

Action D 1.2

Observatoire thermique des cours d'eau et des nappes alluviales

Modélisation statistique et prévision de la température de l'eau

Avril 2023



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

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	5
1.1	Objectifs de ce rapport	5
1.2	Mécanismes Physiques	5
1.3	Modélisations statistiques : exemple du projet TIGRE	6
1.4	Remarque sur l'impact des échanges avec les nappes	7
2	IMPACTS DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DU DEBIT	8
2.1	Données	8
2.2	Rappel du contexte	8
2.3	Relations linéaires Tair / Teau : Juin à Septembre	10
2.4	Impact du débit.....	11
2.5	Conséquences	12
	2.5.1 Dérèglements climatiques et température de l'eau.....	13
	2.5.2 Prévision de température de l'eau au Bazacle	13
3	PREVISION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU.....	14
3.1	Station du Bazacle à Toulouse (Garonne)	14
	3.1.1 Modèle pour le jour J et itérations jusqu'à J+3.....	14
	3.1.2 Exemple d'un modèle spécifique pour J+2 et discussion	17
	3.1.3 Comparaisons avec des modèles plus simple.....	18
	3.1.4 Choix du modèle pour la prévision opérationnelle	19
3.2	Autres stations thermiques.....	20
	3.2.1 Station MIGADO de Valentine (Garonne).....	20
	3.2.2 Station RSA de Montespan (Garonne).....	22
	3.2.3 Station RSA de Saint-Julien (Garonne).....	23
	3.2.4 Comparaison avec le Bazacle (Garonne).....	24
	3.2.5 Autre prise en compte du débit.....	24
3.3	Limites des modèles statistiques	24
4	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	25
4.1	Conclusions	25
4.2	Perspectives	25
5	ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE	27
6	ANNEXES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
6.1	Modèles linéaires sur l'année complète	28
	6.1.1 Impacts de la température de l'air.....	28
	6.1.2 Impact du débit	30
	6.1.3 Impacts de l'advection	30
	6.1.4 Impact de la température de l'air et de la température de l'eau en amont.....	32
6.2	Prévision de la température de l'eau sur l'année complète (et comparaison avec la saison estivale) ..	34
	6.2.1 Modèle basé sur la température de l'air (J-6 à J+1) et la température de l'eau à Valentine (J)	34
	6.2.2 Modèles utilisant la température de l'eau au Bazacle	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : 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)...	6
Figure 2. Température de l'air en Juillet-Aout (moyenne 2000-2021, données SAFRAN : Météo France, Life Eau&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.	9
Figure 3. Station de mesure de température de la Garonne et stations hydrométriques mobilisées pour la modélisation.	9
Figure 4. Température de l'eau au Bazacle (sonde RSA) en fonction de la température de l'air (moyennée sur 5 jours. Données sur l'année complète (gauche) et de Juin à Septembre seulement (droite).....	10
Figure 5. Boîtes à moustache des températures de l'air moyennées sur 5 jours à Toulouse-Blagnac (données SYNOP Météo-France). Les boîtes sont réalisées mois par mois en prenant l'ensemble des températures de l'air moyenné sur 5 jours glissants pour un mois donné sur la période 1996-2022, à la station Météo-France de Toulouse-Blagnac, et en calculant les centiles et la médiane de la distribution.	11
Figure 6. Idem que la Figure 5 mais en ajoutant le débit (code couleur) moyen sur 8 jours à Portet-sur-Garonne.	12
Figure 7. Comparaison entre les prévisions du modèle (effectuées sur l'échantillon test contenant les 30% des données non utilisées pour l'ajustement par moindres carrés) et les observations à l'échéance J+3. Les droites en pointillés correspondent à la droite 1:1 (accord parfait modèle-données) et aux droites à $\pm 2^{\circ}\text{C}$	17
Figure 8. 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).	29
Figure 9. Température de l'eau de l'Arac à Biert (Données Naïades / 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.....	29
Figure 10. Débit Journalier à Portet-sur-Garonne en fonction de la température de l'eau (données Naïades, 2009-2017).	30
Figure 11. Température de la Garonne au Bazacle en fonction de celle à Valentine le jour précédent. Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).....	31
Figure 12. Température de la Garonne à Valentine en fonction de celle de la Pique à Cier-de-Luchon (le même jour). Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).	31
Figure 13. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).....	32
Figure 14. Différences modèle – données au Bazacle à J+5, avec un modèle bilinéaire basé sur la température de l'air moyenne de J+2 à J+5 et la température de l'eau au jour J. L.	35
Figure 15. Différences modèle – mesure, comme figure 14 mais en considérant seulement les données des mois de Juin à Septembre pour la construction du modèle tout comme pour la comparaison aux données.	36

1 INTRODUCTION

1.1 Objectifs de ce rapport

Ce rapport a principalement une visée opérationnelle : mettre en place et évaluer des modèles statistiques linéaires de la température de l'eau. Différentes approches sont proposées tout d'abord sur l'exemple du Bazacle, puis sur d'autres stations sur la Garonne. La mise en place de ces modèles donne des éléments pour comprendre certains mécanismes clefs contrôlant la température de l'eau et l'influence des différents paramètres, mais, une compréhension plus détaillée nécessiterait la mise en place de modèle physique et/ou de mesures complémentaires.

La suite de cette introduction présente plusieurs éléments de contexte et des généralités sur la température de l'eau des rivières. Le cœur de ce rapport se focalise ensuite principalement sur quelques stations sélectionnées et sur la température de l'eau en période estivale où les enjeux sont les plus importants. Une analyse de la modélisation et de la prévision de la température de l'air sur l'année complète, incluant une discussion de l'impact de l'advection est présentée en annexe de ce document (page **Erreur ! Signet non défini.** et suivantes).

Il est précisé que certains éléments présentés dans ce rapport se retrouvent dans le rapport de synthèse annuel de suivi de la température 2022.

1.2 Mécanismes Physiques

La température de l'eau des rivières est contrôlée par de nombreux facteurs (figure 1) :

- 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 d'un cours d'eau 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 ripisylve¹ 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).

¹ Ripisylve : végétation se développant sur la berge d'une rivière.

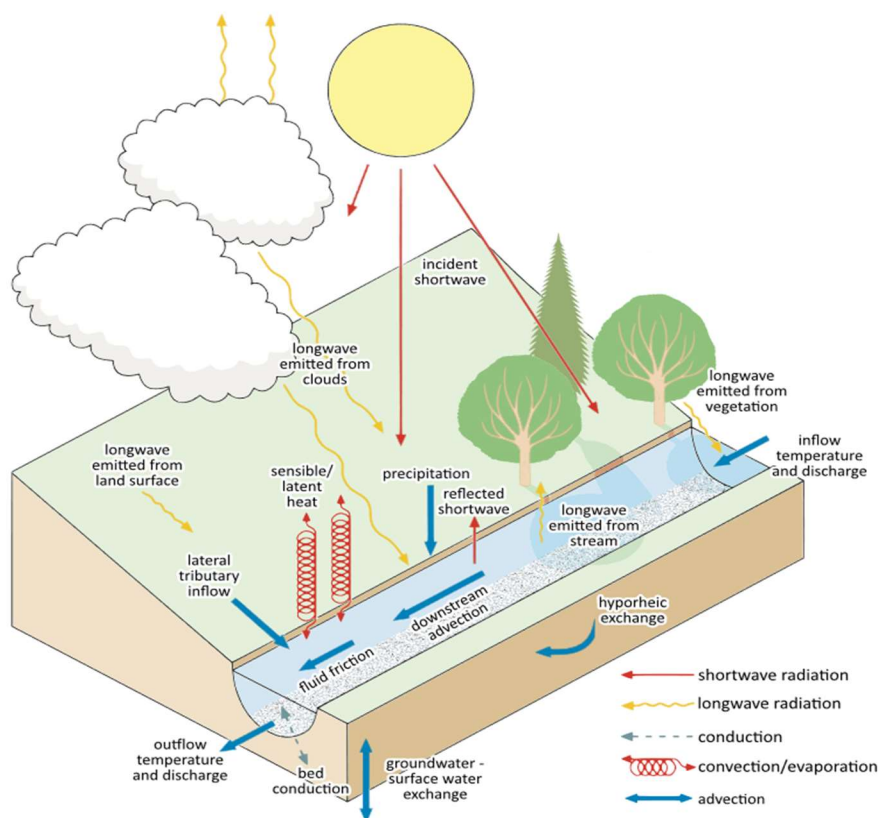


Figure 1 : Echanges hydrologiques et thermiques contrôlant la température de l'eau dans les rivières et devant être prises en comptes dans les modèles détaillés (Dugdale et al., 2017).

1.3 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 (Thermie en rivière : analyse géostatistique et description de régime, cf. <https://thermie-rivieres.inrae.fr/>). 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 des indicateurs à chaque station. Les chercheurs du projet ont ainsi sélectionné 16 variables explicatives possibles (à partir des données climatiques du modèle SAFRAN, de données morphométriques et hydrologiques des cours d'eau à partir du RHT², ainsi que des données SYRAH³ quantifiant les effets de la végétation rivulaire) et ont développé 3 modèles

² Réseau Hydrographique Théorique français

³ Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau

statistiques différents (réseau de neurones, 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 neurones 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 géostatistiques 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 complexe, se basent toujours sur un **jeu de données passées**. Ils peuvent être utilisés en première approximation pour étudier des tendances futures dans le contexte du dérèglement climatique, mais cet exercice doit être fait avec précaution car des situations n'ayant jamais existé dans le passé vont se produire dans le futur.

1.4 Remarque sur l'impact des échanges avec les nappes

La température des eaux souterraines varie beaucoup moins que celle des cours d'eau. Ainsi, les apports d'eau souterraines vont réchauffer les cours d'eau en hiver et les refroidir en été, ayant un effet de « tampon thermique ». La température des rivières est ainsi influencée par les apports de nappes, qui dépendent eux-mêmes de nombreux facteurs hydromorphologiques, topographiques et géologiques. **Favoriser les échanges avec les aquifères superficiels est donc essentiel dans une perspective de limitation du réchauffement de l'eau des rivières sous l'effet de l'augmentation des températures de l'air.**

Dans la suite de ce rapport 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.

2 IMPACTS DE LA TEMPERATURE DE L'AIR ET DU DEBIT

2.1 Données

Les différentes données qui ont été mobilisées dans cette étude sont les suivantes :

- la température de l'air au travers :
 - des données ponctuelles aux stations de mesures Météo-France acquises par le Conseil Départemental,
 - des données SYNOP⁴ (gratuites) à Toulouse-Blagnac,
 - données SAFRAN⁵ obtenues via une convention entre le Conseil départemental de la Haute-Garonne et le SMEAG (Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement de la Garonne) dans le cadre du projet Life « Eau-Climat »⁶ ;
- les débit journaliers de la Garonne mesurés sur trois stations hydrométriques : Portet-sur-Garonne, Marquefave et Valentine (voir la localisation de ces stations en Figure 3) proviennent de la base de données hydroportail⁷ ;
- la température de l'eau sur la Garonne au travers :
 - des 3 stations du Réseau de Stations d'Alerte (RSA) : Bazacle, Saint-Julien et Montespan,
 - d'une station de l'association Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre (MIGADO) à Valentine (voir la localisation de ces stations en Figure 3).

2.2 Rappel du contexte

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 liées aux différences d'altitude (figure 2). Sur la partie aval du domaine la température de l'eau moyenne des 30 jours le plus chaud 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 la remarque sur les nappes effectuée au paragraphe 1.4 et avec les observations sur les sources et puits effectuées dans le « rapport annuel 2021-2022 »⁸, partie 5.1.3, page 38). 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.

⁴ Données d'observations transmises sur le système mondial de télécommunication de l'Organisation Météorologique Mondiale. Elles sont accessibles gratuitement (historique depuis 1996) via https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=90&id_rubrique=32

⁵ Données atmosphériques produites par Météo-France basées sur des observations et de la modélisation, sur une grille de 8 km x 8km (cf. Vidal et al., 2010 et <https://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article424>)

⁶ <https://www.gesteau.fr/life-eau-climat>

⁷ <https://hydro.eaufrance.fr/>

⁸ « Observatoire thermique des cours d'eau et des nappes alluviales - rapport annuel 2021-2022 » disponible en téléchargement dans la bibliothèque du site Garonne-amont : <https://garonne-amont.fr/bibliotheque/>

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 différente de celle d'une station de mesure ponctuelle en fond de vallée.

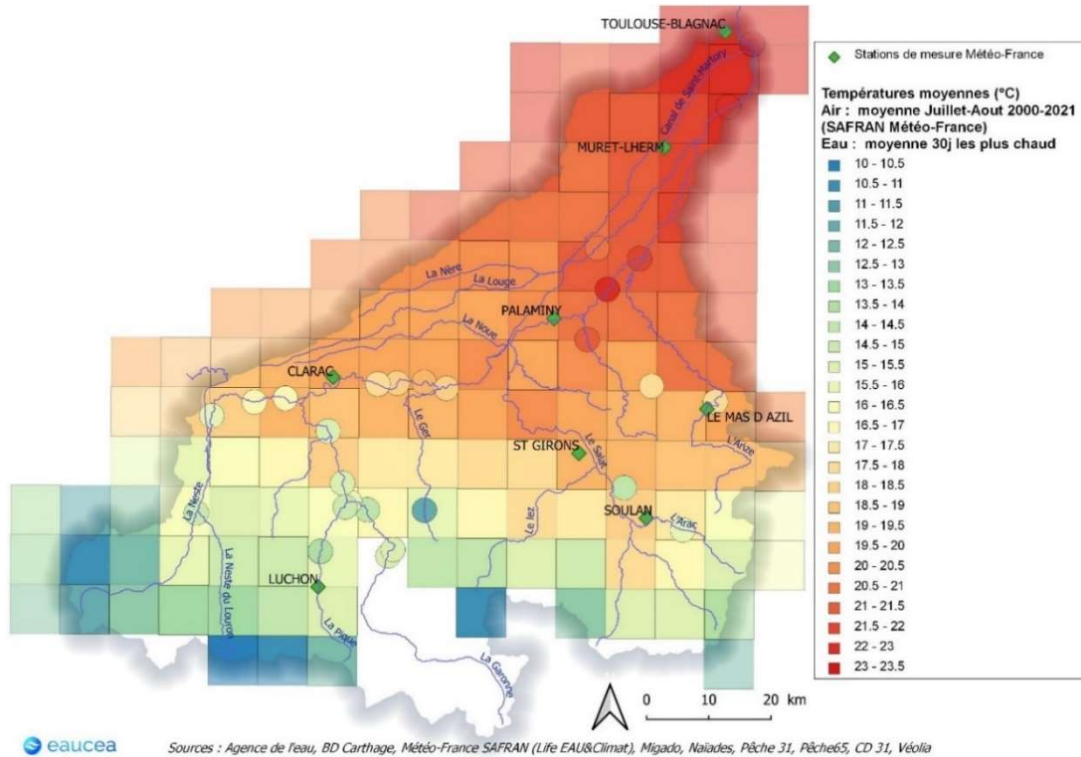


Figure 2. Température de l'air en Juillet-Aout (moyenne 2000-2021, données SAFRAN : Météo France, Life Eau&Climat) et température de l'eau aux stations de mesures, pendant les 30 jours les plus chaud de chaque année où un été quasi-complet est disponible.

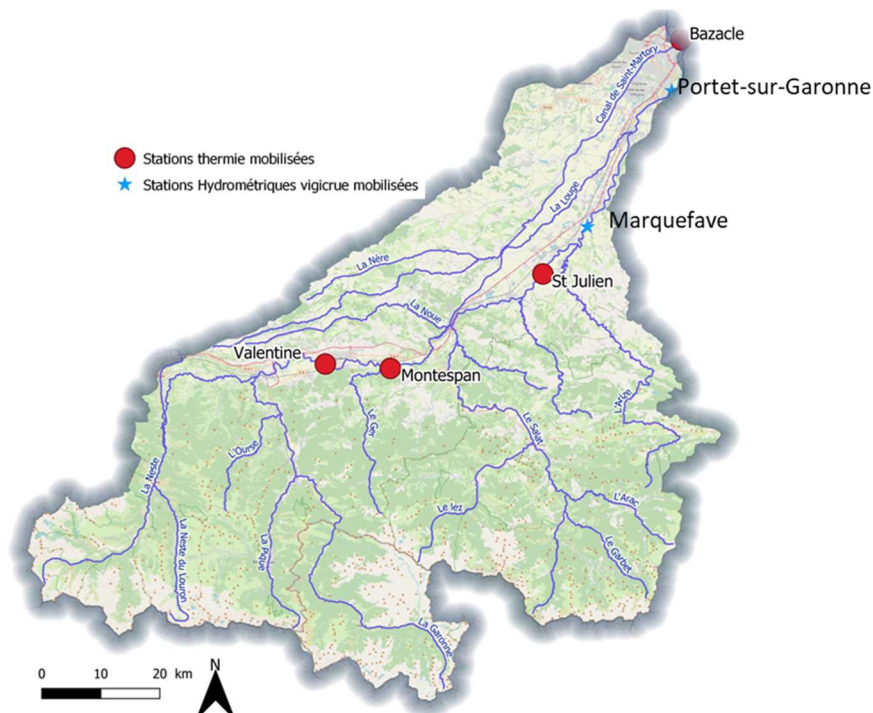


Figure 3. Station de mesure de température de la Garonne et stations hydrométriques mobilisées pour la modélisation.

2.3 Relations linéaires Tair / Teau : Juin à Septembre

Dans une **optique opérationnelle**, les stations sélectionnées sont en priorité celles du Réseau de Stations d'Alerte (RSA) ayant un historique long, ainsi que la station MIGADO de Valentine. Une attention particulière est accordée à station du Bazacle (sur la Garonne à Toulouse) pour laquelle une expérimentation de prévision de la température de l'eau sera effectuée dès l'été 2023.

La température de l'eau au Bazacle est bien corrélée à la température de l'air (Figure 4), sauf en hiver les températures de l'eau se répartissent de part et d'autre de la droite 1:1.

En hiver, $Teau > Tair$ car la Garonne ne gèle pas. Sur l'année complète l'équation $Teau(J) = 0,865 Tair(J-4 \text{ à } J) + 1,95^{\circ}\text{C}$ (coefficient $R^2 = 0,986$) donne la température de l'eau à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pour 74% des jours; sur la période de Juin à Septembre seulement, l'équation est : $Teau(J) = 0,83 Tair(J-4 \text{ à } J) + 3,44^{\circ}\text{C}$ (avec $R^2 = 0,990$) et elle donne la température de l'eau à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pour 69% des jours considérés.

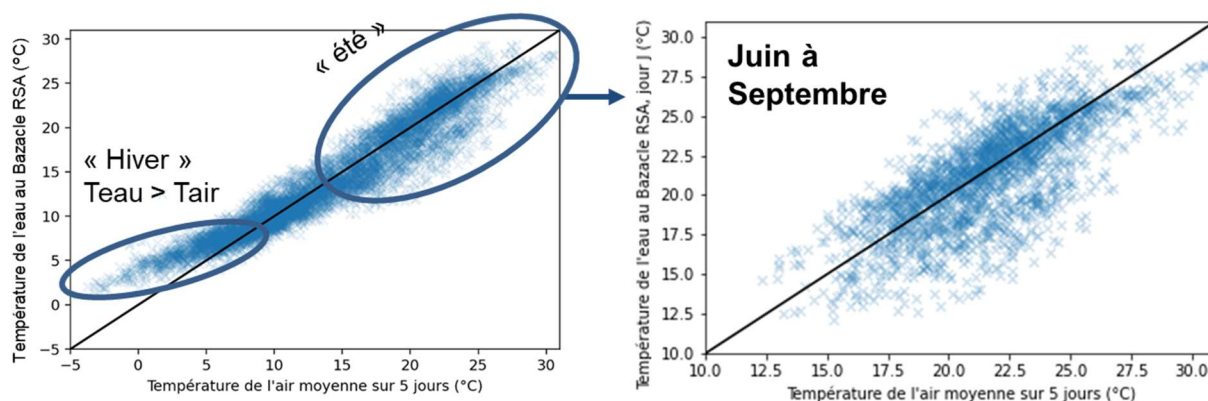


Figure 4. Température de l'eau au Bazacle (sonde RSA) en fonction de la température de l'air (moyennée sur 5 jours). Données sur l'année complète (gauche) et de Juin à Septembre seulement (droite)

Dans une optique de **gestion du risque** on se focalise sur la période estivale, plus particulièrement sur les mois de **Juin à Septembre** qui sont les plus chauds de l'année (Figure 5). C'est également les seuls mois où la température de l'air (en moyenne glissante sur 5 jours) dépasse parfois les 25°C , avec des valeurs moyennes mensuelles entre environ 19°C et 23°C .

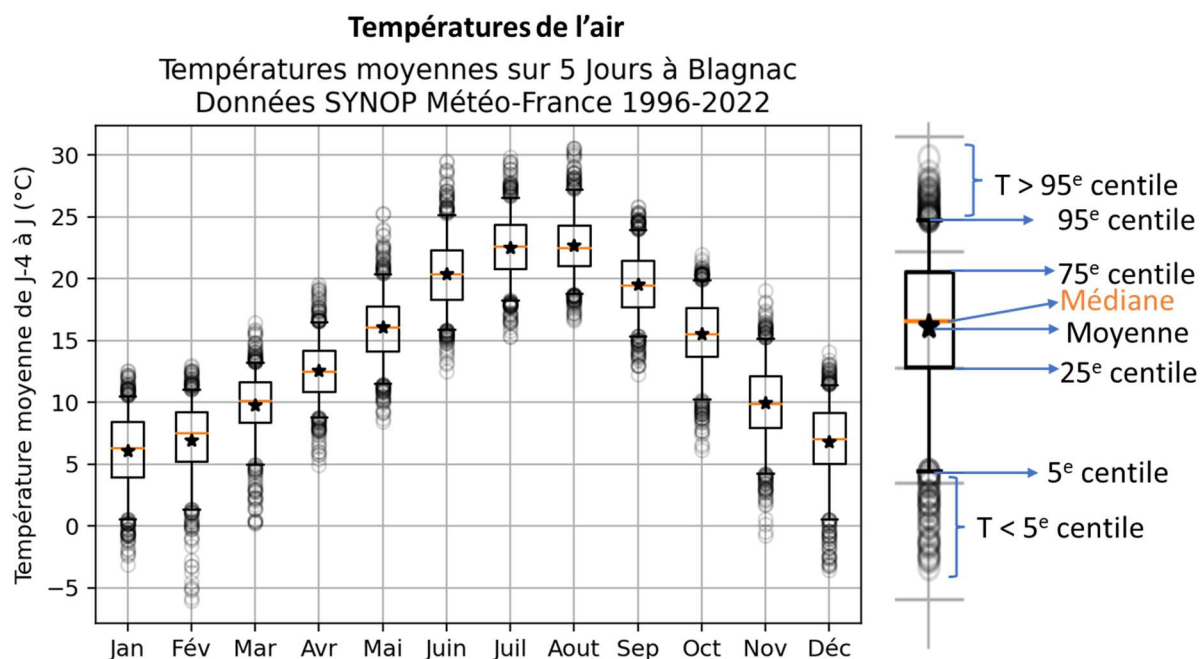


Figure 5. Boîtes à moustache des températures de l'air moyennées sur 5 jours à Toulouse-Blagnac (données SYNOP Météo-France). Les boîtes sont réalisées mois par mois en prenant l'ensemble des températures de l'air moyenné sur 5 jours glissants pour un mois donné sur la période 1996-2022, à la station Météo-France de Toulouse-Blagnac, et en calculant les centiles et la médiane de la distribution.

2.4 Impact du débit

Le débit n'est pas un facteur adapté à la modélisation des températures de l'eau par une approche linéaire **lorsque l'année complète est considérée** car des variations considérables de débits existent entre les crues et les étiages (cf. annexe 6.1.2 page 30). **Cependant, sur la période Juin à Septembre le débit peut être un facteur d'influence à prendre en compte pour une modélisation linéaire.**

En effet, sur l'ensemble des données disponibles, **pour une température de l'air donnée plus le débit moyen est élevé plus la température de l'eau est faible** (Figure 6). Les débits moyennés sur 8 jours ne dépassent $300 \text{ m}^3/\text{s}$ que dans de rares situations (principalement des crues début Juin) et sont associés à des températures de la Garonne plutôt fraîches (au maximum environ 19°C).

Afin d'améliorer les résultats du modèle et d'éviter des situations très particulière associées par exemple à des crues de Juin, **les situations où les débits moyens sur 8 jours consécutifs dépassent $300 \text{ m}^3/\text{s}$ sont exclues de l'analyse.**

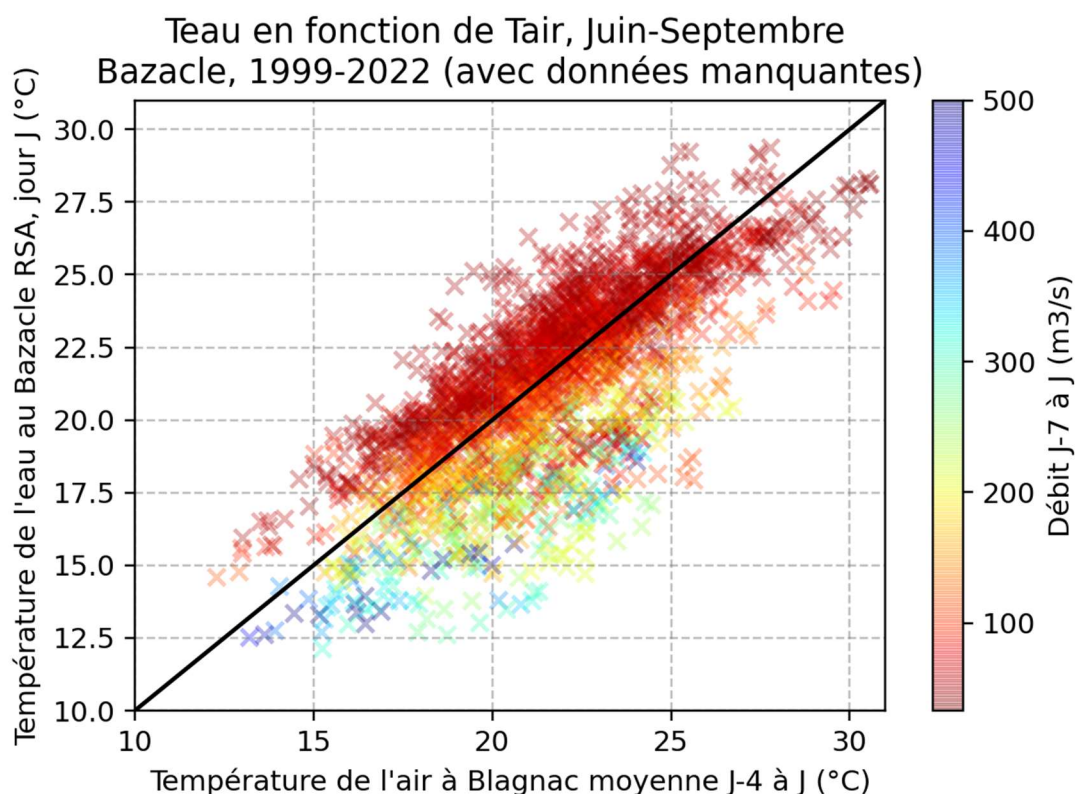


Figure 6. Idem que la Figure 5 mais en ajoutant le débit (code couleur) moyen sur 8 jours à Portet-sur-Garonne.

Plusieurs tests ont été effectués avec des légères différences en fonction du nombre de jours choisis pour moyenniser le débit et la température de l'air. Les meilleurs résultats en termes de capacité du modèle à reproduire les données avec moins de $\pm 2^\circ\text{C}$ d'erreur sont obtenus en considérant la température moyenne de l'air moyennée de J-3 à J ($T_{\text{air}}(J-3 \text{ à } J)$) et le débit moyenné de J-4 à J ($Q(J-4 \text{ à } J)$). Une équation est calculée en considérant 70% des données disponibles et ensuite elle est testée sur un échantillon test contenant les 30% restants. **L'équation obtenue est la suivante (pour Juin à Septembre et $Q(J-7 \text{ à } J) < 300 \text{ m}^3/\text{s}$) :**

$$\text{Teau}(J) = 0,64 \text{ Tair}(J-3 \text{ à } J) - 0,026 \text{ Q}(J-4 \text{ à } J) + 10,1^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec $R^2 = 0.996$ et une différence entre les données mesurées et celle calculée à partir de cette équation **inférieure à $\pm 2^\circ\text{C}$ dans 86,6% des cas de l'échantillon test** (87,1% sur l'échantillon complet).

2.5 Conséquences

L'équation (Eq. 1) permet **d'évaluer l'impact potentiel de variation de débit et de température de l'air sur la température de l'eau, toutes autres choses égales par ailleurs**. Elle pourrait également être utilisée pour la **prévision de la température de l'eau** en connaissant température de l'air et débits passés et en disposant de prévisions à l'échéance voulue.

2.5.1 Dérèglements climatiques et température de l'eau

Ainsi une hausse de 2°C de la température de l'air entraînerait une augmentation de la température de l'eau de 1.3°C. Au contraire, une hausse des débits de 40m³/s entraînerait une baisse de températures de l'eau de 1°C.

Pour information, la médiane des 12 projections climatiques DRIAS⁹ effectuées avec le scénario RCP8.5¹⁰ prévoit une hausse des températures de l'air d'environ 2.6°C en 2040-2069 par rapport à 1981-2010. Cela entraînerait une hausse de la température de la Garonne d'environ 1.7°C. Pour contrecarrer cette hausse il faudrait un apport de 64 m³/s environ pendant la totalité de la période de Juin à Septembre, ce qui représente un volume considérable.

Cependant, les modélisations hydrologiques effectuées par Météo-France basées sur les modèles climatique DRIAS prévoient une tendance à **la baisse des débits naturels de la Garonne** en étiage, avec donc une tendance à l'amplification du réchauffement de l'eau de la Garonne (cf. DRIAS-Eau : www.drias-eau.fr).

Ainsi, la température de l'eau a augmenté (comme cela a pu être démontrée sur la Garonne)¹¹ et va continuer à augmenter sous l'effet du dérèglement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines.

2.5.2 Prévision de température de l'eau au Bazacle

Le modèle fournit (Eq. 1) pourrait également être utilisé pour la prévision (en remplaçant les débits et températures de l'air observées par une moyenne entre mesures passées et prévisions de débits et températures). Les performances théoriques seraient alors celles indiquées : **87% des prévisions à ± 2°C**. Ces performances seraient bien entendu réduites dans un cas réel, les prévisions de températures de l'air et de débits ne pouvant pas être parfaites.

La partie suivante s'intéresse plus en détail à la prévision de la température de l'air et aux performances des modèles linéaires de prévision proposés.

⁹ Il s'agit de modèles de projections climatiques régionales sélectionnés par Météo-France pour la France Métropolitaine. Chaque projection est issue d'un couple « modèle de climat global + modèle régional » fournissant des projections à une résolution de 12 km lesquelles sont ensuite mises sur la grille SAFRAN à 8kmx8km, et une méthode de correction de biais est appliquée. Les données sont alors mises à disposition sur <http://www.drias-climat.fr>

¹⁰ Scénario de trajectoire d'émission de gaz à effet de serre élevée mais donnant les résultats les plus proche de la trajectoire récente, sur la période depuis 2006 (cf. Rapport DRIAS, Soubeyroux et al., 2020, encart D p18)

¹¹ 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.

3 PREVISION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU

3.1 Station du Bazacle à Toulouse (Garonne)

Dans la majorité des cas, la température de l'eau de la Garonne à Toulouse, au Bazacle, **varie assez peu d'un jour à l'autre** : sur l'ensemble des données disponibles, l'écart moyen de température en valeur absolue entre deux jours consécutifs est de 0,46°C. Dans une optique de prévision à court terme (quelques jours), **la connaissance de la température de l'eau le jour précédent la prévision est un facteur déterminant pour pouvoir obtenir une prévision de bonne qualité.**

Le contexte est le suivant : au matin du jour J, les données disponibles sont la température moyenne de l'eau au jour J-1 et l'objectif est de prévoir la température moyenne de l'eau au jour J, et éventuellement les jours suivants (J+1, J+2, J+3).

Pour une visée opérationnelle, **les températures de l'air minimales et maximales journalières sont les données le plus souvent disponibles.** Il s'agit des données achetées par le SMEAG dans le cadre du soutien d'étiage de la Garonne par exemple, ou encore des données communiquées sur le site internet grand public de Météo-France. En météorologie, les températures minimales et maximales journalières sont définies de la façon suivante, pour un jour J donné :

- **Température minimale TN(J)** : « Température la plus basse qui ait été relevée sur le site entre le jour J-1 à 18 h UTC et le jour J à 18 h UTC. »
- **Température maximale TX (J)** : « Température la plus élevée qui ait été relevée sur le site entre le jour J à 6 h UTC et le jour J+1 à 6 h UTC. »

Ces définitions sont établies internationalement. Pour la France, sauf cas particuliers, les résultats correspondent à ceux qui seraient obtenus avec une définition « intuitive » (minimum et maximum de température de 00h00 à 23h59 heure locale).

Remarque : les données SAFRAN de Météo-France fournissent par contre des températures minimales et maximales sur la journée, et ne correspondent donc pas exactement à TN et TX, elles seront appelées dans la suite de ce rapport Tmin et Tmax.

3.1.1 Modèle pour le jour J et itérations jusqu'à J+3

Une régression linéaire est effectuée en utilisant 70% de l'ensemble des données disponibles de Juin à Septembre, avec des débits moyennés sur 8 jours (J-8 à J) inférieurs à 300 m³/s à Portet-sur-Garonne. Un ajustement par la méthode des moindres carrés donne l'équation suivante :

$$Teau(J) = 0.840 Teau(J-1) + 0.052 TN(J) + 0.11 TX(J) - 0.0035 Q(J) \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec Teau (J) et Teau(J-1) la température de l'eau au Bazacle respectivement au jour J et J-1, TN(J) et TX(J) respectivement les température minimale et maximale de l'air à Toulouse-Blagnac au jour J, et Q(J) le débit moyen au jour J à Portet-sur-Garonne.

Contrairement à l'équation (Eq. 1), cette équation n'inclut pas de constante. Il serait possible d'effectuer un ajustement avec une constante (voir par exemple les modélisations proposées en annexe, dans la partie 6.2) mais cela ne permet pas d'améliorer les résultats et il n'y a pas de justification physique pour inclure une telle constante sachant que l'équation inclut la température de l'eau au jour précédent.

Les performances des modélisations de J à J+3, évaluées sur un échantillon test de 30% des données non utilisées pour la régression linéaire, sont présentées Tableau 1. Sans surprise, plus la prévision est à échéance lointaine plus les erreurs sont importantes. Par exemple, au jour J la totalité des prévisions ont une erreur inférieure à $\pm 2^\circ\text{C}$, tandis qu'à J+3 94.3% des erreurs restent en dessous de ce seuil. De même l'écart-type est plus que doublé entre la prévision à J (0.49°C) et celle à J+3 (1.12°C).

Les valeurs extrêmes (minimum et maximum dans le Tableau 1) sont à prendre avec précautions : elles augmentent également avec l'échéance mais sont très élevées dès J et surtout J+1. Elles peuvent être liées à de nombreux facteurs : erreurs de mesure ou modélisation inadaptée à des conditions très spécifiques relativement rares et donc mal représentées par le modèle (par exemple associés à des lâchers d'eau importants). Les écarts les plus importants correspondent à des cas (12 journées sur l'échantillon complet de 1 616 journées) où les débits moyens sur J-7 à J sont inférieurs à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ mais avec des débits à J – J+3 très élevés (supérieurs à $500 \text{ m}^3/\text{s}$). **Exclure les cas où les débits à J, J+1, J+2 et J+3 dépassent $500 \text{ m}^3/\text{s}$ à Portet-sur-Garonne permet d'éviter ces situations avec des erreurs importantes de prévision.**

Tableau 1. Evaluation du modèle de prévision de la température de l'eau au jour J au Bazacle, appliqué plusieurs fois successive effectuer des prévisions jusqu'à J+3

Evaluation du modèle $Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.052 TN(J) + 0.105 TX(J) - 0.0035 Q(J)$						
Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à $300 \text{ m}^3/\text{s}$ sur 8 jours						
Echéance Prévision	erreur min ($^\circ\text{C}$) (modèle - données)	erreur max ($^\circ\text{C}$) (modèle - données)	écart-type des erreurs ($^\circ\text{C}$)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
				$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$
Echantillon complet						
J	-1.7	2.1	0.5	95.7	99.9	100
J+1	-9.7	3.3	0.78	81.8	99.1	99.9
J+2	-11.5	3.7	0.97	74.2	96.4	99.8
J+3	-11.8	3.7	1.13	68.6	93.3	99.4
Echantillon test						
J	-1.7	1.8	0.49	96.1	100	100
J+1	-9.7	2.6	0.83	83.5	99.1	99.8
J+2	-11.5	3.7	1.03	72.3	96.7	99.6
J+3	-11.5	3.7	1.12	69.7	94.3	99.4

Ajouter ce critère d'exclusion des débits journalier supérieurs à $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ne change que de façon modérée les résultats de la régression linéaire, avec des variations de seulement quelques pourcents sur les coefficients. Nous conservons donc l'équation précédente (Eq. 2), lorsqu'on l'applique aux nouveaux jeux de données on obtient les résultats du Tableau 2.

Une représentation graphique des performances du modèle sur l'échantillon test à J+3 est fournie Figure 4.

Pour conclure, l'équation de prévision (Eq. 2) permet de représenter les observations à J+2 avec des différences modèle-données de moins de $\pm 1^\circ\text{C}$ dans plus de 70% des cas et moins de $\pm 2^\circ\text{C}$ dans plus de 95% des cas considérés. Cette équation n'est applicable que sur la période de Juin à Septembre et en excluant les débits les plus élevés ($Q(J-7 \text{ à } J) > 300 \text{ m}^3/\text{s}$; et éventuellement pour de meilleurs résultats $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ pour chaque jour de J à J+3).

Tableau 2. Idem que le Tableau 1 mais en excluant les journées avec $Q(J)$, $Q(J+1)$, $Q(J+2)$ ou $Q(J+3) > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ (15 journées exclues au total). Une partie des différences avec le Tableau 1 viennent également du choix de l'échantillon test (30% de l'échantillon complet, choisis au hasard).

Evaluation du modèle $Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.052 TN(J) + 0.105 TX(J) - 0.0035 Q(J)$ Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à 300m ³ /s sur 8 jours et en excluant les débits à J J+1, J+2 et J+3 supérieurs à 500 m ³ /s						
Echéance Prévision	erreur min (°C) (modèle -	erreur max (°C) (modèle -	écart-type des erreurs	Fraction des données (%) avec		
				$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$
Echantillon complet						
J	-1.7	2.1	0.5	95.8	99.9	100
J+1	-2.5	3.3	0.74	82	99.2	99.9
J+2	-3	3.7	0.9	74.4	96.6	99.9
J+3	-2.8	3.7	1.03	69	93.6	99.7
Echantillon test						
J	-1.7	1.8	0.51	94.8	100	100
J+1	-2.2	2.1	0.72	83.2	99.4	100
J+2	-2.7	2.5	0.89	74.9	96.7	100
J+3	-2.8	3.2	1.02	68.8	93.4	99.8

Test de 'prévision' de température à J+3 au Bazacle
échantillon test

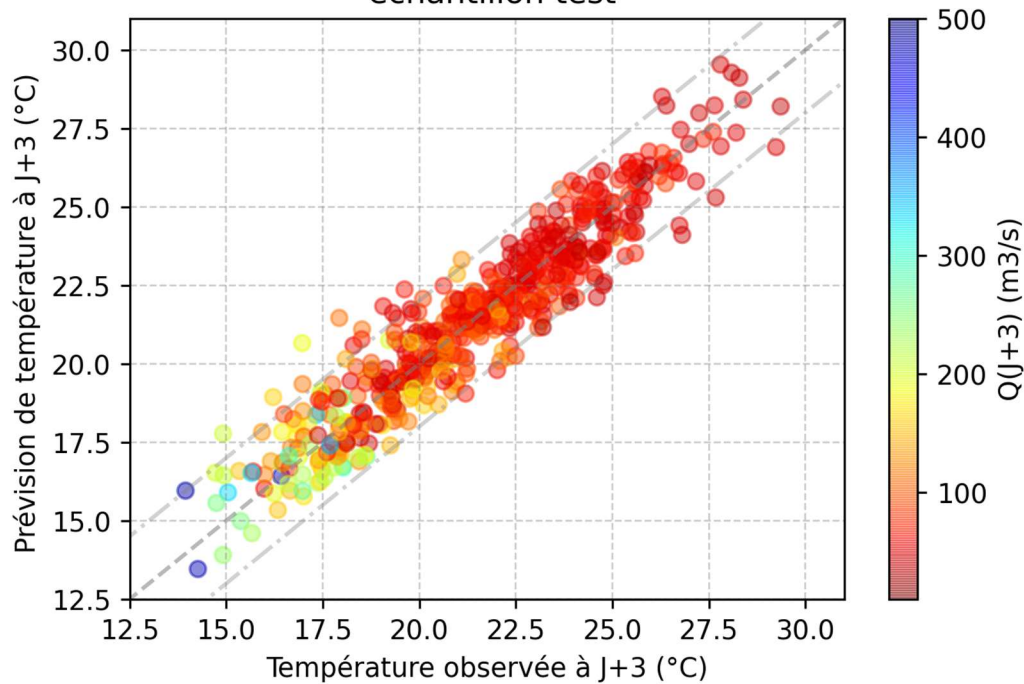


Figure 7. Comparaison entre les prévisions du modèle (effectuées sur l'échantillon test contenant les 30% des données non utilisées pour l'ajustement par moindres carrés) et les observations à l'échéance J+3. Les droites en pointillés correspondent à la droite 1:1 (accord parfait modèle-données) et aux droites à $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.1.2 Exemple d'un modèle spécifique pour J+2 et discussion

Une autre approche consiste à développer des équations spécifiques pour chaque échéance. Par exemple à J+2 on obtient l'équation suivante :

$$\text{Teau}(J+2) = 0,63 \text{ Teau}(J-1) + 0,16 \text{ TN}(J+1 \text{ à } J+2) + 0,21 \text{ TX}(J+1 \text{ à } J+2) - 0,0062 \text{ Q}(J \text{ à } J+2) \quad (\text{Eq. 3})$$

qui utilise les températures de l'air minimales et maximales moyennes de J+1 à J+2 inclus, ainsi que les débits moyens sur 3 jours (J à J+2 inclus). Les performances de ces modèles sont quasi-identiques à celles de l'équation (Eq. 2) itérée plusieurs fois (Tableau 3 à comparer avec le Tableau 1 pour J+2), par exemple ce modèle spécifique à J+2 donne moins de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ d'erreur dans 96.9% des cas de l'échantillon test, contre 96.7% pour le modèle (Eq. 2). Une amélioration plus marquée est visible sur les erreurs minimales.

Tableau 3. Résultats du modèle spécifique à J+2, pour l'échantillon test de 30% des données non utilisées pour l'ajustement par moindres carrés et pour l'échantillon complet (ensemble des données disponibles)

Evaluation du modèle spécifique pour J+2 : $Teau(J+2) = 0,63 Teau(J-1) + 0,16 TN(J+1 \text{ à } J+2) + 0,21 TX(J+1 \text{ à } J+2) - 0,0062 Q(J \text{ à } J+2)$ sur la période Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à 300m ³ /s sur 8 jours						
Echéance Prévision	erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
				± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet						
J+2	-6.7	4.8	0.93	73.5	97.1	99.6
Echantillon test						
J+2	-6.7	4.8	0.98	72.3	96.9	99.3

3.1.3 Comparaisons avec des modèles plus simple

Le modèle proposé précédemment utilise le débit et la température. Les modèles plus simples donnent aussi des résultats satisfaisants à courtes échéances. Ainsi par exemple le modèle le plus simple qui consiste à supposer que la température de l'eau reste constante, donne des résultats corrects pour une prévision à un jour (erreur inférieure à ±2°C dans 98% des cas) mais nettement moins bonnes à J+3 (erreur inférieure à ±2°C dans 72% des cas). Un modèle n'utilisant pas le débit mais seulement les températures de l'air peut être réalisé et donne des résultats très convenables. En se basant sur l'équation suivante :

$$Teau(J) = 0,855 Teau(J-1) + 0,035 TN(J) + 0,091 TX(J) \quad (\text{Eq. 4})$$

Appliquée au même échantillon de donnée que l'équation (Eq. 2), cette équation (Eq. 4) donne moins de ±2°C d'erreur à J+3 pour 89.9% des jours de l'échantillon test, soit des résultats meilleurs que le modèle simpliste basé sur l'hypothèse de température de l'eau constante mais moins bons que ceux de l'équation (Eq. 2) incluant le débit (plus de 94% des jours sont modélisés avec moins de ±2°C d'erreur, cf. échantillon test Tableau 1).

Par contre, comme mentionné précédemment, le modèle incluant le débit peut de façon très ponctuelle mener à des erreurs très importantes (lorsque les débits sont très importants), ce qui n'est pas le cas pour les modèles basés uniquement sur la température.

Tableau 4. Evaluation du modèle de prévision de la température de l'eau au jour J au Bazacle, appliqué plusieurs fois successive pour effectuer des prévisions jusqu'à J+3. Modèle ici n'utilisant pas le débit comme paramètre.

Evaluation du modèle $Teau(J) = 0,855 Teau(J-1) + 0,035 TN(J) + 0,091 TX(J)$						
Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à 300m ³ /s sur 8 jours						
Echéance Prévision	erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
				± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet						
J	-1.8	2.8	0.55	93.3	99.7	100
J+1	-2.8	4.3	0.85	77.3	97.7	99.7
J+2	-3	5.2	1.04	69.3	93.7	99.2
J+3	-3.2	5.2	1.19	63.7	90.1	97.5
Echantillon test						
J	-1.8	2.3	0.56	93.4	99.4	100
J+1	-2.2	4.2	0.86	77.2	97.6	99.4
J+2	-3	5.2	1.09	69	93.8	98.2
J+3	-3.2	5.2	1.2	67.3	89.9	97.2

3.1.4 Choix du modèle pour la prévision opérationnelle

Le modèle spécifique à J+2 permet d'obtenir une amélioration très légère des résultats dans les cas où les débits à J – J+3 sont élevés. Cependant, cette approche nécessite d'avoir autant de modèles différents que de jours de prévision (4 modèles pour une prévision de J à J+3) et l'amélioration modeste des résultats ne justifie pas cette complexité supplémentaire. De plus, avoir un seul modèle itéré plusieurs fois permet facilement d'étendre les prévisions à des échéances plus longues et simplifie les procédures de test et de validation. **Il est plus simple de tester le même modèle à toutes les échéances, et de conserver l'équation (Eq. 2) pour les applications opérationnelles, en prenant soin d'exclure les situations où les débits passés ou futurs sont élevés ($Q(J-7 \text{ à } J) > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ sur les jours J, J+1, J+2 et J+3).**

L'utilisation d'un modèle plus simple (Eq. 4) n'incluant pas le débit, pourrait également être envisagée, notamment si les incertitudes sur les prévisions de débit sont importantes.

Les performances réelles des prévisions dépendront bien entendu des performances des prévisions de températures de l'air et de débit, toute erreur sur ces prévisions impactant directement la prévision de température de l'eau. Une phase de test en situation réelle, avec archivage des données observées, des prévisions Météo-France et des prévisions de débit permettra d'évaluer en conditions opérationnelles les performances des prévisions et d'envisager des améliorations éventuelles.

Remarque : plus l'échéance est lointaine et moins la connaissance de la température de l'eau au jour J-1 est importante pour la prévision. Ainsi, si à J+3, les performances du modèle basé sur (Eq. 2) (cf. Tableau 2) sont meilleures que celles d'un modèle basé uniquement sur l'équation (Eq. 1) n'utilisant que température de l'air et débit, sans aucune connaissance de la température de l'eau, il est probable qu'à des échéances plus lointaines la différence entre les deux approches devienne négligeable, voir que l'équation (Eq. 1) soit plus performante.

3.2 Autres stations thermiques

Les données achetées auprès de Météo-France sont des température moyennes journalières, et les données SAFRAN incluent seulement les minimum et maximum des 24 données de températures horaires d'une journée (donc légèrement différentes des TN et TX standards). L'utilisation des données SAFRAN permet d'avoir un jeu de données complet. Pour chaque station, il est ainsi possible de choisir le point SAFRAN le plus proche et d'avoir un jeu de données continu de Janvier 2000 à Février 2022 (période pour laquelle les données ont pu être obtenues à ce jour). Pour rappel, seule la **période Juin à Septembre** (inclus) est étudiée ici.

3.2.1 Station MIGADO de Valentine (Garonne)

La station MIGADO de Valentine dispose d'un historique relativement long (1 450 points de données au total avec débits et températures de l'eau disponibles, depuis 2008, 1 280 jours une fois éliminés les débits les plus élevés, dépassants 100 m³/s en moyenne sur 8 jours).

Les modèles de prévision obtenus sont alors les suivants :

Sans prise en compte du débit (Tableau 5) :

$$Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.033 T_{min}(J) + 0.090 T_{max}(J) \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec prise en compte du débit (Tableau 6) :

$$Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.045 T_{min}(J) + 0.092 T_{max}(J) - 0.0051Q(J) \quad (\text{Eq. 6})$$

Les coefficients de ces deux équations sont assez semblables à ceux obtenus plus en aval, au Bazacle, avec toutefois un coefficient plus important sur le débit, qui pourrait s'expliquer par les débits plus faibles à Valentine qu'au Bazacle (en moyenne environ 3 fois plus faible qu'à Toulouse sur les mois de Juin à Septembre).

Les performances des modèles sont par contre bien plus faibles que pour le Bazacle, avec seulement 75% des prévisions avec moins de $\pm 2^\circ\text{C}$ d'erreur. Il semblerait que la température de l'eau à Valentine soit trop variable d'un jour à l'autre pour qu'une approche utilisant la température de l'eau au jour J-1 soit valable sur plusieurs jours.

En effet, dès J+1 les performances se dégradent beaucoup et sont moins bonnes que le modèle basé uniquement sur la température de l'air et le débit selon l'équation suivante :

$$Teau(J) = 0.144 T_{max}(J-1 \text{ à } J) + 0.28 T_{min}(J-1 \text{ à } J) - 0.0505 Q(J-1 \text{ à } J) + 10.6^\circ\text{C} \quad (\text{Eq. 7})$$

Les température et débits étant des moyennes sur les jours J-1 et J. Pour une prévision à J+1, il suffit de remplacer J-1 par J et J par J+1 dans l'équation (et ainsi de suite à plus longues échéances).

Cette équation (Eq. 7) peut être appliquée à n'importe quelle échéance, avec des performances théoriques ne dépendant pas de l'échéance choisie, puisqu'elle n'utilise pas la température de l'eau au jour précédent. Elle a également l'avantage de ne pas nécessiter de données de température de l'eau télétransmises en temps réel. **L'équation (Eq. 7) sera à utiliser de préférence pour la prévision de température de l'eau à Valentine**, quelle que soit l'échéance considérée.

Les performances réelles de cette modélisation dépendront bien entendu des performances des prévisions de températures de l'air et de débit.

Tableau 5. Résultats du modèle de prévision de la température de l'eau à Valentine utilisant la température de l'eau au jour J-1, mais pas le débit. L'équation de prévision est appliquée plusieurs fois pour aller jusqu'à J+3.

Evaluation du modèle $Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.033 Tmin(J) + 0.090 Tmax(J)$						
Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à 100m ³ /s sur 8 jours						
Echéance Prévision	erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
				± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet						
J	-2	1.1	0.53	81.7	100	100
J+1	-3.2	1.6	0.82	49.5	90.7	99.5
J+2	-4.2	1.7	0.95	34.6	75.5	96.6
J+3	-4.7	1.5	1.02	25.1	62.6	91.7
Echantillon test						
J	-2	1.1	0.57	82.8	100	100
J+1	-3	1.6	0.82	53.4	91.9	99.7
J+2	-4.2	1.7	0.96	38	79.7	96.4
J+3	-4.7	1.5	1.05	29.4	64.8	91.4

Tableau 6. Evaluation du modèle de prévision de la température de l'eau à Valentine avec prise en compte du débit et de la température de l'eau au jour J-1, en itérant plusieurs fois la même équation de prévision.

Evaluation du modèle $Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.045 Tmin(J) + 0.092 Tmax(J) - 0.0051Q(J)$						
Juin-Septembre en excluant les débits supérieurs à 100m ³ /s sur 8 jours						
Echéance Prévision	erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
				± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet						
J	-1.9	1.1	0.5	87.6	100	100
J+1	-2.9	1.4	0.75	58.8	95	100
J+2	-3.7	1.4	0.87	44.8	85.6	98.7
J+3	-4.1	1.4	0.93	34	75.4	96.1
Echantillon test						
J	-1.9	1.1	0.53	87.2	100	100
J+1	-2.7	1.4	0.75	61.5	95.3	100
J+2	-3.7	1.3	0.87	48.7	87.5	99
J+3	-4.1	1.1	0.93	38.8	79.4	96.9

Tableau 7. Performances du modèle de prévision de la température de l'eau à Valentine n'utilisant pas la température de l'eau le jour précédent (Eq. 7). Ce modèle est donc applicable à n'importe quelle échéance voulue, sur la période de Juin à Septembre inclus.

$\text{Teau}(J) = 0.144 \text{ Tmax}(J-1 \text{ à } J) + 0.28 \text{ Tmin}(J-1 \text{ à } J) - 0.0505 \text{ Q}(J-1 \text{ à } J) + 10.6^\circ\text{C}$ pour des débits moyens $\text{Q}(J-7 \text{ à } J) < 100 \text{ m}^3/\text{s}$					
erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
			± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet					
-2.5	2.1	0.69	86	99.3	100
Echantillon test					
-2.4	2.1	0.71	84.6	99.5	100

3.2.2 Station RSA de Montespan (Garonne)

Montespan est situé en aval de Valentine, mais en l'absence de station hydrométrique à Montespan les débits utilisés sont aussi ceux de Valentine. Au total, après filtrage des débits élevés (dépassants 100 m³/s à Valentine en moyenne sur 8 jours) et des valeurs manquantes, il reste 1 704 jours exploitables sur les mois de Juin à Septembre (années 1999-2021) pour l'ajustement par moindres carrés (rappel : 2022 n'est pas utilisée ici car les données SAFRAN journalières récupérées à ce jour ne couvrent pas l'été 2022).

Les modélisations donnent des résultats différents de ceux obtenus pour Valentine, mais avec des conclusions qualitativement très similaires :

- Une modélisation utilisant la température de l'eau au jour J-1 ne donne de bons résultats que à courte échéance (pour le jour J : 99.5% des données à +/- 2°C) [avec l'équation : $\text{Teau}(J) = 0.84 \text{ Teau}(J-1) + 0.098 \text{ Tmax}(J) + 0.048 \text{ Tmin} - 0.0084\text{Q}(J)$]
- Pour une prévision à 1 jour, une équation sans prendre en compte la température de l'eau le jour précédent donne des résultats très légèrement moins bons (98% à +/-2°C). Par contre, les performances étant par construction inchangées à échéance plus longues, ce modèle est très supérieur au précédent dès J+1. Il se base sur l'équation : $\text{Teau}(J) = 0.18 \text{ Tmax}(J-1 \text{ à } J) + 0.23 \text{ Tmin}(J-1 \text{ à } J) - 0.057 \text{ Q}(J-1 \text{ à } J) + 11.2^\circ\text{C}$ (Eq. 8)

Les résultats du modèle proposé sont présentés Tableau 8. L'équation (Eq. 8) peut être utilisée dès l'échéance J et jusqu'à J+3 ou plus sous réserve de disposer de prévisions de débit et de température de l'air.

Tableau 8. Evaluation du modèle de prévision proposé à Montespan, pour toutes les échéances (approche similaire à celle proposée pour Valentine Tableau 7). Equation valable pour la période de Juin à Septembre inclus.

Teau(J) = 0.18 Tmax(J-1 à J) + 0.23 Tmin(J-1 à J) – 0.057 Q (J-1 à J) + 11.2°C pour des débits moyens Q(J-7 à J) < 100 m ³ /s					
erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
			± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet					
-10.9	2.7	0.92	75.6	97.9	99.6
Echantillon test					
-10.9	2.4	0.98	73.8	97.7	99.8

3.2.3 Station RSA de Saint-Julien (Garonne)

A St-Julien-sur-Garonne, entre Cazères et Carbonne, aucune station hydrométrique n'est disponible. On utilise donc les données de la station de Marquefave, située à l'aval de Carbonne (données depuis 2006). Ainsi, la série temporelle analysée ici couvre la période 2006-2021 (mois de Juin à Septembre) et contient 1 175 journées avec des débits moyens sur 8 jours à Marquefave inférieurs à 160 m³/s.

Ici encore, les résultats sont plus proches de ceux de Valentine et Montespan que de ceux du Bazacle : **la température de l'eau au jour J-1 n'est pas un facteur déterminant** pour la prévision. Elle peut améliorer légèrement les prévisions pour le jour J [équation : $Teau(J) = 0.84 Teau(J-1) + 0.10 Tmax(J) + 0.02 Tmin(J) - 0.0029 Q(J)$ donnant ± 2°C dans 99.7% des cas au jour J], mais ne doit pas être utilisée à échéances plus longues.

Dès J+1, les prévisions sont en effet significativement meilleures sans considérer la température de l'eau à J-1, avec l'équation :

$$Teau(J) = 0.192 Tmax(J-1 à J) + 0.176 Tmin(J-1 à J) - 0.029 Q (J-1 à J) + 11.15°C \quad (Eq. 9)$$

Les résultats du modèle proposé sont présentés Tableau 9. L'équation (Eq. 9) peut être utilisée dès l'échéance J et jusqu'à J+3 ou plus sous réserve de disposer de prévisions de débit et de température de l'air.

Tableau 9. Evaluation du modèle de prévision proposé à Saint-Julien sur Garonne, pour toutes les échéances (approche similaire à celle proposée pour Valentine Tableau 7). Equation valable pour la période de Juin à Septembre inclus.

Teau(J) = 0.192 Tmax(J-1 à J) + 0.176 Tmin(J-1 à J) – 0.029 Q (J-1 à J) + 11.15°C pour des débits moyens Q(J-7 à J) < 160 m ³ /s					
erreur min (°C) (modèle - données)	erreur max (°C) (modèle - données)	écart-type des erreurs (°C)	Fraction des données (%) avec une erreur inférieure à :		
			± 1°C	± 2°C	± 3°C
Echantillon complet					
-4.9	3.2	0.97	73	95.8	99.4
Echantillon test					
-3.3	3.2	1.04	69.1	93.8	99.4

3.2.4 Comparaison avec le Bazacle (Garonne)

Il apparaît que la situation du Bazacle est très particulière et diffère des autres stations sur la Garonne. En effet, au Bazacle, la température de l'eau au jour J-1 est un facteur déterminant pour la prévision au moins jusqu'à J+3 alors qu'aux autres stations il cesse d'être impactant dès J+1, et n'est pas indispensable pour une prévision à un jour (de J-1 à J). Cette différence pourrait venir de la situation particulière du plan d'eau du Bazacle qui pourrait être à l'origine d'une inertie plus importante (volumes d'eau plus importants à chauffer).

Pour toutes les stations considérées, Bazacle compris, les débits journaliers élevés entraînent ponctuellement des sous-estimations très importantes de la température de l'eau.

3.2.5 Autre prise en compte du débit

Une autre approche consisterait par exemple à considérer non par le débit journalier Q mais le logarithme népérien du débit, $\ln(Q)$ dans les différentes modélisations effectuées. Cette approche permet de résoudre en partie le problème associé aux débits élevés que l'on doit filtrer. Par contre, les résultats sur les débits faibles ne sont pas meilleurs.

Si l'objectif est de ne pas avoir à effectuer de filtres sur les débits élevés (pour lesquels les équations linéaires en débit donnent des résultats éloignés de la réalité) les approches basées sur $\ln(Q)$ peuvent être préférables, par contre si l'objectif est de bien représenter les situations où la température est élevée, associées à des débits faibles, une approche avec $\ln(Q)$ n'est pas nécessaire. Pour information, au Bazacle (RSA) un ajustement linéaire donne l'équation $Teau(J) = 0.87 Teau(J+1) + 0.051 TN(J) + 0.106 TX(J) - 0.222 \ln(Q(J))$ (93% à ± 2 °C sur l'échantillon test ; performance similaires ou légèrement inférieures à la modélisation linéaire, sauf pour les débits élevés).

3.3 Limites des modèles statistiques

Les modèles statistiques étant développés sans utiliser d'équations physiques mais en se basant uniquement sur les propriétés des séries de données passées, **ils ne permettent pas à priori de prévoir correctement des situations qui ne se sont jamais produites dans les séries historiques**. Il en découle plusieurs limitations importantes :

- Le traitement des événements extrêmes à partir de modèles statistiques est délicat de par leur faible nombre d'occurrence, nécessitant des séries statistiques longues ;
- Le changement climatique et les changements hydromorphologiques créent des conditions nouvelles qui n'existent pas dans les données actuelles et donc qui risquent de ne pas être bien représentées par les modèles statistiques ;
- Les modèles statistiques, même complexe, ne permettent pas à priori de faire des projections climatiques, ils peuvent au mieux donner des indications de tendance, un ordre de grandeur (et encore, à prendre avec précaution).

L'utilisation de modèles physiques pourrait permettre de répondre à certains de ces problèmes, mais ces modèles sont complexes à calibrer et mettre en œuvre.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

4.1 Conclusions

Ce rapport s'est focalisé en partie sur la station de mesure de la **température de l'eau de la Garonne au Bazacle à Toulouse** pour mettre en évidence les **liens entre température de l'air et température de l'eau**. Des modèles linéaires y ont été proposés essentiellement sur la période de Juin à Septembre où les enjeux sont importants, et cela a permis de mettre en évidence **l'impact du débit à cette période de l'année**, lorsque les données avec des débits élevés sont exclues de l'analyse (débits sur 8 jours supérieurs à 300 m³/s à Portet-sur-Garonne).

L'ajout du débit comme paramètre pour la modélisation permet de mettre en évidence qu'une augmentation du débit entraîne en moyenne une diminution de la température de l'eau. A Toulouse une augmentation de 2°C de la température de l'air entrainerait une augmentation de la température de l'eau de 1.3°C. Au contraire, une hausse des débits de 40m³/s entrainerait une baisse de températures de l'eau de 1°C. Les modèles incluant les débits ont aussi de meilleures performances que les modèles basés uniquement sur la température de l'air.

Les modèles de prévision proposés se basent sur ces résultats, et incluent en plus la température de l'eau le jour précédent. **Un modèle simple pour prévoir la température de l'eau au jour J à partir de celle à J-1, ainsi que des températures de l'air et du débit a été proposé. Il donne de bons résultats, y compris lorsqu'il est itéré jusqu'à J+3**, lorsque les débits journaliers restent inférieurs à 500 m³/s et les moyennes sur 8 jours inférieurs à 300 m³/s. Lorsque les débits journaliers sont élevés, les résultats du modèle se dégradent fortement (surestimation de l'impact « refroidissant » du débit en hautes eaux – l'équation étant bien adaptée uniquement pour des débits faibles à modérés mais pas en crue) et il est préférable d'exclure les situations où le débit journalier observé ou prévu dépasse 500 m³/s. **Le cas échéant, un modèle sans prise en compte du débit pourrait être appliqué dans ces situations.**

Aux autres stations étudiées sur la Garonne, les résultats sont assez différents avec notamment une importance nettement moindre de la température de l'eau la veille de la prévision. A ces autres stations (St-Julien, Montespan et Valentine) il est ainsi préférable (au moins à partir de J+1) de ne pas utiliser la température de l'eau à J-1 mais uniquement des modèles basés sur les températures de l'air et les débits. Tous comme au Bazacle, il est alors important de filtrer les cas où les débits sont élevés

4.2 Perspectives

Comme mentionné, **le modèle de prévision proposé dans ce rapport pour le Bazacle sera testé en conditions réelles dès Juin 2023**. Ce test en 2023 pourrait conduire à des améliorations futures en fonction des performances en conditions réelles.

En fonction des objectifs, une autre approche pour la prévision pourrait être de définir *un niveau de risque*. Par exemple, pouvoir donner un pourcentage de risque de dépassement du

seuil de température de 25°C au jour J en fonction d'une série d'autres facteurs (température de l'eau la veille, température de l'air, débit). On pourrait envisager la construction d'un indice qui à partir des paramètres disponibles puisse donner un niveau de risque de dépassement d'un seuil donné. Il faudrait définir les objectifs d'un tel indice, et notamment le taux de fausses alertes acceptable (et/ou le taux de non détection acceptable, sachant que diminuer le taux de fausse alerte entrainera une augmentation du taux de non détection). Cette approche est légèrement différente de la prévision chiffrée de température : l'objectif serait alors en effet de prévoir le mieux possible des événements « extrêmes ». Avec une limitation liée à la rareté de tels événements et donc la difficulté à créer des modèles statistiques fiables dans l'objectif de les prédire.

5 ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

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.

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., Chandesris, 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>

Soubeyroux, Jean-Michel, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, et al. « Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole ». Météo-France, 2020. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>.

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.

6 ANNEXES

Le rapport se focalise essentiellement sur la modélisation de la température de l'eau pendant les mois de Juin à Septembre inclus, qui sont les mois où les enjeux sont les plus importants de par les températures de l'air élevées, dont les effets sont renforcés par des débits faibles.

Des modélisations et prévisions peuvent aussi être effectuées en considérant l'année complète. Les résultats correspondant sont présentés ici, en annexe, car ils sont moins essentiels mais apportent néanmoins des compléments qui éclairent la compréhension des paramètres clés pour la température de l'eau, ainsi que les choix effectués pour la modélisation / prévision en été présentée dans le cœur de ce rapport.

Les modélisations présentées ici se basent uniquement sur un sous-ensemble des données MIGADO, tandis que dans le cœur du rapport les données du RSA sont privilégiées (et MIGADO à Valentine) dans une optique opérationnelle.

6.1 Modèles linéaires sur l'année complète

Comme indiqué dans la partie 2.4 page 11, le débit ne peut pas être utilisé dans le cadre d'une modélisation linéaire de la température de l'eau sur l'année complète. Les modèles linéaires sur l'année complète ci-dessous se basent donc soit sur l'advection (température de l'eau plus en amont utilisée pour modéliser la température à l'aval) soit sur la température de l'air soit sur ces deux paramètres.

6.1.1 Impacts de la température de l'air

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 entre température de l'air et température de l'eau aussi bien sur la Garonne à Toulouse (au Bazacle, figure 8) que par exemple sur l'Arac à Biert (figure 9). 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 Toulouse¹² 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.

¹² 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.

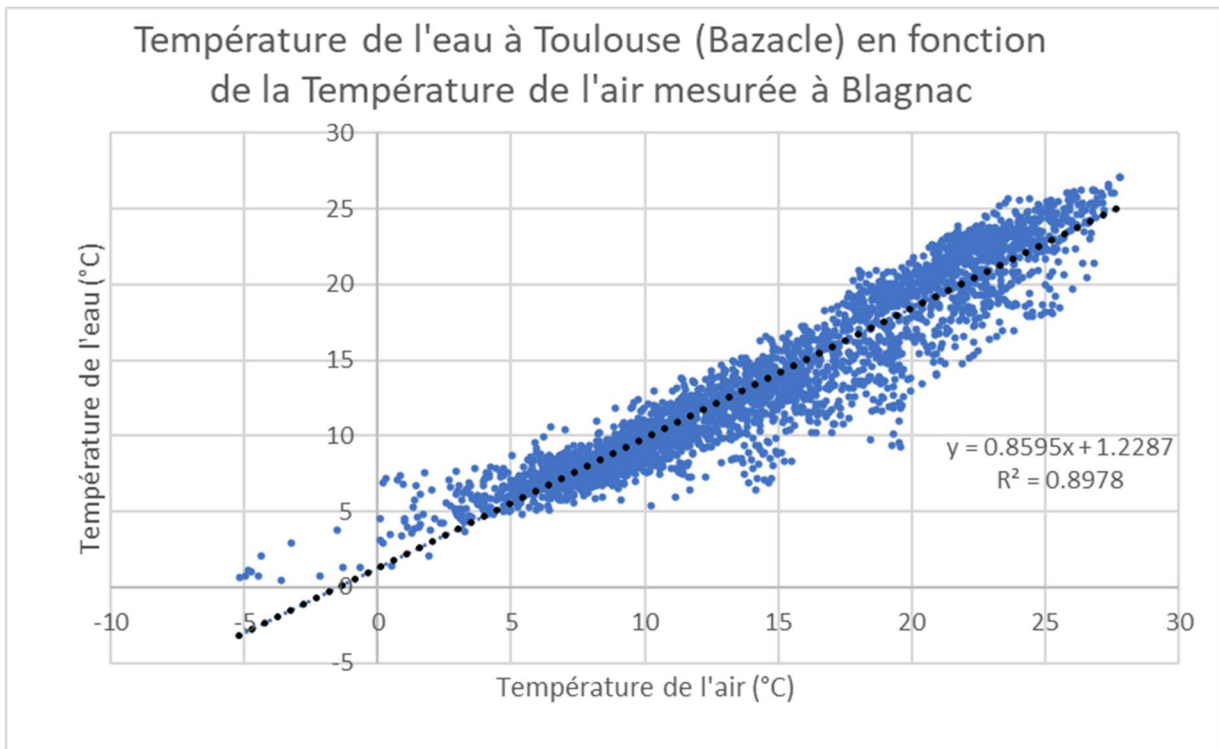


Figure 8. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse le jour J (moyenne journalière) en fonction de la température moyenne de l'air sur 8 jours (J-7 à J inclus). Données Météo-France (station Toulouse-Blagnac) et MIGADO (température de l'eau au Bazacle). Données 2008-2020 (avec des données manquantes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

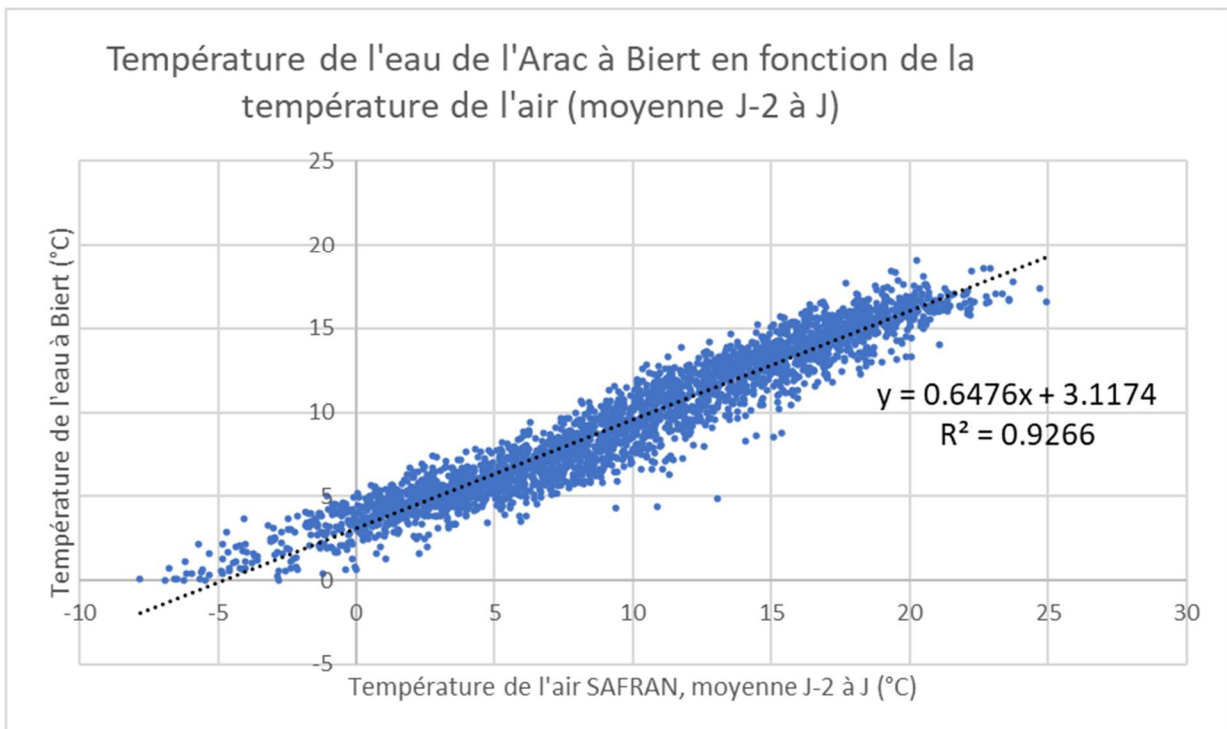


Figure 9. Température de l'eau de l'Arac à Biert (Données Naiades / TIGRE) en fonction de la température de l'air issue du modèle SAFRAN (Météo-France Life/Climat) moyennée sur les 3 jours précédents (J-2 à J). Les données utilisées couvrent la période 2008-2018.

6.1.2 Impact du débit

A Portet-sur-Garonne on dispose de plusieurs années de mesures du débit et de la température de l'eau. On observe qu'il n'y a aucune corrélation significative entre ces deux **paramètres sur l'année complète** (figure 10). Par ailleurs, il n'y a pas non plus de corrélation entre le débit et la variabilité de la température de l'eau non expliquée par celle de l'air. Ainsi, du moins à Portet-sur-Garonne, le débit n'est pas un facteur déterminant pour la température de l'eau **lorsque l'on s'intéresse à l'année complète. Cela vient notamment du fait que les débits de crue peuvent être jusqu'à deux ordres de grandeur au-dessus des débits d'étiage et donc qu'un modèle linéaire n'est pas adapté à de telles variations.** Par exemple, si 1°C d'augmentation de la température de l'air aura un impact similaire sur la température de l'eau, peu importe qu'il fasse 10°C ou 25°C. Par contre, une augmentation du débit de 20 m³/s pourrait avoir un impact sur la température de l'eau en étiage (par exemple si le débit passe de 60 m³/s à 80 m³/s) mais cet apport de 20m³/s aura un effet négligeable en hautes eaux (par exemple si le débit passe de 500 m³/s à 520m³/s).

Une possibilité ici serait par exemple de considérer le logarithme népérien du débit et de le faire intervenir dans l'équation afin d'avoir des impacts du débit qui ne soient pas linéaire mais diminuent lorsque les débits sont élevés. Les débits de la Garonne étant toujours (très) supérieurs à 1m³/s, $\ln(Q)$ sera toujours supérieur à zéro.

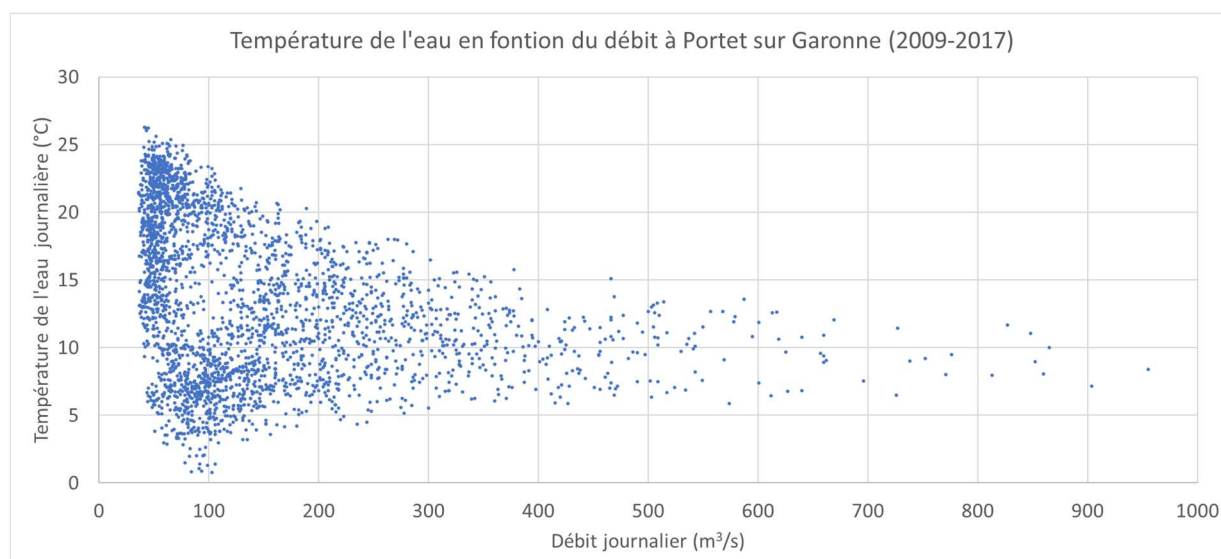


Figure 10. Débit Journalier à Portet-sur-Garonne en fonction de la température de l'eau (données Naiades, 2009-2017).

6.1.3 Impacts de l'advection

Comme indiqué en introduction, la température initiale d'un tronçon est un des facteurs essentiels à prendre en compte pour la modélisation de la température de l'eau. Il a donc été comparé les températures moyennes journalière de la Garonne à Valentine et au Bazacle (environ 100 km en aval) et une bonne corrélation entre la température à Valentine au jour J-1 et celle au Bazacle au jour J (figure 11) a pu être observée. Cette approche donne des résultats plutôt meilleurs que l'utilisation de la température de l'air, mais nécessite la connaissance de la température de l'eau à Valentine à J-1.

Remarque : le Bazacle n'est pas sur le périmètre de Garonne amont car il se situe à l'aval de la confluence avec l'Ariège. On peut noter que la corrélation entre les températures moyennes journalière de la Garonne à Valentine et au Bazacle est bonne malgré la proportion importante d'eau venant du bassin de l'Ariège à l'étiage.

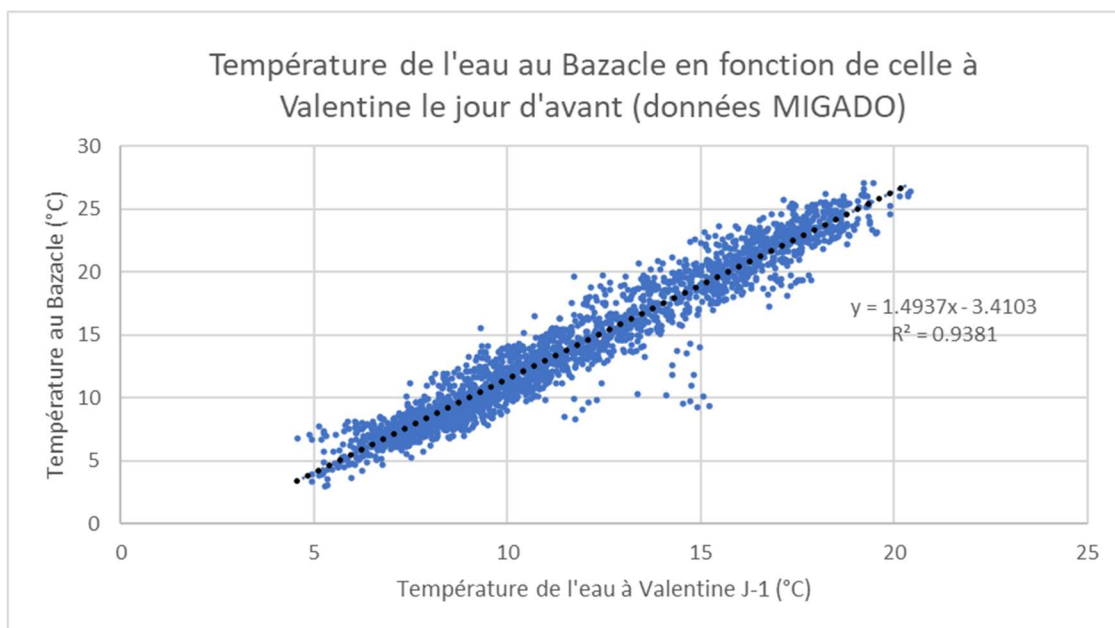


Figure 11. Température de la Garonne au Bazacle en fonction de celle à Valentine le jour précédent. Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).

De même, si l'on remonte plus en amont, on observe également une bonne corrélation entre la température de la Pique à Cier-de-Luchon et celle de la Garonne à Valentine (figure 13), et cela malgré le fait que la partie amont de la Garonne va aussi influencer sur la température après la confluence.

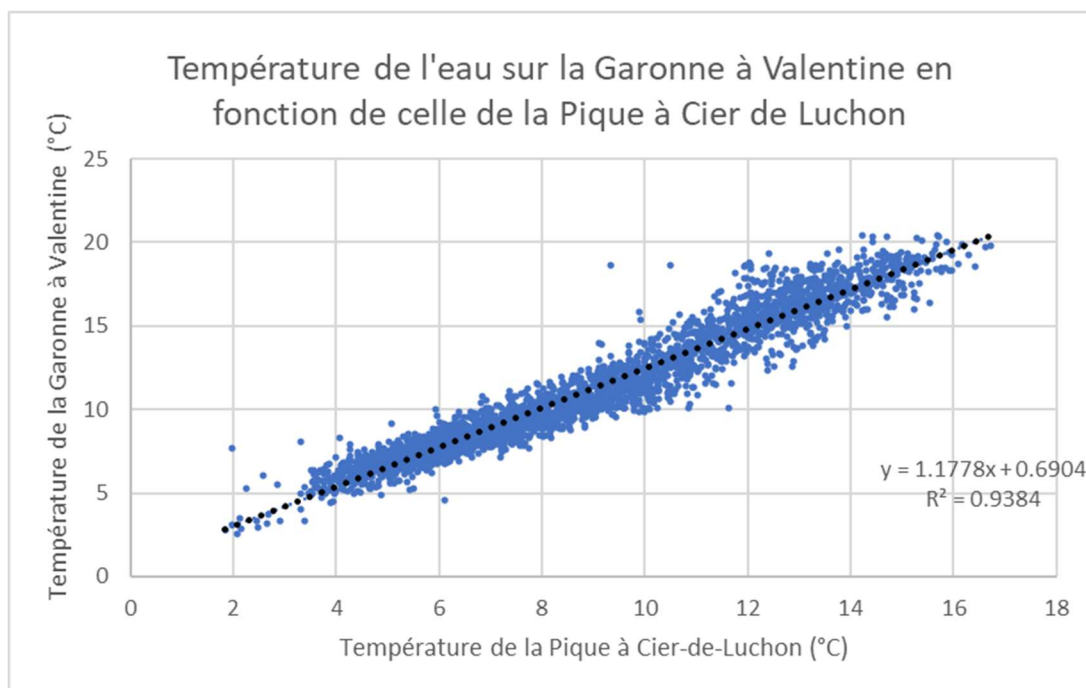


Figure 12. Température de la Garonne à Valentine en fonction de celle de la Pique à Cier-de-Luchon (le même jour). Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).

En conséquence, on observe également une très bonne corrélation entre la température de l'eau de la Pique à Cier-de-Luchon et celle de la Garonne au Bazacle (figure 13)

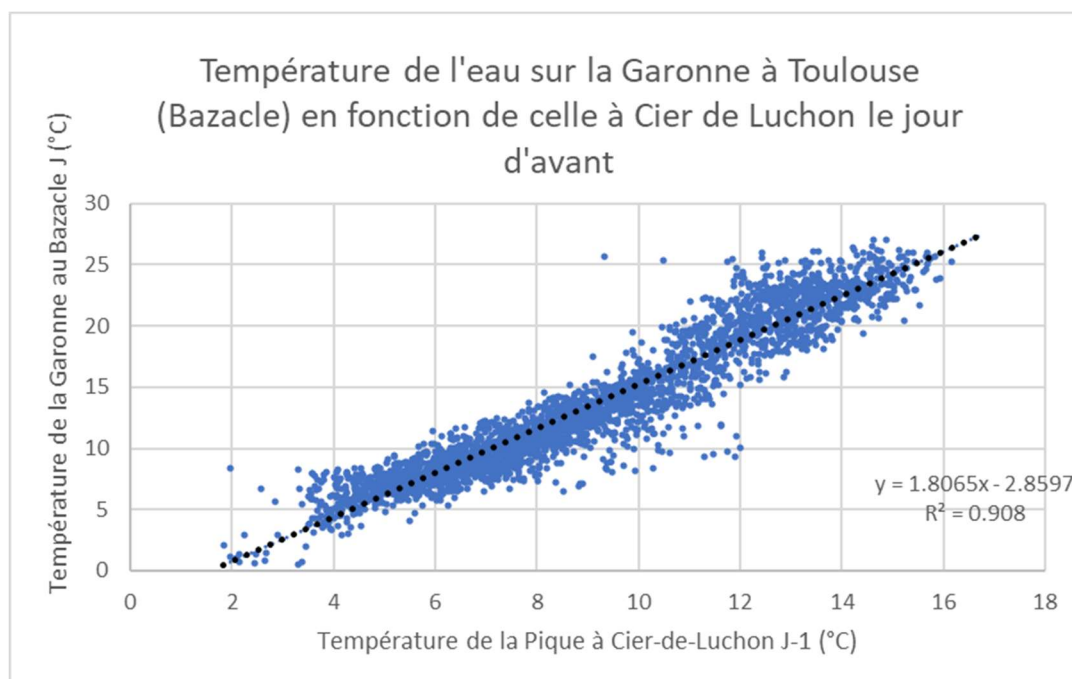


Figure 13. Température de l'eau de la Garonne à Toulouse Données MIGADO, 2009-2020 (avec parfois des données manquantes).

Les résidus du modèle advectif ne sont pas du tout corrélés à la température de l'air au jour J, et donc si l'on désire améliorer le modèle linéaire, il faut développer un modèle linéaire spécifique à deux variables (cf. paragraphe suivant).

Le résumé de ces modélisations de la température de l'eau sur l'année complète est présenté Tableau 10 page suivante.

6.1.4 Impact de la température de l'air et de la température de l'eau en amont

Une autre approche consiste à utiliser à la fois la température de l'air et la température de l'eau en amont pour déterminer la meilleure modélisation bilinéaire de la température de l'eau sur l'année complète à partir de ces deux variables. On peut ainsi déterminer les meilleurs coefficients a, b et c pour calculer la température de l'eau au Bazacle le jour J à partir de celle à Valentine au jour J-1 et de la température moyenne de l'air à Toulouse-Blagnac de J-7 à J :

$$Teau(Bazacle, J) = a Teau(Valentine, J - 1) + b Tair(Toulouse, J - 7 \text{ à } J) + c$$

Sur le jeu de données dont nous disposons on obtient alors :

$$1,035 Teau(Valentine, J - 1) + 0,292 Tair(Bazacle, J - 7 \text{ à } J) - 2,453^\circ\text{C}$$

Avec un coefficient de détermination $R^2=0,952$

Comme vu précédemment, les valeurs de R^2 sont légèrement plus faibles si l'on utilise uniquement la température à Valentine et pas celle de l'air, avec $R^2=0,938$.

Nous présentons dans le tableau 10 les résultats des 3 modélisations de la température de l'air, en se basant sur les jours J pour lesquelles l'ensemble des données sont disponibles (température de l'eau au Bazacle jour J, température à Valentine à J-1 et température de l'air à Toulouse de J-7 à J). L'ensemble des modèles utilisés présentent des bonnes valeurs du coefficient de détermination ($R^2>0,9$), cependant les autres critères soulignent des écarts modèle-données qui peuvent être importants, dépassant parfois les 3°C.

Tableau 10. Comparaison entre trois modélisations linéaires de la température de l'eau à Toulouse (Bazacle) sur la période 2009-2020. NB : Il y a de légères différences avec ce qui ont été présenté précédemment car afin que la comparaison soit la plus juste possible on n'utilise ici seulement les jours ou l'ensemble des données sont disponibles.

	Modèle « Tair/Teau » : Teau au Bazacle (jour J) à partir de Tair à Toulouse-Blagnac (moyenne J-7 à J)	Modèle « advectif » : Teau au Bazacle (jour J) à partir de Température de l'eau à Valentine (J-1)	Modèle bilinéaire : « Tair/Teau + advection »
Coefficient de détermination R^2	0,906	0,938	0,954
Ecart minimum modèle-mesure	-5,8 °C	-5,5 °C	-4,3 °C
Ecart maximum modèle-mesure	8,9 °C	9,9 °C	9,6 °C
Ecart-type modèle-mesure (RMSE)	1,74 °C	1,41 °C	1,22 °C
Ecart moyen modèle-mesure en valeur absolue	1,33 °C	1,04°C	0,86 °C
Ecart médian modèle-mesure en valeur absolue	1,09 °C	0,81 °C	0,66 °C
Pourcentages des jours avec un écart absolu inférieur à 2°C (inférieur à 3°C)	78,4% (92,4%)	87,7% (96,8%)	92,2% (98,3%)

Le modèle basé sur la température de l'air, donne les moins bons résultats pour l'ensemble des métriques considérées (sauf l'écart maximum modèle–mesure, mais ce n'est pas très significatif car il s'agit uniquement d'une valeur extrême dans une longue série, avec également un risque qu'il s'agisse d'une donnée aberrante non filtrée), et les meilleurs résultats sont observés avec le modèle bilinéaire utilisant à la fois la température de l'air et celle de l'eau en amont.

Cette approche peut ainsi être utilisée pour des prévisions de température de l'eau à court terme (cf. paragraphe suivants).

6.2 Prévision de la température de l'eau sur l'année complète (et comparaison avec la saison estivale)

6.2.1 *Modèle basé sur la température de l'air (J-6 à J+1) et la température de l'eau à Valentine (J)*

Dans les paragraphes précédents, nous avons créé des modèles à partir de l'ensemble des données disponibles, ce qui ne permet pas de les tester dans une approche de prévision. Afin de valider notre approche dans une optique de prévision à J+1, on crée un modèle multilinéaire « Tair + advection » à partir des données disponibles en excluant l'année 2020, puis on applique le modèle prédictif à l'année 2020. On obtient alors un écart absolu moyen entre la prédiction et le modèle de l'ordre de 0,7°C, avec moins de 2°C de différence dans 97,5% des cas (et aucun cas avec plus de 3°C d'écart)¹³.

Notons que pour une prévision réelle à J+1 avec ces performances il faudrait la température de l'eau à Valentine au jour J et une prévision « parfaite » de la température de l'air à Toulouse au jour J+1.

Remarque : lorsque la série de données est suffisamment longue, une autre approche (utilisée dans les parties 2.3, 2.4, et 3 de ce rapport) consiste à sélectionner de façon aléatoire par exemple deux tiers des données pour créer un modèle linéaire (« échantillon d'entraînement ») et le tiers restant pour tester le modèle linéaire (« échantillon test »).

¹³ Ces résultats sont meilleurs que ceux sur la période complète (Tableau 10, colonne 3), car les données sur la période 2009-2015 sont moins bien modélisées par un modèle bilinéaire que celles pour après 2015 (cela pourrait venir de contextes différents ou bien de la qualité des données).

6.2.2 Modèles utilisant la température de l'eau au Bazacle

Au Bazacle, la température moyenne au jour J+1 est très proche de celle au jour J. Il y a une **excellente corrélation ($R^2 > 0,99$) entre la température de l'eau au Bazacle au jour J-1 et celle au jour J**. Cette corrélation reste très bonne y compris sur plusieurs jours, par exemple la corrélation entre la température de l'eau au Bazacle au jour J et au jour J+4 reste bonne, avec moins de 2°C de variation de température dans 81% des cas et un écart absolu moyen de 1.25°C, c'est-à-dire des résultats très proches de ceux du modèle Tair/Teau (première colonne du tableau 10). En incluant la température de l'air en plus de la température de l'eau, les résultats de modélisation sont encore améliorés. Deux exemples d'équation pour la prévision à J+5 (basés sur la température de l'eau au jour J et la température de l'air) sont présentés ci-après, ils permettent d'illustrer ce qui est faisable, les limites de l'exercice et les différences entre une équation valable toute l'année et une équation spécifique pour Juin à Septembre.

Soulignons cependant que dans le cas de prévision spécifique pour la saison estivale il est préférable de se concentrer sur les approches présentées dans le cœur du rapport et incluant comme paramètre supplémentaire le débit.

6.2.2.1 Année complète

Si l'objectif est d'effectuer une prévision de température de l'eau de la Garonne au Bazacle à J+1, **le meilleur modèle est le plus simple**. Et pour des horizon plus lointain, l'utilisation de la température de l'air semble prometteuse. Ainsi, **pour une prévision à J+5**, en se basant sur les données disponibles en 2008-2019, on obtient l'équation suivante :

$$Teau(\text{Bazacle}; J + 5) = 0,58 Teau(\text{Bazacle}; J) + 0,39 Tair(\text{Toulouse}; J + 2 \text{ à } J + 5) + 0,16^\circ\text{C}$$

Avec un coefficient de détermination $R^2=0,965$ sur 2008-2019. En utilisant cette équation pour « prédire » la température de l'eau au Bazacle en 2020, on obtient de bons résultats (figure 14) avec moins de 0,56°C d'écart dans plus de la moitié des cas, un écart absolu moyen de 0,72°C et **moins de 2°C d'écart dans 95,1% des cas** (moins de 3°C d'écart dans 98,6% des cas).

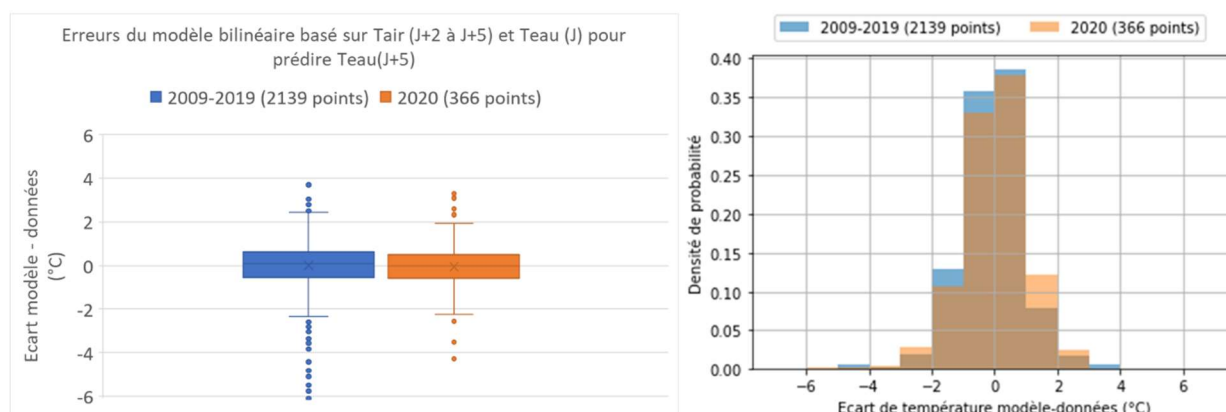


Figure 14. Différences modèle – données au Bazacle à J+5, avec un modèle bilinéaire basé sur la température de l'air moyenne de J+2 à J+5 et la température de l'eau au jour J. Le modèle bilinéaire est créé à partir des données sur la période 2009-2019 (2139 points) et appliqué également à l'année 2020 (366 points). Le graphe de gauche présente les statistiques (trait central = médiane, croix = moyenne, boîte = interquartile et valeurs extrêmes indiqués par les points qui sortent des barres) et le graphe de droite donne les densités de probabilité (les intervalles sont de largeur = 1°C, donc par exemple sur 2009-2019, l'écart entre le modèle et les données est compris entre -1°C et 0°C dans un peu plus de 35% des cas).

6.2.2.2 Juin à Septembre

Pour comparaison, si l'on ne considère que les mois de **Juin à Septembre** dans une optique de prévision des températures élevées, on obtient alors une équation légèrement différente :

$$\begin{aligned} Teau(Bazacle; J + 5) \\ &= 0,575 Teau(Bazacle; J) + 0,42 Tair(Toulouse; J + 2 \text{ à } J + 5) \\ &- 0,19^{\circ}C \end{aligned}$$

Le coefficient de détermination est $R^2=0,956$ et la prévision pour l'été 2020 donne là aussi de bons résultats (figure 15) avec **moins de 0,54°C d'écart pour plus de la moitié des jours**, un écart absolu moyen de 0,79°C **moins de 2°C d'écart dans 88,5% des cas** (moins de 3°C dans 97,5% des cas).

Si l'on diminue la période de temps utilisée pour déterminer les coefficients et augmente celle utilisée pour la vérification, on obtient des équations légèrement différentes mais avec des performances similaires¹⁴.

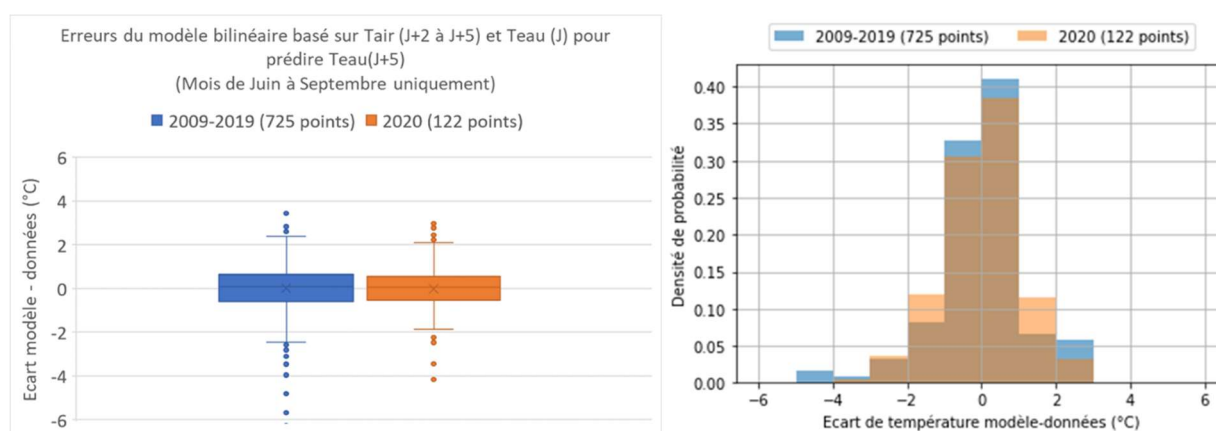


Figure 15. Différences modèle – mesure, comme figure 14 mais en considérant seulement les données des mois de Juin à Septembre pour la construction du modèle tout comme pour la comparaison aux données.

Pour conclure, si les prévisions de température de l'air sont « parfaites » on peut espérer prédire la température de l'eau de la Garonne à Toulouse, à J+5 avec une précision de +/- 2°C dans environ 90% des cas à l'aide d'un modèle bilinéaire simple (et à +/-1°C dans 65 à 70% des cas).

Notre modèle simple attribuant environ 40% de la variabilité à la température de l'air, une erreur de 1°C sur la prévision de la température moyenne de l'air de J+2 à J+5 entrainera environ 0,4°C d'erreur sur la prévision de température de l'eau.

Rappelons à nouveau ici que dans le cas de prévision spécifique pour la saison estivale il est préférable de se concentrer sur les approches présentées dans le cœur du rapport et incluant comme paramètre supplémentaire le débit (cf. partie 3 page 14 et suivantes).

¹⁴ Par exemple si l'on crée le modèle sur les données disponibles de 2009 à 2016, soit 1064 points de données disponibles, et effectue la vérification sur la période 2016-2020 avec 1441 points de données, on obtient un écart absolu prévision-mesure de 0,76°C en moyenne, et moins de 2°C dans 95,5% des cas. Si sur les mêmes périodes de temps on ne considère que les mois de Juin à Septembre, on obtient alors un écart absolu prévision-mesure de 0,83°C en moyenne, et moins de 2°C dans 92,2% des cas.