouse
05 61 62 50 68
eaucea@eaucea.fr
www.eaucea.fr

Action réalisée avec le soutien financier
de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
1.1	L'enjeu ressource en eau potable	5
1.2	L'enjeu écosystémique.....	6
1.3	L'observatoire thermique des cours d'eau et des nappes	8
2	OBJECTIFS.....	9
3	DONNEES DE TEMPERATURE DE L'EAU	10
3.1	Collecte des données	10
3.2	Traitement des données	11
3.3	Résultats et limites du traitement automatique : exemple du Bazacle.....	12
3.4	Recommandations pour les mises à jour de la base de données	14
3.5	Disponibilité des données.....	14
3.6	Proposition de stations supplémentaires	15
4	INDICATEURS.....	19
4.1	Moyennes	19
4.2	Nombres de dépassements de seuils.....	24
4.3	Evolutions temporelles	28
4.3.1	<i>Température de la Garonne au Bazacle et changement climatique</i>	<i>28</i>
4.3.2	<i>Chroniques de températures sur le cours de la Garonne</i>	<i>30</i>
4.3.3	<i>Dépassements du seuil de 25°C (aval).....</i>	<i>31</i>
4.3.4	<i>Dépassements du seuil de 19°C.....</i>	<i>33</i>
4.4	Synthèse.....	34
5	FACTEURS D'INFLUENCE ET MODELISATION.....	36
5.1	Introduction	36
5.1.1	<i>Mécanismes Physiques.....</i>	<i>36</i>
5.1.2	<i>Modélisations statistiques : exemple du projet TIGRE</i>	<i>37</i>
5.1.3	<i>De la source à la rivière</i>	<i>38</i>
5.2	Température de l'air	39
5.2.1	<i>Données.....</i>	<i>39</i>
5.2.2	<i>Relations linéaires</i>	<i>40</i>
5.2.3	<i>Prévision de la température de l'eau</i>	<i>42</i>
6	CONCLUSIONS	43
7	BIBLIOGRAPHIE.....	44
8	ANNEXES	46
	Indicateurs et statistiques aux stations disposant de longues séries de données	46
	<i>Indicateurs sur la Garonne à Toulouse, au Bazacle (données MIGADO).....</i>	<i>47</i>
	<i>Indicateurs sur la Garonne à Carbonne (données MIGADO).....</i>	<i>48</i>
	<i>Indicateurs sur la Garonne à Valentine (données MIGADO).....</i>	<i>49</i>
	<i>Indicateurs sur la Garonne à Loures-Barousse (données MIGADO).....</i>	<i>50</i>
	<i>Indicateurs sur la Pique à Marignac (données MIGADO).....</i>	<i>51</i>
	<i>Indicateurs sur la Pique à Cier-de-Luchon (données MIGADO)</i>	<i>52</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse (gauche) et à Malause (droite). Source : thèse de Kevin Larnier, 2010.	5
Figure 2. Tolérance des espèces piscicoles à la température de l'eau, au stade adulte et au stade juvénile Les droites orange matérialisent les seuils de 19°C et 25°C. Source : projet TIGRE https://thermie-rivieres.inrae.fr/ , s'appuyant sur de nombreuses études antérieures : Frisk et al. (2012), Tissot & Souchon (2010), Mallet et al. (1999), Casselman et Lewis (1996), Elliott & Elliott (1995), Elliott et al. (1994), Persat (1988), Elliott (1981).	7
Figure 3 : Comparaison des caractéristiques thermiques du ruisseau de Vaucorniau (dans le Parc Naturel Régional du Morvan), avec des mesures toutes les 30 minutes (Durllet 2009).	8
Figure 4. Station de suivi de température par producteur de données. NB : certaines stations sont très proches (par exemple station MIGADO et RSA au Bazacle, à Toulouse).	11
Figure 5. Moyenne journalière de la température de la Garonne mesurée au Bazacle (Toulouse) par les sondes de températures gérées par MIGADO (orange) et par le Conseil départemental de Haute-Garonne (RSA, bleu).	13
Figure 6. Températures de l'eau de la Garonne en Juillet-Aout 2003 au Bazacle, à Toulouse, mesurées par les sondes MIGADO et RSA CD31.	13
Figure 7. Moyenne journalière de la température de la Garonne mesurée au Bazacle (Toulouse) par les sondes de températures gérées par MIGADO (orange) et par le Conseil départemental de Haute-Garonne (RSA, bleu). Zoom sur l'année 2009.	14
Figure 8. Station de mesures de température de l'eau par producteur. La taille des symboles indique le nombre d'années avec des données continues ou presque de Juin à Septembre (et donc utilisables pour le calcul d'indicateur de température).	15
Figure 9. Stations thermiques existantes sur le territoire (en noir) et zones où des manques sont identifiés (ovales bleus). Le choix des stations supplémentaires à installer est à discuter et décider en concertation avec les membres du groupe de travail.	17
Figure 10. Stations de mesure de température de l'eau issues de différents producteurs et stations hydrométriques. La localisation des sondes de la Fédération de Pêche d'Ariège est donnée à titre indicatif, car ces données n'ont pas été utilisées dans ce rapport.	18
Figure 11 Moyenne interannuelle des températures de l'eau du jour le plus chaud de chaque année $\langle MT_{1j} \rangle$ (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre)	22
Figure 12. Moyenne interannuelle des températures de l'eau des 7 jours consécutifs les plus chauds de chaque année $\langle MT_{7j} \rangle$ (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre).	23
Figure 13. Moyenne interannuelle des températures de l'eau des 30 jours consécutifs les plus chauds de chaque année $\langle MT_{30j} \rangle$ (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre).	24
Figure 14. Nombres de journées où la température moyenne mesurée dépasse 19°C. Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquant sur ces 4 mois) – (rappel : les années utilisées sont différentes d'une station à l'autre). ..	25
Figure 15. Nombres de journées où la température maximale horaire mesurée dépasse 19°C. Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquants) – (rappel : les années utilisées sont différentes d'une station à l'autre).	26

Figure 16. Nombres de journées où la température maximale horaire mesurée dépasse 25°C. Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquants) – (rappel : les données couvrent des périodes différentes d'une station à l'autre)	27
Figure 17. Température de l'eau au Bazacle (données MIGADO) en moyenne sur les mois de Juillet-Septembre (gauche) et en moyenne annuelle (droite). Les années avec plus de 2 jours manquant en Juillet-Septembre sont exclues de la figure de gauche et celles avec plus de 5 jours manquants sur l'année sont exclues de la figure de droite.	29
Figure 18. Température de l'air à Toulouse-Blagnac (moyennes annuelles calculée à partir de données journalières Météo-France).	29
Figure 19. Température de l'air à Saint-Girons (données 1950-2015 : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique / Météo-France) sur la période 1994-2015 (gauche) et sur la période complète pour laquelle les données sont disponibles (1950-2015). L'équation est celle de la courbe de tendance statistiquement significative.	29
Figure 20. Série temporelle des températures journalières de l'eau de la Garonne d'amont en aval : à Loures-Barousse, Valentine et Carbone.	30
Figure 21. Température moyenne annuelle de l'eau de la Garonne d'amont en aval : à Loures-Barousse, Valentine et Carbone.	31
Figure 22. Nombre de dépassements du seuil de 25°C (en moyenne journalière) au Bazacle (données MIGADO). Les droites en pointillés indiquent les valeurs moyennes sur la période 1991-2021 (6,7 et 10,5 jours de dépassement respectivement en moyenne journalière et en valeur maximale).	31
Figure 23. Nombre de dépassements du seuil de 25°C en moyenne journalière (idem Figure 22 mais avec des données de 4 stations de mesure différentes).	32
Figure 24. Nombre de journées où la température maximale de l'eau dépasse 25°C (données RSA et MIGADO au pas horaire).	32
Figure 25. Stations sélectionnées pour les dépassements de 19°C de moyenne journalière.	33
Figure 26. Nombre de dépassements du seuil de 25°C pour une sélection de stations de mesure de température de l'eau.	34
Figure 27. Régions du territoire en termes de thermie des cours d'eau et des enjeux associés.	35
Figure 28 : Echanges hydrologiques et thermiques contrôlant la température de l'eau dans les rivières et devant être prises en compte dans les modèles détaillés (Dugdale et al., 2017).	36
Figure 29. Température de l'eau des sources de la Courate et de la Fontaine Blanche, ainsi que du puits de Pitarlet (données CD09).	38
Figure 30. Température de l'Arac à Biert (moyennes journalières, données Naiades / OFB / TIGRE).	38
Figure 31. Température de l'air en Juillet-Aout (moyenne 2000-2021, données SAFRAN : Météo France, Life/Climat) et température de l'eau aux stations de mesures, pendant les 30 jours les plus chauds de chaque année où un été quasi-complet est disponible (années de mesures variables d'une station à l'autre). Les stations de mesures Météo-France sont indiquées en vert.	40
Figure 32. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse le jour J (moyenne journalière) en fonction de la température moyenne de l'air sur 8 jours (J-7 à J inclus). Données Météo-France (station Toulouse-Blagnac) et MIGADO (température de l'eau au Bazacle). Données 2008-2020 (avec des données manquantes cependant).	41
Figure 33. Température de l'eau de l'Arac à Biert (Données Naiades / TIGRE) en fonction de la température de l'air issue du modèle SAFRAN (Météo-France Life/Climat) moyennée sur les 3 jours précédents (J-2 à J). Les données utilisées couvrent la période 2008-2018.	41

1 INTRODUCTION

En 2010, une thèse sur la température de l'eau de la Garonne (Larnier, 2010) confirmait l'augmentation tendancielle, plus marquée l'été qu'en moyenne annuelle, avec à Toulouse une hausse estivale de +2,8°C de 1978 à 2005, soit **environ +1°C tous les 10 ans** (figure 1).

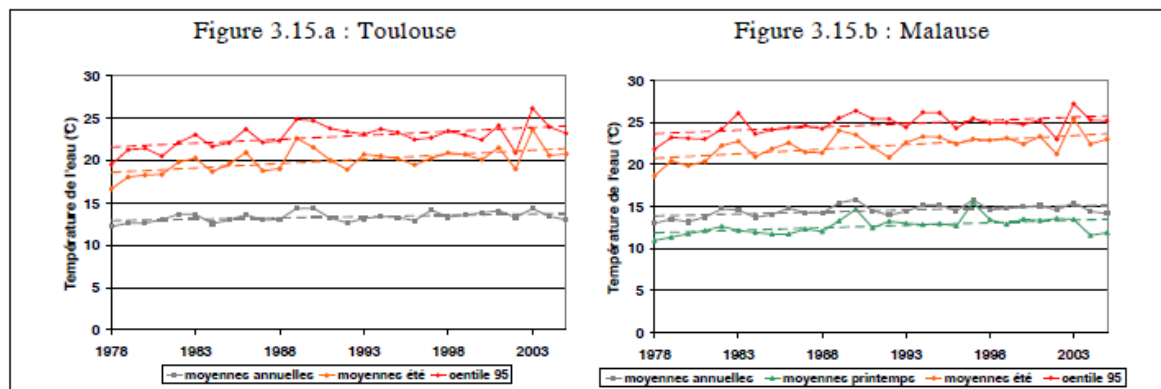


Figure 1. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse (gauche) et à Malause (droite). Source : thèse de Kevin Larnier, 2010.

Or, la température de l'eau est un paramètre essentiel du fonctionnement écologique des cours d'eau, des estuaires et du littoral, mais aussi un paramètre limitant pour la production d'eau potable. Les enjeux associés sont donc majeurs et le dérèglement climatique déjà constaté (se traduisant notamment par la hausse des températures) pourrait lourdement modifier les équilibres actuels. C'est donc, au côté de la question quantitative, un élément clé de la caractérisation de la ressource en eau qui intéresse directement le Projet de Territoire Garon'Amont (PTGA).

En effet, les rapports successifs du Groupe d'Expert Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) montrent que la hausse des températures de l'air observée à l'échelle planétaire est liée aux activités humaines et va continuer dans le futur (si les activités humaines continuent à être émettrices nettes de gaz à effet de serre), entraînant donc, toutes autres choses égales par ailleurs (végétation, hydromorphologie etc.) une augmentation de la température des cours d'eau due au réchauffement climatique. Plusieurs autres facteurs peuvent également expliquer cette hausse de la température de l'eau : il peut s'agir par exemple de modification hydromorphologique, d'une dégradation des échanges avec la nappe, d'une modification de l'ombrage.

1.1 L'enjeu ressource en eau potable

Une illustration frappante de ces dernières années est que l'alimentation en eau potable de la métropole toulousaine a été plus certainement menacée par les canicules estivales et les températures trop élevées de la Garonne (supérieures à 25°C au niveau du captage) que par une indisponibilité volumétrique. Les enjeux sont en partie technique, avec une plus grande difficulté dans les process de décantation, mais essentiellement sanitaires avec des risques accrus de développements bactériens dans les réseaux ou de relargages de chlorure de vinyle monomère (CVM) dans les réseaux PVC antérieurs à 1980. Cette situation, qui se produit plusieurs jours par an à Toulouse, est amenée à devenir plus fréquente dans le futur sous l'effet du dérèglement climatique.

1.2 L'enjeu écosystémique

Par ailleurs, l'augmentation de la température de l'eau des rivières a aussi des impacts importants sur les écosystèmes aquatiques. Ainsi, il est essentiel de connaître la température des rivières et les facteurs qui l'influencent afin de déterminer les moyens d'action.

En premier lieu, la concentration de l'eau en oxygène dissous diminue quand la température de l'eau augmente. Une eau à 10°C à saturation (c'est-à-dire à l'équilibre avec la pression atmosphérique) présente une quantité d'oxygène dissous de 10,9 mg/l, alors qu'une eau à 20°C aura une concentration de 8,8 mg/l. D'autre part, en milieu naturel, l'élévation de la température aura tendance à augmenter l'activité de dégradation de la matière organique par les micro-organismes présents dans le milieu aquatique. Or cette activité consomme de l'oxygène d'autant plus vite que la température augmente. Cet effet ciseaux peut localement induire des zones peu oxygénées (dans les fosses et plans d'eau peu renouvelés par exemple) néfastes au bon état des eaux et à la vie aquatique.

En second lieu, c'est tout l'écosystème qui évolue en fonction de l'ambiance thermique. L'augmentation de la température et les modifications climatiques vont avoir des impacts multiples sur la physiologie, sur la phénologie, sur la santé et sur la distribution des espèces. Dans les systèmes fluviaux les communautés se modifient selon un gradient amont/aval lié aux conditions du milieu et notamment à la température, ainsi qu'à la nourriture disponible (« River continuum concept »). Pour les macro-invertébrés benthiques, une étude montre que 30% de la variabilité des Ephéméroptères, des Plécoptères, des Trichoptères et des Coléoptères est liée à la température estivale (A. Haidekker et D. Hering, 2008). Pour les poissons, diverses études ont été réalisées pour tenter de prévoir les modifications de distributions des espèces et des communautés selon les prévisions d'augmentation de température. Concrètement les zones favorables aux poissons tels que la truite ou le chabot régresseront vers les zones de montagnes. Au contraire, d'autres espèces thermophiles coloniseront ces nouveaux milieux. La figure 2 indique pour différentes espèces piscicoles les optimums de température. Ainsi, par exemple la Truite Fario adulte est en situation de stress physiologique au-delà de 19°C, notamment si cette température se maintient au-delà de 7 jours, avec un seuil létal de 25°C. La Garonne est le dernier fleuve d'Europe de l'ouest à abriter les 8 espèces de grands migrateurs amphihalins. La température influe sur leur comportement migratoire et une fois arrivés aux zones de frayères, la température doit être adéquate pour notamment la vie des œufs. Pour plus de détails, voir Chanseau et al. (2008) et Baptist et al (2014).

Figure 2. Tolérance des espèces piscicoles à la température de l'eau, au stade adulte et au stade juvénile. Les droites orange matérialisent les seuils de 19°C et 25°C.

Source : projet TIGRE

<https://thermie-rivieres.inrae.fr/>,

s'appuyant sur de nombreuses études antérieures : Frisk et al.

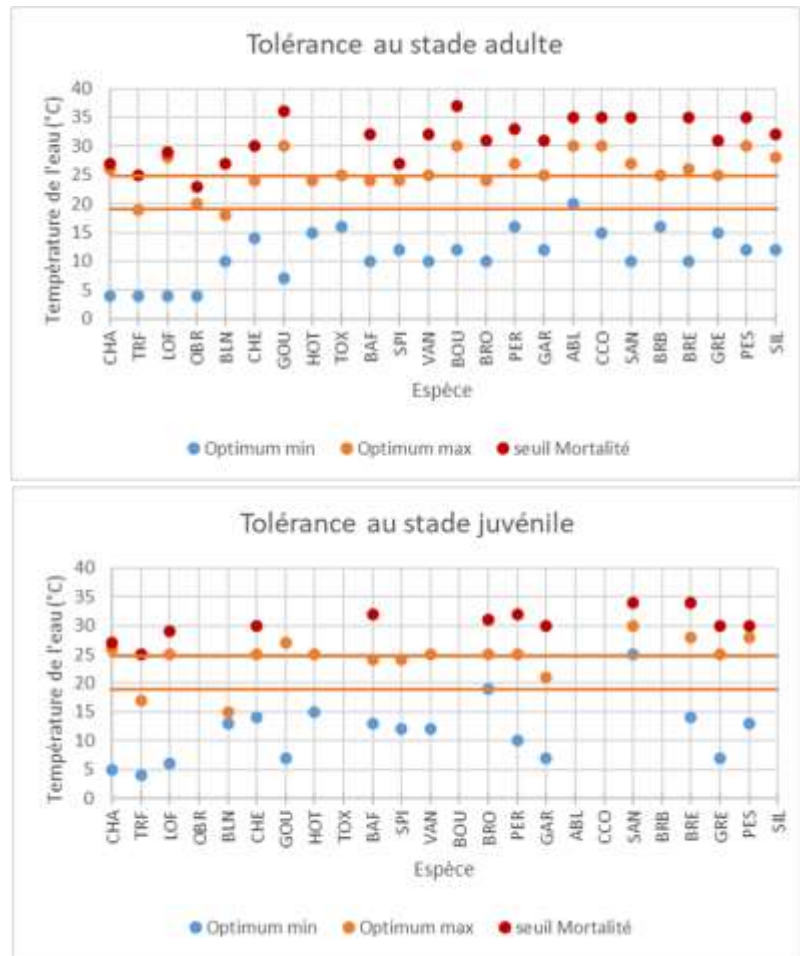
(2012), Tissot & Souchon (2010),

Mallet et al. (1999), Casselman et

Lewis (1996), Elliott & Elliott (1995),

Elliott et al. (1994), Persat (1988),

Elliott (1981).



1.3 L'observatoire thermique des cours d'eau et des nappes

Le suivi de ces phénomènes tendanciels est donc considéré comme une information nécessaire à l'adaptation du territoire aux changements climatiques. Observer, comprendre et informer constituent les fondements du travail de l'observatoire thermique des cours d'eau. Les premiers éléments de diagnostics conduisent à travailler dès l'origine du projet sur une vision élargie aux nappes d'accompagnement qui pourraient jouer un rôle dans la thermorégulation des cours d'eau.

... avec les acteurs impliqués...

Compte tenu des enjeux, la mise en réseau de plusieurs acteurs du territoire est une nécessité avec en particulier une coopération forte des fédérations de pêche, observatrices attentives des écosystèmes aquatiques, et des producteurs d'eau potable immédiatement intéressés par la qualité des eaux brutes et sans doute à termes par des outils de prévision. La DREAL de Bassin est également associée au projet et prévoit de mettre en place une base de données pour la bancarisation et la valorisation des données de température de l'eau. Les données issues de l'observatoire thermique pourront alimenter cette base de données (sous réserve d'accord des producteurs de données).

... pour définir des actions d'atténuation ou d'accompagnement

L'ambition est enfin de préparer des pistes d'actions pour amortir les effets défavorables sur les milieux ou sur les usages. En effet, l'hydromorphologie des cours d'eau, la présence de végétation riveraine, les connexions avec les nappes peuvent être mobilisées au service de cette atténuation. L'étude de Marteau et al. (2019) montre par exemple les effets de la ripisylve sur la température des cours d'eau dans la plaine de la Bresse, ainsi que l'importance des caractéristiques de l'écoulement (par exemple, les seuils génèrent une stratification à l'amont avec en conséquence un échauffement marqué en surface pendant les journées d'été et un gradient vertical de température). L'influence de la ripisylve sur la température de l'eau a également été caractérisée par Durllet dans le cadre d'une étude réalisée sur un ruisseau du Morvan (figure 3).

Vis-à-vis de la gestion quantitative, le débit n'est pas nécessairement un facteur de gestion de la température des cours d'eau. Les zones exondées, lorsqu'elles existent, exposent les cailloux qui emmagasinent la chaleur et in fine réchauffent l'eau. Les lâchers d'eau influencent les débits mais ne réduisent pas ce phénomène. En revanche, le débit peut contribuer à atténuer les conséquences qualitatives de l'augmentation de température (par effet de dilution) et donc orienter une stratégie de placement de l'eau (l'impact du débit sur la température de l'eau n'est pas discuté dans ce rapport mais le sera dans le rapport spécifique sur la modélisation courant 2023).

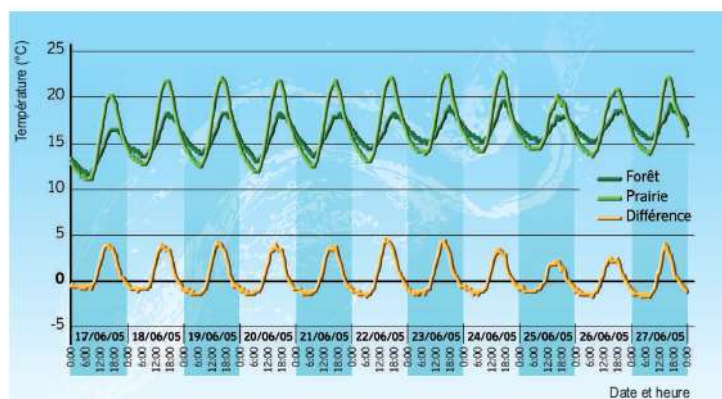


Figure 3 : Comparaison des caractéristiques thermiques du ruisseau de Vaucorniau (dans le Parc Naturel Régional du Morvan), avec des mesures toutes les 30 minutes (Durllet 2009).

2 OBJECTIFS

Les objectifs généraux de l'observatoire thermique sont tout d'abord :

- **Connaitre** la température de l'eau des rivières dans le périmètre du PTGA et ses liens avec la température de l'air ainsi que d'autres paramètres ;
- **Définir des indicateurs** clés pour différents objectifs (biologie/écosystèmes et eau potable notamment) ;

Rendre l'information accessible et compréhensible, que ce soit pour des scientifiques ou bien pour du grand public.

Et à plus longs termes, sur la durée du projet :

- **Prévoir** l'évolution de la température de l'eau *localement* (au niveau de points de mesures) sur des durées de quelques jours ;
- **Améliorer la compréhension** des mécanismes grâce à un **démonstrateur**_(site pilote instrumenté) dont la portée serait aussi pédagogique (choix du site et de l'instrumentation à définir en 2023)
- **Analyser les impacts du changement climatique sur la température des cours d'eau (besoin de longues chroniques de données).**

L'observatoire thermique apporte également une contribution à certains des objectifs de d'autres programme locaux existants (PGE, SDAGE et SAGE). En développant un suivi plus fréquent et plus dense de la température de l'eau sur la vallée de la Garonne et notamment son chevelu hydrographique, l'observatoire contribue à **renforcer le réseau de mesure de la qualité de l'eau**, participant ainsi à la disposition I.16 du SAGE vallée de la Garonne.

Dans ce rapport annuel, nous présentons tout d'abord **les données de température** de l'eau collectées jusqu'à présent (année 2021) ainsi que les traitements mis en place pour leur utilisation (partie 3). Nous illustrons également à l'aide de cartes, la couverture spatiale du territoire et les disparités qui existent entre certains cours d'eau. Ces disparités peuvent être de natures différentes : couverture géographique, temporalité, disponibilité des données. En effet, pour certaines stations, des mesures relativement anciennes ont pu être collectées, tandis que d'autres stations n'ont été installées que tout récemment. Certains secteurs ne présentent aucune station de mesure. Pour ces derniers, nous proposons d'installer des sondes supplémentaires. Nous présentons ensuite dans la partie 4 **des indicateurs thermiques clés** pour les enjeux piscicole et de température de l'eau, puis étudions (partie 5) les **principaux facteurs influençant la température de l'eau** des rivières (température de l'air, température de l'eau en amont, débit, ...), dans une optique de **modélisation statistique** et de prévision. Les possibilités et limites de ces modèles seront analysées et des améliorations seront proposées en fonctions des objectifs de prévision.

Un autre objectif est d'inscrire d'ores et déjà le réseau de suivi thermique Garon'Amont à une échelle plus large en prenant part à la réflexion, conduite par la DREAL de bassin, sur la mise en place d'un réseau sur le Bassin Adour-Garonne. Cette démarche préfigure également la constitution, à moyen terme, d'un réseau national en cours de lancement et qui sera géré par l'Office Français de la Biodiversité.

3 DONNEES DE TEMPERATURE DE L'EAU

Afin de pouvoir suivre l'évolution de la température de l'eau sur le long terme et d'identifier ensuite des leviers d'action, il est nécessaire de mettre en place un **réseau d'observation** et de **bancariser les données de température de l'eau dans une base de données**. Nous présentons dans cette partie les données qui ont pu être obtenues par le Conseil Départemental de Haute-Garonne, dans le cadre du Projet de Territoire Garonne Amont (PTGA), ainsi que le traitement semi-automatisé des données que nous avons effectué en vue de leur intégration à terme dans **une base de données structurée par la DREAL Occitanie** (avec pour objectif de devenir *in fine* une base de données nationale de l'Organisme Français de la Biodiversité - OFB).

3.1 Collecte des données

Les données de température de l'eau ont été récupérées auprès de différents producteurs / sources de données, répartis sur le territoire (figure 4) :

- le Réseau de Stations d'Alerte (RSA) géré par le Conseil Départemental de la Haute-Garonne (4 stations) ;
- le Réseau de Stations d'Alerte (RSA) géré par Véolia (2 stations) ;
- le portail Naiades, réseau national de données sur la qualité des eaux de surface (12 stations) ;
- la Fédération de Pêche de Haute-Garonne (9 stations) ;
- la Fédération de Pêche des Hautes-Pyrénées (2 stations) ;
- l'association Migrateur Garonne Dordogne Charente Seudre (MIGADO) (13 stations).

De plus, des données supplémentaires ont été fournies par le Conseil Départemental de l'Ariège (deux sources et un puits) et par Réseau 31 (2 stations : eaux souterraines et mesures irrégulières des eaux du Salat, non exploitables en l'état). Au total, les données issues de 47 stations ont été récupérées (dont 3 non-exploitables en l'état). Ce rapport se base sur les données collectées à ce jour (Août 2022) et sera actualisé dans le cadre de rapports annuels intégrant l'apport de nouvelles données de température de l'eau. Il existe par ailleurs d'importantes chroniques de température de l'eau appartenant à la Fédération Départementale de Pêche de l'Ariège qui n'ont pas pu être mobilisées à ce stade, mais qui viendront prochainement enrichir l'analyse.

La liste des stations mobilisées à ce stade et les informations principales qui en sont issues est fournie dans la suite de ce rapport (Tableau 1).

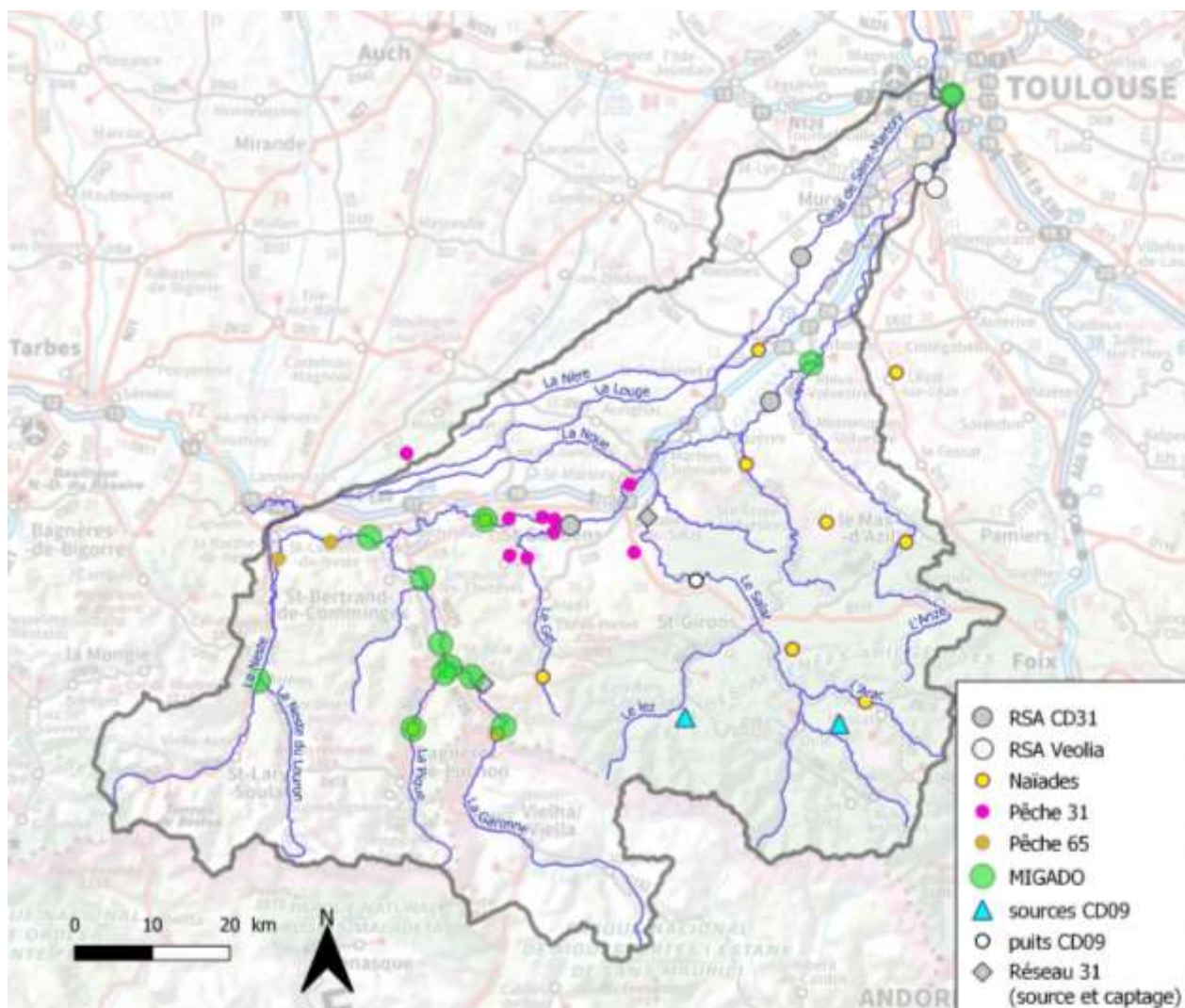


Figure 4. Station de suivi de température par producteur de données. NB : certaines stations sont très proches (par exemple station MIGADO et RSA au Bazacle, à Toulouse).

3.2 Traitement des données

Les données ainsi récupérées sont sous des formats variés qui dépendent du producteur des données et des traitements éventuels qui auraient déjà été effectués. Le traitement des données que nous avons réalisé est en partie automatisé et consiste en la succession des étapes suivantes :

1. conversion manuelle des données dans un format .csv standard afin de pouvoir les lire de façon automatisée ;
2. suppression des doublons ou quasi-doublons (données différentes au même instant ou à un intervalle de temps inférieur à la fréquence d'acquisition des données) ;
3. plusieurs filtres sont ensuite appliqués pour détecter les valeurs aberrantes (filtres qui pourraient par la suite être affinés localement et appliqués par les producteurs avant transmission) :
 - a. valeurs à l'extérieur de l'intervalle 0°C – 35°C,
 - b. variations de plus de 2°C en une heure,
 - c. écarts à la moyenne glissante sur +/- 12h supérieurs à 5°C
4. mise des données au pas horaire et journalier et enregistrement au format .csv standard ;

5. création pour chaque station d'un fichier au format préconisé par la DREAL Occitanie (fichier Excel au pas de temps horaire). **La question de la bancarisation des données disponibles uniquement au pas de temps journalier devra être abordée.**

La conversion au format DREAL se fait manuellement à partir des fichiers au format .csv, et des informations supplémentaires (métadonnées) sont à ajouter à la main. Il faudrait mobiliser les fournisseurs de données afin qu'ils complètent les métadonnées. Le format de données DREAL inclut la « Qualification Sandre ». Nous ne qualifions une donnée comme « correcte » que si la qualification a été effectuée par le producteur lui-même, les données invalidées par nos soins ou par le producteur sont indiquées avec un code égal à 2 (« incorrecte »). **Nous avons fait le choix d'indiquer l'ensemble des autres données ayant passé nos tests automatiques comme « Non qualifiées (brutes) »** (avec le code 4). Cette qualification peut sembler pessimiste, mais l'exemple du Bazacle (paragraphe 3.3 ci-après) montre qu'il s'agit d'une précaution nécessaire.

3.3 Résultats et limites du traitement automatique : exemple du Bazacle

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le site du Bazacle à Toulouse est équipé de deux stations de mesures différentes, l'une gérée par l'association MIGADO et l'autre par le Conseil départemental de la Haute-Garonne. Les données de températures de l'eau issues de ces deux stations peuvent donc être comparées. On observe ainsi, qu'elles sont dans l'ensemble cohérentes entre-elles (au pas journalier), après pré-traitement automatisé (figure 5). Cependant, les différences d'emplacement des deux sondes pourraient être à l'origine de différences dans les températures mesurées. En effet, la température n'est généralement pas homogène sur un tronçon de rivière mais peut varier en fonction de la profondeur, des caractéristiques locales de l'écoulement, etc. Par exemple, sur un tronçon donné, les températures pourront être différentes dans un trou d'eau à l'ombre des arbres et dans un radier sans ombrage (avec un impact encore plus fort au pas de temps horaire qu'en moyenne journalière), cf. par exemple l'étude de Marteau et al (2019). La prise d'eau pour la station de mesure du RSA est située à environ 40cm de la surface du plan d'eau et la mesure de température est effectuée à l'intérieur du bâtiment, ce qui pourrait entraîner des variations de température par rapport à une mesure in-situ. La sonde MIGADO est située dans la passe à poisson, à 2 m de profondeur et mesure une masse d'eau a priori bien mélangée. Une stratification du plan d'eau (malgré le courant important) ainsi qu'un réchauffement de l'eau dans son trajet jusqu'à la mesure dans le laboratoire du RSA pourraient être la cause de mesures de températures plus élevées que les mesures de la sonde MIGADO.

A l'été 2003, les données MIGADO sont 1,2 à 1,5°C inférieures à celles du RSA, avec 12 dépassements de 25°C en moyenne journalière d'après les données RSA et 41 d'après les données MIGADO, et ce bien que les deux courbes soient d'allures très similaires et qu'aucune des deux ne semble avoir de point aberrant sur la période considérée (figure 6). Ces écarts sont cohérents avec la différence de positionnement des sondes et une stratification du plan d'eau.

Plusieurs différences trop importantes pour être entièrement dues au positionnement des sondes sont également visibles en zoomant sur les séries temporelles (par exemple figure 7, avec des écarts jusqu'à 10°C sur la série temporelle, et fréquemment autour de 2°C). De tels écarts sont délicats à éliminer. En effet, un examen minutieux de l'ensemble des séries temporelles des deux stations du Bazacle serait nécessaire pour corriger une partie des erreurs, et invalider les données de l'une ou l'autre des sondes lorsque c'est nécessaire.

Dans la quasi-totalité des cas nous ne disposons que d'une seule station sur un site donné et donc un tel exercice n'est pas possible pour l'ensemble des stations. Cet exemple illustre bien les limites d'un traitement automatisé, les possibilités d'améliorations futures¹ et l'importance du choix de la localisation d'une station sur un site donné. Il incite également à la prudence dans l'interprétation des données. Un avertissement sur le degré de validation des données pourrait être intégré dans la base de données en complément de la classification « Non qualifiées (brutes) » dans la base. Des informations précises sur la localisation de la station (profondeur, éventuel ombrage, type d'écoulement...) devront aussi être demandées aux producteurs.

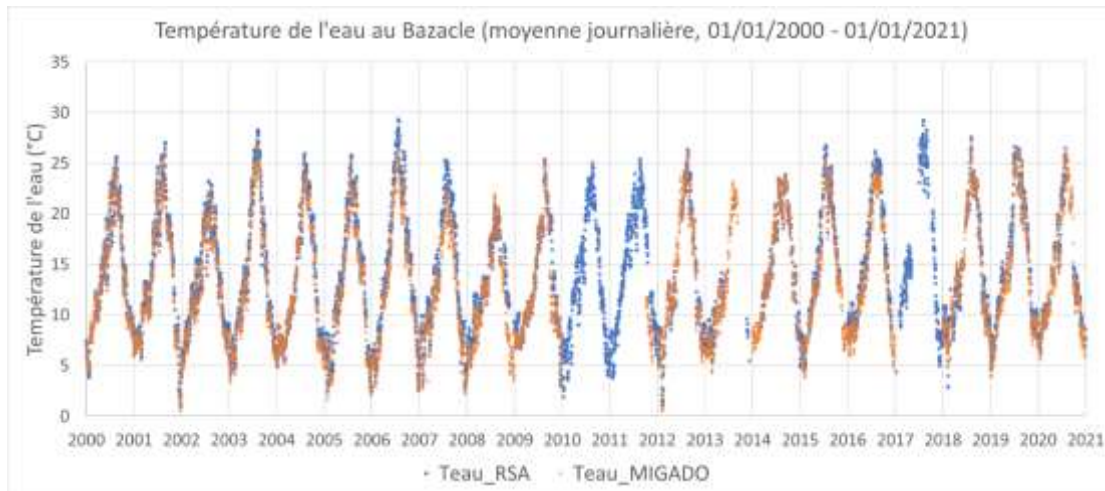


Figure 5. Moyenne journalière de la température de la Garonne mesurée au Bazacle (Toulouse) par les sondes de températures gérées par MIGADO (orange) et par le Conseil départemental de Haute-Garonne (RSA, bleu).



Figure 6. Températures de l'eau de la Garonne en Juillet-Aout 2003 au Bazacle, à Toulouse, mesurées par les sondes MIGADO et RSA CD31.

¹ Par exemple : mobilisation d'expertise des acteurs locaux, développement de méthodes automatiques plus fines en collaborations avec eux, et/ou mise en place de procédures manuelles supplémentaires

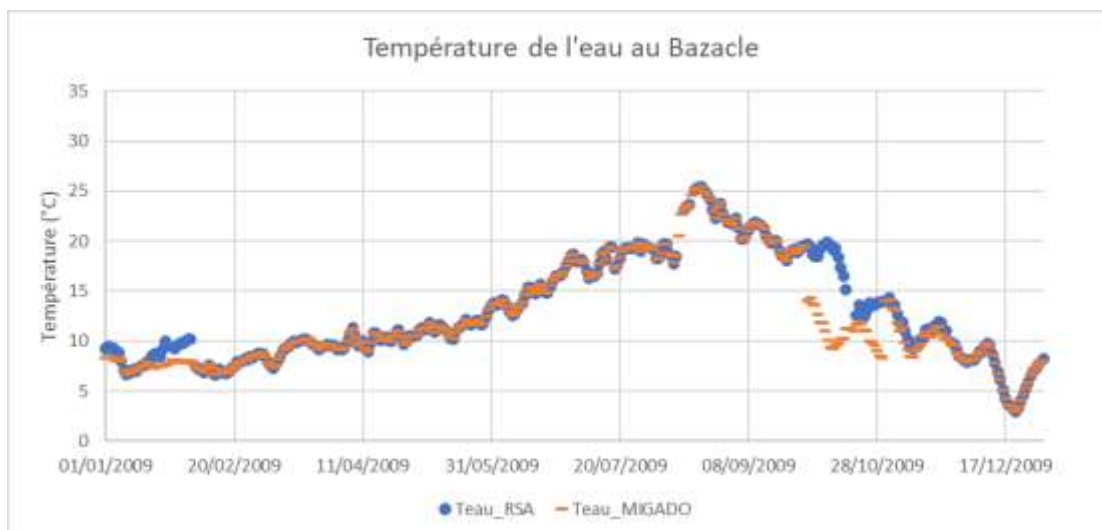


Figure 7. Moyenne journalière de la température de la Garonne mesurée au Bazacle (Toulouse) par les sondes de températures gérées par MIGADO (orange) et par le Conseil départemental de Haute-Garonne (RSA, bleu). Zoom sur l'année 2009.

3.4 Recommandations pour les mises à jour de la base de données

Les traitements effectués ici sont essentiellement automatisés et, comme nous avons pu le voir, certaines données invalides ne seront pas éliminées par cette méthode. Il serait ainsi préférable de **mobiliser les fournisseurs** pour qu'ils utilisent leur expertise locale afin de réaliser un pré-traitement des données le plus fin possible et cela avant même de transmettre les données. Par ailleurs, il serait préférable d'**uniformiser les méthodes d'acquisitions** (pas horaire en heure entières par exemple) par exemple en suivant autant que possible les **recommandations fournies par la DREAL Occitanie** (en collaboration avec des Fédérations de Pêche).

3.5 Disponibilité des données

Au total, au moment de la rédaction de ce document, nous disposons de **41 stations de mesure de température des cours d'eau** (rivière ou canal) **exploitables** a priori, auxquelles s'ajoutent 2 sources et un puit. Cependant, de nombreuses stations sont récentes et ne disposent de données que depuis un temps très court. Ainsi, seulement 33 stations disposent d'au moins un été quasi-complet de Juin à Septembre (moins de 10 jours manquant au total sur la période Juin-Septembre).

Les mesures les plus anciennes dont nous disposons datent de 1994 (station MIGADO au Bazacle, au pas de temps journalier), mais certaines séries comportent de nombreuses données manquantes (ou erronées). Ainsi, seules 6 stations de mesures disposent d'au moins 10 années avec des données quasi-continues de Juin à Septembre, au pas horaire ou journalier (figure 8).

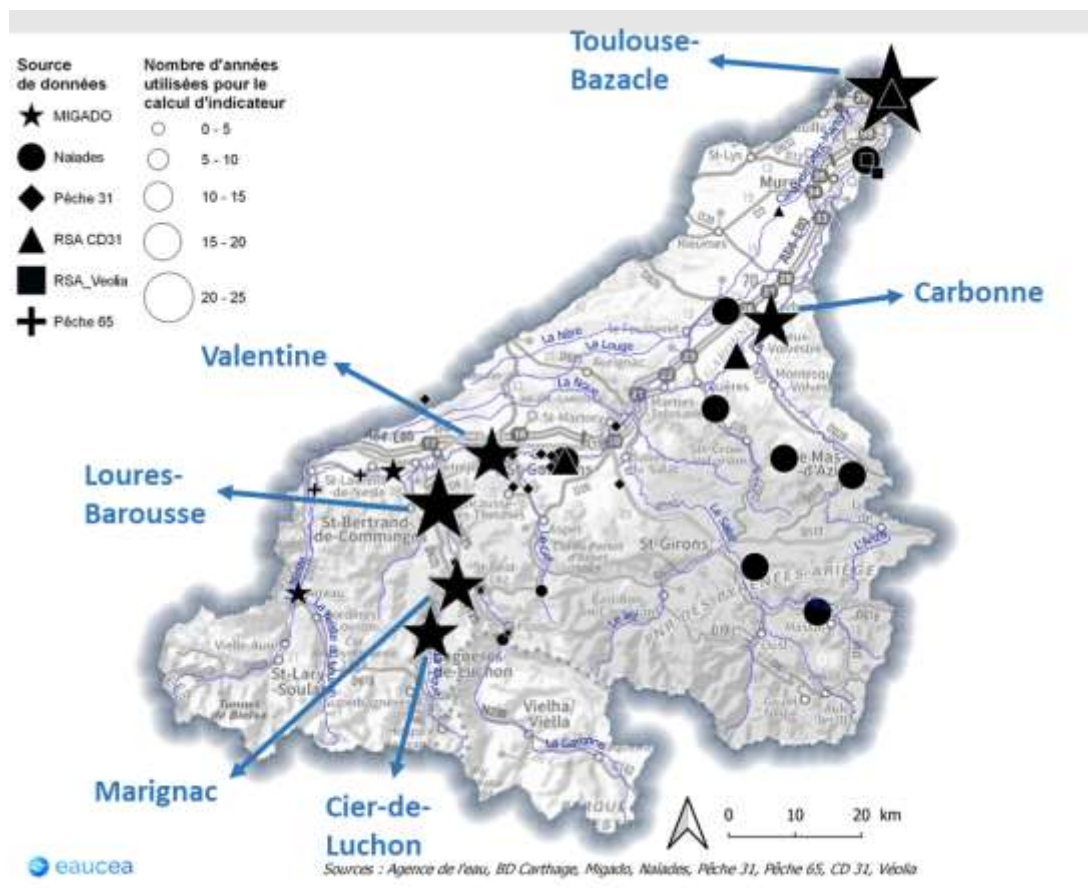


Figure 8. Station de mesures de température de l'eau par producteur. La taille des symboles indique le nombre d'années avec des données continues ou presque de Juin à Septembre (et donc utilisables pour le calcul d'indicateur de température).

Ces données, toutes fournies par l'association MIGADO, sont sur **la Pique à Cier-de-Luchon** (10 ans) et **Marignac** (10 ans) ainsi que sur **la Garonne à Loures-Barousse** (19 ans), **Valentine** (11 ans), **Carbonne** (14 ans), et **Toulouse-Bazacle** (24 ans). La station du Bazacle disposant de longues séries temporelles et présentant un fort enjeu en termes de production d'eau potable, nous la prendrons plusieurs fois comme exemple dans la suite du document.

Le faible nombre de longues séries continues souligne bien l'importance de la mise en place et de la maintenance d'un réseau de stations pérennes.

3.6 Proposition de stations supplémentaires

En fonction des retours des différents partenaires et gestionnaires des stations, nous pourrions envisager de pérenniser l'ensemble des stations présentées ici. Afin d'améliorer la couverture du territoire sur la plupart des cours d'eau, nous suggérerions d'ajouter au total **5 à 10 stations de mesures**, en privilégiant lorsque c'est possible une amélioration d'installations déjà existantes (mesures de hauteurs d'eau par exemple). Ainsi, **en fonction des retours des différents partenaires et producteurs de données, des capteurs pérennes pourraient être installés** (figure 9 et figure 10) :

- sur **le Salat (cours d'eau peu influencé par les prélèvements)** :
 - à Salies-du-Salat (31) où des mesures sont déjà effectuées par Réseau31 à fréquence irrégulière ;

- également en amont par exemple à Soueix (09) (station hydrométrique DREAL déjà présente) ;
- sur **le Lens** à Betchat (09) (historique de mesures hydrologiques 1975-2004) ;
- sur **la Nère** (31) (pas de station hydrométrique existante) ;
- sur **la Noue** (31) (pas de station hydrométrique existante) ;
- sur l'amont de **la Louge** (31).

La partie amont du territoire pourrait être complétée par des mesures sur :

- **le Lez** à Engomer (09) (station hydrométrique DREAL déjà présente) ;
- sur **l'Ourse** à Ferrère (65) (au niveau des captages pour l'AEP du Syndicat des eaux de Barousse Comminges Save par exemple). Il s'agit de la seule masse d'eau en très bon état qualitatif sur le périmètre du SAGE Vallée de la Garonne, avec en conséquence un enjeu de préservation.

Pour les stations situées en Ariège (bassins du Salat, de l'Arize et du Volp, cf. Figure 10), une concertation avec la Fédération Départementale de la Pêche de l'Ariège doit être étudiée.

De plus, dans le cadre de la coopération transfrontalière avec le Conseil Général du Val d'Aran (action B.2.3 du PTGA), un suivi sur le versant espagnol pourrait être envisagé.

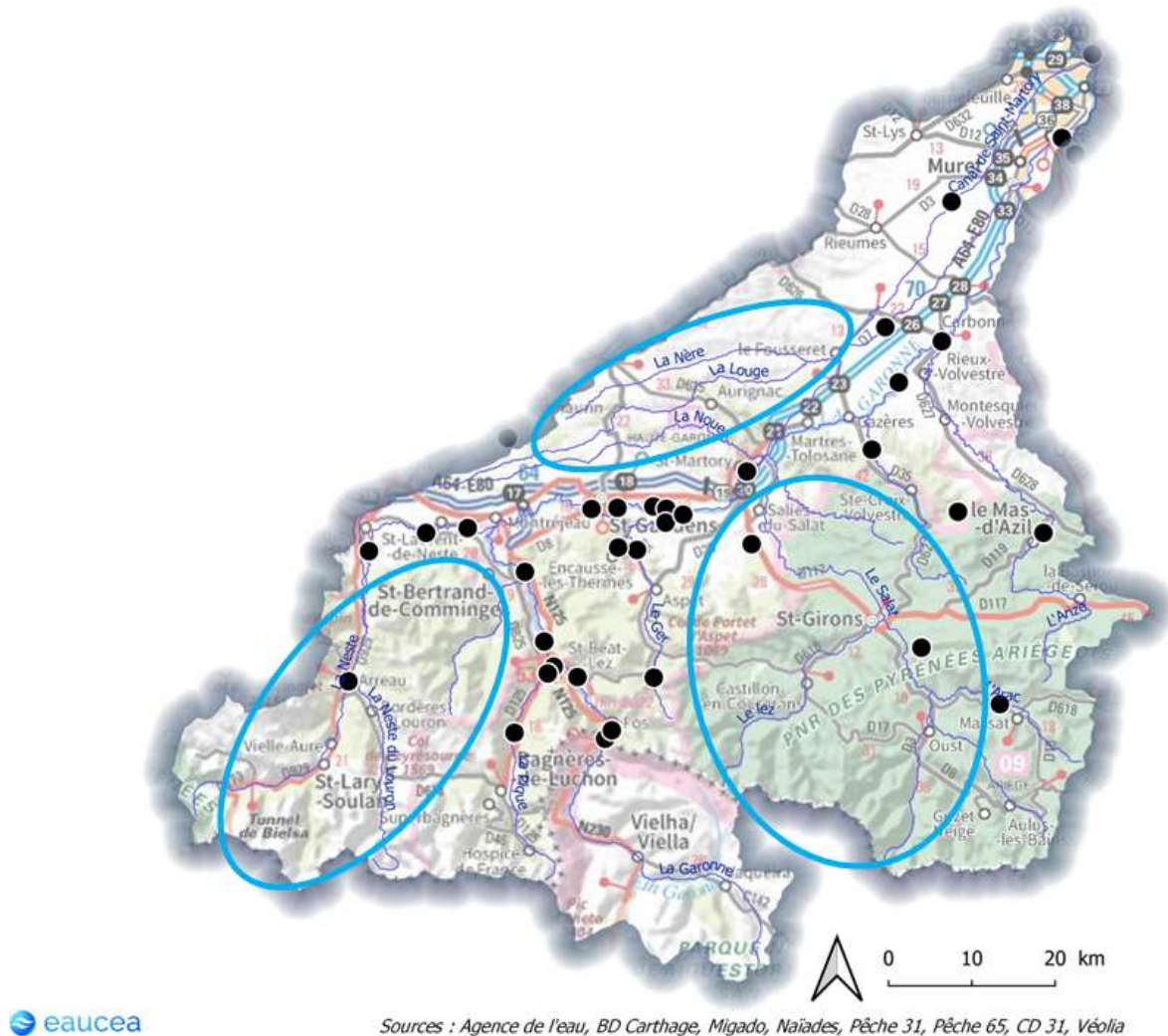


Figure 9. Stations thermiques existantes sur le territoire (en noir) et zones où des manques sont identifiés (ovales bleus). Le choix des stations supplémentaires à installer est à discuter et décider en concertation avec les membres du groupe de travail.

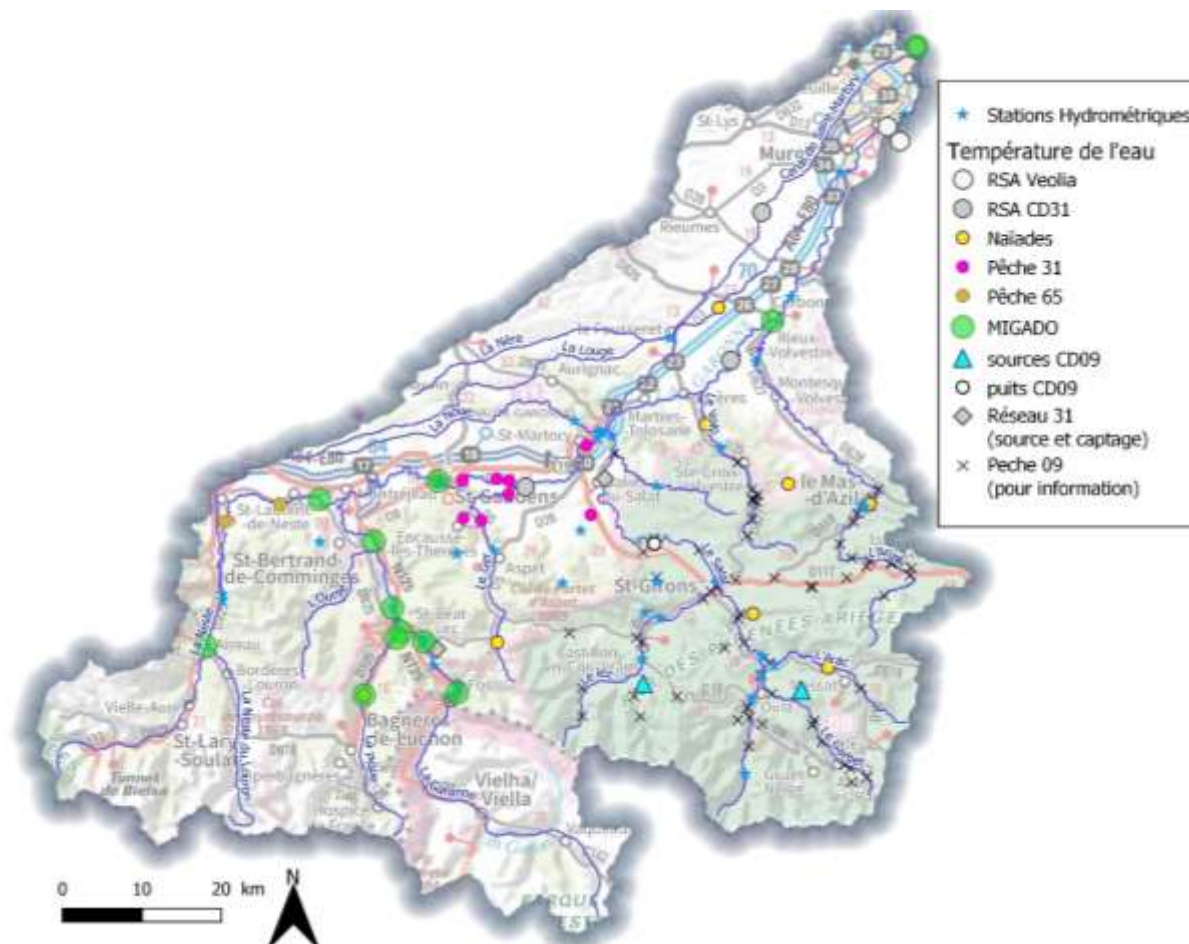


Figure 10. Stations de mesure de température de l'eau issues de différents producteurs et stations hydrométriques. La localisation des sondes de la Fédération de Pêche d'Ariège est donnée à titre indicatif, car ces données n'ont pas été utilisées dans ce rapport.

Par ailleurs, d'autres stations pourraient être créés, dans un second temps, afin de constituer un (ou plusieurs) **site « démonstrateur »**. Il est en effet envisagé d'instrumenter de façon plus intensive (avec plusieurs capteurs sur un même tronçon) qui aurait un objectif double : d'une part améliorer la compréhension des mécanismes contrôlant la température de l'eau au-delà de la température de l'air (ripisylve, échanges avec la nappe d'accompagnement, etc.) et d'autre part avoir une visée illustrative et pédagogique. Ce dispositif pourrait aussi servir de site pilote pour le travail sur la prévision de la température de l'eau.

4 INDICATEURS

4.1 Moyennes

A partir des données journalières, pour chaque année où des données quasi-continues sont disponibles de Juin à Septembre, nous calculons les **températures moyennes sur X jours glissants (T_{Xj})** (en prenant $X = 1, 7$ et 30), puis sélectionnons pour chaque année la **valeur maximale (MT_{Xj})**, et finalement calculons les moyennes interannuelles, pour obtenir **3 indicateurs $\langle MT_{1j} \rangle$, $\langle MT_{7j} \rangle$ et $\langle MT_{30j} \rangle$** (les chevrons indiquant qu'il s'agit de moyennes). Il s'agit d'indicateurs standards pour qualifier le régime thermique des cours d'eau et les impacts de la température sur les écosystèmes qui sont d'autant plus impactés que les températures élevées se prolongent dans le temps (cf. par exemple le rapport du projet TIGRE²).

Les indicateurs annuels moyens pour chacune des stations sont présentés dans le Tableau 1. Le Tableau 2 présente, à titre d'exemple pour la sonde RSA du Bazacle, les indicateurs calculés chaque année où un été quasi-complet est disponible (moins de 10 jours manquants de juin à septembre). L'ensemble des indicateurs année par année pour les 6 stations disposant de longues séries de données (en gras dans le Tableau 1) sont présentés en annexe. Ces indicateurs sont également localisés sur les cartes du périmètre Garon'Amont (figure 11, figure 12 et figure 13).

Nous observons un contraste marqué amont – aval (figure 11), effet notamment des différences d'altitude et de température moyenne de l'air. Ainsi en amont du territoire, les températures les plus chaudes sur une journée $\langle MT_{1j} \rangle$ sont de l'ordre de 15 à 18°C tandis qu'en aval elles sont plutôt comprises entre 23 et 26 °C, avec une zone de transition entre les deux où $\langle MT_{1j} \rangle$ est de l'ordre de 18 à 22 °C environ. Les indicateurs sur 7 jours (figure 12) et 30 jours (figure 13) montrent le même contraste amont-aval. En amont $\langle MT_{7j} \rangle = 14,5\text{-}17^\circ\text{C}$ environ et $\langle MT_{30j} \rangle = 14\text{-}16^\circ\text{C}$ environ, et sur la zone aval $\langle MT_{7j} \rangle = 22,5^\circ\text{C}\text{-}25^\circ\text{C}$ et $\langle MT_{30j} \rangle = 21\text{-}24^\circ\text{C}$ environ.

² TIGRE : Thermie en rivière : analyse géostatistique et description de régime, <https://thermie-rivieres.inrae.fr/>

Tableau 1. Liste des stations de thermie des cours d'eau pour lesquelles des données ont pu être récupérées et traitées. Les différentes colonnes indiquent la disponibilité des données (années valides à 90%, années utilisées pour les indicateurs c'est-à-dire avec moins de 10 jours manquants sur la période Juin-septembre) et indicateurs calculés à partir des températures de l'eau de juin à septembre inclus : Teau_xJ (x=1,7 ou 30) est la moyenne interannuelle des température moyennes des x jours consécutifs le plus chauds de chaque année. Teau_xJ_max : idem que Teau_xJ mais en utilisant les températures maximales journalières (lorsqu'elles sont disponibles) au lieu des températures moyennes journalières ; nombre de dépassement de seuils en moyenne journalière et en termes de température maximales.

Nom	Source	Années valides à 90%	Nombre de points valides (années)	Nombre d'années utilisées pour indicateurs	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
Arac_Biert	Naiades	9	10.3	8	17.7	17.0	16.0	19.8	18.9	17.6	0.1	0	7.1	0
Arbas_Mane	Peché31	0	0.7	0										
Ariege_RSA_Lacroix-Falgarde	RSA_Veolia	0	0.9	0										
Arize_Mas_d_Azil	Naiades	5	7.3	5	19.6	18.9	18.0	21.3	20.2	19.2	4	0	28.6	0
Garonne Bazacle	MIGADO	23	25.6	26	25.3	24.7	23.3	25.8	25.2	23.8	81.4	6.7	89.3	10.5
Garonne Carbonne	MIGADO	14	17.9	15	23.9	23.2	21.8	24.8	24.0	22.4	64.5	1.0	70.8	2.3
Garonne Fronsac Pont SNCF	MIGADO	4	7.8	4	17.4	16.3	15.3	20.1	18.1	17.0	0.3	0	4.8	0
Garonne Loures-Barousse	MIGADO	14	17.1	15	17.0	16.3	15.4	19.0	18.0	16.8	0	0	4	0
Garonne Marignac	MIGADO	0	0.9	1	18.1	17.1	16.0	20.2	19.2	18.0	0	0	5	0
Garonne Plan d'Arem	MIGADO	2	3.5	3	16.8	16.3	15.4	17.6	17.1	16.0	0	0	0	0
Garonne Saint-Béat (arrêté en 2019)	MIGADO	1	4.3	4	15.2	14.8	14.0	17.2	16.6	15.6	0	0	0.8	0
Garonne Valentine	MIGADO	10	12.5	11	19.0	18.4	17.5	20.8	19.9	18.8	3.9	0	24.8	0
Garonne_Canal_St-Martory	Peché31	0	0.2	0										
Garonne_Estancarbon	Peché31	1	2.0	1	21.5	20.3	19.1	24.0	22.5	21.1	24	0	60	0
Garonne_Fos_Pont_du_Roi	Naiades	2	4.5	2	16.5	16.1	15.3	17.9	16.9	16.1	0	0	0	0
Garonne_Montespan_Labarthe_Inard	Naiades	6	8.7	5	20.4	19.7	18.8	21.3	20.6	19.6	14.4	0	32.8	0
Garonne_Pointis_moulin_vicompte	Peché31	0	0.3	0										
Garonne_Portet_amont_Ariege	Naiades	7	8.3	7	24.6	24.0	22.6	25.9	25.2	23.9	77.1	1	93.3	8
Garonne_RSA_Bazacle	RSA_CD31	10	18.0	8	25.9	25.4	23.9	26.6	25.9	24.4	88.5	12.1	101.8	15.4
Garonne_RSA_Lherm	RSA_CD31	2	5.8	1	25.6	24.8	24.1	26.4	25.8	24.9	75	4	103	14
Garonne_RSA_Montespan	RSA_CD31	11	19.4	5	20.2	19.5	18.4	21.5	20.9	19.6	16.8	0	32.6	0
Garonne_RSA_Portet	RSA_Veolia	0	0.6	0										
Garonne_RSA_Saint_Julien	RSA_CD31	8	15.0	7	24.0	23.5	22.0	24.7	24.2	22.7	68.3	2	75.3	4.6
Garonne_Saint-Gaudens_St-Anne	Peché31	1	1.6	1	20.0	19.2	18.2	21.3	20.3	19.2	6	0	25	0

Nom	Source	Années valides à 90%	Nombre de points valides (années)	Nombre d'années utilisées pour indicateurs	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
Garonne_St-Gaudens_Valentine	Naiades	8	8.9	8	18.7	18.0	16.9	19.6	18.9	17.8	1.8	0	6.1	0
Ger_Boutx	Naiades	2	5.0	3	12.3	11.9	11.7	13.6	13.0	12.5	0	0	0	0
Ger_Pontis_Inard	Peché31	0	1.4	0										
Ger_Soueich	Peché31	0	0.2	0										
Job_Encausse_les_thermes	Peché31	0	0.2	0										
Louge_Marignac_aval_Fousseret	Naiades	7	7.6	6	22.6	21.9	20.6	24.1	23.1	21.8	55.3	0	80.8	0.2
Montbrun_amont_Montbrun-Bocage	Naiades	7	7.7	7	19.5	19.0	17.8	20.1	19.6	18.4	5.6	0	12.3	0
Nert_aval_Riverenert	Naiades	8	9.5	8	15.0	14.5	14.1	17.3	16.3	15.5	0	0	0	0
Neste_Arreau	MIGADO	4	6.6	5	15.9	15.5	14.8	18.7	17.8	17.0	0	0	0.6	0
Neste_Aventignan	MIGADO	4	6.1	6	19.6	18.5	17.6	22.1	20.7	19.6	3.5	0	40.3	0
Neste_Aneres	Peché65	0	1.0	1	19.6	18.3	16.9	21.4	20.0	18.3	1	0	18	0
Neste_Lortet	Peché65	0	1.5	1	17.5	16.6	15.7	19.2	18.2	17.0	0	0	1	0
Neste_St-Laurent	MIGADO	5	9.16	6	18.5	17.8	16.7	20.8	19.7	18.3	1	0	13.8	0
Pique Cier de Luchon	MIGADO	10	12.4	10	15.5	14.8	13.9	17.4	16.6	15.5	0	0	0	0
Pique_Cier_de_Luchon	Naiades	7	8.4	7	17.2	16.5	15.7	19.0	18.3	17.3	0	0	1	0
Pique Marigac	MIGADO	9	10.0	10	16.2	15.5	14.7	17.8	17.0	16.0	0	0	0.3	0
Save_Saint_Planhard	Peché31	0	0.0	0										
Volp_Plan	Naiades	5	7.4	7	23.2	22.5	21.2	24.5	23.6	22.3	61	0	79.9	0.4

Tableau 2. Indicateurs calculés au Bazacle à partir des données RSA, chaque année où un été quasi-complet est disponibles (moins de 10 jours manquant de Juin à Septembre inclus). Dans ce tableau, Teau_xJ (x=1,7 ou 30) est la température des x jours consécutifs les plus chauds. La date indique la fin de la période.

Année	Teau_1J (°C)	date_1J	Teau_7J (°C)	date_7J	Teau_30J (°C)	date_30J
2000	25.6	20/08/2000	25.3	21/08/2000	23.2	26/08/2000
2002	23.2	29/07/2002	22.2	24/08/2002	20.7	25/08/2002
2003	28.3	08/08/2003	28.0	13/08/2003	26.6	29/08/2003
2004	26.0	02/08/2004	25.4	04/08/2004	24.3	21/08/2004
2005	25.8	29/07/2005	25.4	29/07/2005	23.5	14/08/2005
2006	29.4	25/07/2006	28.7	28/07/2006	27.4	01/08/2006
2011	25.4	22/08/2011	24.8	26/08/2011	22.9	15/09/2011
2014	23.9	11/09/2014	23.5	13/09/2014	22.8	23/09/2014
Moyenne	25.9	-	25.4	-	23.9	-

Moyenne des températures du jour le plus chaud de chaque année

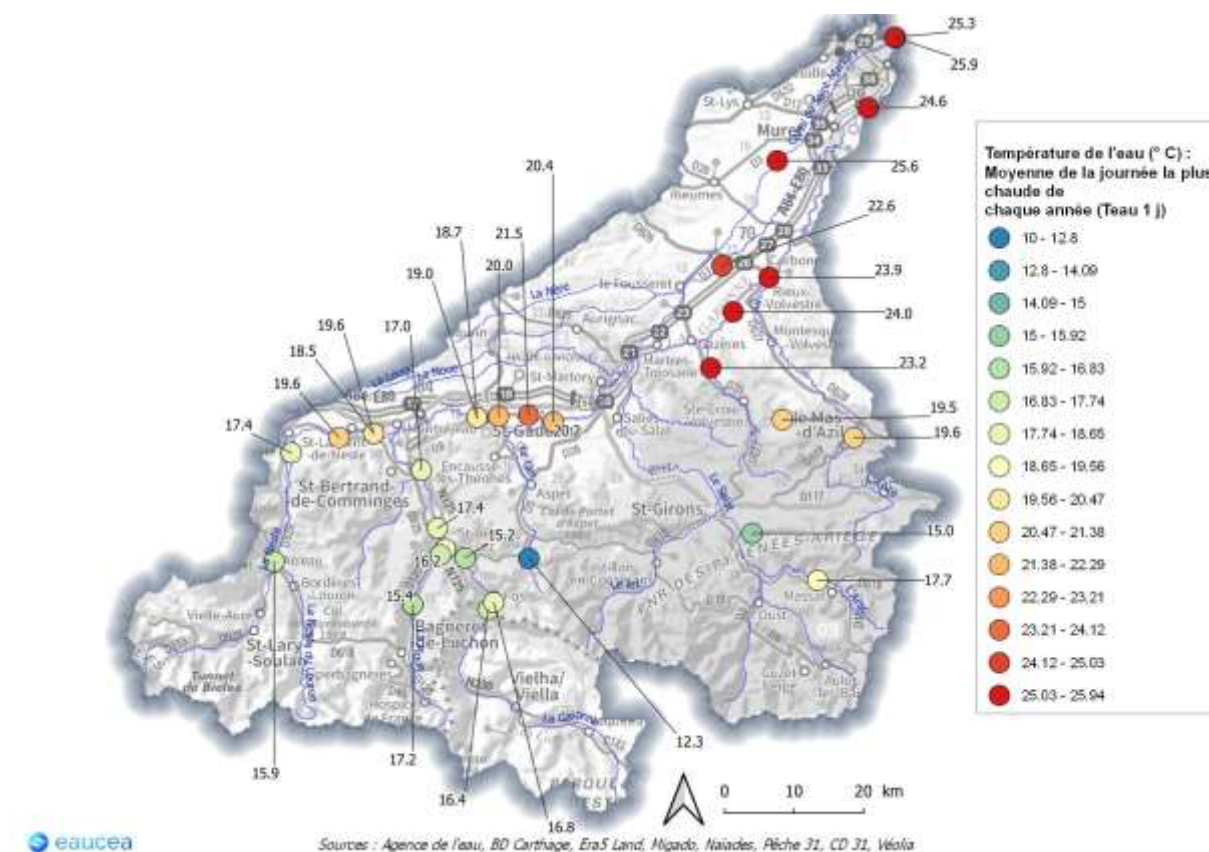


Figure 11 Moyenne interannuelle des températures de l'eau du jour le plus chaud de chaque année <MT_{1J}> (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre)

Moyenne des températures des 7 jours consécutifs de les plus chauds de chaque année

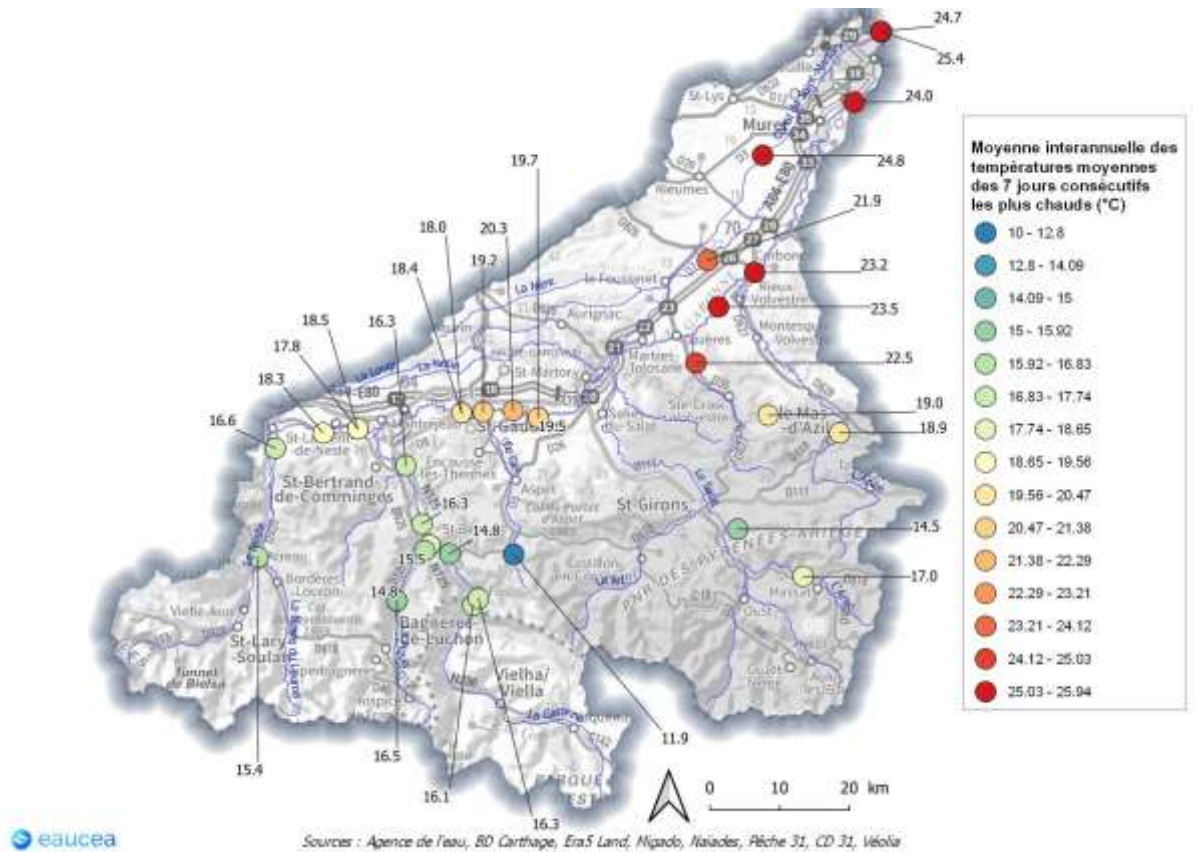


Figure 12. Moyenne interannuelle des températures de l'eau des 7 jours consécutifs les plus chauds de chaque année $\langle MT_7 \rangle$ (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre).

Moyenne des températures des 30 jours consécutifs de les plus chauds de chaque année

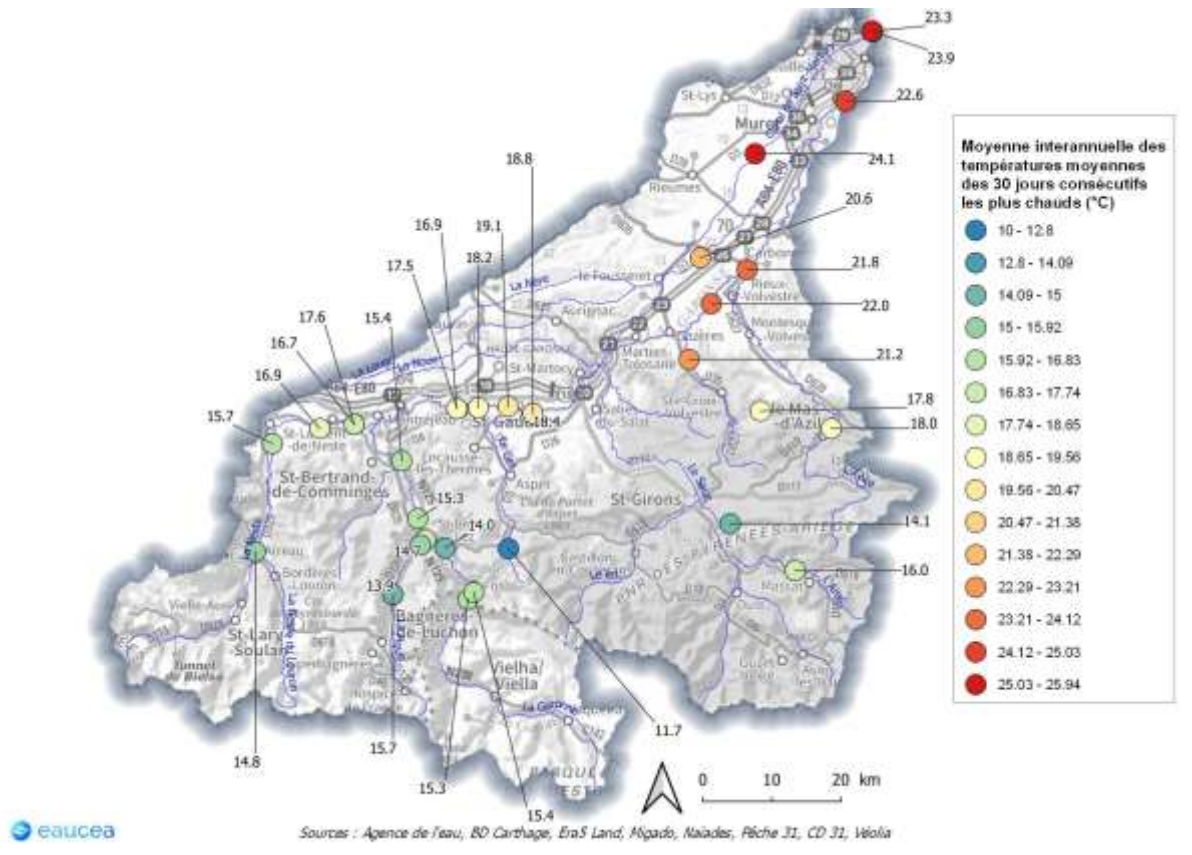


Figure 13. Moyenne interannuelle des températures de l'eau des 30 jours consécutifs les plus chauds de chaque année <MT_{30J}> (rappel : les années utilisées pour le calcul de l'indicateur varient d'une station à l'autre).

4.2 Nombres de dépassements de seuils

De façon complémentaire, nous calculons également le **nombre de journées avec dépassement des seuils de 19°C** (stress physiologique pour la truite Fario) **et de 25°C** (léthal pour la truite Fario, et seuil réglementaire pour la fabrication d'eau potable) en moyenne journalière et au pas de temps horaire. On observe (figure 14) que la température moyenne journalière est fréquemment (> 50 jours) supérieure à 19°C sur la région aval du domaine, et que des dépassements de seuils peuvent se produire plus en amont (points vert – jaune sur la figure 14). Au pas de temps horaire, le seuil de 19°C peut être dépassé ponctuellement sur une grande partie du territoire (figure 15).

On observe (Figure 16) que les températures supérieures à 25°C (au pas horaire) ne sont présentes que dans la zone aval du territoire. Il s'agit justement de la région où la densité de population et les enjeux de production d'eau potable sont les plus importants. On note qu'au Bazacle, les sondes MIGADO et RSA donnent des résultats différents, cela provient d'une part des différences déjà mentionnées entre ces deux sondes (cf. partie 3.3), et d'autre part du fait que jusqu'en 2018 les données MIGADO traitées étaient au pas journalier uniquement.

Quel que soit l'indicateur considéré, il est important de rappeler qu'il s'agit de moyennes sur des années très différentes les unes des autres, et que même à Toulouse, il peut n'y avoir que très peu voir aucun dépassement du seuil de 25°C lors d'une année froide, et quelques dizaines de jours lors d'années chaudes. Cette variabilité interannuelle est discutée plus en détail dans la partie [Erreur ! Source du renvoi introuvable.](#)

Nombre moyen de jours avec $T_{\text{moyenne}} > 19^{\circ}\text{C}$

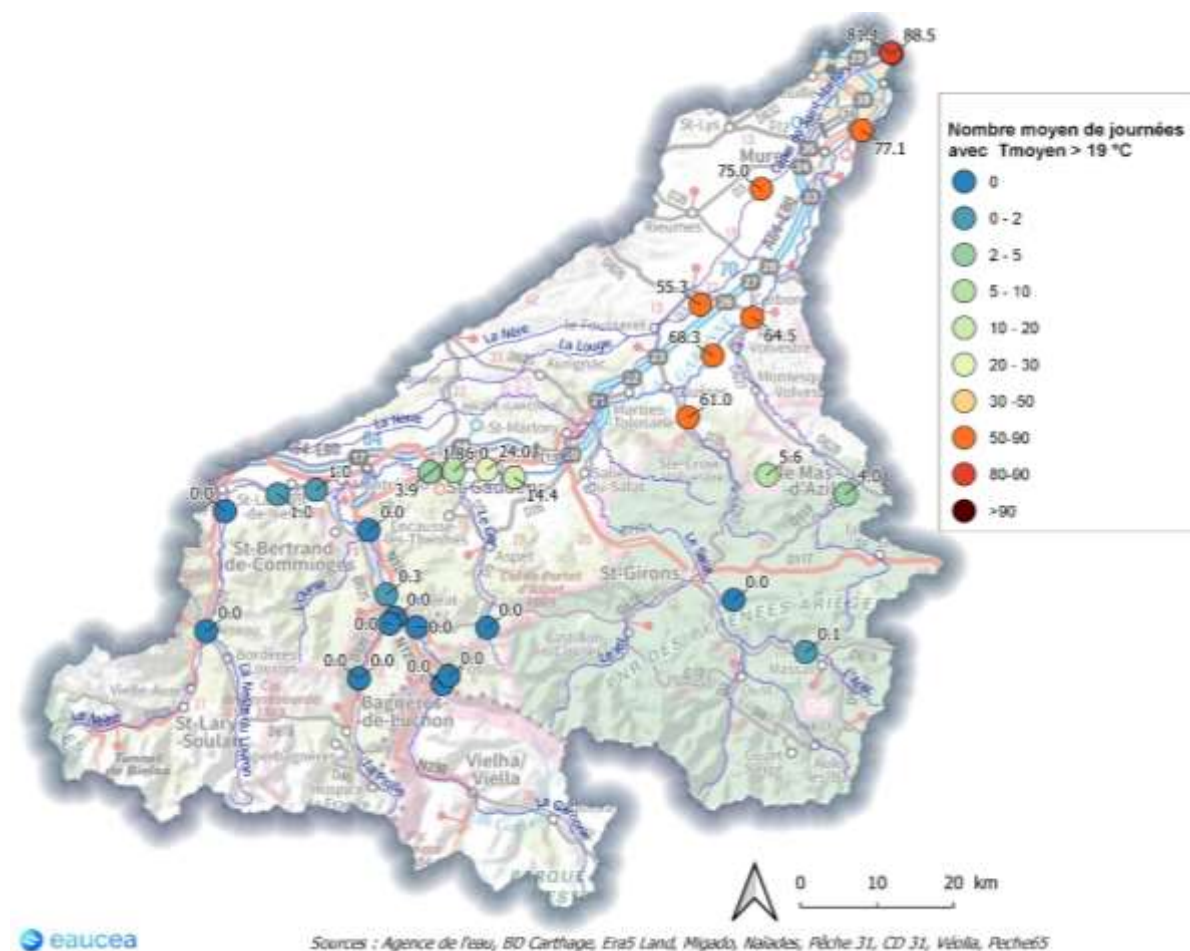


Figure 14. Nombres de journées où la température moyenne mesurée dépasse 19°C. Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquant sur ces 4 mois) – (rappel : les années utilisées sont différentes d'une station à l'autre).

Nombre moyen de jours avec $T_{MAX} > 19^{\circ}C$

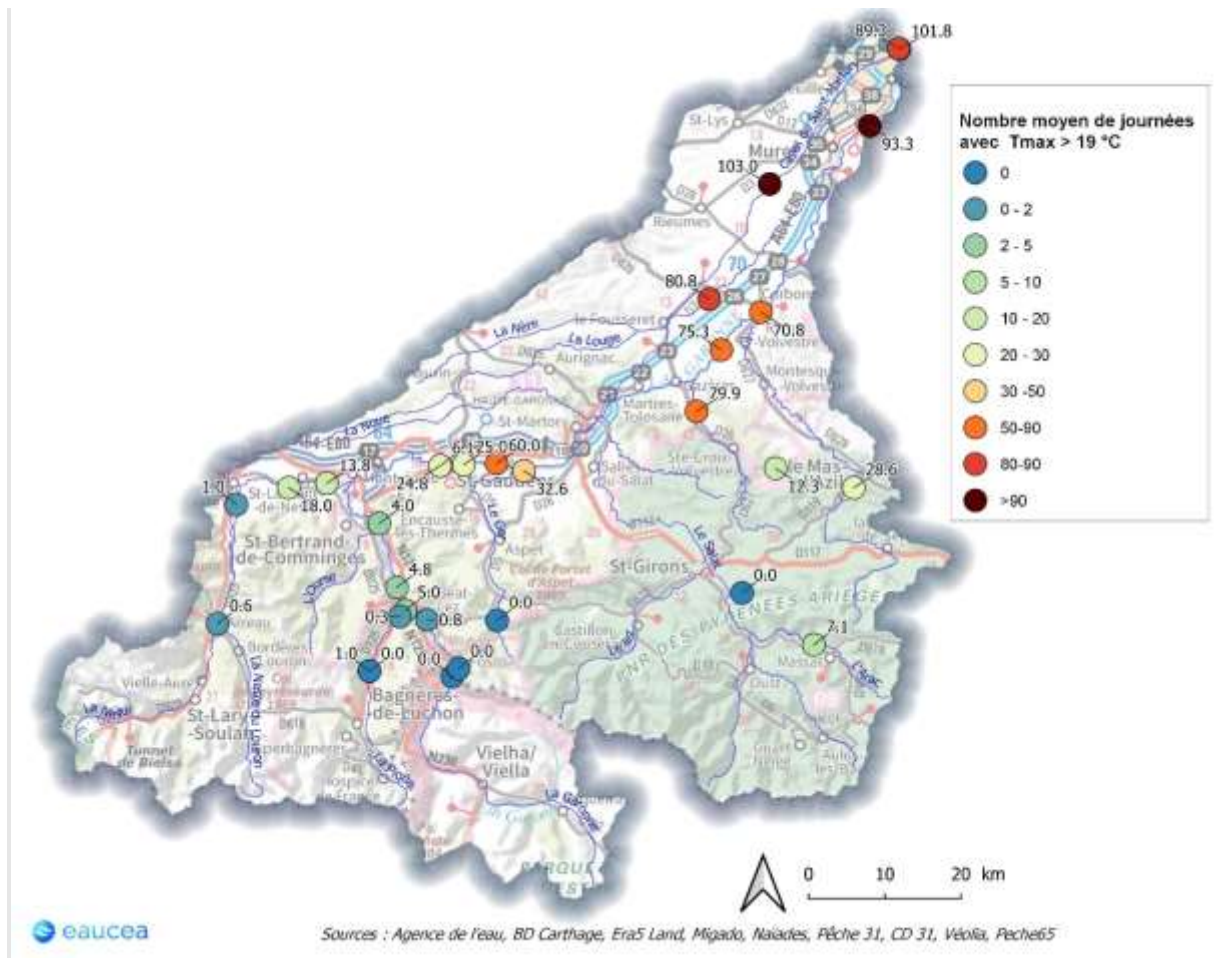


Figure 15. Nombres de journées où la température maximale horaire mesurée dépasse $19^{\circ}C$. Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquants) – (rappel : les années utilisées sont différentes d'une station à l'autre).

Nombre moyen de jours avec $T_{MAX} > 25^{\circ}\text{C}$

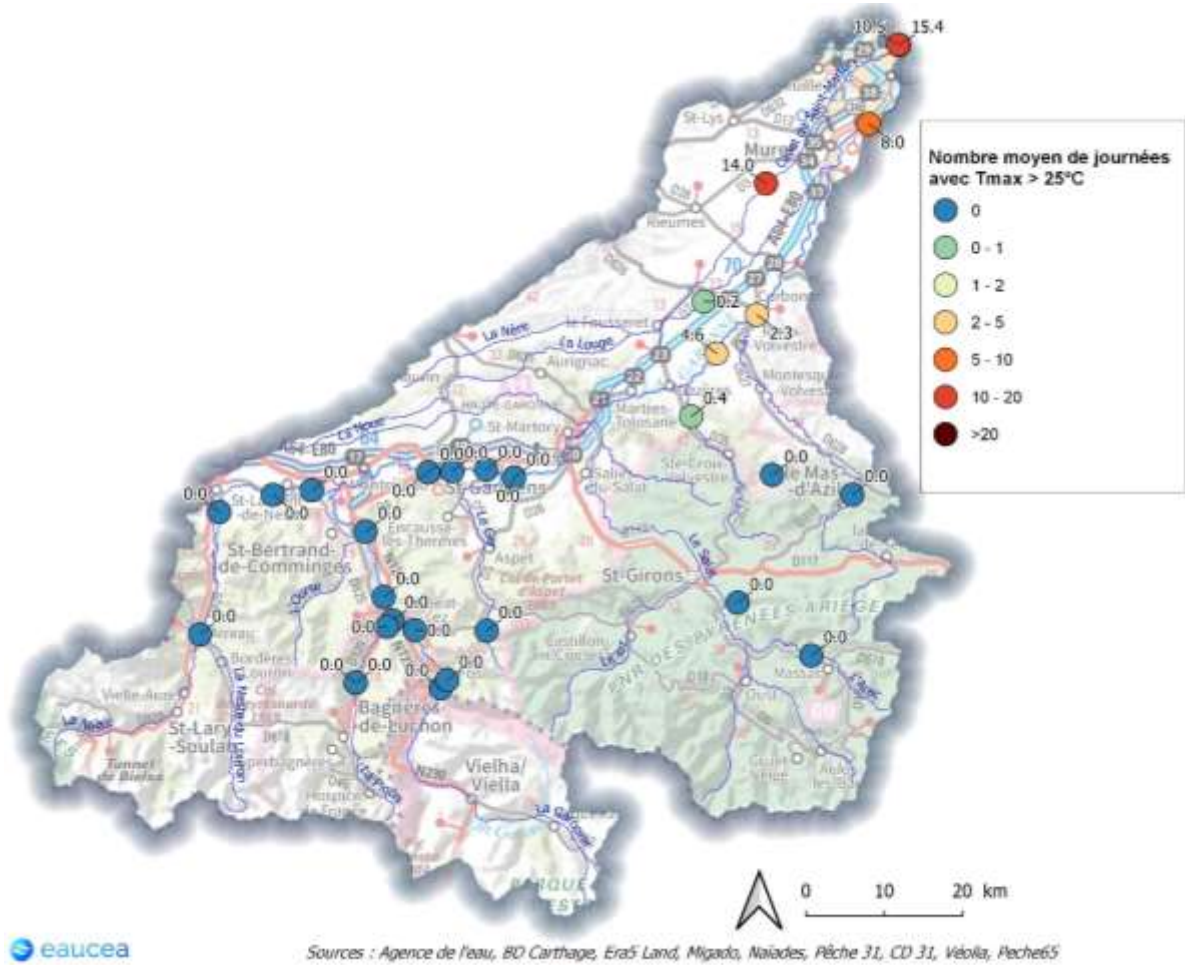


Figure 16. Nombres de journées où la température maximale horaire mesurée dépasse 25°C . Sont considérées uniquement les années avec des données quasi-continues de juin à septembre (moins de 10 jours manquants) – (rappel : les données couvrent des périodes différentes d'une station à l'autre)

A partir des cartes présentées dans cette partie on peut schématiquement séparer le territoire en 3 zones : une région aval où les températures peuvent dépasser 25°C (région au Nord de Cazère, Figure 16) ; une zone de transition où le seuil de 19°C peut être dépassé en moyenne journalière, mais où la température reste inférieure à 25°C (bande qui commence au sud de Cazère et s'arrête vers Aspet, Figure 14) ; une zone de montagne où la température ne dépasse en général pas les 19°C (au sud de la latitude d'Aspet). Cette séparation du territoire en 3 zones est reprise et détaillée dans la synthèse paragraphe 4.4 (Figure 27).

Remarque : données horaires et cycle diurne

Nous n'avons pas à ce stade étudié en détail le cycle diurne des températures de l'eau sur le territoire. Les amplitudes journalières sont très variables selon la saison (par exemple en moyenne 0,6°C en décembre, janvier et février sur la Garonne à Toulouse, 1,7°C en juin, et en moyenne sur l'année environ 1°C) mais aussi d'un jour à l'autre. Ces variations sont dues d'une part au cycle diurne et d'autre part aux variations à long terme qui s'y superposent (changement de temps ou changement de saison par exemple). Bien entendu, les cours d'eau plus petits présentent une inertie moins importante et donc des variations journalières plus marquées : par exemple sur la Pique à Cier-de-Luchon, l'amplitude thermique en moyenne annuelle est de 2,2°C et de 2,8-2,9°C en juillet-août.

4.3 Evolutions temporelles

4.3.1 Température de la Garonne au Bazacle et changement climatique

La température moyenne de l'eau de Juillet à Septembre a dépassé 22°C chaque année depuis 2018³ mais seulement 3 fois entre 1994 et 2017 (Figure 17), mettant en évidence des conditions particulièrement chaudes au cours des dernières années. Cependant, les températures de l'eau au Bazacle ne présentent pas de tendance linéaire statistiquement significative sur la période 1994-2020 (test de Mann Kendall à 95%), contrairement à ce qui avait été discuté en introduction (thèse de Kévin Larnier) pour la période 1978-2005. Cette observation ne remet pas en causes la hausse des températures de l'eau observée sur des temps longs, mais **illustre la difficulté à extraire un signal de changement climatique à partir de séries de données présentant une variabilité interannuelles forte**. Le même phénomène est observé sur les températures de l'air : sur la période 2000-2019 aucune tendance linéaire statistiquement significative (test de Mann-Kendall à 95%) n'est observée sur les températures de l'air à Toulouse-Blagnac (figure 18), mais la tendance devient statistiquement significative dès que l'on considère une période de temps suffisamment longues, comme on peut le voir sur la longue série de données à Saint-Girons (figure 19)

³Les températures de l'air ayant été particulièrement élevées en Juillet-Août 2022, avec une répétition de vagues de chaleurs, ce seuil de 22°C en moyenne Juillet-Septembre sera très probablement également dépassé en 2022.

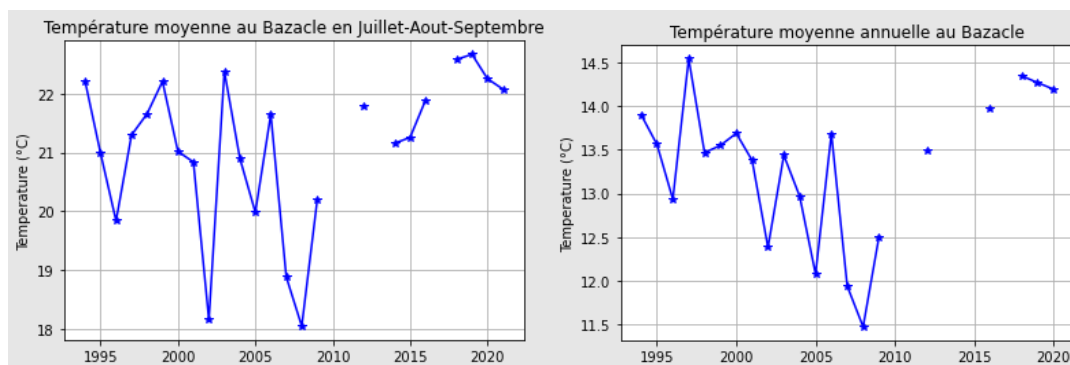


Figure 17. Température de l'eau au Bazacle (données MIGADO) en moyenne sur les mois de Juillet-Septembre (gauche) et en moyenne annuelle (droite). Les années avec plus de 2 jours manquant en Juillet-Septembre sont exclues de la figure de gauche et celles avec plus de 5 jours manquants sur l'année sont exclues de la figure de droite.

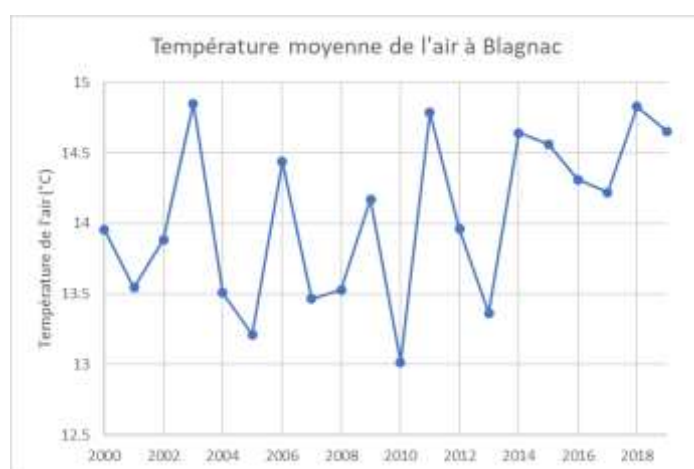


Figure 18. Température de l'air à Toulouse-Blagnac (moyennes annuelles calculée à partir de données journalières Météo-France)

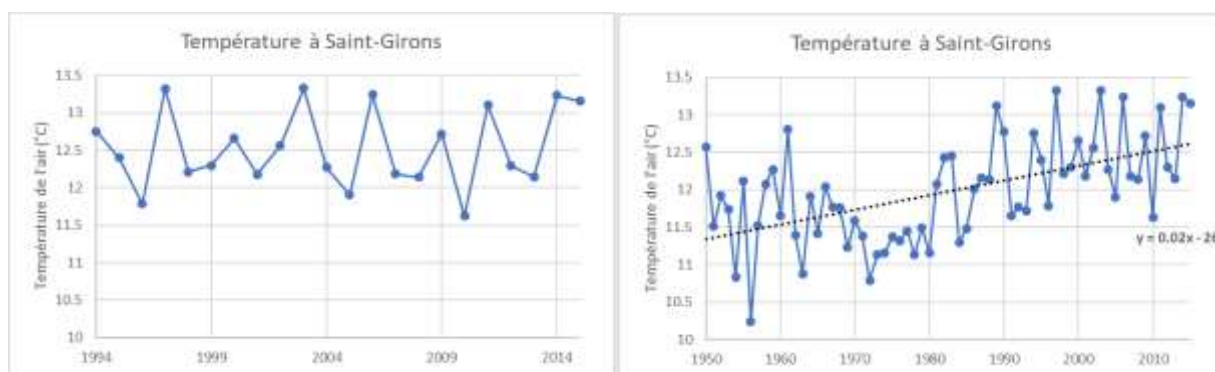


Figure 19. Température de l'air à Saint-Girons (données 1950-2015 : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique / Météo-France) sur la période 1994-2015 (gauche) et sur la période complète pour laquelle les données sont disponibles (1950-2015). L'équation est celle de la courbe de tendance statistiquement significative.

Ainsi, il est indispensable de **disposer de longues séries de données homogènes** (même modèle de sonde, pas de changement de localisation, d'ombrage, etc.) **et validées** (éliminations de points erronés) **afin d'être en mesure de détecter les effets du changement climatique** sur la température de l'eau.

4.3.2 Chroniques de températures sur le cours de la Garonne

Les séries temporelles de température de l'eau de la Garonne à Loures-Barousse, Valentine et Carbone ont des cycles saisonniers assez similaires avec un gradient de température amont-aval visible à toutes les saisons mais beaucoup plus prononcé en été qu'en hiver (Figure 20)

Les températures moyennes annuelles dans la période récente tendent à être supérieures à la moyenne 2009-2020 (Figure 21). C'est notamment le cas de 2016 à 2020 sur la Garonne à Valentine. Les contrastes de température amont-aval apparaissent très clairement avec environ 1,5-2°C entre chaque station.

A Valentine (Figure 21), c'est-à-dire dans la zone de transition entre le secteur aval du territoire et le secteur de montagne, on remarque l'augmentation de la température depuis 2013 presque chaque année. Cependant cette série temporelle est beaucoup trop courte pour extraire un signal climatique (comme discuté dans la partie précédente, un tel signal est souvent difficile à mettre en évidence et nécessite plusieurs dizaines d'années de données).

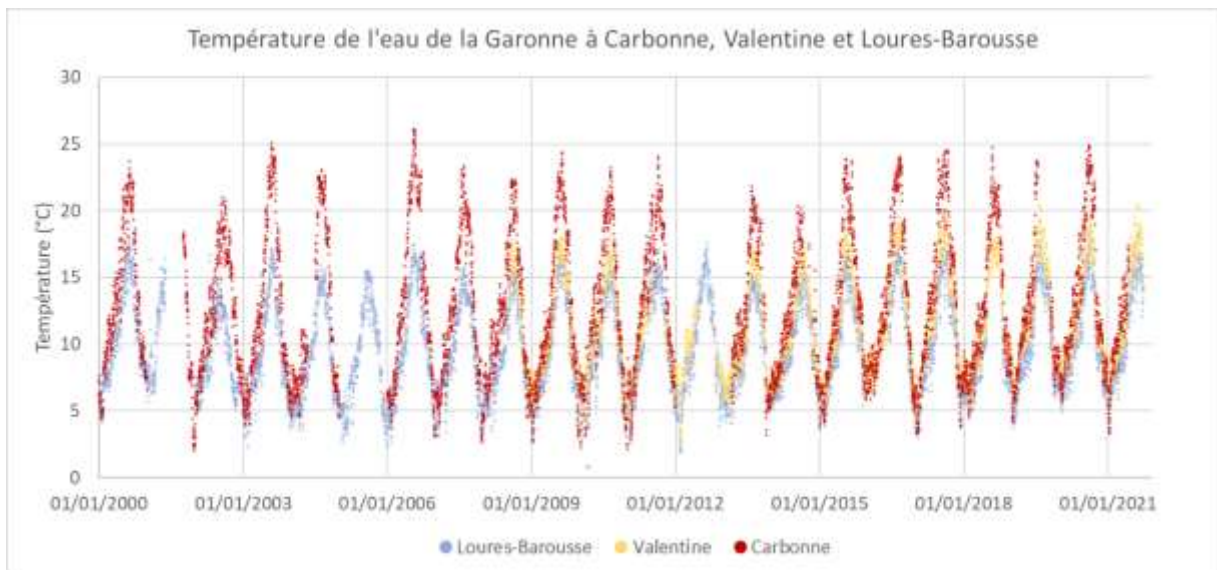


Figure 20. Série temporelle des températures journalières de l'eau de la Garonne d'amont en aval : à Loures-Barousse, Valentine et Carbone.

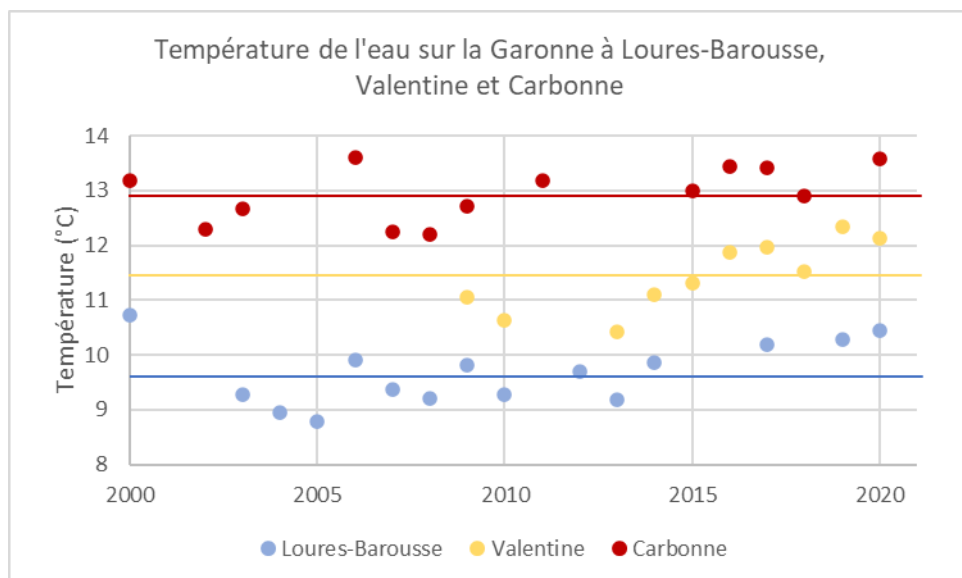


Figure 21. Température moyenne annuelle de l'eau de la Garonne d'amont en aval : à Loures-Barousse, Valentine et Carbonne.

4.3.3 Dépassements du seuil de 25°C (aval)

D'après les données MIGADO (qui donnent des températures plus basses que celles du RSA mais qui sont a priori plus représentatives car mesurant une eau mieux mélangée), le nombre de dépassement du seuil de 25°C en moyenne journalière au Bazacle n'a pas augmenté de façon significative depuis 1991 (Figure 22). Il y a une très forte variabilité interannuelle, avec certaines années sans dépassement du seuil et d'autres années avec plus de 10 jours de dépassements en moyenne journalière (et plus de 20 jours où la température maximale dépasse 25°C). Les années 2017-2021 présentent plus de dépassements de seuil que la moyenne 1991-2021 (notamment en moyenne journalière). Le nombre élevé de dépassements de seuil en 2017 (année pas particulièrement caniculaire) est étonnant et pourrait être lié à des problèmes de mesure.

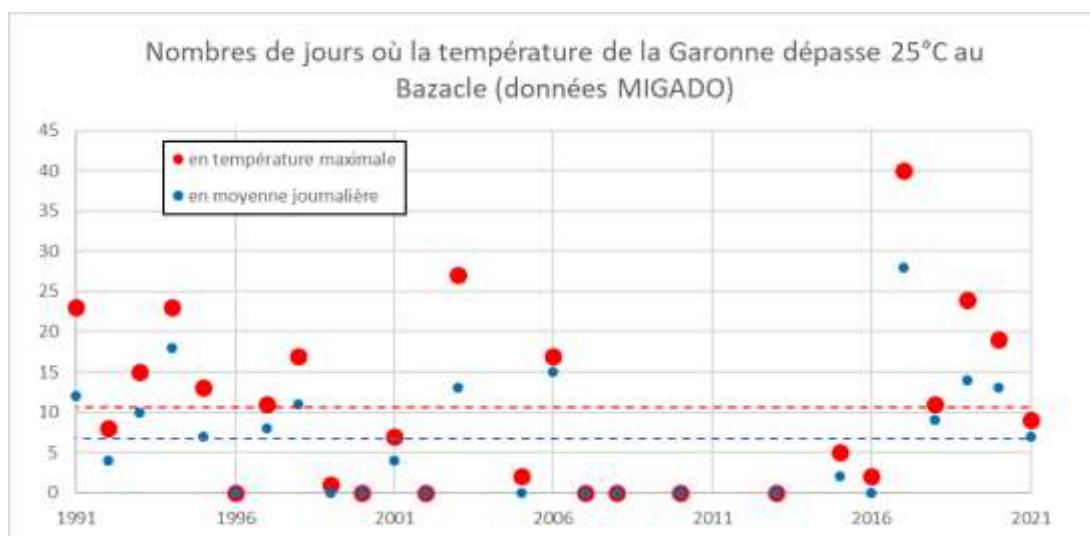


Figure 22. Nombre de dépassements du seuil de 25°C (en moyenne journalière) au Bazacle (données MIGADO). Les droites en pointillés indiquent les valeurs moyennes sur la période 1991-2021 (6,7 et 10,5 jours de dépassement respectivement en moyenne journalière et en valeur maximale).

La sonde RSA également située au Bazacle donne des dépassements de seuils plus nombreux que ceux mesurés avec la sonde MIGADO (Figure 23 et Figure 24), avec plus de 40 journées de dépassement lors de la canicule de 2003. Des dépassements de seuils sont également observés de façon plus occasionnelles à Carbone. Les données au Lherm, sur le Canal de St Martory, sont assez limitées (nombreuses données manquantes) mais les données de 2014 indiquent des dépassements de seuils plus fréquents qu'à Toulouse où la sonde RSA du Bazacle n'a mesuré aucune température supérieure à 25°C (au pas horaire, cf. Figure 24).

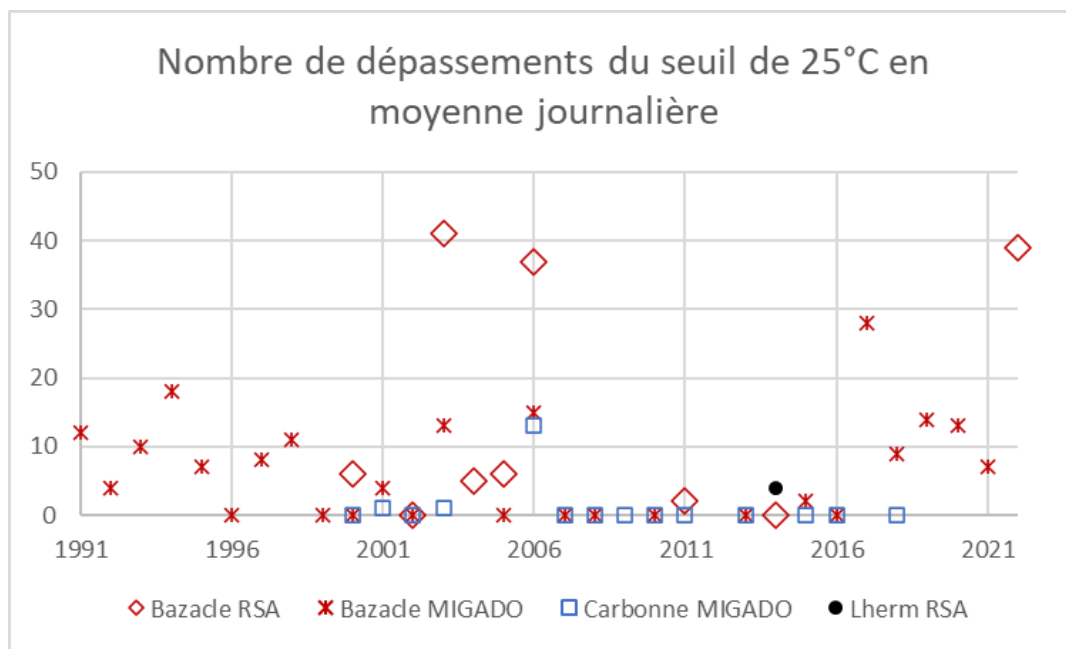


Figure 23. Nombre de dépassements du seuil de 25°C en moyenne journalière (idem Figure 22 mais avec des données de 4 stations de mesure différentes)

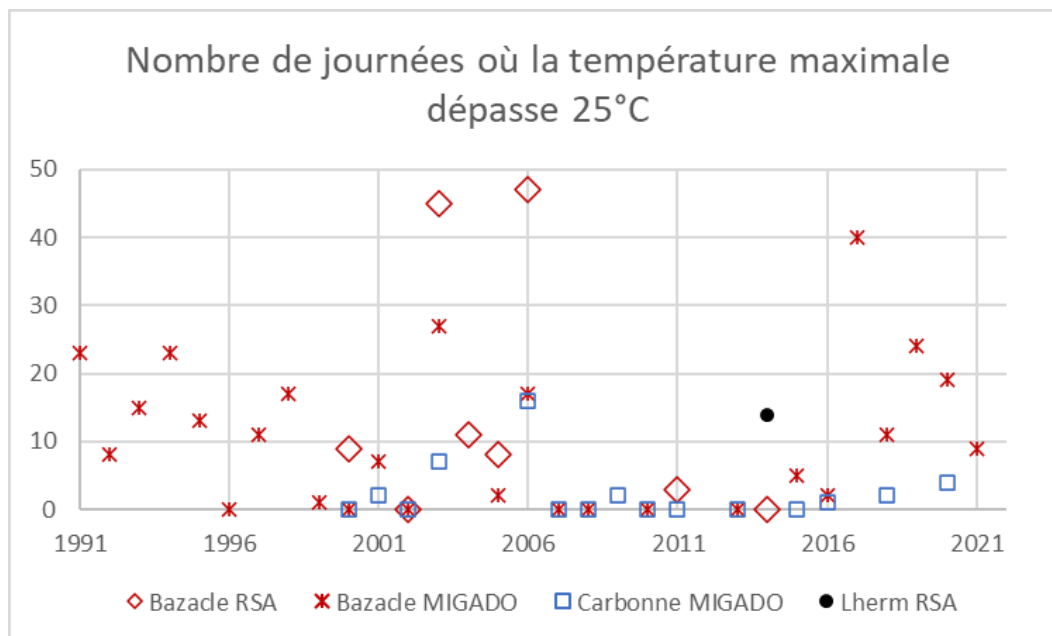


Figure 24. Nombre de journées où la température maximale de l'eau dépasse 25°C (données RSA et MIGADO au pas horaire).

4.3.4 Dépassements du seuil de 19°C

Une sélection de stations dans la zone de transition, sur la Garonne, la Neste, l'Arize et le Montbrun (affluent du Volp) est effectuée afin de comparer les occurrences de dépassement du seuil de 19°C en moyenne journalière (Figure 25). Sur la Neste aval (Aventignan) et sur la Garonne de Valentine à Labarthe-Inard on observe dans l'ensemble que les dépassements de seuils sont plus fréquents en aval qu'en amont (Figure 26). Les mesures à Valentine récupérées sur la plateforme Nâiades montrent cependant des dépassements de seuils beaucoup moins fréquents que celles issues de la sonde MIGADO également située à Valentine. Une visite de terrain et des échanges avec les producteurs de données seraient nécessaires pour mieux comprendre ces différences, qui peuvent venir du matériel, du pré-traitement des données (s'il existe) et de la localisation précise des sondes, comme discuté précédemment pour les sondes du Bazacle.

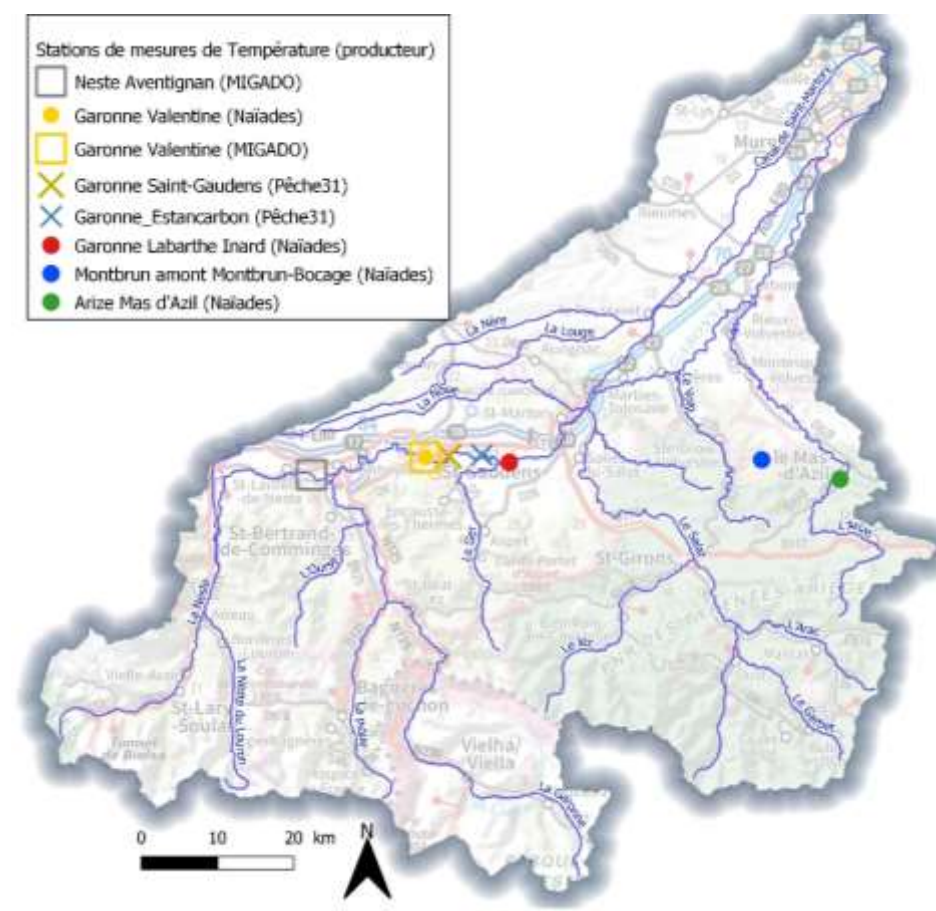


Figure 25. Stations sélectionnées pour les dépassements de 19°C de moyenne journalière.

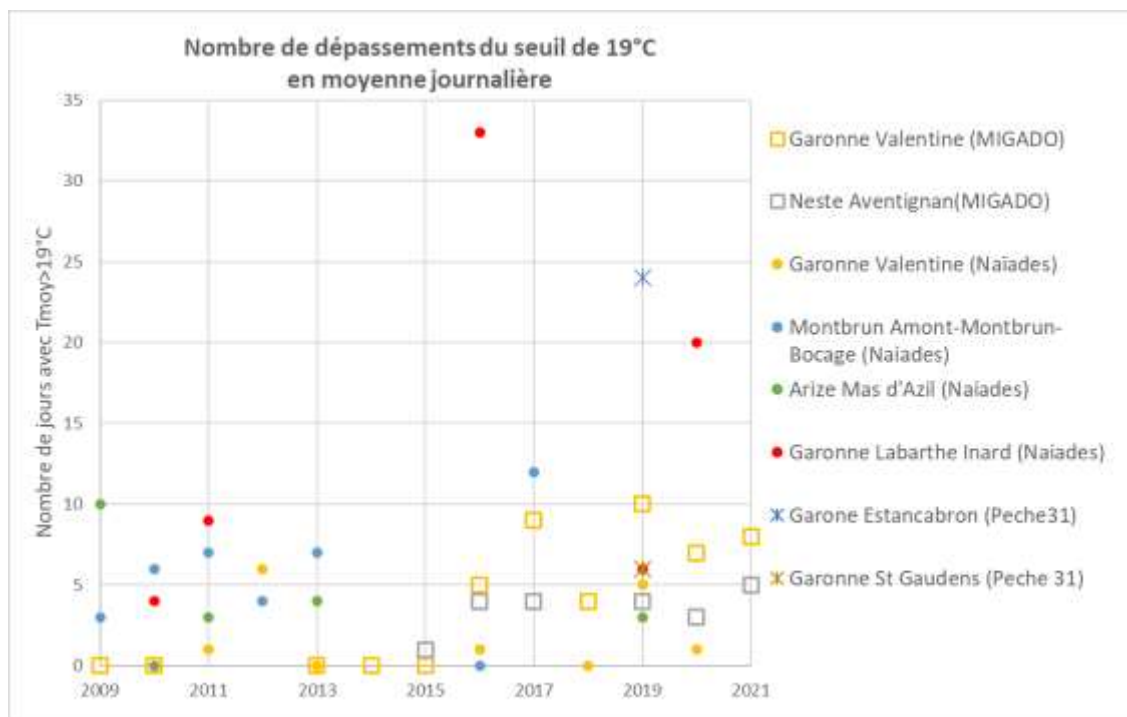


Figure 26. Nombre de dépassements du seuil de 25°C pour une sélection de stations de mesure de température de l'eau.

Ici encore, les séries temporelles sont trop courtes pour déceler une tendance, mais sur l'ensemble des données considérées (Figure 26) les 4 dépassements de seuil les plus importants sont observés en 2016 (Garonne à Labarthe-Inard), 2017 (Monbrun-Bocage), 2019 (Garonne à Estancabron) et 2020 (Labarthe-Inard).

4.4 Synthèse

On peut distinguer trois grandes régions sur le territoire en fonction des caractéristiques thermiques des cours d'eau et des enjeux qui leurs sont associés (Figure 27) :

- 1) La région la plus en aval est assez densément peuplée et connaît également les températures de l'eau les plus élevées et des dépassements du seuil de 25°C (fréquents à Toulouse Blagnac, rares mais possibles à Carbonne). L'enjeu principal y est la fabrication d'eau potable ;
- 2) Une zone « de transition » qui comprend aussi bien le sud de la plaine de la Garonne que les coteaux et les flancs nord des Pyrénées. Dans cette région la température des cours d'eau est très variable, mais des enjeux de biodiversité piscicole existent avec des dépassements par exemple du seuil de 19°C (seuil de stress physiologique pour la truite Fario) ;
- 3) Le secteur amont du territoire est une zone de montagne où la température de l'eau n'est en général pas encore un enjeu majeur mais reste à surveiller notamment en termes d'effets du changement climatique, et ce d'autant plus que les espèces piscicoles qui y vivent ne pourront pas remonter le cours d'eau contrairement aux espèces plus en aval.

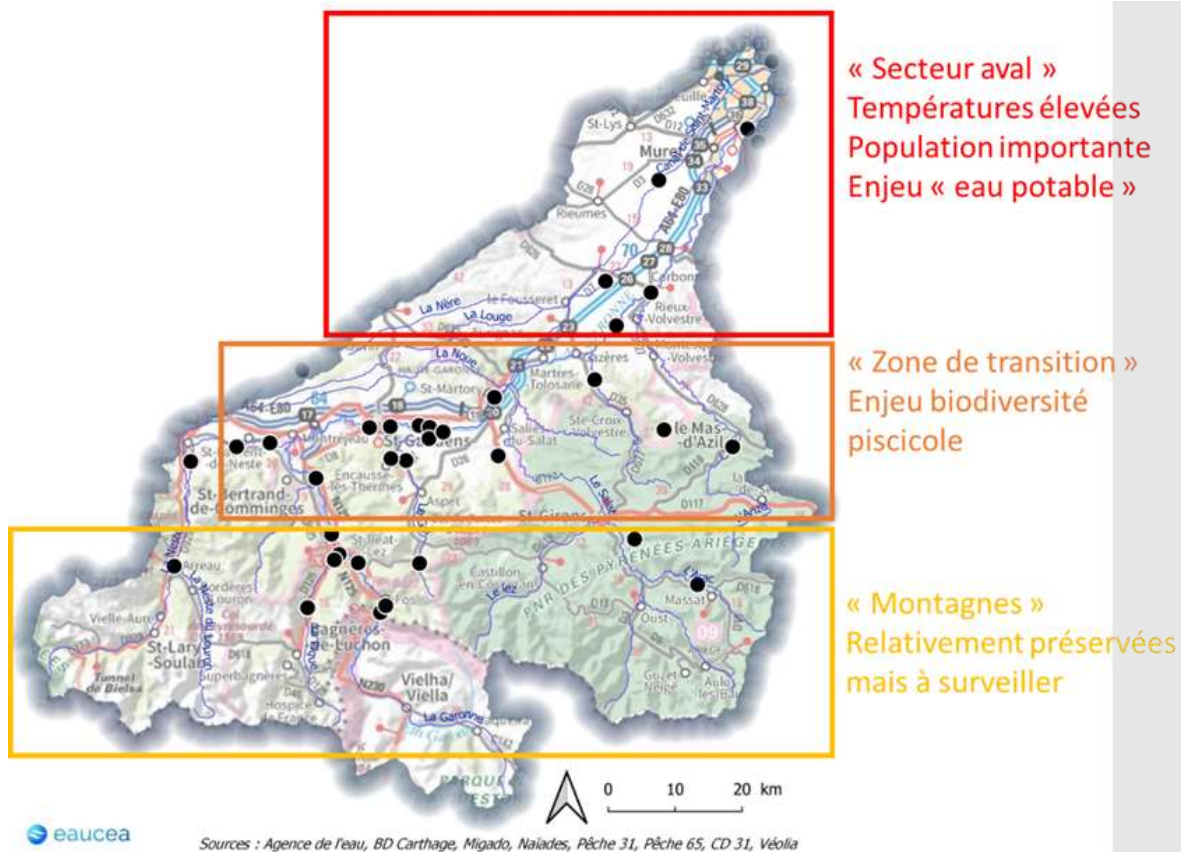


Figure 27. Régions du territoire en termes de thermie des cours d'eau et des enjeux associés.

5 FACTEURS D'INFLUENCE ET MODELISATION

5.1 Introduction

5.1.1 Mécanismes Physiques

La température de l'eau des rivières est contrôlée par de nombreux facteurs (figure 28) :

- la **température initiale** de l'eau en tête de tronçon ou de bassin ;
- les modifications de la température par **advection d'eau** (échanges avec la nappes, apport des affluents et précipitations, éventuels rejets) ;
- les **échanges thermiques** (radiation, flux de chaleur sensible et chaleur latente) avec l'atmosphère, le sol, le lit de la rivière et la végétation, le chauffage direct par le soleil, le refroidissement par évaporation.

Ainsi, une modélisation physique détaillée de la température du cours d'eau d'une rivière est complexe et nécessite un modèle prenant en compte, dans l'idéal, tous ces paramètres. Pour cela il faut une bonne connaissance du tronçon considéré, car la ripisylve et la topographie vont impacter fortement le rayonnement et donc la température (moyenne et amplitude diurne). Il est également nécessaire de connaître les affluents et de modéliser ou d'estimer leurs températures, d'estimer l'impact des échanges avec les nappes, etc. De nombreux modèles de ce type sont développés et utilisés dans le cadre de travaux de recherches (cf. les articles généraux de Dugdale et al., 2017 et Ouellet et al., 2020).

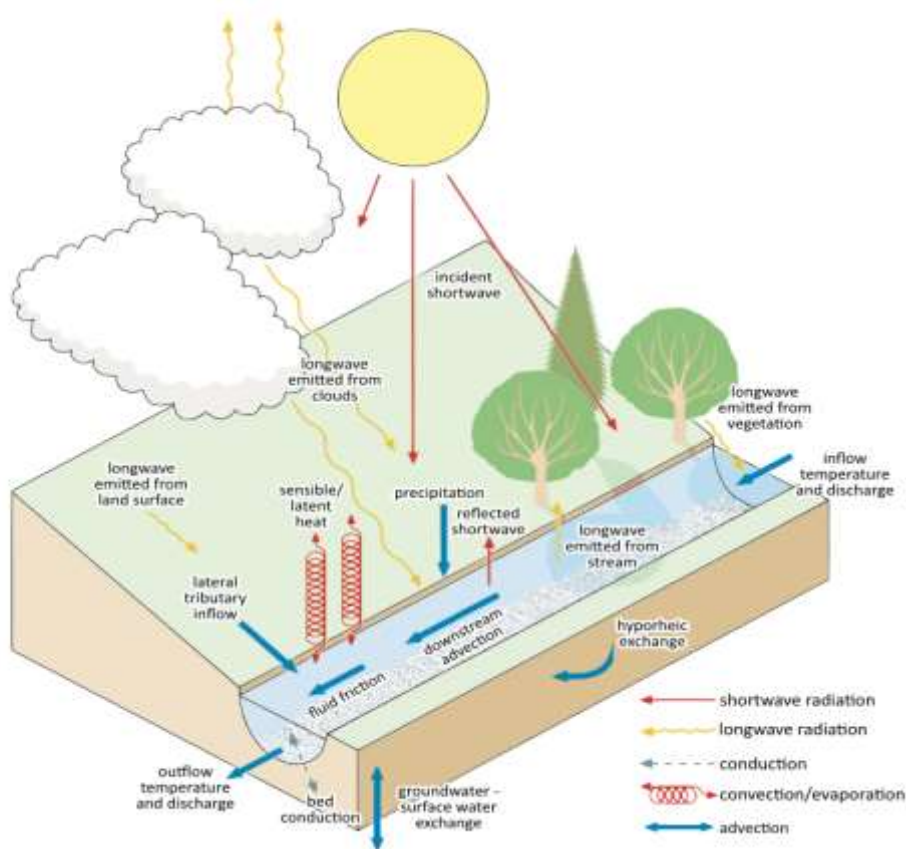


Figure 28 : Echanges hydrologiques et thermiques contrôlant la température de l'eau dans les rivières et devant être prises en compte dans les modèles détaillés (Dugdale et al., 2017).

5.1.2 Modélisations statistiques : exemple du projet TIGRE

Une autre façon d'étudier la thermie des rivières et les facteurs d'influences consiste à construire des modèles statistiques reliant la température de l'eau à d'autres facteurs, et permettant de reconstruire des données temporellement (par exemple pour générer des données là où elles manquent) ou spatialement (étendre les données en dehors des points de mesure).

C'est l'approche utilisée dans le cadre du projet TIGRE. Dans ce projet, une régression linéaire entre la température de l'eau et la température de l'air les jours précédents est réalisée pour chacune des stations de mesure étudiées. L'équation ainsi obtenue est ensuite utilisée pour reconstruire des données là où elles sont manquantes ou erronées, et obtenir alors des séries continues. Ces séries reconstruites sont alors utilisées pour calculer les indicateurs $\langle MT_{30j} \rangle$ et $\langle MT_{7j} \rangle$ à chaque station. Les chercheurs du projet ont ainsi sélectionné 16 variables explicatives possibles (à partir des données climatiques du modèle SAFRAN, morphométriques et hydrologiques RHT⁴, ainsi que les données SYRAH⁵ quantifiant les effets de la végétation rivulaire) et ont développé 3 modèles statistiques différents (réseau de neurone, forêt d'arbres décisionnels, régression multilinéaire).

Pour 2 des 3 modèles, les deux variables principales expliquant 50 à 70 % de la variabilité sont l'aire du bassin versant et la moyenne des températures de l'air en juillet-août (les auteurs indiquent que de façon surprenante la modélisation basée sur les réseaux de neurone donne par contre une importance très faible à ces deux paramètres, inférieure à 5%). Ils ont par ailleurs été plus loin sur la Loire Amont (9 000 km² et 92 stations de mesure bien réparties) en développant un modèle géostatistique qui utilise la distance le long d'un cours d'eau (effet d'advection) et également la distance à vol d'oiseau avec ou sans connexion hydrologique pour tenir compte des effets climatiques. Les résultats de ce modèle géostatistique permettent une bonne représentation de la température des cours d'eau là où le maillage territorial est suffisamment important.

Ces modèles statistiques, qu'il s'agisse de régression linéaire ou de modèles plus complexes, se basent toujours sur un **jeu de données passées**. Ils ne sont donc généralement pas adaptés pour étudier les effets du changement climatique car ils ne peuvent pas générer de façon adaptée des situations qui n'ont pas existé dans le jeu de données utilisé pour les construire.

Dans la suite de cette partie, nous comparons les températures de sources, d'un puits et d'une série de mesures de rivière en Ariège qui permettent d'illustrer les différences entre température de l'eau de surface et températures des eaux de nappes (données fournies par le Conseil départemental de l'Ariège). Ensuite, nous nous focalisons sur les mesures en rivière et utilisons des régressions linéaires et bilinéaires pour étudier l'influence de différents paramètres, puis nous appliquons ces résultats dans une optique de prévisions et discutons les possibilités et limites de cette approche, pour finalement proposer des perspectives pour ces travaux.

⁴ Réseau Hydrographique Théorique français

⁵ Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau

5.1.3 De la source à la rivière

Nous disposons de données sur deux sources, un puits et un cours d'eau, dans un périmètre assez restreint pour que les données puissent être comparées. On remarque d'une part que la température de l'eau des sources varie très peu par rapport à celle de l'eau du puits de Pitarlet (figure 29). Ainsi, la source de la Fontaine blanche a une température quasi-constante avec des variations de seulement 0,6°C, celle de la Courate présente une amplitude annuelle de l'ordre de 1 à 1,5°C tandis que l'eau du puits a une amplitude annuelle d'environ 5 à 6 °C. Par comparaison, l'Arac à Biert a une amplitude annuelle de 16 à 18°C (figure 30). Les températures de l'air (en moyenne journalière) sont encore plus variables, avec une amplitude annuelle de l'ordre de 20 à 25°C (voir plus si l'on tient compte des valeurs les plus extrêmes).

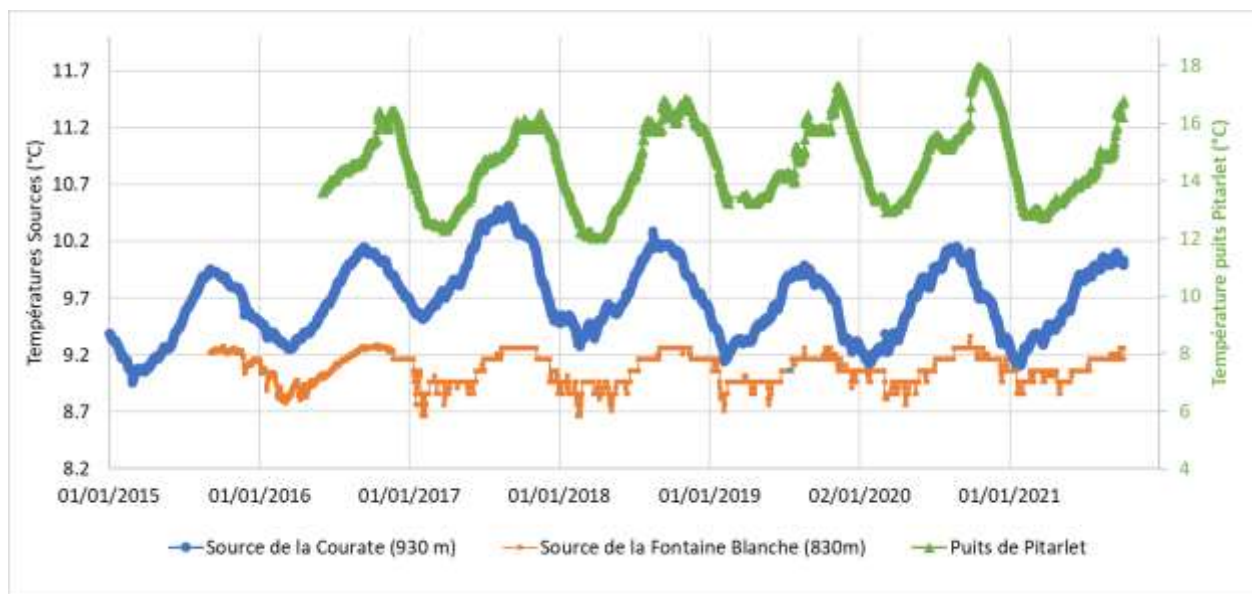


Figure 29. Température de l'eau des sources de la Courate et de la Fontaine Blanche, ainsi que du puits de Pitarlet (données CD09).

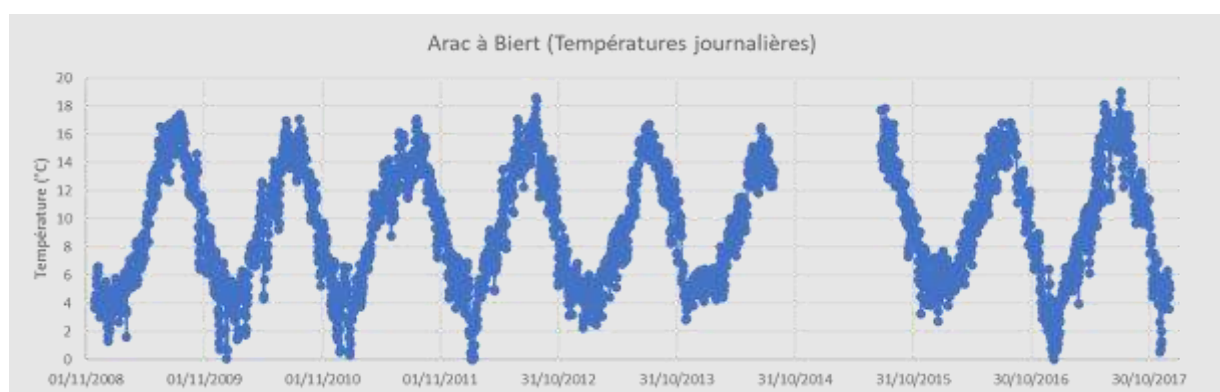


Figure 30. Température de l'Arac à Biert (moyennes journalières, données Naiades / OFB / TIGRE).

D'autre part, comme attendu les températures de l'eau en rivière présentent un cycle annuel plus proche de celui des températures de l'air. Les températures des eaux souterraines (sources ou puits) sont en moyenne plus stables au cours de l'année et vont donc en général être plus chaudes que la température d'un cours d'eau proche en hiver, et plus froides en été. Ainsi, lorsque la température de l'eau des cours d'eau est élevée en été, les apports des aquifères superficiels vont avoir un effet refroidissant. **Cette observation souligne l'importance des échanges avec les aquifères superficiels dans une perspective de limitation de l'augmentation de la température de l'eau des rivières due au changement climatique et à l'augmentation des températures de l'air.**

Dans la suite de cette partie nous nous focalisons sur la température des rivières, mais il est essentiel de garder à l'esprit l'impact des échanges avec les eaux souterraines.

5.2 Température de l'air

5.2.1 Données

Afin d'étudier les liens entre température de l'air et température de l'eau, nous disposons de données ponctuelles aux stations de mesures Météo-France acquises par le Conseil départemental de la Haute-Garonne, ainsi que de données SAFRAN (générées à partir d'observations de surface et de modèles météorologiques) obtenues via une convention entre le Conseil départemental de la Haute-Garonne et le SMEAG dans le cadre du projet Life Eau&Climat.

On remarque que les gradients de température de l'eau (températures élevées à l'aval et plus faibles à l'amont) correspondent également aux gradients de température de l'air liés aux différences d'altitude (figure 31). Sur la partie aval du domaine la température de l'eau moyenne des 30 jours la plus chaude est proche de la température moyenne de l'air en été, tandis que plus en amont la température de l'eau est plus faible que celle de l'air (en accord avec les observations sur les sources et puits effectuées dans la partie précédente). Une partie des écarts entre température de l'air et de l'eau vient de l'advection d'eau froide de l'amont et des échanges avec la nappe (plus froide en été). Ces écarts peuvent aussi en partie provenir du fait que les données SAFRAN couvrent la période 2000-2021 lorsque les stations de mesure de température de l'eau couvrent des périodes plus courtes et différentes d'une station à l'autre. De plus, la maille SAFRAN faisant 8 km de côté, l'altitude est lissée à cette échelle là et donc l'altitude moyenne du point SAFRAN peut être très différente de celle d'une station de mesure ponctuelle en fond de vallée. Pour plus d'informations sur SAFRAN voir par exemple Vidal et al. 2010.

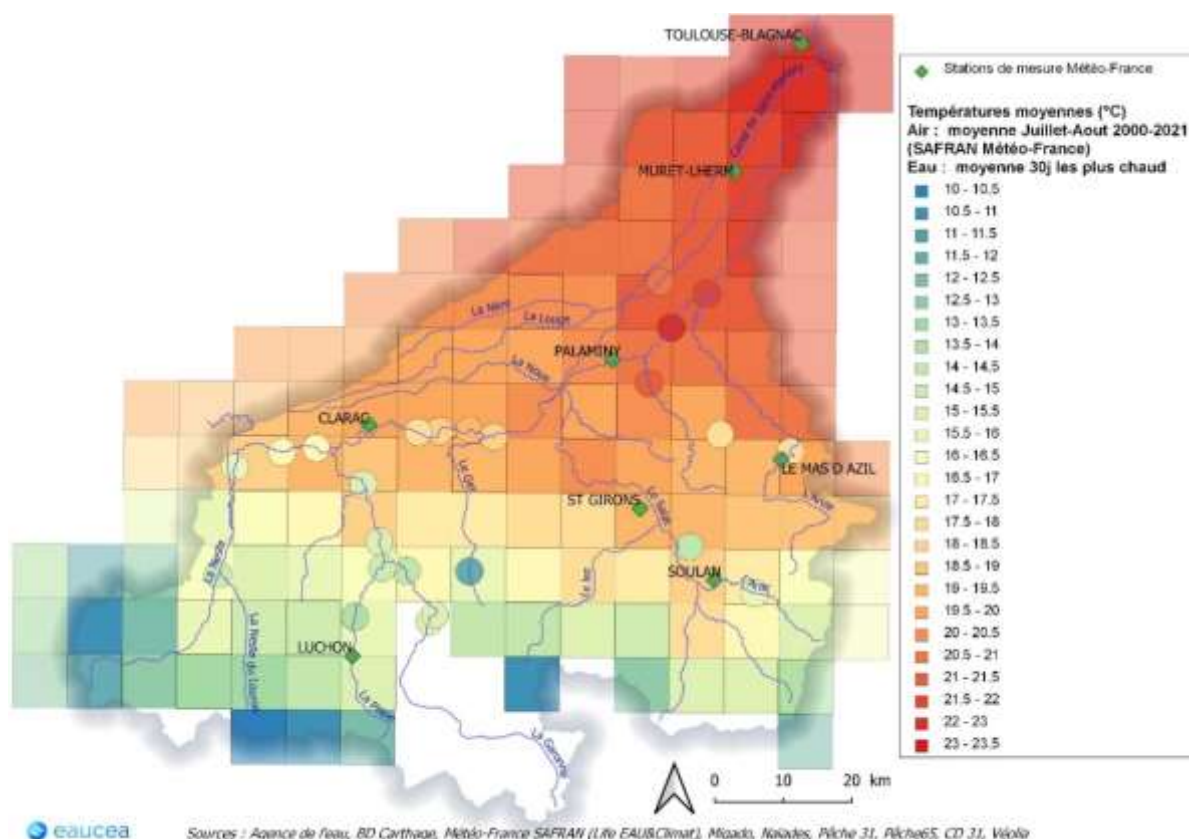


Figure 31. Température de l'air en Juillet-Aout (moyenne 2000-2021, données SAFRAN : Météo France, Life/Climat) et température de l'eau aux stations de mesures, pendant les 30 jours les plus chaud de chaque année où un été quasi-complet est disponible (années de mesures variables d'une station à l'autre). Les stations de mesures Météo-France sont indiquée en vert.

5.2.2 Relations linéaires

A partir des données disponibles, nous représentons la température de l'eau en fonction de la température de l'air pour différentes stations de mesures. Nous observons des corrélations significatives aussi bien sur la Garonne à Toulouse (au Bazacle, figure 32) que par exemple sur l'Arac à Biert (figure 33). Dans les deux cas, les coefficients de détermination R^2 sont proches de 0,9. Certains points montrent cependant un écart important à la droite de régression : il pourrait s'agir soit de points aberrants non filtrés, soit de situations particulières pour lesquelles la température moyenne de l'air n'est pas le facteur déterminant pour la température de l'eau.

Dans les deux cas, l'écart en valeur absolue entre la température calculée à l'aide de la régression linéaire à partir de la température de l'air et celle mesurée directement est de moins de 2°C dans la majorité des cas (77,2% des cas à Toulouse⁶ et 92,7% à Biert). L'écart est supérieur à 3°C dans seulement 2% des cas à Biert et 7,2% des cas à Toulouse.

⁶ Cette valeur ne semble pas liée à la situation spécifique du Bazacle (présence d'un barrage), en effet à Portet-sur-Garonne (données Naiade / TIGRE) on obtient des résultats très similaires avec des écarts absolus entre modèle linéaire et mesures inférieurs à 2°C dans 79% des cas.

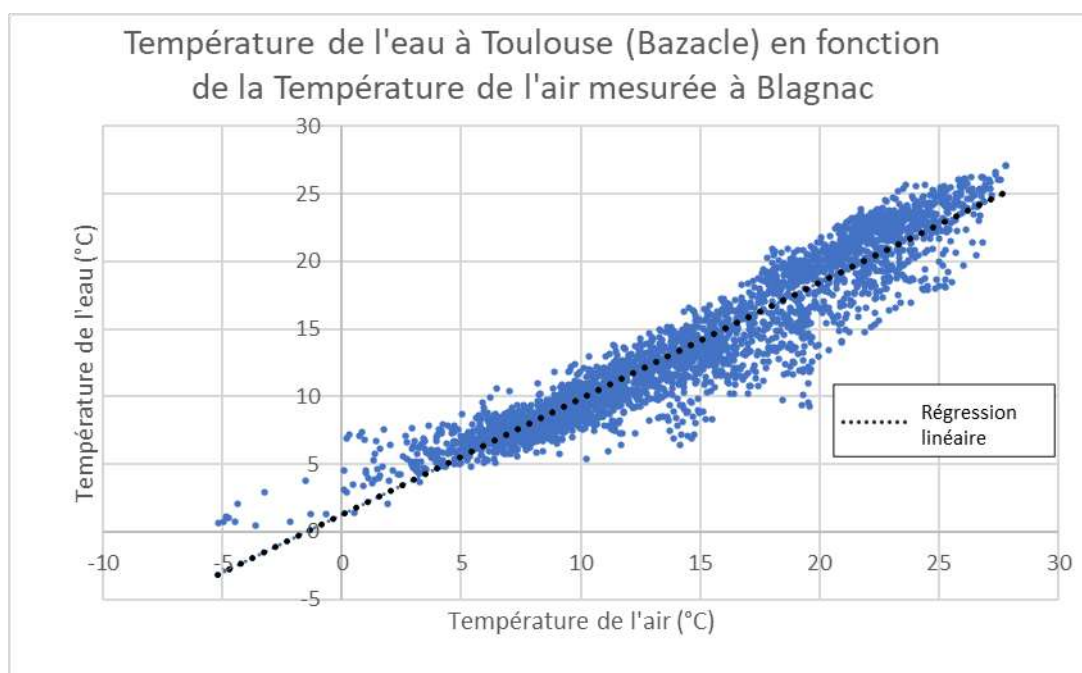


Figure 32. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse le jour J (moyenne journalière) en fonction de la température moyenne de l'air sur 8 jours (J-7 à J inclus). Données Météo-France (station Toulouse-Blagnac) et MIGADO (température de l'eau au Bazacle). Données 2008-2020 (avec des données manquantes cependant).

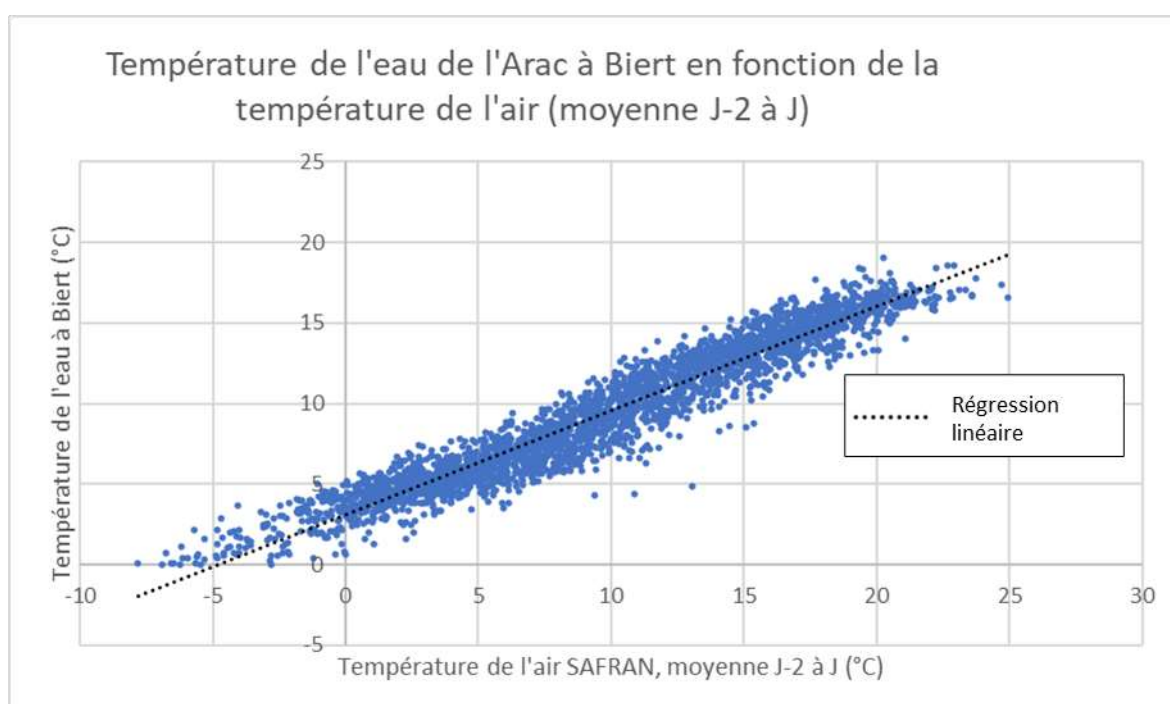


Figure 33. Température de l'eau de l'Arac à Biert (Données Naiades / TIGRE) en fonction de la température de l'air issue du modèle SAFRAN (Météo-France Life/Climat) moyennée sur les 3 jours précédents (J-2 à J). Les données utilisées couvrent la période 2008-2018.

5.2.3 Prévision de la température de l'eau

Les liens observés entre température de l'air et température de l'eau, permettent d'envisager le développement de modèles statistiques de prévision des températures de l'eau, en utilisant des prévisions de température de l'air.

Des détails complémentaires sur les liens entre la température de l'air et celle de l'eau, les modélisations statistiques et la prévision de la température de l'eau seront fournis dans un rapport spécifique.

6 CONCLUSIONS

Nous avons présenté les données collectées, leur traitement et mise en forme. Les données sont désormais disponibles au format préconisé par la DREAL Occitanie. L'analyse cartographique des données disponibles a mis en évidence les zones présentant des manques et la nécessité de pérenniser un réseau de suivi afin de disposer de séries de données longues sur l'ensemble du territoire. Des indicateurs standards de températures élevées des cours d'eau ont été présentés pour l'ensemble des stations pour lesquelles au moins un été complet est disponible. Ces indicateurs pourraient aussi être intégrés à la base de données. Une mobilisation des producteurs de données pourrait permettre de compléter les métadonnées et d'affiner le traitement des données de température de l'eau. Des fiches stations seront réalisées afin de synthétiser les informations pertinentes sur chaque station. Elles seront complétées par les producteurs de données qui pourront y inclure des informations techniques (type de sonde par exemple) ainsi que les détails de l'installation (localisation précise, présence d'ombrage, etc.).

Sur la base des stations disponibles, les premières comparaisons entre eaux souterraines et eaux de surfaces ont mis en évidence l'effet atténuateur des apports d'eau souterraines dont la température varie beaucoup moins dans l'année que celle des rivières. Cette analyse nécessite d'être poussée avec la prise en compte d'autres données souterraines notamment, ce qui devrait pouvoir être effectué avec la mise en place d'un site pilote « démonstrateur », dont les caractéristiques seront définies en 2023.

L'étude des facteurs d'influence a montré la corrélation de la température de l'eau avec la température de l'air les jours précédents, et ouvre la voie pour des prévisions de températures de l'eau à partir de la température de l'air. Ces aspects de modélisations et prévisions de la température de l'eau feront l'objet d'un rapport détaillé.

7 BIBLIOGRAPHIE

Baptist, F., Poulet, N., Séon-Massin, N. (2014) : Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation. Onema, collection comprendre pour agir, 128p, ISBN : 970-10-91047-38-8

Chanseau, M., Nars, A., Menchi, O., Carry, L., Bosc, S. (2008) : les conditions du milieu sur le bassin de la Garonne et les besoins des migrateurs amphihalins. Rapport MIGADO
http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/61369/GED_00000000.pdf

Dugdale, S. J., Hannah, D. M., Malcolm, I. A. (2017) : River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. *Earth Science Reviews*, doi:10.1016/j.earscirev.2017.10.00

Durlet, P (2009) : Éléments techniques pour la préservation des ruisseaux : retour d'expériences du programme LIFE, Ruisseaux de têtes de bassins et faune patrimoniale associée, 2004-2009, Parc naturel régional du Morvan, 80 p. ; ISBN : 978-2-918060-04-8.

Haidekker, A., Hering, D. (2008) : Relationship between benthic insects (Ephemeroptera, Plecoptera, Coleoptera, Trichoptera) and temperature in small and medium-sized streams in Germany: A multivariate study. *Aquat Ecol* **42**, 463–481 <https://doi.org/10.1007/s10452-007-9097-z>

Larnier, K., Roux, H., Dartus, D. and Croze, O. (2010) : Water Temperature Modeling in the Garonne River (France). *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 398, 20.

Larnier, K. (2010) : Modélisation thermohydraulique d'un tronçon de Garonne en lien avec l'habitat piscicole : approches statistique et déterministe, thèse de Doctorat, INP Toulouse.

Marteau, B., Piégay, H., Chandèsris, A., Cernesson, F., Michel, K., Piffady, J., Vaudor, L. (2019) : Effets de la ripisylve sur l'échauffement thermique des cours d'eau : de l'évaluation par télédétection à l'extrapolation à l'échelle régionale (plaine de la Bresse)
http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Prg_Rech/A59-Piegay-rapport.pdf

Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S. J., Hannah, D. M., Krause, S., Proulx-Ouellet, S. (2020): River temperature research and practice : Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems, *Science of The Total Environment* 736, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>

Story A, Moore RD, Macdonald JS. (2003): Stream temperatures in two shaded reaches below cutblocks and logging roads: Downstream cooling linked to subsurface hydrology. *Canadian Journal of Forest Research* 33 : 1383–1396. DOI: 10.1139/x03-087

TIGRE (Thermie en rivière : analyse géostatistique et description de régime) :
- site internet du projet : <https://thermie-rivieres.inrae.fr/>

- rapport final : A. Beaufort, F. Moatar, E. Sauquet, 2020. Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France, INRAE UR RiverLy, Université de Tours GÉHCO

https://florentinamoatar.files.wordpress.com/2020/12/projet-tigre_rapport_final_2020.pdf

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. and Soubeyroux, J.-M. (2010) : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30 : 1627–1644. doi : 10.1002/joc.2003

8 ANNEXES

Indicateurs et statistiques aux stations disposant de longues séries de données

Cette annexe présente une série d'indicateur pour chaque année avec moins de 10 jours de données manquantes entre Juin et Septembre, pour les 6 stations MIGADO ayant au moins 10 années disponibles. Les indicateurs présentés sont calculés à partir de données recueillies **au pas de temps horaire** (sauf mention contraire).

Les indicateurs présentés sont :

- *Teau_XJ moyenne* ($X = 1, 7$ ou 30) : température moyenne journalière des X jours consécutifs les plus chauds ;
- *Teau_XJ max* ($X = 1, 7$ ou 30) : moyenne des maximums journaliers des températures des X jours consécutifs les plus chauds (calculé à partir des données au pas horaire) ;
- *Nb jours $T_{moy} > 19^{\circ}\text{C}$* : nombre de jours où la température moyenne journalière dépasse 19°C ;
- *Nb jours $T_{moy} > 25^{\circ}\text{C}$* : nombre de jours où la température moyenne journalière dépasse 25°C ;
- *Nb jours $T_{max} > 19^{\circ}\text{C}$* : nombre de jours où la température maximale journalière dépasse 25°C (calculé à partir des données au pas horaire) ;
- *Nb jours $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$* : nombre de jours où la température maximale journalière dépasse 25°C (calculé à partir des données au pas horaire).

De plus, en bas de tableau, pour chaque indicateur la moyenne, la médiane et plusieurs centiles sont également indiqués. Il s'agit donc de fréquences expérimentales observées sur les années disponibles, et non pas de fréquences de retour qui nécessitent de faire des hypothèses sur la distribution des événements extrême (et peut ne pas avoir beaucoup de sens lorsque seulement 10 années sont disponibles)

Indicateurs sur la Garonne à Toulouse, au Bazacle (données MIGADO)

Données de l'Associations MIGADO au pas horaire ; sonde suivie par M. Dartiguelongue de SCEA (pour le compte de MIGADO) jusqu'en 2018.

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
1991	27.5	26.9	24.8	28.4	27.8	25.5	83	12	90	23
1992	25.2	24.9	23.5	25.8	25.3	23.9	59	4	66	8
1993	26.1	25.3	24.3	27.0	26.0	24.9	94	10	101	15
1994	27.7	26.7	25.3	28.2	27.1	25.8	82	18	85	23
1995	25.5	25.3	24.3	25.9	25.6	24.7	78	7	82	13
1996	24.2	23.4	22.3	24.3	23.7	22.6	61	0	66	0
1997	26.2	25.4	23.8	26.7	25.8	24.3	112	8	121	11
1998	25.9	25.1	23.6	26.6	25.9	24.4	83	11	87	17
1999	24.7	24.2	23.4	25.1	24.7	23.8	95	0	100	1
2000	24.8	24.4	22.6	25.0	24.7	23.0	81	0	92	0
2001	26.0	25.1	23.4	26.5	25.6	23.8	74	4	90	7
2002	22.2	21.1	19.6	22.7	21.6	20.3	39	0	56	0
2003	26.8	26.6	25.2	27.5	27.3	25.7	87	13	94	27
2005	24.9	24.4	22.5	25.2	24.8	22.9	64	0	75	2
2006	26.5	26.0	24.8	27.0	26.4	25.2	102	15	104	17
2007	22.3	21.9	20.7	22.6	22.3	21.1	44	0	50	0
2008	22.0	21.5	20.0	22.3	21.9	20.4	35	0	40	0
2010	24.4	23.7	22.0	24.7	24.0	22.5	76	0	83	0
2013	23.1	22.4	21.5	23.8	23.2	22.3	62	0	74	0
2015	25.4	24.8	23.5	25.9	25.3	24.0	85	2	95	5
2016	24.7	23.7	23.1	25.3	24.2	23.5	89	0	102	2
2017	27.5	26.5	25.0	27.9	27.0	25.4	125	28	136	40
2018	27.1	26.4	24.2	27.4	26.8	24.7	98	9	107	11
2019	26.4	25.5	24.7	26.6	26.1	25.1	98	14	105	24
2020	26.0	25.2	24.5	26.4	25.7	24.9	101	13	105	19
2021	25.7	25.0	23.2	26.1	25.5	23.7	109	7	117	9
Moyenne	25.3	24.7	23.3	25.8	25.2	23.8	81.4	6.7	89.3	10.5
Médiane	25.6	25.1	23.5	26.0	25.5	24.0	83.0	5.5	91.0	8.5
10 ^e centile	22.7	22.1	21.1	23.2	22.7	21.7	51.5	0	61.0	0
20 ^e centile	24.4	23.7	22.3	24.7	24.0	22.6	62.0	0	74.0	0
80 ^e centile	26.5	26.0	24.7	27.0	26.4	25.1	98.0	13.0	105.0	19.0
90 ^e centile	27.3	26.6	24.9	27.7	27.1	25.4	105.5	14.5	112.0	23.5
Écart-type	1.6	1.6	1.5	1.7	1.6	1.6	22.3	7.3	22.1	10.7

Indicateurs sur la Garonne à Carbonne (données MIGADO)

année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2000	23.7	22.9	21.4	24.5	23.4	21.9	69	0	71	0
2001	25.1	24.1	22.1	25.5	24.6	22.6	66	1	68	2
2002	21.0	20.0	18.8	21.5	20.6	19.3	17	0	26	0
2003	25.2	24.3	23.6	26.6	25.6	24.5	71	1	79	7
2006	26.1	25.9	24.5	27.4	26.7	25.0	100	13	101	16
2007	23.3	22.7	21.1	24.1	23.3	21.6	57	0	66	0
2008	22.3	22.1	20.8	23.0	22.6	21.3	46	0	50	0
2009	24.4	23.8	22.3	25.5	24.5	22.9	76	0	79	2
2010	23.2	22.7	21.1	24.5	23.3	21.6	65	0	70	0
2011	24.1	23.3	21.2	24.4	23.7	21.8	61	0	77	0
2013	21.9	21.0	20.2	23.9	23.5	20.6	44	0	54	0
2015	23.8	23.4	22.4	24.5	24.1	22.9	66	0	71	0
2016	24.1	23.5	23.1	25.4	24.2	23.6	74	0	82	1
2018	24.8	23.7	21.5	25.7	24.3	22.2	72	0	79	2
2020	24.9	24.5	23.4	25.9	25.1	24.0	83	0	89	4
Moyenne	23.9	23.2	21.8	24.8	24.0	22.4	64.5	1.0	70.8	2.3
Médiane	24.1	23.4	21.5	24.5	24.1	22.2	66.0	0.0	71.0	0.0
10 ^e centile	22.0	21.5	20.4	23.4	22.9	20.9	44.8	0.0	51.6	0.0
20 ^e centile	23.1	22.6	21.0	24.1	23.3	21.5	54.8	0.0	63.6	0.0
80 ^e centile	24.9	24.1	23.1	25.7	24.7	23.7	74.4	0.2	79.6	2.4
90 ^e centile	25.2	24.4	23.5	26.3	25.4	24.3	80.2	1.0	86.2	5.8
Écart- type	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	19.0	3.3	17.7	4.3

Indicateurs sur la Garonne à Valentine (données MIGADO)

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2009	18.1	17.9	17.1	20.2	19.7	18.5	0	0	14	0
2010	18.2	17.7	16.6	19.8	18.6	17.7	0	0	2	0
2013	17.2	16.8	16.4	18.7	18.1	17.6	0	0	0	0
2014	17.3	16.8	16.1	18.9	17.8	17.2	0	0	0	0
2015	19.0	18.1	17.4	21.2	20.1	18.8	0	0	26	0
2016	19.6	18.8	18.3	21.6	20.5	19.8	5	0	43	0
2017	19.8	19.1	18.0	21.6	20.5	19.3	9	0	42	0
2018	19.5	18.8	17.4	21.2	20.2	18.7	4	0	24	0
2019	20.4	19.5	18.5	21.8	20.8	19.7	10	0	41	0
2020	19.9	19.0	18.4	22.0	21.0	20.2	7	0	45	0
2021	20.4	19.6	18.4	21.9	21.2	19.7	8	0	36	0
Moyenne	19.0	18.4	17.5	20.8	19.9	18.8	3.9	0	24.8	0
Médiane	19.5	18.8	17.4	21.2	20.2	18.8	4.0	0	26.0	0
10 ^e centile	17.3	16.8	16.4	18.9	18.1	17.6	0.0	0	0.0	0
20 ^e centile	18.1	17.7	16.6	19.8	18.6	17.7	0.0	0	2.0	0
80 ^e centile	19.9	19.1	18.4	21.8	20.8	19.7	8.0	0	42.0	0
90 ^e centile	20.4	19.5	18.4	21.9	21.0	19.8	9.0	0	43.0	0
Écart- type	1.2	1.0	0.9	1.2	1.2	1.0	4.1	0	18.1	0

Indicateurs sur la Garonne à Loures-Barousse (données MIGADO)

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2000	18	17.5	16.2	20	19	17.9	0	0	4	0
2002	14.9	13.9	13.2	17	15.3	14.3	0	0	0	0
2007	15.7	15.5	14.5	16.1	15.9	15	0	0	0	0
2008	16.3	15.4	14.7	18	17	16	0	0	0	0
2009	16.6	16.4	15.9	19	18.3	17.5	0	0	0	0
2010	16.5	15.9	14.9	18.9	17.9	16.6	0	0	0	0
2011	17.4	16.7	15.4	20.3	18.3	16.7	0	0	8	0
2012	17.6	17	16.1	18.1	17.6	16.9	0	0	0	0
2013	15.2	14.9	14.5	16.9	16.3	15.5	0	0	0	0
2014	15.4	15.1	14.5	17.4	16.8	16	0	0	0	0
2015	17.4	16.2	15.5	19.7	18.4	17.1	0	0	2	0
2017	18.2	17.4	16.2	20.9	19.6	17.9	0	0	9	0
2019	18.3	17.4	16.3	20.8	19.6	18.3	0	0	10	0
2020	18.8	17.9	16.7	22	20.9	18.8	0	0	16	0
2021	18.2	17.5	16.3	20.6	19.6	18.1	0	0	11	0
Moyenne	17	16.3	15.4	19	18	16.8	0	0	4	0
Médiane	17.4	16.4	15.5	19	18.3	16.9	0	0	0	0
10 ^e centile	15.3	15	14.5	16.9	16.1	15.2	0	0	0	0
20 ^e centile	15.7	15.4	14.5	17.3	16.7	15.9	0	0	0	0
80 ^e centile	18.2	17.4	16.2	20.6	19.6	17.9	0	0	9.2	0
90 ^e centile	18.3	17.5	16.3	20.8	19.6	18.2	0	0	10.6	0
Écart- type	1.3	1.2	1	1.7	1.6	1.3	0	0	5.4	0

Remarque : de 2003 à 2006 les données horaires sont incomplètes mais les données journalières donnent les résultats ci-après :

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2003	17.1	16.7	16.1	-	-	-	0	0	-	-
2004	15.9	15.1	14.6	-	-	-	0	0	-	-
2005	15.5	15.2	14.6	-	-	-	0	0	-	-
2006	17.5	16.7	16.4	-	-	-	0	0	-	-

Indicateurs sur la Pique à Marignac (données MIGADO)

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2012	15.7	15.1	14.4	17.5	16.5	15.7	0	0	0	0
2013	15.5	15.1	14.5	16.9	16.5	15.9	0	0	0	0
2014	14.6	14.1	13.6	16.3	15.2	14.6	0	0	0	0
2015	16.0	14.9	14.6	17.4	16.6	16.2	0	0	0	0
2016	16.1	15.5	15.2	17.5	17.0	16.3	0	0	0	0
2017	17.7	17.1	15.5	19.6	18.5	16.9	0	0	2	0
2018	15.9	15.2	13.7	18.0	17.1	15.3	0	0	0	0
2019	16.8	16.2	15.2	19.2	18.1	16.9	0	0	1	0
2020	16.8	16.2	14.8	17.8	16.9	15.8	0	0	0	0
2021	16.8	16.1	15.1	18.1	17.4	16.4	0	0	0	0
Moyenne	16.2	15.5	14.7	17.8	17.0	16.0	0	0	0.3	0
Médiane	16.0	15.4	14.7	17.7	17.0	16.1	0	0	0.0	0
10° centile	15.4	14.8	13.7	16.8	16.4	15.2	0	0	0.0	0
20° centile	15.7	15.1	14.2	17.3	16.5	15.7	0	0	0.0	0
80° centile	16.8	16.2	15.2	18.3	17.5	16.5	0	0	0.2	0
90° centile	16.9	16.3	15.3	19.2	18.1	16.9	0	0	1.1	0
Écart- type	0.9	0.9	0.6	1.0	0.9	0.7	0	0	0.7	0

Indicateurs sur la Pique à Cier-de-Luchon (données MIGADO)

En 2006 les données n'étaient bancarisées étaient des températures moyennes journalières ; les températures maximales et les indicateurs associés ne sont donc pas disponibles en 2006.

Année	Teau_1J moyenne (°C)	Teau_7J moyenne (°C)	Teau_30J moyenne (°C)	Teau_1J max (°C)	Teau_7J max (°C)	Teau_30J max (°C)	Nb jours Tmoy > 19°C	Nb jours Tmoy > 25°C	Nb jours Tmax > 19°C	Nb jours Tmax > 25°C
2006	15.7	14.9	14.26	-	-	-	0	0	-	-
2007	14.0	13.7	12.7	16.0	15.2	14.2	0	0	0	0
2011	15.3	14.5	13.6	16.8	16.0	14.8	0	0	0	0
2012	15.7	14.6	13.9	17.4	16.1	15.4	0	0	0	0
2013	15.5	15.1	14.5	16.9	16.5	15.9	0	0	0	0
2016	15.5	14.8	14.6	18.1	17.1	16.5	0	0	0	0
2018	15.1	14.5	13.2	17.3	16.4	14.8	0	0	0	0
2019	15.8	15.1	14.3	18.0	17.2	16.1	0	0	0	0
2020	16.2	15.5	14.2	18.2	17.3	15.8	0	0	0	0
2021	15.9	15.4	14.4	18.0	17.2	16.1	0	0	0	0
Moyenne	15.4	14.8	13.9	17.4	16.6	15.5	0	0	0	0
Médiane	15.6	14.9	14.2	17.4	16.5	15.8	0	0	0.0	0
10^e centile	15.0	14.4	13.1	16.6	15.8	14.7	0	0	0.0	0
20^e centile	15.3	14.5	13.5	16.9	16.1	14.8	0	0	0.0	0
80^e centile	15.8	15.2	14.4	18.0	17.2	16.1	0	0	0.0	0
90^e centile	15.9	15.4	14.5	18.1	17.2	16.2	0	0	0.0	0
Écart- type	0.6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0	0	0.0	0