

Action D 1.2

Observatoire thermique des cours d'eau et des nappes alluviales

Note technique : équations pour les prévisions de température de l'eau en temps réel à l'été 2024

Juin 2024



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

Table des matières

Avant-propos	2
Résumé	3
Prévision de la température de la Garonne au Bazacle (données RSA)	4
Equations à itérer	4
Equations spécifiques à échéances données	5
Remarque sur les différences entre équations spécifiques et équation itérées	6
Equations basées uniquement sur la température de l'air sans prise en compte de la température initiale de l'eau :	6
Conclusion sur le choix des modèles au Bazacle	6
Prévision de la température de la Garonne à Valentine (données DREAL)	8
Introduction	8
Equations à itérer	8
Comparaison avec d'autres modèles linéaires	10
Conclusion	10
Annexes	10
Erratum	10
Comparaisons modèle – données DREAL à Valentine	10
Différences entre les données SAFRAN à Valentine et les données mesurées à Palaminy	12

Avant-propos

Cette note technique est présentée dans le cadre des bons de commande n°5 du 31/05/2024 portant sur des modélisations dans le cadre de l'action D.1.2. Cette note complète les éléments déjà présenté dans le rapport envoyé précédemment (« Bilan année 2023 : Observations et prévisions », partie 3 et Annexes, qui se rapportent également à ce même bon de commande) et propose plusieurs modèles pour être déployés sur la plateforme E-tiage Garonne¹ pendant l'été 2024. Elle sera complétée par un document présentant le retour d'expérience après la fin de l'étiage.

¹ E-tiage est un service d'aide à la décision pour la gestion de la ressource en eau des rivières développé par Eauce, EDF et Laëtis et déployé dans le cadre de la gestion de l'étiage de la Garonne (<https://garonne.e-tiage.com>).

Résumé

Les équations proposées sont les suivantes :

Pour la prévision de température de la Garonne au Bazacle de J+0 à J+8, l'équation suivante sera itérée :

- $Teau(J) = 0.855 Teau(J-1) + 0.035 TN(J) + 0.091 TX(J)$

Il s'agit de l'équation présentée dans le document « Bilan de l'année 2023 »

Pour les prévisions de J+4 à J+8 des équations spécifiques à chaque échéance sont proposées en plus de l'équation itérée afin de fournir deux prévisions différentes à chaque échéance (donnant ainsi un faisceau) :

- $Teau(J+4) = 0.57 Teau(J-1) + 0.142 TN(J+1 \text{ à } J+4) + 0.382 TX(J+1 \text{ à } J+4) - 3.29^{\circ}C$
- $Teau(J+5) = 0.54 Teau(J-1) + 0.184 TN(J+2 \text{ à } J+5) + 0.366 TX(J+2 \text{ à } J+5) - 3.23^{\circ}C$
- $Teau(J+6) = 0.525 Teau(J-1) + 0.221 TN(J+3 \text{ à } J+6) + 0.356 TX(J+3 \text{ à } J+6) - 3.14^{\circ}C$
- $Teau(J+7) = 0.507 Teau(J-1) + 0.252 TN(J+4 \text{ à } J+7) + 0.343 TX(J+4 \text{ à } J+7) - 2.9^{\circ}C$
- $Teau(J+8) = 0.492 Teau(J-1) + 0.267 TN(J+4 \text{ à } J+7) + 0.337 TX(J+4 \text{ à } J+7) - 2.65^{\circ}C$

Pour la température de l'eau à Valentine, l'itération de l'équation suivante est proposée pour des prévisions de J à J+8 :

- $Teau(J) = 0.857 Teau(J-1) + 0.085 TX(J)$

Dans les équations ci-dessus :

- Teau (J-1) est la température moyenne de l'eau mesurée lors de la journée J-1 ;
- Les prévisions sont des prévisions de températures moyennes journalières ;
- TN et TX sont les températures minimales et maximales de l'air prévues par Météo-France à Blagnac (pour les prévisions de température de l'eau au Bazacle) et à Palaminy (pour les prévisions de températures de l'eau à Valentine).

Les équations ont été obtenues par régressions linéaires sur les données RSA du Bazacle et DREAL de Valentine, sur la période de Juin à Septembre et pour des débits moyens sur 8 jours inférieurs à 300 m³/s à Portet-sur-Garonne et inférieurs à 100 m³/s à Valentine. En dehors de cette période et pour des débits élevés les performances peuvent être dégradées.

Prévision de la température de la Garonne au Bazacle (données RSA)

Equations à itérer

L'équation proposée dans le rapport précédent est :

$$\text{Teau}(J) = 0.855 \text{ Teau}(J-1) + 0.035 \text{ TN}(J) + 0.091 \text{ TX}(J) \text{ [modèle 1]}$$

(Pour la période Juin à Septembre, avec Q8J <300m3/s)

Cette équation est à itérer pour les échéances au-delà de J (et ici jusqu'à J+8, les prévisions Météo--France étant fournies jusqu'à J+8).

D'autres équation peut être comparées au modèle 1. Par exemple, celle présentée en Annexe 5.8 du précédent rapport :

$$\text{Teau}(J) = 0.86 \text{ Teau}(J-1) + 0.055 \text{ TN}(J) + 0.075 \text{ TX}(J) \text{ [modèle 2]}$$

Ou encore une nouvelle équation possible obtenu par ajustement linéaire sur l'ensemble des données disponibles actuellement :

$$\text{Teau}(J) = 0.855 \text{ Teau}(J-1) + 0.06 \text{ TN}(J) + 0.078 \text{ TX}(J) \text{ [modèle 3]}$$

En ajoutant un terme constant lors de l'ajustement, une autre équation peut être obtenue :

$$\text{Teau}(J) = 0.883 \text{ Teau}(J-1) + 0.063 \text{ TN}(J) + 0.0935 \text{ TX}(J) - 1.07 \text{ °C [modèle 4]}$$

Les résultats présentés dans le Tableau 1 ci-dessous montrent que les 3 modèles sans constante présentent des résultats très similaires (amélioration de la RMSE² de 0.03°C avec le modèle 3 par rapport au modèle 1 à échéance longue). Le modèle 4 (avec constante) donne dans l'ensemble des résultats légèrement meilleurs que le modèle 1 (RMSE améliore de 0.02°C à 0.05°C). Mais cette amélioration modeste ne justifie pas forcément un changement de modèle par rapport à ce qui a été présenté dans le rapport précédent (modèle 1), car le modèle 4 présente parfois des erreurs importantes dans la prévision des températures le plus élevées ou les plus basses (Figure 1 page 7).

Tableau 1 Racine carré de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, °C) pour les quatre modèles itératifs proposés ici pour la prévision de la température de l'eau de la Garonne au Bazacle.

	RMSE_Modele1	RMSE_Modele2	RMSE_Modele3	RMSE_Modele4
J+0	0.58	0.58	0.58	0.56
J+1	0.87	0.87	0.86	0.83
J+2	1.05	1.06	1.05	1
J+3	1.19	1.2	1.19	1.14
J+4	1.29	1.3	1.28	1.24
J+5	1.36	1.37	1.35	1.31
J+6	1.42	1.43	1.4	1.37
J+7	1.47	1.47	1.45	1.42
J+8	1.51	1.51	1.48	1.47

² Racine carré de l'erreur quadratique moyenne (de l'anglais *Root Mean Square Error*)

Equations spécifiques à échéances données

Des équations spécifiques à échéances données n'améliorent pas significativement les prévisions aux échéances courtes mais peuvent présenter un intérêt à partir de J+4. Les meilleurs résultats (en termes de RMSE) sont obtenus en utilisant les températures de l'air moyennées sur 4 jours (J+1 à J+4 par exemple pour une prévision à J+4).

Ainsi par exemple à J+4 :

$$Teau(J+4) = 0.508 Teau(J-1) + 0.12 TN(J+1 \text{ à } J+4) + 0.315 TX(J+1 \text{ à } J+4)$$

donne une RMSE = 1.25°C et 89.4% des données avec des erreurs inférieures à 2°C. Ce modèle donne ainsi des résultats légèrement améliorés par rapport à ceux du modèle itéré jusqu'à J+4. Aux échéances plus courtes, modèles itérés et modèles spécifiques donnent des résultats équivalents, mais plus l'échéance est lointaine, plus les modèles spécifiques peuvent devenir intéressants.

Ainsi par exemple à J+5 le modèle :

$$Teau(J+5) = 0.48 Teau(J-1) + 0.176 TN4J_J+5 + 0.30 TX4J_J+5$$

Donne une RMSE de 1.29°C et 88% des prévision à +/- 2°C , soit des résultats meilleurs que ceux des modèles itérés.

L'ajout d'une constante dans les modèles spécifiques améliore encore les résultats en termes de RMSE. Ainsi les équations suivantes :

- $Teau(J+4) = 0.57 Teau(J-1) + 0.142 TN(J+1 \text{ à } J+4) + 0.382 TX(J+1 \text{ à } J+4) - 3.29^\circ\text{C}$
- $Teau(J+5) = 0.54 Teau(J-1) + 0.184 TN(J+2 \text{ à } J+5) + 0.366 TX(J+2 \text{ à } J+5) - 3.23^\circ\text{C}$
- $Teau(J+6) = 0.525 Teau(J-1) + 0.221 TN(J+3 \text{ à } J+6) + 0.356 TX(J+3 \text{ à } J+6) - 3.14^\circ\text{C}$
- $Teau(J+7) = 0.507 Teau(J-1) + 0.252 TN(J+4 \text{ à } J+7) + 0.343 TX(J+4 \text{ à } J+7) - 2.9^\circ\text{C}$
- $Teau(J+8) = 0.492 Teau(J-1) + 0.267 TN(J+4 \text{ à } J+7) + 0.337 TX(J+4 \text{ à } J+7) - 2.65^\circ\text{C}$

donnent les meilleurs résultats en termes de RMSE comme présenté dans le Tableau 2 ci-dessous. L'impact de l'utilisation d'une constante est d'au moins 0.05°C jusqu'à J+6, et plus faible au-delà.

Tableau 2. Racine carré de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des modèles à échéances spécifiques (J+4 à J+8) - avec et sans constante - pour la prévision de la température de l'eau de la Garonne au Bazacle

modeles à échéances spécifiques J+n	RMSE (°C)	
	avec constante	sans constante
n=4	1.19	1.25
n=5	1.24	1.29
n=6	1.27	1.32
n=7	1.3	1.34
n=8	1.33	1.36

Les modèles à échéance spécifique avec constante ont, tout comme le modèle 4 présenté précédemment, tendance à surestimer les températures les plus élevées et sous estimées les températures le plus basses (cf. exemples Figure 1 et Figure 2). Les modèles spécifiques – y compris avec constante – permettent cependant parfois de prévoir des pics de températures non prévus par les modèles itérés (exemple Figure 2, notamment entre 120 et 140 environ avec le modèle avec constante qui donne les meilleurs résultats sur cette période).

Remarque sur les différences entre équations spécifiques et équation itérées

Itérer plusieurs fois la même équation revient à diminuer le poids de la température de l'eau initiale avec le temps, et à augmenter le poids des températures de l'air, avec un poids plus élevé pour celle de l'échéance et des poids de plus en plus faible les jours précédents l'échéance de la prévision, ainsi par exemple à J+1 on a :

$$Teau(J+1) = 0.855 Teau(J) + 0.035 TN(J+1) + 0.091 TX(J+1)$$

Soit

$$Teau(J+1) = 0.855 (0.855 Teau(J-1) + 0.035 TN(J-1) + 0.091 TX(J-1)) + 0.035 TN(J+1) + 0.091 TX(J+1)$$

$$Teau(J+1) = 0.855^2 Teau(J-1) + 0.855 * 0.035 TN(J) + 0.855 * 0.035 TN(J) \\ + 0.035 TN(J+1) + 0.035 TN(J+1)$$

Comme $0.855 < 1$ on a **le poids des TN et TX antérieures qui deviens de plus en plus faible.**

Au contraire **dans les équations à échéance spécifiques proposée, les températures de l'air sont moyennées sur les n jours précédents, avec les mêmes poids pour chacun des jours considérés.** Nous avons testé une équation avec 9 paramètres au lieu de seulement 3, en considérant indépendamment les TN et TX aux échéances J+5 à J+8 pour une prévision à J+8. Les résultats ne sont que très légèrement améliorés (avec par exemple une RMSE de 1.34°C contre 1.36°C pour l'équation à 3 paramètres)

Equations basées uniquement sur la température de l'air sans prise en compte de la température initiale de l'eau :

Ces modèles sont applicables quelque soit l'échéance, **avec une racine carré de l'erreur quadratique moyenne assez importante cependant : proche de 2°C . Plus de la moitié des données modélisées avec plus de 1°C d'erreur** (25% environ avec plus de 2°C d'erreur). Ils peuvent être intéressants pour des tendances longues ou en l'absence de mesures de température de l'eau, **mais y compris à J+8, des modèles spécifiques ou des modèles itérés sont préférables car leurs performances globales sont meilleures (ce qui n'exclue pas que dans certaines situations des modèles sans température de l'eau donnent de très bon résultats).**

Conclusion sur le choix des modèles au Bazacle

Tout d'abord il est important de rappeler que, comme souligné dans le rapport précédent, les équations de prévisions ont toutes certaines années où elles donnent des bons résultats et d'autres où leurs performances sont moins bonnes ; il est difficile de conclure sur les causes qui peuvent être multiples.

Les modèles spécifiques avec une constante dans l'équation donnent globalement des résultats meilleurs en termes de RMSE que les modèles itérés, mais les exemples présentés soulignent qu'en certaines occasions leurs résultats sont moins bon que ceux d'un modèle itéré.

Les modèles avec constante qui donnent des résultats plutôt meilleurs que les modèles sans constante dans l'ensemble tendent cependant à donner des résultats trop extrêmes dans certaines situations (notamment pour les températures les plus chaudes ou au contraire les plus froides).

Au vu de ces résultats, notre proposition est de :

- Utiliser le modèle sans constante présenté dans le rapport précédent pour les échéances J à J+8 (« modèle 1 »)

- Utiliser en compléments 5 modèles spécifiques pour les échéances J+4 à J+8, avec constante, pour donner une fourchette, en gardant à l'esprit que ces modèles peuvent avoir tendance à surestimer les extrêmes (chauds et froids) de température de l'eau, mais donnent dans l'ensemble les meilleurs résultats en termes de RMSE, et peuvent parfois prévoir des pics de température non prévu correctement à l'aide du modèle itéré.

Cette approche permet d'avoir, avec les modèles proposés, un faisceau assez large après J+4. Elle pourra être testée dès l'été 2024, et le retour d'expérience permettra de la conserver ou de l'améliorer en fonction des performances mais aussi des besoins et demandes.

Echantillon de valeurs mesurées vs prévues au Bazacle RSA

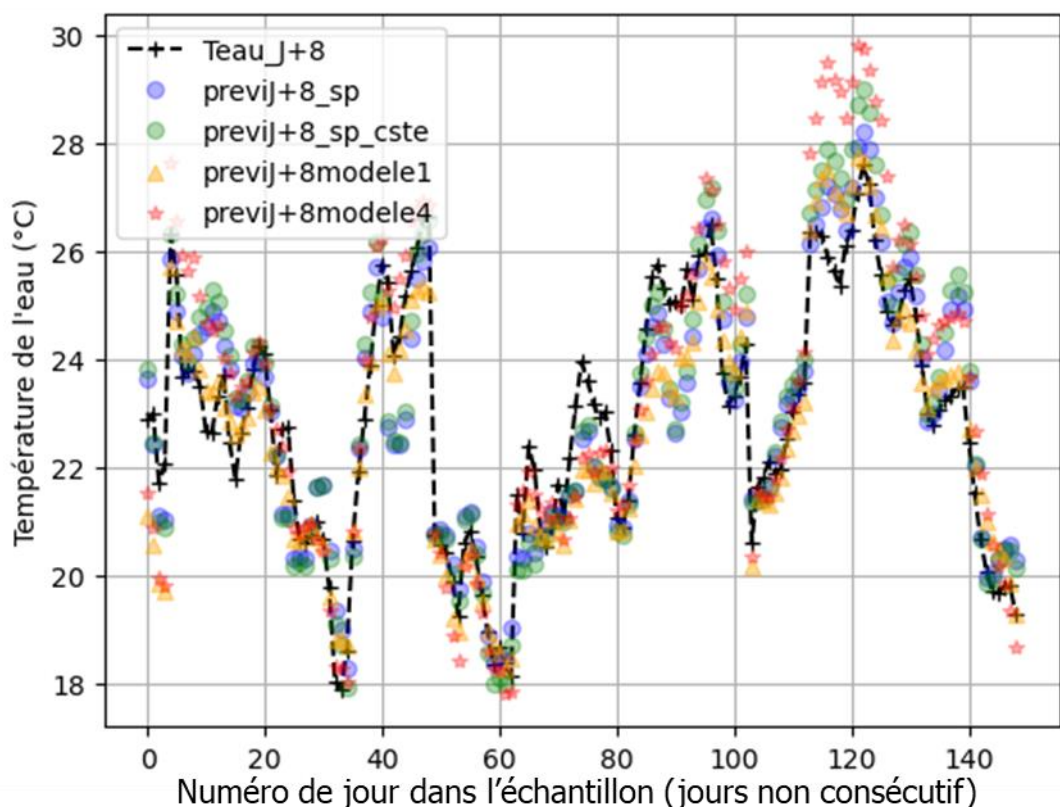


Figure 1. Résultats sur un échantillon de valeurs (qui ne sont pas consécutives à causes de nombreuses données manquantes) des différentes équations de prévision à J+8 « _sp » = modèle spécifique (sans et avec constante) ; modèle 1 = modèle itéré présenté dans le précédent rapport ; modèle 4 = modèle avec constante

Echantillon de valeurs mesurées vs prévues au Bazacle RSA

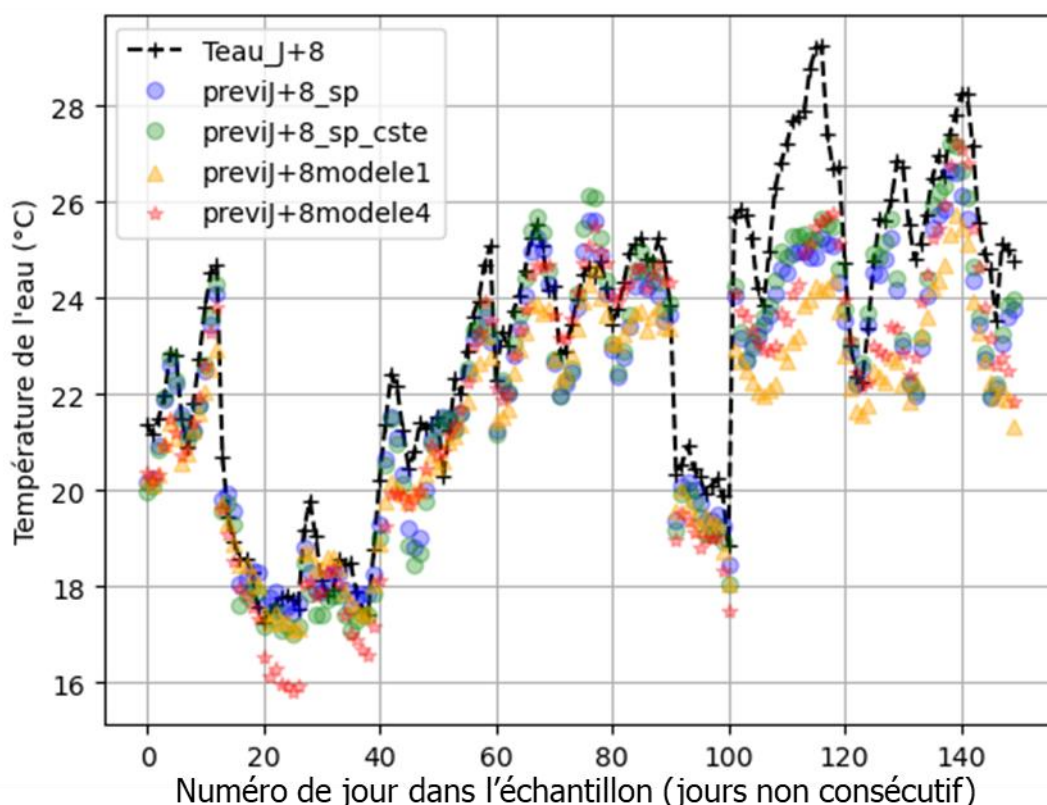


Figure 2. idem que Figure 1 mais pour un autre échantillon.

Prévision de la température de la Garonne à Valentine (données DREAL)

Introduction

Les données de température de l'eau mesurées par la sonde DREAL de Valentine qui est télétransmise sur la plateforme *E-tiage Garonne*, disposent d'un historique court (depuis fin juillet 2021), avec cependant des étés assez contrastés (2021, 2022 et 2023).

En mobilisant ces données de température de l'air ainsi que les données de la station météo-France de Palaminy (température journalières minimale TN et maximale TX) il est possible de réaliser des équations de prévisions sans utiliser le débit, et donc utilisable quotidiennement pour la prévision estivale de température de l'eau.

Sur la période considérée (Juin à Septembre, avec des débits moyens sur les 8 jours précédent inférieurs à 100m³/s), les températures de l'eau moyennes journalières mesurées varient de 12.6°C à 21.1°C, avec une moyenne de 16.7°C (médiane également égale à 16.7°C) et un écart-type de 1.8°C. Pour information, les données MIGADO sur un historique beaucoup plus long présentent des statistiques similaires avec seulement une moyenne légèrement plus basses (températures entre 11.1°C et 21.5°C, écart-type de 1.8°C, moyenne 16.4°C, médiane 16.5°C).

Equations à itérer

Sur la base des données DREAL, l'équation suivante est obtenue par régression linéaire :

$$\text{Teau}(J) = 0.854 \text{ Teau}(J-1) + 0.085 \text{ TX}(J) + 0.0031 \text{ TN}(J) \quad [\text{Modele_DREAL_TX_TN}]$$

Le facteur sur TN étant proche de zéro, on peut considérer une équation n'utilisant que la température maximale journalière :

$$\text{Teau}(J) = 0.857 \text{ Teau}(J-1) + 0.085 \text{ TX}(J) \quad [\text{modèle_DREAL_TX}]$$

Et en laissant la possibilité d'un terme constant l'équation devient :

$$\text{Teau}(J) = 0.840 \text{ Teau}(J-1) + 0.084 \text{ TX}(J) + 0.31^\circ\text{C} \quad [\text{modèle_DREAL_TX_cste}]$$

En se basant sur les données *MIGADO* jusqu'en 2023, l'équation est différente (sans surprise car les sondes ont des différences sur leur période commune, même après correction des données de 2023) :

$$\text{Teau}(J) = 0.83 \text{ Teau}(J-1) + 0.0953 \text{ TX}(J) + 0.0132 \text{ TN}(J) \quad [\text{Modele_MIGADO}]$$

Appliqué aux données DREAL disponibles, le choix du modèle a assez peu d'impact (cf. Tableau 3 ci-dessous). Le modèle basé sur les données MIGADO présente cependant un biais³ aux échéances longues lorsqu'il est appliqué aux données DREAL. Ce biais provient soit de limites de la régression linéaires, soit plus probablement des différences entre les données MIGADO et DREAL (différences de mesures sur leur période de fonctionnement commun, mais aussi historique plus long des mesures MIGADO utilisées pour réaliser le « modèle MIGADO »).

Tableau 3. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et biais des données modélisées par rapport aux observations de température de l'eau de la Garonne à Valentine.

RMSE (°C)				
	Modele_MIGADO	Modele_DREAL_TX_TN	Modele_DREAL_TX	Modele_DREAL_TX_cste
J+0	0.46	0.46	0.46	0.45
J+1	0.68	0.67	0.67	0.67
J+2	0.79	0.78	0.78	0.77
J+3	0.87	0.84	0.84	0.83
J+4	0.93	0.9	0.9	0.88
J+5	0.97	0.94	0.94	0.91
J+6	1.01	0.97	0.97	0.94
J+7	1.05	1.01	1.01	0.97
J+8	1.09	1.05	1.06	1.01
Biais (°C)				
J+0	0.05	-0.01	-0.01	-0.01
J+1	0.1	-0.02	-0.01	-0.02
J+2	0.13	-0.03	-0.02	-0.03
J+3	0.16	-0.04	-0.03	-0.04
J+4	0.18	-0.05	-0.04	-0.04
J+5	0.2	-0.06	-0.04	-0.05
J+6	0.21	-0.07	-0.04	-0.06
J+7	0.22	-0.08	-0.05	-0.07
J+8	0.22	-0.09	-0.06	-0.08

³ Biais moyen, c'est-à-dire écart entre la moyenne des données observées et la moyenne des données modélisées

Au vu des performances très proches des modèles à toutes les échéances, nous proposons de conserver le modèle le plus simple, basé uniquement sur TX et sans constante :

$$\text{Teau}(J) = 0.857 \text{ Teau}(J-1) + 0.085 \text{ TX}(J).$$

Notons que la dispersion des résultats, quel que soit le modèle, est assez importante à J+8.

Comparaison avec d'autres modèles linéaires

Les modèles à échéances spécifiques n'améliorent pas les résultats pour les prévisions basées sur les données DREAL (RMSE à J+8 : 1.12°C donc légèrement supérieure à celle du modèle itéré).

Les modèles sans utilisation de la température de l'eau initiale⁴ ne permettent pas non plus d'améliorer les résultats par rapport au modèle itéré (au moins jusqu'à J+8 inclus). Les modèles basés uniquement sur la température de l'air ont une RMSE supérieure à 1.1°C (quel que soit l'échéance).

Conclusion sur le choix d'un modèle à Valentine

Un seul modèle sera utilisé pour Valentine pour l'été 2024 : **$\text{Teau}(J) = 0.857 \text{ Teau}(J-1) + 0.085 \text{ TX}(J)$** .

Ce modèle a été réalisé à partir d'un jeu de données DREAL réduit car les données MIGADO présentent des différences avec la sonde DREAL et les régressions linéaires basées sur les données MIGADO sont moins adaptées pour les données DREAL, sur l'échantillon disponible.

Annexes

Erratum

Une erreur s'était glissée dans le rapport Modélisation de 2023, l'équation présentée n'étant pas optimale. En se basant sur les données SAFRAN, en incluant les données de 2023, la version corrigée de l'éq 5 page 20 sur le rapport sur la modélisation statistique pour la prévision de la température de l'eau⁵ d'avril 2023 est :

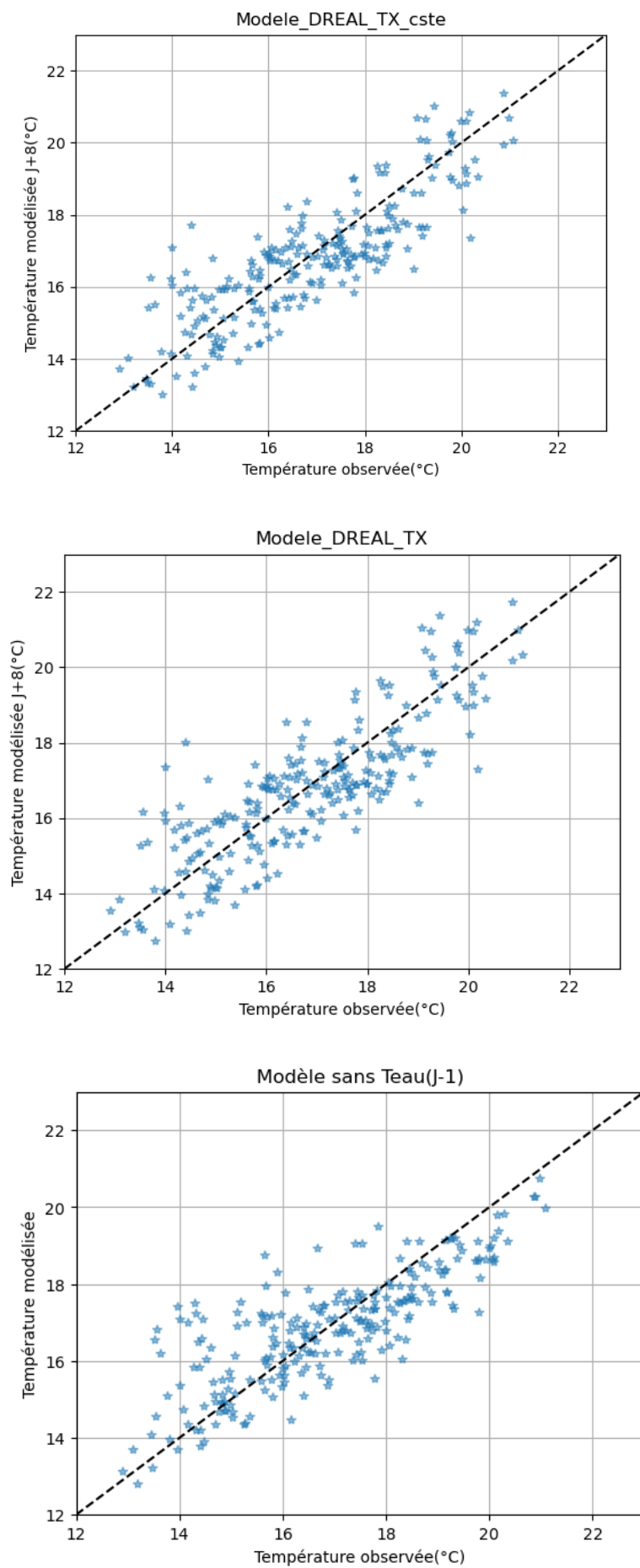
$\text{Teau}(J) = 0.8525 \text{ Teau}(J-1) + 0.020 \text{ Tmin}(J-1 \text{ à } J) + 0.090 \text{ Tmax}(J-1 \text{ à } J)$. On remarque des différences avec l'équation basée sur les données de la station de Palaminy, elles viennent du fait que TN et TX à la station ne sont pas équivalents aux Tmin et Tmax basés sur des données horaires SAFRAN. Par ailleurs, SAFRAN utilise des données mais aussi un modèle pour l'interpolation.

Comparaisons modèle – données DREAL à Valentine

Les figures ci-après illustrent les résultats des modélisations proposées pour la température de l'eau de la Garonne à Valentine, comparées aux observations DREAL sur les périodes Juin à Septembre.

⁴ $\text{Teau}(J) = 0.213 \text{ TX}(J) + 0.207 * \text{TN}(J) + 7.8^\circ\text{C}$ (Juin – septembre, Q8J < 100 m3/s); on remarque qu'en l'absence de température de l'eau initiale les poids de TN et TX sont très similaires, alors que lorsqu'on utilise Teau(J-1) le poids de TN est très faible et négligeable.

⁵ Rapport téléchargeable à partir du site internet Garon'Amont : <https://garonne-amont.fr> – onglet Bibliothèque

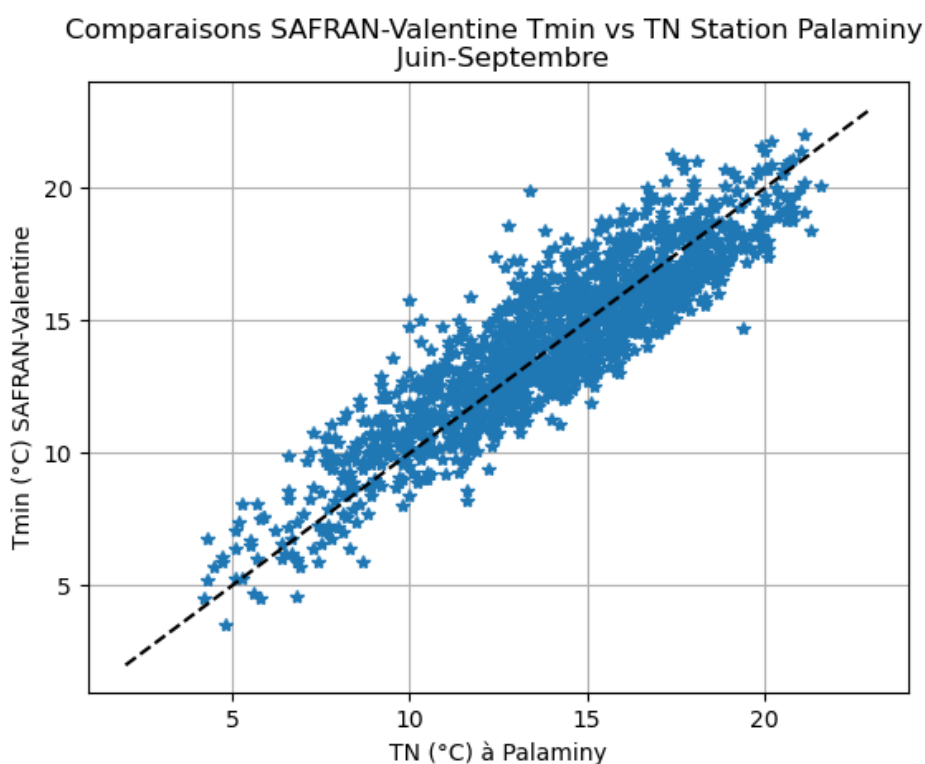


Différences entre les données SAFRAN à Valentine et les données mesurées à Palaminy

Les prévisions Météo-France transmises sur E-tiage Garonne sont celles pour la station de Palaminy, le point SAFRAN le plus proche de Valentine donne sans surprise des températures différentes avec :

- Moyenne TX à Palaminy : 27.0°C (Juin-Septembre sur la période avec des données de température de l'eau)
- Moyenne Tmax⁶ SAFRAN-Valentine : 23.56°C (Juin-Septembre sur la période avec des données de température de l'eau)

Soit une différence de 3.4°C entre le point SAFRAN de Valentine et la station de Palaminy (qui peut en partie s'expliquer par la distance entre Valentine et Palaminy, plus basse en altitude, ainsi que par la différence entre Tmin (horaire) et TX). En termes de moyenne journalière, la différence est plus faible, avec 1.45°C de plus. Cette différence s'explique en bonne partie par la différence d'altitude entre la station de Palaminy (pt SAFRAN : 413 m, Palaminy 243 m). En effet en moyenne la température diminue de 0.65°C / 100m, mais cette diminution peut être plus importante en été lorsque les conditions sont sèches (anticyclone).



⁶ Les températures minimum et maximum dans les données SAFRAN sont basées sur des données horaires, et sont donc différentes des TX et TN aux stations Météo-France.

