

## *Action D 1.2*

### *Observatoire thermique des cours d'eau et des nappes alluviales*

### *Quels futurs pour la température de l'eau de la Garonne à Toulouse ?*

**Novembre 2024**



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

## TABLE DES MATIERES

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>TENDANCES PASSEES .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CLIMAT FUTUR.....</b>	<b>5</b>
3.1	Introduction .....	5
3.2	Impact des dérèglements climatiques sur le territoire Garon'Amont .....	5
<b>4</b>	<b>HYDROLOGIE FUTURE A PORTET-SUR-GARONNE.....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>TEMPERATURES DE L'EAU FUTURES .....</b>	<b>10</b>
5.1	Modèles utilisés et limites .....	10
5.1.1	<i>Données Météorologiques .....</i>	<i>10</i>
5.1.2	<i>Avertissement : limites des modèles proposés pour les tendances climatiques.....</i>	<i>10</i>
5.1.3	<i>Relations Tair/Teau sans constante .....</i>	<i>10</i>
5.1.4	<i>Tendance climatiques passées basées sur données SAFRAN .....</i>	<i>12</i>
5.1.5	<i>Projections proposées sur la base de données moyennées JAS année par année.....</i>	<i>13</i>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCES.....</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>18</b>
8.1	Projections climatiques.....	18
8.1.1	<i>Introduction.....</i>	<i>18</i>
8.1.2	<i>Modèles et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.....</i>	<i>18</i>
8.2	Modélisation de la température de l'eau sur la base de la température de l'air, au pas journalier – équations avec constante .....	20
8.2.1	<i>Impact du débit .....</i>	<i>20</i>

# 1 INTRODUCTION

---

Les rapports précédents<sup>1</sup> ont présenté et analysé différents aspects de la modélisation de la température de l'eau et de son application à la prévision en temps réel des températures de l'eau de la Garonne au Bazacle et à Valentine. Les équations de prévision ont également été appliquées dans le rapport « Bilan de l'année 2023 » pour analyser la tendance de la température de l'eau sur la période passée.

Ce document reprend et actualise les estimations des tendances passées, en discutant de la validité des différentes approches possibles. Il présente également brièvement les résultats des projections climatiques et hydrologiques Explore2 sur le territoire Garon'Amont et plus précisément à Toulouse, ainsi que leurs conséquences sur la température de l'eau de la Garonne à Toulouse-Bazacle. Une estimation de la fourchette des températures moyennes en juillet-septembre est ainsi proposée. Les résultats présentés se basent sur des modèles liant température de l'eau à la température de l'air (et éventuellement au débit) et **ne permettent pas une analyse fine par exemple des extrêmes, mais donnent des grandes tendances sur des températures moyennes.**

---

<sup>1</sup> Disponibles sur le site <https://garonne-amont.fr/bibliotheque/?id=17-24-26>

## 2 TENDANCES PASSEES

Les Figure 1 et Figure 2 issues du rapport de synthèse de l'année 2023 présentent les températures de l'eau moyennes estivales sur la période passée. Les données Figure 1 sont issues des mesures de température de l'eau effectuées par la sonde de l'association MIGADO. La Figure 2 se base sur des observations de la température de l'air à partir desquelles la température de l'eau journalière (sur la période juillet à septembre) est modélisée à l'aide de l'équation suivante :  $Teau(J) = 0.745 Tair(J-4 \text{ à } J) + 5.0^{\circ}C^2$ , où  $Teau(J)$  est la température de l'eau d'un jour J donné en juillet, août ou septembre et  $Tair(J-4 \text{ à } J)$  la température de l'air à Toulouse-Blagnac moyennée sur les jours J-4 à J inclus. **L'utilisation de cette approche pour des tendances longues sera discutée partie 5.1. et une mise à jour proposée.**

Les deux séries de données présentées ont une tendance statistiquement significative à la hausse (test de Mann-Kendall avec un intervalle de confiance de 95%). Les données MIGADO donnent une tendance marquée : **+0.54°C par décennie en moyenne sur 1994-2023**, mais cette tendance est à prendre avec précaution (historique court et données manquantes).

Température de l'eau de la Garonne à Toulouse-Bazacle (moyenne Juillet-Septembre)  
données MIGADO 1994-2023

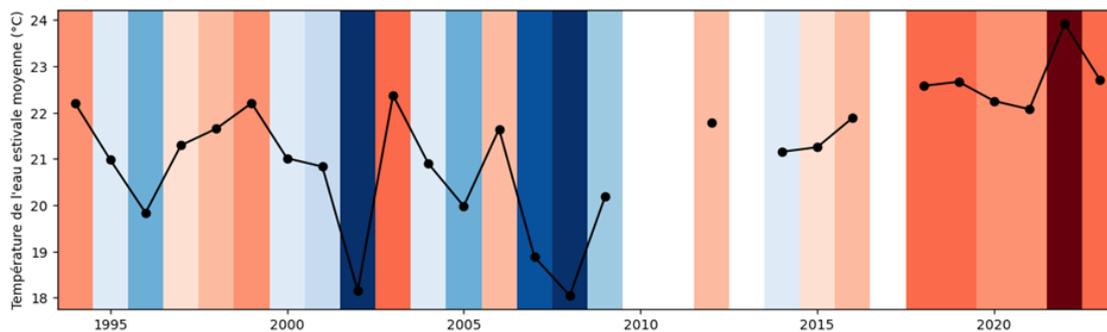


Figure 1. Température moyenne estivale de l'eau de la Garonne au Bazacle mesurée par la sonde MIGADO. Une couleur rouge /bleu indique des températures estivales supérieures / inférieures à la moyenne 1994-2023.

Température de l'eau de la Garonne à Toulouse-Bazacle (moyenne Juillet-Septembre)  
(modélisée à partir de la température de l'air à Blagnac)

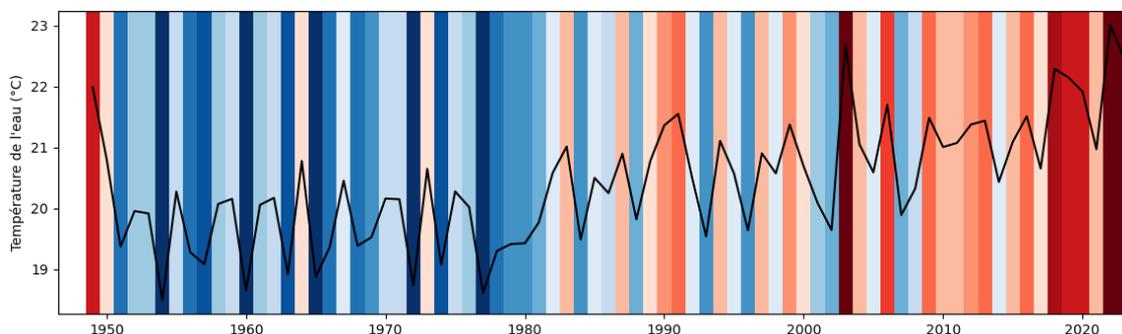


Figure 2. Température moyenne estivale de l'eau de la Garonne au Bazacle reconstruite à partir des données de températures moyennes de l'air à Toulouse-Blagnac (données : opendata Météo-France). **Attention : préféré la Figure 10 plus adaptée (cf. partie 5.1).**

<sup>2</sup> Basées sur les données MIGADO de température de l'eau (au Bazacle) et Météo-France (à Blagnac) pour la température de l'air.

## 3 CLIMAT FUTUR

---

### 3.1 Introduction

Les projections climatiques proviennent des travaux effectués dans le cadre du projet Explore2 à l'échelle nationale. Plus d'informations sur les modèles et le **choix du scénario d'émissions de gaz à effet de serre RCP8.5** (ainsi que des références bibliographiques associées) sont fournies en Annexe (**cf. partie 7, page 17**). Cette partie se focalise sur l'horizon « milieu de siècle » (2040-2069). Des résultats jusqu'à la fin du siècle seront également présentés à titre indicatifs, mais les incertitudes à ces échéances augmentent.

### 3.2 Impact des dérèglements climatiques sur le territoire Garon'Amont

Ce paragraphe présente un aperçu succinct des impacts des dérèglements climatiques sur le territoire Garon'Amont, notamment en termes de températures moyennes annuelles et saisonnières.

Comme expliqué en Annexe (partie 7, page 17), les résultats des projections climatiques sont présentés sous forme de variations par rapport à une période de référence passée de 30 ans, 1981-2010 ici (Figure 3).

Les modèles donnent des résultats significativement différents, représentant autant de futurs climatiques possibles *a priori*. La sélection des 17 modèles Explore2-Climat a en effet été effectuée au vu de travaux de recherche récents, et un seul modèle apparaît comme peu probable au vu des travaux scientifiques les plus récents : il s'agit du modèle Nor-ESM/WRF « DRIAS15 » (Marson et al. 2024).

Ainsi, à l'horizon 2040-2069, par rapport à 1981-2010, les modèles prévoient des hausses de températures en moyenne sur l'ensemble du territoire Garon'Amont de +1.6°C à +3°C, avec une médiane des modèles à +2.4°C. A l'horizon 2070-2099, les modèles prévoient +3.2 à +5.4°C environ. La majorité des modèles prévoient également des baisses des précipitations annuelles, avec cependant des incertitudes très importantes illustrées par les différences d'un modèle à l'autre.

Cette présentation des résultats en moyenne annuelle masque des **différences saisonnières importantes**, ainsi les modèles prévoient des hausses de températures plus importantes en été et à l'automne, mais plus faibles en hiver et au printemps (Figure 4). Par ailleurs des **contrastes territoriaux** existent, et il peut être intéressant de se focaliser sur les résultats au Bazacle, et sur les mois de juillet à septembre où les enjeux sont les plus forts en termes de température de l'eau de la Garonne (Figure 5). On peut alors dès à présent faire ressortir certains modèles qui bornent les futurs possibles en termes de température mais aussi en termes de bilan hydrique (et donc d'impact potentiel sur les débits, même si la relation est tout sauf linéaire). Le modèle **DRIAS9** HadGEM/CCLM donne un scénario avec des étés chauds et secs, tandis que le modèle **DRIAS7** CNRM/ALADIN donne au contraire le réchauffement estival le plus modéré au Bazacle. Enfin, les modèles **DRIAS18** et **DRIAS14** donnent des hausses de températures proches de la médiane des modèles, mais sont très différents en termes de bilan hydrique. Ces 4 modèles seront utilisés pour représenter une fourchette de futurs climatiques possibles et leurs impacts sur la température de l'eau.

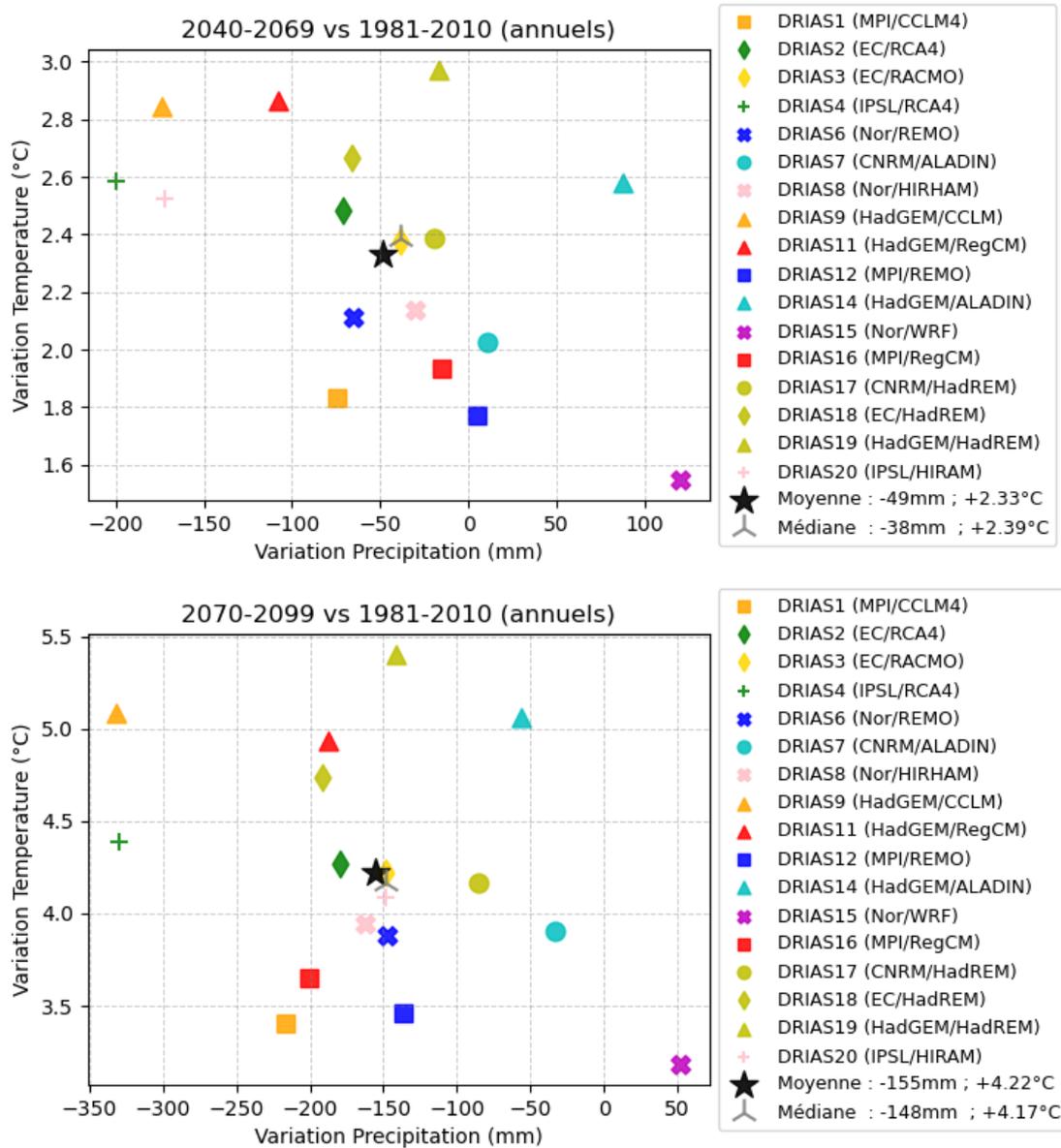


Figure 3. Variations de Précipitations et de Température prévues par les modèles de climat Explore2 aux horizons 2040-2069 (haut) et 2070-2099 (bas) par rapport à 1981-2010. Chaque symbole coloré correspond à un des 17 couples de modèles Explore2 (la couleur fait référence au modèle de climat régional, par exemple orange pour le modèle CCLM et le symbole au modèle de climat, par exemple MPI-ESM pour le carré, ainsi le carré orange correspond aux simulations du modèle MPI-ESM/CCLM4 que nous appelons « DRIAS1 » pour simplifier). La moyenne et la médiane des modèles sont également indiquées sur les graphiques.

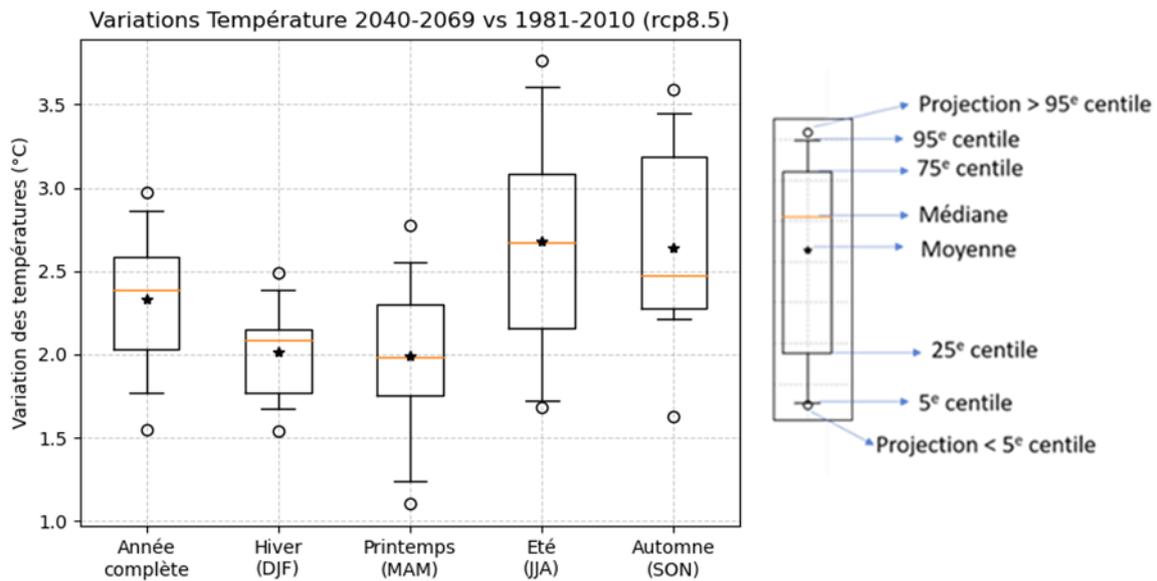


Figure 4. Boîtes à moustache présentant les variations de températures moyennes en 2040-2069 par rapport à 1981-2010, sur la base des 17 simulations Explore2-Climat, sur l'année complète et par saison.

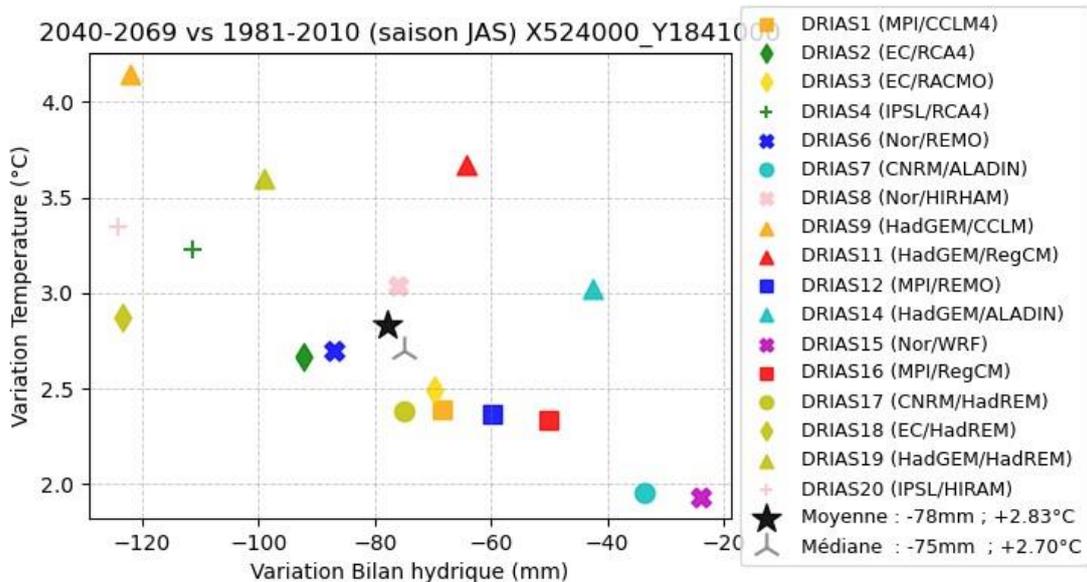


Figure 5. Variations de températures moyennes et de bilan hydrique au niveau du point SAFRAN le plus proche du Bazacle, en moyenne sur les mois de juillet août et septembre et à l'horizon 2040-2069.

Les moyennes présentées ici sur des périodes de 30 ans ne mettent pas en évidence **la grande variabilité d'une année à l'autre, qui existent et perdureront dans le futur.**

Le focus étant ici la température de l'eau modélisée à partir de celle de l'air, nous présenterons dans la suite de cette note des estimations de la température de l'eau basées sur les projections climatiques.

## 4 HYDROLOGIE FUTURE A PORTET-SUR-GARONNE

L'analyse détaillée des projections hydrologique dépasse les objectifs de cette note, et seule une présentation très synthétique est effectuée ici. Les résultats des modèles Explore2 fournissent en effet un grand nombre de projections hydrologiques futures (85 chroniques issues de 5 modèles hydrologiques et 17 modèles de climat). Les modèles hydrologiques sont très différents entre eux, y compris sur la période historique et en utilisant les données SAFRAN comme données météorologiques. Les différences entre les modèles de climat et leurs impacts sur les réponses hydrologiques modélisées augmentent encore le faisceau des possibles, y compris sur la période historique passée (Figure 6).

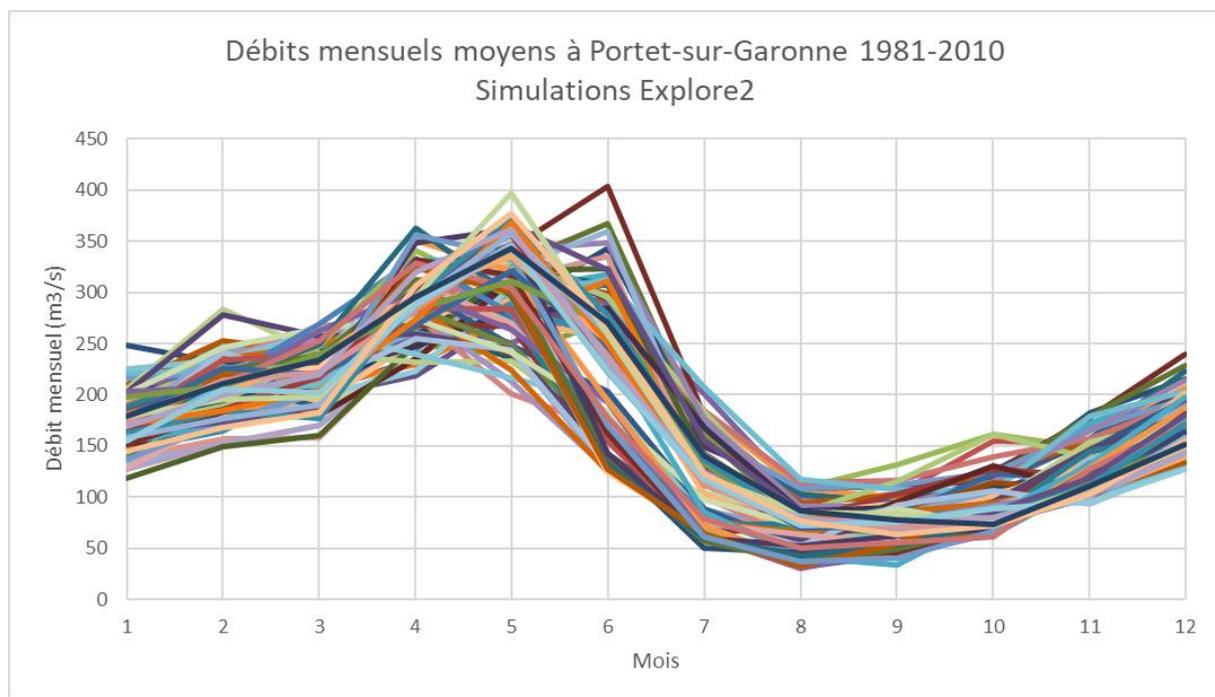


Figure 6. Débits mensuels moyens issus des simulations Explore2 (17 simulation climatiques x 5 modèles hydrologiques = 85 chroniques de débits simulées).

Sur l'ensemble de la France, et plus encore dans la moitié Sud du territoire, la plupart des simulations prévoient une diminution des débits d'été, aussi bien en termes de débit moyens lors des mois d'été que d'indicateurs comme les QMNA ou QMNA quinquennal. Ce résultat se retrouve à Portet-sur-Garonne, où les modèles prévoient une baisse des débits d'été.

La quasi-totalité des modèles prévoient des baisses des débits moyens sur les mois de juillet à septembre, et la médiane de toutes les simulations donne une baisse de  $-27 \text{ m}^3/\text{s}$  en 2040-2069 par rapport à 1981-2010. Par ailleurs, les modèles les plus réalistes sur la période récente donnent plutôt des baisses plus importantes.

Les 4 modèles de climat précédemment sélectionnés donnent des variations de débits moyens allant de  $+5 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $-70 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les simulations donnant des hausses de débit proviennent du modèle ORCHIDEE, qui est très éloigné des débits observés (et naturalisés) sur la période

historique et donc à considérer avec précaution. Les modèles SMASH et GRSD, le plus proches des observations sur l'historique donnent des variations entre  $-20\text{m}^3/\text{s}$  et  $-70\text{m}^3/\text{s}$  (Figure 7).

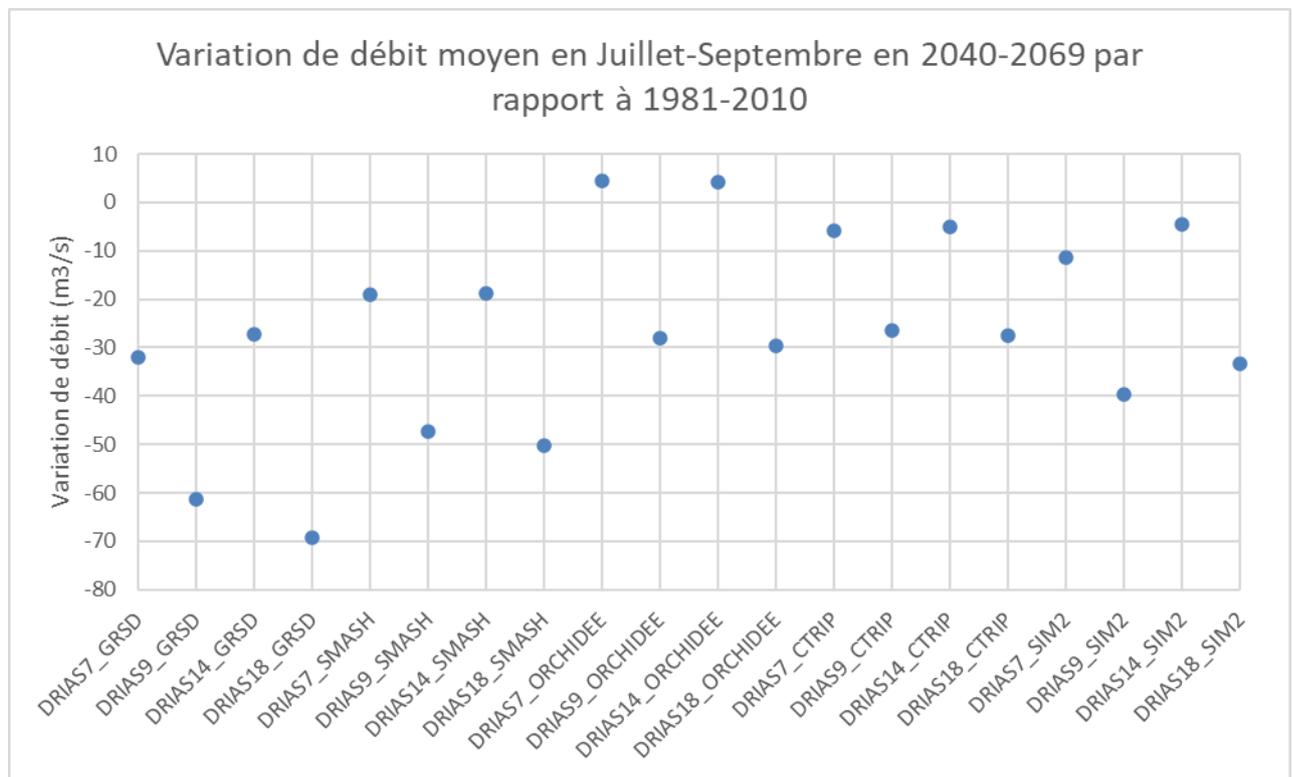


Figure 7. Variations de débit moyens naturels à Portet-sur-Garonne en juillet-septembre en 2040-2069 par rapport à 1981-2010, d'après 4 modèles de climat Explore2 contrastés (et 5 modèles hydrologiques disponibles).

## 5 TEMPERATURES DE L'EAU FUTURES

---

### 5.1 Modèles utilisés et limites

#### 5.1.1 Données Météorologiques

Les projections climatiques fournissent des températures sur la grille SAFRAN, il est donc préférable d'utiliser des modèles réalisés à partir des données SAFRAN historiques (sur le point de grille contenant le site du Bazacle) et de l'utiliser pour le futur, plutôt que de se baser sur des modèles générés à partir des données de la station Météo-France de Blagnac.

#### 5.1.2 Avertissement : limites des modèles proposés pour les tendances climatiques

Il est essentiel de noter ici que les équations linéaires proposées se basent uniquement sur des **observations passées** sur la période 1994-2023, pour fournir **une relation entre température de l'eau et de l'air constante dans le temps**, malgré les dérèglements climatiques et leurs conséquences (y compris sur les milieux). Les modèles sont construits sur les conditions *passées* or dans le futur des conditions n'ayant jamais existées dans le passé sont attendues, et *rien ne garantit que les modèles proposés soient adaptés à ces conditions futures*<sup>3</sup>. Ainsi, les relation Tair/Teau suggèrent des hausses des températures de l'eau plus faibles que celles de l'air. Cela est vrai à de courtes échelles de temps et c'est le sens des équations linéaires avec constante proposées (lorsque la température de l'air augmente lors d'une canicule, la température de l'eau de la Garonne augmente aussi, mais de façon moins importante, de même elle diminue moins fortement lorsque la température de l'air diminue) mais **cette approche n'est pas forcément justifiée pour discuter de tendance passées ou futures**.

De même, l'utilisation de modèles linéaires avec une constante s'il permet des améliorations des performances utiles pour la prévision à quelques jours, n'a pas forcément de sens pour étudier des tendances climatiques, passées ou futures.

#### 5.1.3 Relations Tair/Teau sans constante

Sur les 26 étés considérés (avec des données complètes de juillet à septembre), les températures de l'eau moyennes sur juillet à septembre varient entre 0.87 et 1.05 fois la température de l'air moyenne (et en moyenne sur les 26 étés ce facteur est 1.00<sup>4</sup>). **Aucune tendance ne se dégage sur ce facteur**, avec des valeurs entre 0.975 et 1.05 la plupart des années sauf entre 2002 et 2009 et en 2013 où les valeurs sont entre 0.87 et 0.975 (Figure 8).

Le débit moyen (mesuré) en juillet-septembre (Figure 9) présente une tendance statistiquement significative à la baisse, **en moyenne -0.82m<sup>3</sup>/s/an** (ce malgré la présence de 3 années récentes avec des débits moyens plutôt élevés en juillet-septembre : 2013, 2014 et 2017). L'évolution du ratio (Figure 8) ne semblent que partiellement liée au débit moyen.

---

<sup>3</sup> Ni d'ailleurs par exemple aux années 1950-1970 le climat ayant changé entre 1950-1970 et la période 1994-2023 utilisée pour générer les modèles.

<sup>4</sup> Il s'agit ici de la moyenne du ratio Tair/Teau ; une régression linéaire sur l'ensemble des données journalière juillet-septembre donne un résultat quasi identique, avec un facteur 0.99 :  $Teau(J) = 0.99 * Tair(J-6 \text{ à } J)$

Ratio entre Tair moyenne et Teau moyenne sur la période Juillet-Septembre (données MIGADO Bazacle et SAFRAN)

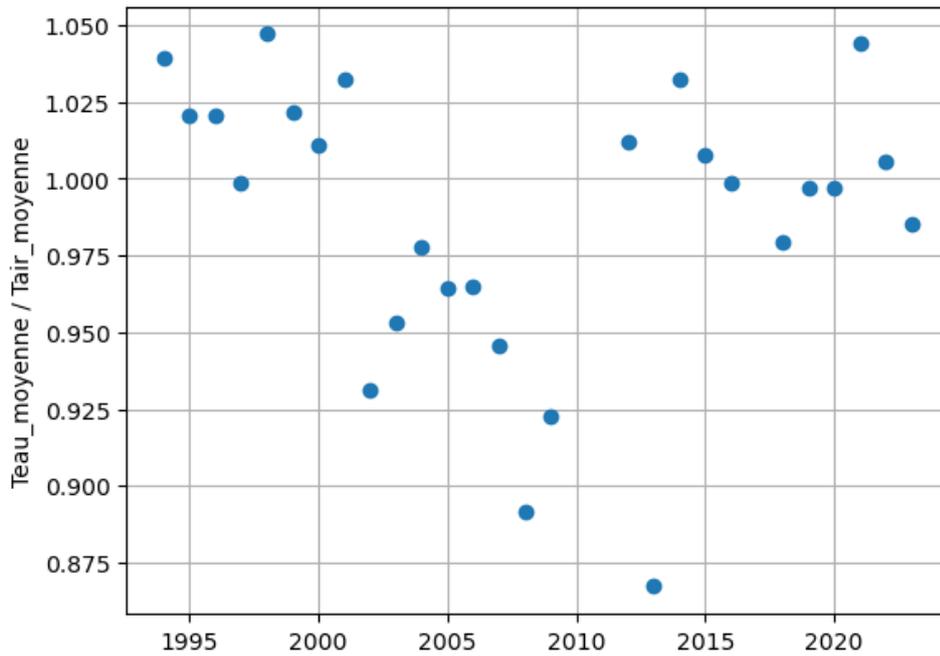


Figure 8. Ratio entre la température de l'eau au Bazacle moyennée sur les mois de juillet à septembre (données MIGADO) et la température de l'air SAFRAN (Météo-France opendata) également moyennée sur les mois de juillet à septembre.

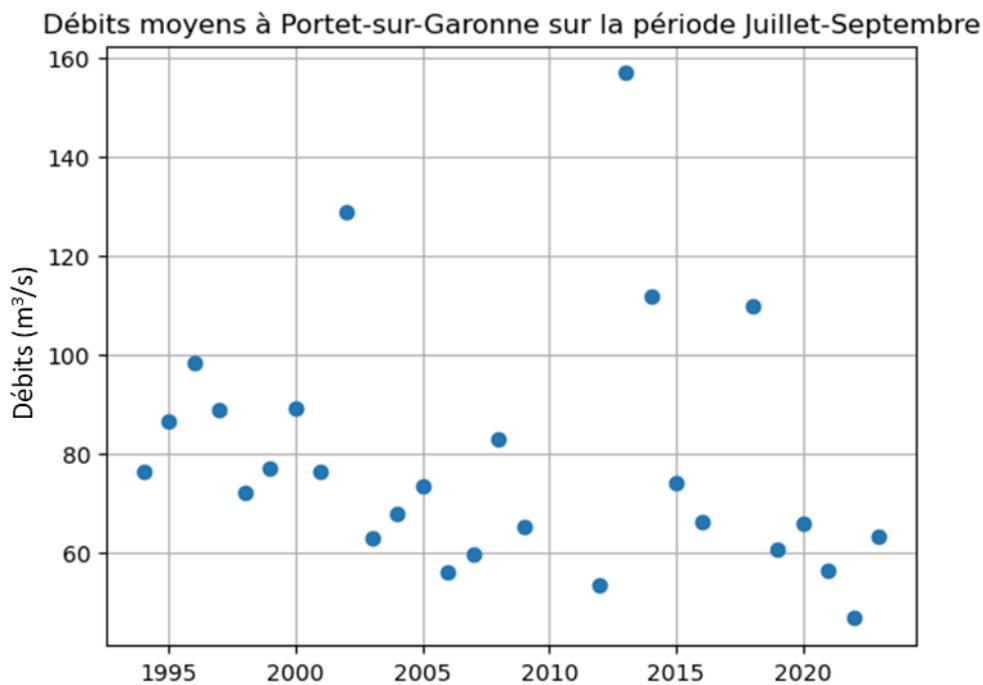


Figure 9. Débits à Portet-sur-Garonne, en moyenne sur les mois de juillet à septembre (données hydroportail)

**Pour conclure :**

- L'inertie de la Garonne entraîne des variations de température sur des échelles de temps courtes (quelques jours) plus faibles que les variations de température de l'air en moyenne journalière<sup>5</sup>
- La température de l'eau moyenne de juillet à septembre est très proche de la température de l'air, avec des petites variations d'une année à l'autre, et c'est cette relation qui est à privilégier pour l'étude des tendances passées et futures.  
*Mais des limitations demeurent car par construction les modèles avec des coefficients constants ne prennent pas en compte les possibles changements des relations Tair/Teau sous l'effet des dérèglements climatiques et de leurs conséquences sur les milieux.*

Les équations à privilégier pour estimer les tendances climatiques moyennes sur les mois de juillet à septembre sont alors, pour la période juillet à septembre :

$$\text{Teau}(J) = 0.99 \text{ Tair } (J-6 \text{ à } J)$$

Et avec prise en compte du débit :

$$\text{Teau}(J) = 1.03 \text{ Tair } (J-6 \text{ à } J) - 0.014 \text{ Q } (J-2 \text{ à } J)$$

#### 5.1.4 *Tendance climatiques passées basées sur les données SAFRAN*

Sur la base des deux équations précédentes, des tendances climatiques passées peuvent être calculées à partir des données SAFRAN disponibles (1959-2023). La période est plus courte que celle des données météo-France de Blagnac, et cela (en plus de l'utilisation d'une équation différente) va entraîner des différences dans la tendance calculée.

Les équations sans constante avec et sans débit donnent toutes deux des tendances à la hausse statistiquement significatives, pour la température de l'eau moyenne juillet-septembre, sur la période 1959-2023. L'équation avec débit donne des valeurs trop faibles de température de l'eau lorsque les débits sont élevés (supérieurs à 300m<sup>3</sup>/s en moyenne sur 8 jours ; situation peu fréquente en été sur la période de disponibilité des données MIGADO, mais plus fréquente avant 1994). **Ainsi, il est plus adapté d'utiliser la température de l'air seule sur l'ensemble des données puis d'ajouter une estimation de la contribution du débit.**

**En considérant uniquement la température de l'air comme variable** (et en conservant toutes les journées sans aucun filtre sur les débits) **la tendance obtenue est +0.46°C/décennie** (Figure 10), qui est, bien entendu, également la tendance sur la température de l'air SAFRAN.

Une tendance sur les débits de -4.6m<sup>3</sup>/s/décennie est par ailleurs observée en excluant les étés ou les débits moyens sur 8 jours dépassent 300m<sup>3</sup>/s (la tendance est de -6.4m<sup>3</sup>/s/décennie en considérant l'historique 1956-2023 sans aucun filtre). Les impacts potentiels sur la tendance à la hausse des températures de l'eau sont donc de **+0.06°C /décennie environ**. Il s'agit plutôt d'une estimation minimale de par le filtre appliqué, mais qui garantit une meilleure validité de l'équation utilisée (0.014 x 4.6 = 0.064)

---

<sup>5</sup> C'est encore plus vrai sur des données toutes les 15 minutes, avec une amplitude diurne plus forte pour les températures de l'air que de l'eau.

Température de l'eau de la Garonne à Toulouse-Bazacle (moyenne Juillet-Septembre)  
(modélisée à partir de la température de l'air SAFRAN)

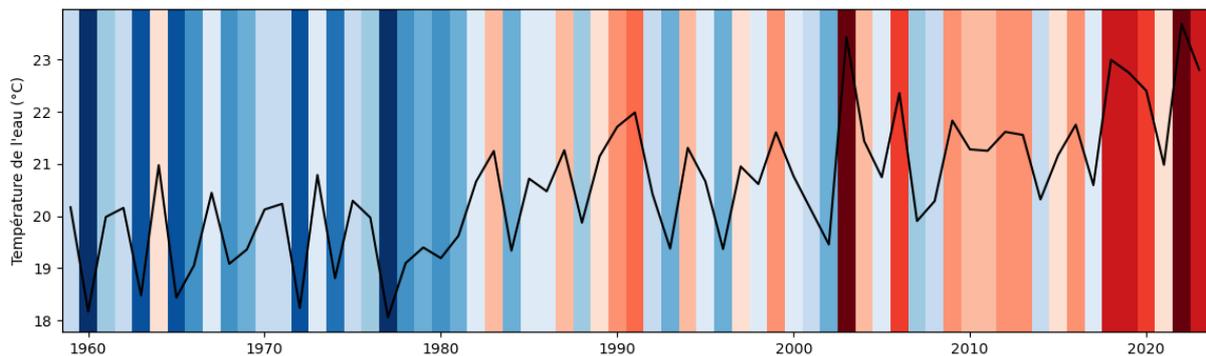


Figure 10. Température moyenne estivale de l'eau de la Garonne au Bazacle reconstruite à partir des données de températures moyennes de l'air du point SAFRAN le plus proche (données 1959-2023, source : opendata Météo-France). Une couleur rouge /bleu indique des températures estivales supérieures / inférieures à la moyenne 1981-2010.

Ainsi, pour conclure : une tendance sur la température de l'air et de l'eau de  $+0.46^{\circ}\text{C}$  (température de l'air seule) à  $+0.52^{\circ}\text{C}$  (avec prise en compte du débit) par décennie est déduite des différents modèles sur la période 1959-2023.

**Il apparait donc ici que la tendance fournie à l'aide des modèles utilisés également pour la prévision à court terme ( $+0.3^{\circ}\text{C}$  sur 1949-2023, comme indiqué dans le rapport « bilan de l'année 2023 ») était plutôt une estimation basse, et qu'une tendance de  $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  environ semble plus probable sur la période 1959-2023, ainsi que, comme le montrent les données MIGADO, sur la période plus récente 1994-2023.**

### 5.1.5 Projections proposées sur la base de données moyennées JAS année par année

Les modèles linéaires basés sur des régressions sur des données historiques pourraient ne pas être adaptées à des études de températures extrêmes journalières jamais rencontrées dans l'historique passé. Cette note synthétique se restreint donc à la description des futurs climatiques moyens et **des températures de l'eau moyenne dans le futur**. Il est bien sûr indispensable de garder à l'esprit qu'il y aura toujours dans le futur une variabilité interannuelle forte avec des étés plus chauds et des étés plus froids que la moyenne, et au sein de chaque été des périodes de fortes chaleurs et des périodes plus fraîches.

Les hausses attendues des températures de l'eau, basées sur les équations présentées précédemment et sur les 4 modèles de climat contrastés sélectionnés s'échelonnent de  **$+1.9^{\circ}\text{C}$  à  $+5^{\circ}\text{C}$  en 2040-2069 par rapport à 1981-2010** en prenant en compte les impacts du débit (Tableau 1). Rappelons qu'aucun modèle de climat ne peut être éliminé a priori en l'état actuel des connaissances, et que cette fourchette donne les évolutions possibles de la température de l'eau moyenne en juillet-septembre. En termes de tendance, en se focalisant sur la période 2020-2070 et sans prise en compte du débit, les modèles donnent  $+0.45^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  à  $+0.67^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ . Ainsi, d'après les modèles, **la tendance observée et modélisée sur la période récente ( $+0.5^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  environ) devrait continuer à un rythme similaire** (modèles avec réchauffement modéré et peu ou pas de baisse des débits) **ou s'intensifier** (modèles à réchauffement plus marqué et/ou baisse des débits moyens), dépassant potentiellement les  $+0.8^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$  sous l'impact conjugué d'une hausse importante de la température et d'une forte baisse des débits (simulations hydrologiques et climatiques les plus défavorables).

Tableau 1. Tendances moyennes sur la température de l'eau au Bazacle modélisée sans prise en compte du débit, et variations à l'horizon 2040-2069, avec et sans prise en compte de l'impact du débit.

	Tendances moyennes hors débit (°C/décennie)		Evolution moyenne 2040-2069 par rapport à 1981-2010		
	1980-2070	2020-2070	variation Teau hors débit (°C)	variation débit (m3/s)	Variation Teau avec débit (°C)
DRIAS7	+0.36	+0.45	+1.9	-32 à +4	<b>+1.9 à +2.5</b>
DRIAS9	+0.67	+0.61	+4.1	-61 à -27	<b>+4.4 à +5</b>
DRIAS14	+0.54	+0.51	+3.0	-27 à +4	<b>+3 à +3.3</b>
DRIAS18	+0.52	+0.67	+2.9	-70 à -28	<b>+3.2 à +3.9</b>

Les températures de l'eau moyennes en juillet-septembre prévues à partir des températures de l'air des modèles de climat sélectionnés sont représentées Figure 11, sans prise en compte de l'impact du débit (il faudrait sinon présenter 4 x 5 = 20 graphiques pour être exhaustifs), afin d'illustrer les tendances et les variabilités interannuelles futures possibles.

**Attention** : il s'agit de résultats de simulations climatiques, donc **il n'est pas possible de comparer aux résultats observés sur les années passées. Les modèles représentent le climat** (tendances, moyennes sur plusieurs décennies, statistiques, occurrences de conditions extrêmes chaudes ou froides, etc.) **mais pas la météorologie** (c'est-à-dire les températures d'un jour ou d'une année *particulière*). Autrement dit, l'année 2022 par exemple n'est pas spécifiquement représenté par les modèles de climat en 2022, mais chaque modèle peut générer des étés chauds et des canicules.

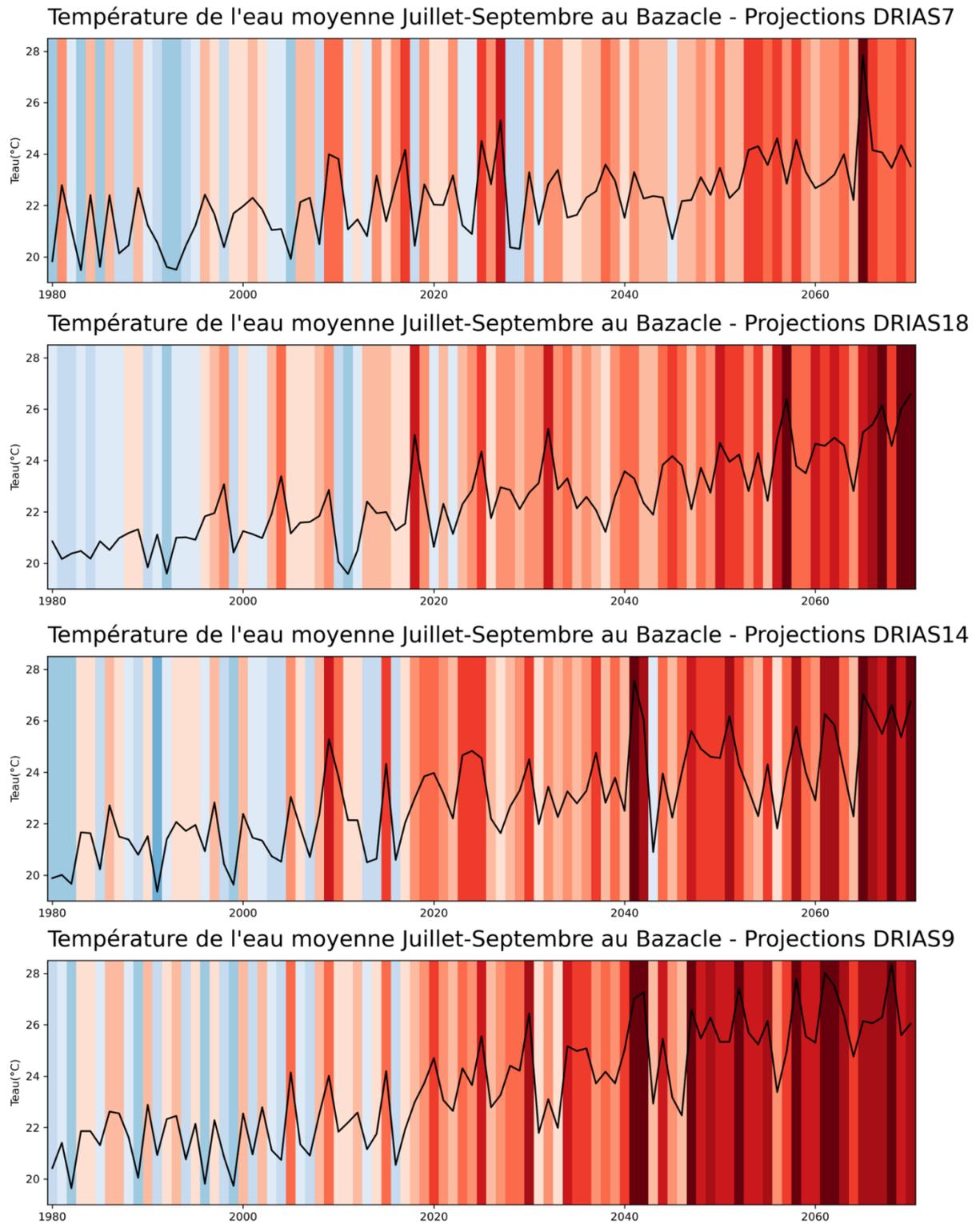


Figure 11. Température de l'eau au Bazacle, en moyenne sur les mois de juillet à septembre, pour chaque année de 1980 à 2070. Les résultats sont basés uniquement sur les températures de l'air (pas de prise en compte du débit) issues des 4 simulations Explore2 sélectionnées pour représenter une fourchette de futurs possibles.

## 6 CONCLUSIONS

---

Cette note sur les impacts des dérèglements climatiques **sur les températures de l'eau de la Garonne au Bazacle en moyenne sur les mois de juillet à septembre** représente une mise à jour des précédents rapports :

- Une modélisation plus adaptée permet de proposer une estimation de **la tendance passée à la hausse : environ +0.5°C/décennie sur la période 1959-2023**. Les observations MIGADO depuis 1994 donne +0.54°C/décennie ;
- Les modèles **prévoient au moins +0.45 à +0.67°C par décennie sur 2020-2070** en ne prenant pas en compte l'impact du débit. En prenant en compte la baisse des débits, la hausse pourrait, d'après les simulations les plus « pessimistes » dépasser +0.8°C par décennie en moyenne sur 2020-2070 ;
- **En 2040-2069, la température moyenne de l'eau en juillet-septembre devrait être entre +1.9°C et +5°C au-dessus de la moyenne 1981-2010 ;**
- Au-delà des tendances, il y aura toujours dans le futur une variabilité interannuelle et pluriannuelle du climat, c'est-à-dire que certaines années (voir certaines décennies) seront plus chaude/froide et/ou plus humides/sèches que la moyenne.
- Les différences entre modèles de climat doivent être vues comme autant de futur possible, il n'est pas possible au regard des connaissances actuelles d'en sélectionner un comme étant le plus probable.

Les modèles prévoient une accélération vers la fin du siècle (2070-2099) mais les incertitudes à cette échéance sont importantes, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Rappelons par ailleurs que les modèles très simples utilisés ont des limites importantes. Aucune tendance passée n'a été observée sur les liens entre températures moyennes de l'air et de l'eau à Toulouse, mais cela pourrait a priori se produire dans le futur. De même, l'impact des débits sur la température de l'eau pourrait changer dans le futur.

Si les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites dans les prochaines années, les dérèglements climatiques pourraient être moins importants que prévu au vu des politiques actuellement en place (et effectives).

## 7 REFERENCES

---

- DRIAS-Climat. 2023. « La Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC) ». 2023. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/405>.
- . 2024. « Portail DRIAS-Climat ». 2024. <https://www.drias-climat.fr/>.
- Escalón, Sebastián. 2022. « Le réchauffement climatique en France s'annonce pire que prévu ». CNRS Le journal. 2022. <https://lejournel.cnrs.fr/articles/le-rechauffement-climatique-en-france-sannonce-pire-que-prevu>.
- Explore2. 2023. « Explore2 - les futurs de l'eau ». Le portail technique de l'OFB. 2023. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>.
- IPCC. 2014. « AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC ». <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- . 2023. « AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC ». 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- Jacob, Daniela, Juliane Petersen, Bastian Eggert, Antoinette Alias, Ole Bøssing Christensen, Laurens M. Bouwer, Alain Braun, et al. 2014. « EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research ». *Regional Environmental Change* 14 (2): 563- 78. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Marson, Paola, Lola Corre, Jean-Michel Soubeyroux, et Éric Sauquet. 2024. « Rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées ». Météo-France, INRAE, Institut Pierre-Simon Laplace. hal-04443633. <https://hal.inrae.fr/hal-04443633>.
- Mukherji, Aditi, Peter Thorne, William W L Cheung, Sarah L Connors, Matthias Garschagen, Oliver Geden, Bronwyn Hayward, et al. 2023. « SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6) ».
- Ribes, Aurélien, Julien Boé, Saïd Qasmi, Brigitte Dubuisson, Hervé Douville, et Laurent Terray. 2022. « An Updated Assessment of Past and Future Warming over France Based on a Regional Observational Constraint ». *Earth System Dynamics* 13 (4): 1397- 1415. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>.
- Soubeyroux, Jean-Michel, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, et al. 2020. « Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole ». Météo-France. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>.
- Verfaillie, Deborah, Michel Déqué, Samuel Morin, et Matthieu Lafaysse. 2017. « The Method ADAMONT v1.0 for Statistical Adjustment of Climate Projections Applicable to Energy Balance Land Surface Models ». *Geoscientific Model Development* 10 (11): 4257- 83. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>.

## 8 ANNEXES

---

### 8.1 Projections climatiques

#### 8.1.1 Introduction

##### **Avertissement : Variabilité naturelle du climat et projection climatiques**

Le système climatique présente une variabilité interannuelle importante, qui peut sur des périodes de temps d'une dizaine d'années être plus importante que les variations à long terme. Ainsi, par exemple, bien que la tendance à long terme soit l'augmentation des températures moyennes, il serait possible d'avoir dans le futur par exemple une période de 5 voire même 10 années sans augmentation significative de la température **sans que cela ne remette en cause la tendance à long terme.**

Il est ainsi risqué de se prononcer sur le climat moyen à courte échéance, et plus pertinent de présenter les résultats sous forme de changements entre une période de référence et une période future de 30 ans, ou encore sous forme de chroniques sur de longues périodes.

Il est important de souligner que les exercices de prospectives climatiques se sont considérablement enrichis grâce aux travaux de recherche effectués à l'échelle internationale depuis plusieurs décennies et résumés dans les différents rapports du GIEC. **Néanmoins, comme tout exercice de prospective fondé sur les avancées scientifiques, il existe toujours un décalage entre les produits des laboratoires et leur traduction opérationnelle sur le territoire.** Ainsi, les modèles de climat régionaux disponibles actuellement utilisent non pas les dernières simulations climatiques globales disponibles et utilisées pour les 6<sup>ème</sup> rapports du GIEC (IPCC 2023; Mukherji et al. 2023) mais celles utilisées dans le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC 2014). Ces simulations climatiques avaient une période « historique » s'arrêtant fin 2005.

#### 8.1.2 Modèles et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

##### 8.1.2.1 Les modèles de projection climatiques régionales DRIAS/Explore2

Le jeu de modèles DRIAS/Explore2 (Soubeyroux et al. 2020; Explore2 2023; DRIAS-Climat 2024) fournit des projections climatiques régionalisées à l'échelle de la France. La réalisation et le choix des projections climatiques a été le fruit d'un travail scientifique international (Jacob et al. 2014) puis de travaux spécifiques à l'échelle de la France.

Les modèles de climat régionaux ont une résolution d'environ 12 km x 12 km et les résultats sont ensuite projetés sur la grille SAFRAN (8 km x 8 km). Les simulations sont effectuées sur la période « historique » passée (1950/1970-2005) en se basant sur des inventaires d'émissions de gaz à effet de serre ainsi que sur la période 2006-2099 avec différents scénarios RCP (« trajectoires représentatives de concentrations de gaz à effet de serre ») pour les concentrations futures de gaz à effet de serre

Les données DRIAS / Explore 2 proviennent de 6 modèles de climats globaux différents, qui sont utilisés pour piloter 9 modèles climatiques régionaux, fournissant au total **17 projections**

**différentes** (pour le scénario RCP8.5). La méthodologie de production des données est résumée Figure 12 : chaque projection climatique provient d'un couple *modèle de climat / modèle régional* auquel est appliqué une descente d'échelle statistique et une correction de biais ADAMONT (Verfaillie et al. 2017).

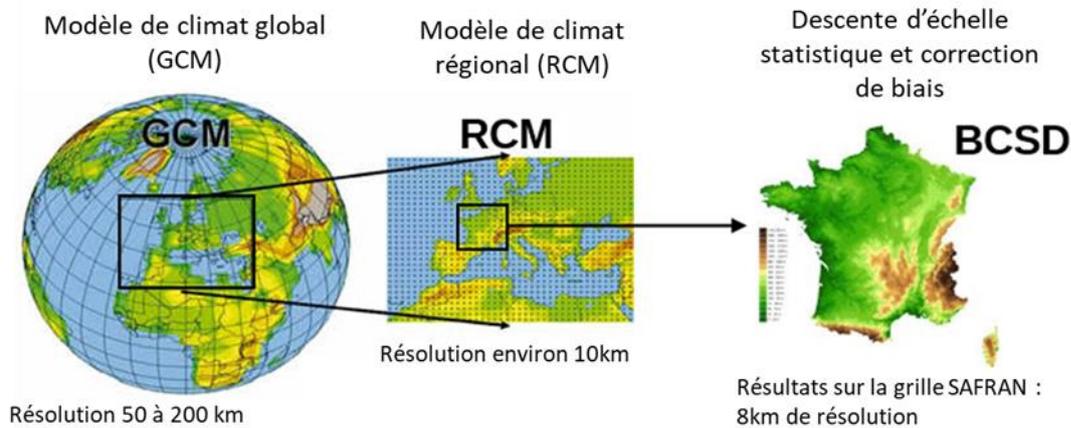


Figure 12 Méthodologie de production des projections DRIAS (adaptée de Soubeyroux et al., 2020)

#### 8.1.2.2 Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP)

Plusieurs éléments incitent à choisir le scénario RCP8.5 plutôt que les deux autres disponibles dans le cadre de DRIAS/Explore2 (à savoir RCP2.6 et RCP4.5) :

- Les travaux de Météo-France montrent que le scénario d'émission de gaz à effet de serre **RCP8.5** (émissions élevées et donc hausse de températures importantes) **donne les résultats les plus proches des observations** sur la période depuis 2005 (cf. Soubeyroux et al., 2020, Encard D).
- Une étude scientifique récente (Escalón 2022; Ribes et al. 2022) montre que les projections climatiques EURO-CORDEX (dont sont issues les projections DRIAS) tendent à **sous-estimer le réchauffement climatique en France**, incitant donc à privilégier les scénarios et/ou modèles prévoyant les hausses de températures les plus importantes.
- **La médiane des modèles DRIAS/Explore 2 RCP8.5** sur la France donne **un niveau de réchauffement à la fin du siècle proche de ce qui est attendu au vu des politiques actuellement en place** (DRIAS-Climat 2023 et communication personnelle de Jean-Michel Soubeyroux, Météo-France, juillet 2023). Si les engagements fermes actuels des Etats sont mis en œuvre alors le réchauffement sera moins important, mais toujours **plus proche du scénario RCP8.5 que des deux autres scénarios disponibles** (RCP4.5 et RCP2.6 dans les simulations DRIAS/Explore2).

**Ces différents éléments invitent à retenir uniquement le scénario RCP8.5, le plus adapté des scénarios disponibles dans le cadre de DRIAS/Explore2.**

Si les émissions mondiales de gaz à effet de serres diminuent au-delà des engagements fermes actuels des Etats et tendent rapidement vers la neutralité carbone, les effets du dérèglement climatique pourront être amoindris.

## 8.2 Modélisation de la température de l'eau sur la base de la température de l'air, au pas journalier – équations avec constante

**Rappel : les limites de ces modèles pour les projections climatiques sont discutées dans la partie 5.1.** Les résultats présentés ici sont donnés à titre indicatif, notamment pour faire le lien avec les équations proposées pour la prévision et discuter l'impact du débit et les limites de l'idée d'utiliser le soutien d'étiage pour faire baisser la température.

Les régressions linéaires effectuées à partir des données SAFRAN donnent cependant des résultats très similaires à ceux obtenus à partir de la station de Blagnac, avec des résultats de régression linéaire quasi identiques, avec, à partir des données de température de l'eau MIGADO :

$$\text{Teau}(J) = 0.745 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) + 5.15^\circ\text{C}$$

Ou encore (performances similaires) :

$$\text{Teau}(J) = 0.768 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) + 4.6^\circ\text{C}$$

Avec les données du RSA les résultats sont différents (sans surprise car les deux sondes diffèrent fréquemment dans leurs mesures et ont des historiques différents)

$$\text{Teau}(J) = 0.817 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) + 4.3^\circ\text{C}$$

Ou encore (performances similaires) :

$$\text{Teau}(J) = 0.847 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) + 3.6^\circ\text{C}$$

Soulignons que pour l'analyse de tendances climatiques la constante n'a pas d'impact, mais que par contre le coefficient multiplicateur de Tair est prépondérant.

Ainsi, dans les 4 équations ci-dessous il varie de 0.745 à 0.847. Cela signifie qu'une hausse des températures de l'air de +3°C par exemple, va entraîner des hausses de températures de l'eau modélisée de +2.24°C à +2.54°C. Mais rappelons que l'utilisation de ces équations n'est pas forcément adaptée sur des moyennes lorsqu'il s'agit d'analyser des tendances climatiques.

### 8.2.1 Impact du débit

En prenant en compte le débit on obtient des équations différentes, avec une sensibilité à la température de l'air légèrement plus faible. Les résultats de la régression sont améliorés par la prise en compte du débit de la Garonne à Portet-sur-Garonne.

L'équation obtenue sur la base des données MIGADO est alors :

$$\text{Teau}(J) = 0.716 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) - 0.02 \text{ Q}(J-2 \text{ à } J) + 7.3^\circ\text{C}$$

Et sur la base des données du RSA :

$$\text{Teau}(J) = 0.721 \text{ Tair}(J-4 \text{ à } J) - 0.024 \text{ Q}(J-2 \text{ à } J) + 8.25^\circ\text{C}$$

**Rappel sur l'impact du soutien d'étiage** : les volumes mobilisés pour le soutien d'étiage peuvent être conséquents et atteignent couramment  $10\text{m}^3/\text{s}$  à Portet-sur-Garonne, parfois plus (ils pourraient théoriquement approcher les  $20\text{m}^3/\text{s}$ ). D'après les équations présentées ci-dessus, cela entraînerait  $-0.2^\circ\text{C}$  ou  $-0.3^\circ\text{C}$ , et ne permettrait donc pas une atténuation significative d'un pic de température de l'eau de la Garonne en période caniculaire. **Pour compenser par exemple une hausse de  $+2^\circ\text{C}$  de la température de l'eau moyenne il faudrait mobiliser environ  $80$  à  $100\text{m}^3/\text{s}$  supplémentaires en continu sur les mois de juillet à septembre.** Le soutien d'étiage ne constitue donc pas un levier d'action significatif sur la température de l'eau de la Garonne à Toulouse.

**Remarque sur les débits observés** : à Portet-sur-Garonne, sur la période de disponibilité des données MIGADO pendant les mois de juillet à septembre, plus de 99% des débits moyens sur 3 jours observés sont compris entre  $36\text{m}^3/\text{s}$  et  $300\text{m}^3/\text{s}$ . Se restreindre aux débits les plus faibles (inférieurs à  $100\text{m}^3/\text{s}$ ) n'entraîne qu'une légère modification de l'équation.