

Etude de la température de l'eau, dans l'estuaire de la Loire

2007 - 2023



Version	Description	Rédaction	Relecture	Validation	Date
1.0	Première rédaction du rapport final d'étude	Hélène Fallou	Sylvain Cerisier, Mairé Coffinet, Téo Crozas, Lise Lebailleur, Kristell Le Bot	Simon Lery	14/04/2025
1.1	Corrections mineures				29/04/2025



Cette opération est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional.

Table des matières

1	Introduction.....	7
2	Bibliographie	8
2.1	Définition de la température.....	8
2.2	Facteurs de contrôle	8
2.2.1	Influence des conditions atmosphériques.....	8
2.2.2	Influence de l'hydrologie.....	10
2.2.3	Influence océanique.....	10
2.2.4	Influence des nappes souterraines	11
2.2.5	Influence anthropique.....	11
2.3	Influence sur le milieu	15
2.3.1	Effets sur les écosystèmes aquatiques	15
2.3.2	Impact sur la flore	17
2.3.3	Effets sur la qualité de l'eau	17
2.3.4	Réglementation	19
2.4	Variabilité spatio-temporelle.....	21
2.4.1	Variabilité spatiale	21
2.4.2	Variabilité temporelle	22
2.5	Changement climatique et température de l'eau	25
2.6	Mesure de la température de l'eau	28
2.6.1	Capteurs à résistance électrique	28
2.6.2	Technologies à transduction thermoélectrique.....	29
2.6.3	Technologies optiques	29
2.6.4	Téledétection thermique.....	29
3	Présentation des données	31
3.1	Présentation de la zone d'étude	31
3.2	Température de l'eau	32
3.2.1	Données du réseau SYVEL	32
3.2.2	Données de la DREAL Pays de la Loire.....	35
3.2.3	Données de l'IFREMER	36
3.2.4	Qualification des données de température de l'eau issues du réseau de mesures SYVEL	36
3.3	Température de l'air.....	37
3.4	Débits.....	37
3.5	Coefficients de marée	38
3.6	Métriques utilisées pour l'analyse des températures de l'eau	38
4	Résultats	40

4.1	Variations temporelles.....	40
4.1.1	Variations inter-annuelles	40
4.1.2	Variations saisonnières	40
4.1.3	Variations journalières.....	43
4.1.4	Cycle de marée	47
4.1.5	Influence des apports hydrauliques	51
4.2	Relation $T^{\circ}\text{air}/T^{\circ}\text{eau}$	53
4.3	Inversion thermique	59
4.4	Stratification verticale	64
4.4.1	Etiage/vives eaux	65
4.4.2	Etiage /mortes eaux.....	66
4.4.3	Hautes-eaux	68
4.4.4	Crue.....	69
4.5	Evolution 2005-2023	74
4.6	Seuils 20°C – 25°C	81
4.6.1	Durée de dépassement	81
4.6.2	Date de dépassement	84
4.7	Températures basses	89
	Conclusion.....	90
	Annexes	92
	Glossaire :	96
	Bibliographie	97

Table des tableaux

Tableau 1 : Réchauffement moyen des cours d'eau, en fonction de leur type (Caissie, 2006)	21
Tableau 2 : Coordonnées des stations du réseau de mesures SYVEL	33
Tableau 3 : Descriptif du réseau de mesures SYVEL (2007-2023)	34
Tableau 4 : conditions des campagnes des profils réalisées par le GIPLE.....	35
Tableau 5 : Coordonnées des stations de la DREAL Pays de la Loire.....	35
Tableau 6 : Coordonnées de la Bouée Molit (IFREMER)	36
Tableau 7 : Critères d'acceptation des données de température pour les stations du réseau SYVEL	37
Tableau 8 : Coordonnées des stations de température de l'air (Météo France).....	37
Tableau 9 : Coordonnées des stations hydrométriques (DREAL Pays de la Loire)	37
Tableau 10 : Coordonnées de la station marégraphique (SHOM)	38
Tableau 11 : Températures journalières minimales et maximales, et température instantanée maximale	43
Tableau 12 : Amplitude moyenne de la température de l'eau, entre le jour le plus chaud et le jour le plus froid .	46
Tableau 13 : Amplitude journalière au cours du mois le plus chaud et du mois le plus froid, aux différentes stations.....	47
Tableau 14 : Bilan de l'influence de la marée sur la variation de la température de l'eau, en fonction des conditions hydrologiques	50
Tableau 15 : Bilan des conditions des campagnes d'analyse de la stratification de la température de l'eau	64
Tableau 16 : Bilan des corrélations entre le nombre annuel de jours avec dépassement des seuils 20°C et 25°C, le nombre annuel de jours avec des débits inférieurs à 150 m ³ /s et 200 m ³ /s, et le nombre annuel de jours avec une température de l'air supérieure à 20°C et 25°C.....	84
Tableau 17 : Bilan des corrélations entre la date de dépassement des seuils 20°C et 25°C, le débit du jour de dépassement, le débit moyenné sur 5 jours, le débit moyenné sur 30 jours, et la température de l'air du jour de dépassement, la température de l'air moyennée sur 5 jours, la température de l'air moyennée sur 30 jours	86
Tableau 18 : Impact des seuils de température sur les poissons	87

Table des figures

Figure 1 : sensibilité des cours d'eau aux forçages atmosphériques (Beaufort et al., 2020).....	9
Figure 2 : Bilan des facteurs influençant la température de l'eau	14
Figure 3 : Variation de la concentration d'oxygène dissous de l'eau en fonction de la température	18
Figure 4 : Distribution spatiale de la température moyenne annuelle des cours d'eau (2008-2012) (Beaufort et al., 2020).....	21
Figure 5 : Températures moyennes journalières de 2005 à 2023 à Montjean/Loire – variations interannuelles (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008).....	22
Figure 6 : Températures moyennes journalières en 2006 à Montjean/Loire – variations annuelles (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)	22
Figure 7 : Températures moyennes journalières en juillet 2006 à Montjean/Loire – variations journalières (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)	23
Figure 8 : Températures instantanées en juillet 2006 à Montjean/Loire – variations journalières (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)	23
Figure 9 : Echelles spatiale et temporelle des enjeux et questions liés à la température des cours d'eau (Marteau et al., 2024).....	24
Figure 10 : Evolution de la date de dépassement du seuil de 16°C en fonction de la distance à la mer (en km) pour la période de référence 1971-1990 (en bleu), le milieu du siècle (en vert) et la fin du siècle (en rouge). Extrait de Moatar (2014).....	26
Figure 11 : Illustration de la température de la Bourbince (71). Survol réalisé le 24/07/2019, avec une température de l'air supérieure à 39°C. A gauche : orthophoto. A droite : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes (Marteau et al., 2024).....	30
Figure 12 : Carte du bassin versant de la Loire, de sa source à l'embouchure (d'après cartographie DIREN Centre, 2003 – Donnée ©SRTM NASA/JPL -© BDCarthage – IGN)	31
Figure 13 : Variation des hauteurs d'eau en fonction du débit du fleuve, en vives eaux et à basse mer.....	32
Figure 14: Carte du réseau SYVEL au 31/12/2023.....	33
Figure 15 : Bilan des stations de mesures.....	38
Figure 16 : Courbes enveloppes et box-plot des températures mensuelles de l'eau, entre 2005 et 2023.....	42
Figure 17 : Variations diurnes, au cours des mois de janvier et juillet 2019.....	44
Figure 18 : Amplitude journalière de la température de l'eau	46
Figure 19 : Situations de référence.....	47
Figure 20 : Variation de la température de l'eau, en conditions de hautes-eaux/Vives-eaux	48
Figure 21 : Variation de la température de l'eau, en conditions de hautes eaux/mortes eaux	48
Figure 22 : Variation de la température de l'eau, en conditions d'étiage/vives eaux	49
Figure 23 : Variation de la température de l'eau, en conditions d'étiage/mortes-eaux	50
Figure 24: Coefficients estimateurs pour les relations multi-linéaires entre la température de l'eau, le débit de la Loire (à gauche) et la température de l'air (à droite)	51
Figure 25 : Régression linéaire de la température de l'eau en fonction de la température de l'air (moyenne hebdomadaire).....	54
Figure 26 : Coefficients estimateurs des relations linéaires entre la température de l'eau et la température de l'air	55
Figure 27 : Relations entre la température maximale annuelle de l'eau et la température maximale annuelle de l'air	56
Figure 28 : Principe du phénomène de l'upwelling (source La Chaine Météo).....	57
Figure 29 : Principe de l'inversion thermique dans l'estuaire	59
Figure 30 : Inversion de la température de l'eau dans l'estuaire, en fonction de la saison (les zones colorées représentent les périodes avec une température de l'eau plus chaude dans l'océan que dans le fleuve).....	60

Figure 31 : Différence des températures journalières entre l'amont (Montjean/Loire) et l'aval (Paimbœuf) entre 2007 et 2023	60
Figure 32 : Différence des températures journalières entre l'amont (moyenne Bellevue/Trentemoult) et l'aval (moyenne Paimbœuf/Donges) entre 2007 et 2023.....	61
Figure 33 : Variabilité de la date des inversions thermiques dans l'estuaire, entre 2007 et 2023 (à gauche : été/hiver ; à droite : hiver/été)	62
Figure 34 : profils hydrologiques – étiage juillet 2023	65
Figure 35 : profils hydrologiques - étiage mai 2022	66
Figure 36 : profils hydrologiques – étiage décembre 2022	67
Figure 37 : profils hydrologiques - Hautes eaux février 2021	68
Figure 38 : Profils hydrologiques - crue février 2021.....	69
Figure 39 : Bilan de la stratification de la température, dans l'estuaire, en fonction des conditions hydrologiques	73
Figure 40 : Distribution des gammes de température par station (2005-2023)	76
Figure 41 : Ecart des températures mensuelles à la moyenne des températures par mois, sur la période 2005-2023.....	78
Figure 42 : tendance pour les anomalies des températures mensuelles, avec un modèle de régression linéaire – tendance des coefficients estimateurs	79
Figure 43 : tendance des coefficients estimateurs, pour les régressions linéaires des moyennes saisonnières des températures de l'eau et de l'air	80
Figure 44 : Durée de dépassement du seuil 20°C, en nombre de jours.....	82
Figure 45 : Coefficients estimateurs des régressions linéaires du nombre de dépassements (à gauche) et de la durée maximale de dépassement (à droite), en fonction du temps, pour le seuil 20°C	82
Figure 46 : durée de dépassement du seuil 25°C, en nombre de jours	83
Figure 47 : Date de dépassement du seuil 20°C.....	85
Figure 48 : Date de dépassement du seuil 25°C.....	85
Figure 49 : périodes de présence des poissons migrateurs dans l'estuaire.....	87
Figure 50 : Les eaux de la Loire gelées, dans le bras de Pirmil, le 13 février 2012 (source : GIP Loire Estuaire) 89	

1 Introduction

La température d'un cours d'eau joue un rôle fondamental dans la dynamique des écosystèmes aquatiques. Elle influe sur la distribution spatiale des organismes vivants, leur croissance, leur reproduction, leur comportement... Elle impacte également la qualité de l'eau et les usages, tels que les prélèvements industriels et la production d'eau. La température de l'eau est sensible aux facteurs environnementaux et aux activités anthropiques.

Tout comme la température de l'air, la température de l'eau tend à augmenter. Le suivi à long terme de la température de l'eau constitue donc un indicateur précieux pour détecter d'éventuelles perturbations ou changements affectant la qualité des eaux estuariennes. Les variations thermiques observées peuvent refléter les effets du changement climatique, notamment à travers l'élévation de la température de l'air et des océans, sur des échelles de temps pluridécennales.

Depuis 2007, un réseau de mesures haute fréquence est déployé dans l'estuaire de la Loire, permettant l'acquisition continue de données de température en sub-surface, entre Oudon et Montoir-de-Bretagne. Jusqu'à présent, ces données ont principalement été exploitées en complément du suivi d'autres paramètres physico-chimiques estuariens, sans faire l'objet d'une analyse dédiée. Afin de mieux comprendre l'évolution thermique de l'estuaire, le GIPLE propose une étude approfondie de ces données, couvrant le continuum fluvial de la Maine à la mer.

Cette étude vise ainsi à apporter des éléments de compréhension sur les dynamiques de la température de l'eau, pour mieux appréhender les enjeux futurs pour l'estuaire de la Loire. L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la température de la Loire, aux différentes échelles spatiales et temporelles.

Plusieurs axes seront abordés : un premier état des lieux des connaissances générales sur la température des cours d'eau et des estuaires, avec un focus particulier sur l'estuaire de la Loire ; une présentation de la méthodologie de mesure et des enjeux métrologiques ; enfin, une analyse approfondie des données du réseau SYVEL afin d'évaluer l'évolution temporelle de la température et de mieux comprendre les mécanismes thermiques propres à cet estuaire.

L'étude soulèvera plusieurs questions essentielles : quels sont les régimes thermiques caractéristiques des cours d'eau et des estuaires ? Quels paramètres influencent la température de l'eau et en quoi diffèrent-ils entre milieu fluvial et estuarien ? Quelles interactions existent entre la température et les usages de l'eau ? Quels sont les impacts sur les cycles biogéochimiques et la qualité de l'eau, et quelles en sont les conséquences sur la vie aquatique ?

2 Bibliographie

2.1 Définition de la température

La température représente le degré de chaleur ou de froid d'un objet ou d'un milieu. D'un point de vue physique, c'est une fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules.

Dans le cadre de l'étude de la température de l'eau, il est d'usage de décrire des métriques spécifiques pour expliquer les variations et les évolutions spatiales et temporelles de ce paramètre. Ainsi, il est utile de déterminer les températures moyennes journalières, mensuelles ou annuelles, les valeurs minimales et maximales, l'amplitude, le nombre de jours au-dessus d'un seuil défini en fonction des spécificités des sites étudiés, la stratification verticale des températures... Ces métriques permettent de décrire la température d'un site et de comparer les températures des différents sites d'un cours d'eau. L'étude de ces métriques peut constituer un axe de caractérisation des rivières, à l'instar de l'étude des grandeurs de débits habituellement utilisées en hydrologie.

L'étude de la température de l'eau doit permettre de faire le lien avec les fonctionnalités et les usages du cours d'eau. En effet, la température est un facteur de contrôle clé pour de nombreux processus biologiques, biophysiques et biochimiques et peut être limitante pour certains usages.

2.2 Facteurs de contrôle

La température des cours d'eau varie à la fois d'amont en aval, mais aussi du fond vers la surface, en partie en réponse aux changements de quantité d'énergie disponible sous forme de chaleur, aux interfaces eau-atmosphère et eau-lit du cours d'eau.

Les variations de transfert de chaleur dépendent de facteurs climatiques tels que les radiations solaires, la température de l'air, le taux d'humidité, la vitesse du vent, mais aussi des caractéristiques du site, telles que la quantité d'ombre liée à la végétation lacustre ou la profondeur de la rivière, la source de l'eau (eau de surface, lac, zone humide...) (Cassie et al, 2006). L'influence anthropique sur la gestion de l'eau (barrages, rejets, régulation ...) est non négligeable et impacte les températures de l'eau.

En estuaire, le ratio entre la quantité d'eau apporté par l'océan et la quantité d'eau douce apportée par le fleuve est un des facteurs principaux facteurs de contrôle de la température de l'eau, derrière la température de l'air. Cette dernière influence la température de l'eau en mer et la température de l'eau des fleuves.

Enfin, le temps de résidence de l'eau, dans l'estuaire, est un facteur non négligeable de contrôle de la température de l'eau.

2.2.1 Influence des conditions atmosphériques

De manière générale, dans les cours d'eau, les conditions atmosphériques sont, avec les facteurs anthropiques, les paramètres ayant le plus d'influence sur la température de l'eau et sont responsables de la plupart des échanges de chaleur à la surface de l'eau. Sur les cours d'eau de grande taille (avec une largeur supérieure à 3m), 80% des échanges thermiques ont lieu à l'interface eau/atmosphère. Les échanges à l'interface eau/sédiments représentent 15% (Evans et al., 1998, Sinokrot et Stefan 1994).

Les principaux facteurs météorologiques sont la température de l'air, l'intensité et la durée des radiations solaires, la vitesse du vent à la surface et la pression de la vapeur d'eau dans l'air (Morin et Couillard, 1990).

L'énergie calorifique est fournie par l'intermédiaire des rayonnements solaires, les conditions d'humidité et de température de l'air. Dans des régions arides, l'évaporation permet de diminuer de façon importante la température de l'eau. La pluie peut par ailleurs augmenter la température d'un cours d'eau, si elle circule sur des sols chauds (L'heureux, 2002). Les rayonnements incidents du soleil (par ondes courtes) sont la principale source d'énergie (Webb et Crisp, 2006, Caissie et al., 2007). Ils suivent un cycle diurne, avec un maximum durant la journée, ce qui augmente les températures de l'eau. L'influence de ces rayons est liée en partie à la profondeur de la colonne

d'eau et à la limpidité de l'eau. La présence de matières en suspension augmente le pourcentage d'absorption et de réflexion de l'onde par l'eau (Wetzel, 2001). Le rayonnement net par ondes longues représente la différence entre les radiations issues de l'atmosphère et de la ripisylve et celles réfléchies par la surface de l'eau. Il correspond aux pertes énergétiques dans la masse d'eau (Webb et Zhang, 2004 ; Caissie et al., 2007). Ce rayonnement par ondes longues est constant sur un cycle journalier, mais présente un maximum en période estivale (Sridhar et al., 2004).

La topographie, en agissant sur les conditions atmosphériques, est également un facteur important de la température de l'eau. L'intensité du rayonnement solaire sera fonction de la latitude et de l'exposition du cours d'eau. La température de l'air diminue avec l'altitude.

Les conditions atmosphériques expliquent en partie les variations journalières et saisonnières, ainsi que les gradients latitudinaux. De nombreux auteurs ont montré une relation forte entre la température de l'air et la température de l'eau, au cours de l'année (Seyedhashemi et al., 2022, Beaufort et al., 2015, Ducharme, 2008). L'influence de la température de l'air sur la température de l'eau est fonction du temps de résidence et de la profondeur du cours d'eau.

De nombreux modèles sont définis pour expliquer ces échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'eau et mettre en avant une corrélation entre la température de l'air et celle de l'eau. La relation linéaire entre la température de l'eau et de l'air, est particulièrement forte ($r^2 > 0,9$) sur les grands cours d'eau, où le substrat n'est pas perméable (Garner et al., 2013), lorsque la température de l'air est comprise entre 0 et 20°C. La corrélation entre les températures devient plus faible pour des températures de l'air extrêmes, chaudes (évaporation et rayonnement thermique) ou froides (apport de chaleur par les nappes) (Webb et al., 2008). En conséquence, la relation entre la température de l'eau et de l'air ressemble à une fonction en forme de S, plutôt qu'à une fonction linéaire (Mohseni et Stefan, 1999).

Dans les estuaires, cette relation entre la température de l'eau et la température de l'air n'est pas vérifiée. L'altitude et la ripisylve ne sont pas des facteurs prépondérants permettant d'expliquer les variations de la température de l'eau. La ripisylve peut néanmoins avoir un impact sur la température de l'eau dans les bras et boires, entraînant une évolution locale de la température. Les apports d'eaux océaniques sont prépondérants et influencent largement la température de l'eau dans les estuaires (cf 2.2.3).

Pour les cours d'eau, les écarts observés dans la relation entre la température de l'eau et la température de l'air permettent d'évaluer la sensibilité des rivières aux conditions climatiques (Figure 1) : certaines, alimentées par des eaux souterraines, sont relativement protégées des influences atmosphériques, tandis que d'autres y sont fortement exposées. Cette sensibilité peut être perçue comme une vulnérabilité face aux changements climatiques actuels : les rivières les plus réactives aux conditions atmosphériques seront sans doute les premières affectées par le réchauffement global.

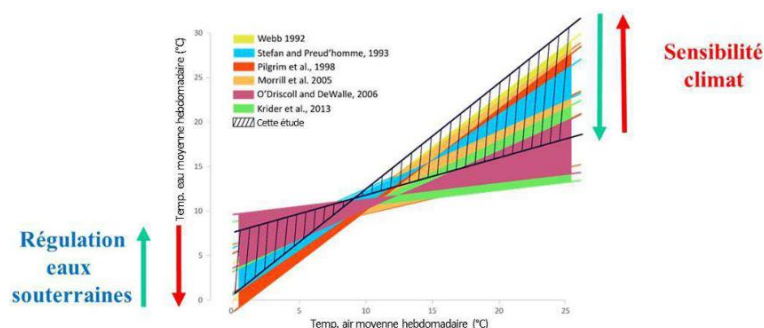


Figure 1 : sensibilité des cours d'eau aux forçages atmosphériques (Beaufort et al., 2020)

2.2.2 Influence de l'hydrologie

Les paramètres hydrauliques jouent un rôle prépondérant dans l'inertie thermique. Les variations sont plus importantes lorsque la profondeur d'un cours d'eau est faible. Lorsque la profondeur d'eau est corrélée au débit du cours d'eau, la variation du débit joue un rôle essentiel dans la variabilité de la température. Il détermine les conditions de transfert de chaleur avec l'atmosphère et les apports latéraux. En cas de crue, les eaux se mélangent, la stratification verticale diminue et la température de l'eau varie faiblement. Au contraire, lorsque les débits sont faibles, la vitesse des courants diminue, ce qui entraîne un réchauffement des eaux (Webb et al., 2003).

Une analyse de régression linéaire multiple réalisée par Webb et al. (2003) a montré qu'une relation inverse entre la température de l'eau et le débit existe pour tous les bassins versants et toutes les échelles de temps, avec un impact plus important sur de courtes échelles de temps et dans les grands bassins du bassin de l'Exe (Royaume-Uni). Cependant, les connaissances sont limitées quant à l'influence du débit sur les températures de l'eau dans les grands bassins fluviaux.

Dans les cours d'eau, la température de l'eau est donc une résultante du cycle hydrologique, suivant les variations des débits fluviaux.

2.2.3 Influence océanique

Les estuaires étant une zone de mélange des eaux fluviales et des eaux océaniques, la température de l'eau est également soumise à l'influence de la température des eaux apportées par les marées. Les volumes d'eau mis en jeu lors du remplissage de l'estuaire à marée montante sont de 5 à 15 fois supérieurs aux volumes d'eau fluviale arrivant de l'amont.

Contrairement aux facteurs de contrôle de la température des cours d'eau, l'influence des cycles de marée sur la température de l'eau dans les estuaires est peu documentée. Néanmoins, les océans présentent une grande inertie thermique. La température de la mer varie sous l'influence de plusieurs facteurs. Sous l'effet du vent, l'évaporation entraîne une perte de chaleur, provoquant ainsi un refroidissement, tandis que l'ensoleillement favorise son réchauffement. Grâce aux relevés de température et à l'analyse statistique, il est désormais possible d'identifier certaines tendances de réchauffement ou de refroidissement, reflétant des variations climatiques ou interannuelles. Le cycle saisonnier de température affecte principalement la couche superficielle de l'océan, d'une épaisseur d'une trentaine de mètres. Au printemps, l'apport d'énergie solaire dépasse les pertes thermiques dues à l'évaporation, entraînant une augmentation de la température de surface de plusieurs degrés. Une couche d'eau plus chaude, d'environ 20 mètres d'épaisseur, se forme alors. La séparation entre cette couche de surface et les eaux profondes est nette et est appelée thermocline saisonnière. Cette barrière thermique, qui a également un impact sur les écosystèmes marins, ne peut être rompue que par des événements météorologiques violents tels que les tempêtes ou les coups de vent.

Dans l'Atlantique, la température de la couche de surface varie de 7 à 9°C en hiver à environ 20°C en été.

Lorsque les courants sont faibles et que la profondeur est suffisante, les eaux profondes restent isolées et ne sont pas affectées par le réchauffement estival. C'est le cas du "bourrelet froid", une masse d'eau en forme de dôme, située sous la thermocline saisonnière et présente toute l'année. Cette structure thermique est localisée principalement dans la Grande Vasière, au sud de la Bretagne, et à l'ouest du front d'Ouessant. Sa température fluctue peu, restant proche de 12 °C avec des variations annuelles inférieures à 1 °C.

En été et au début de l'automne, les phénomènes d'upwelling, qui correspondent à la remontée d'eaux profondes froides sous l'influence du vent, sont particulièrement marqués, notamment en Bretagne sud, en présence de vents de nord ou de nord-ouest.

À l'automne, une masse d'eau chaude accumulée durant l'été peut s'écouler vers le nord sous forme d'une langue d'eau chaude de 14 à 16 °C, pouvant s'étendre du Pays basque jusqu'à la Loire. En hiver, un courant chaud peut apparaître, longeant le nord de la péninsule ibérique et remontant vers le golfe de Gascogne.

Les océans jouent un rôle clé dans la régulation du climat, en absorbant plus de 90 % de l'excès de chaleur lié au réchauffement climatique. Depuis 1950, la température de la couche de surface (0-300 m) a augmenté en moyenne de 0,3 °C.

A titre d'exemple, dans l'estuaire de la Gironde, un gradient longitudinal est observé, avec un écart maximal moyen de température de 3°C, entre les eaux marines à l'embouchure et les eaux fluviales (à l'amont) (Sautour et Baron, 2018).

2.2.4 Influence des nappes souterraines

Au niveau de sa source, la température du cours d'eau est fortement liée à la température de la nappe dont il provient (Caissie, 2006). La température des nappes souterraines reste sensiblement constante au cours de l'année, avec des valeurs comprises entre 12 et 14°C. Des études ont montré que les nappes alimentaient les cours d'eau en période de faible débit, et donc d'étiage (Caissie et Giberson, 2003). En période d'étiage, la température du cours d'eau est plus élevée que celle de la nappe du fait des conditions atmosphériques et des faibles débits qui provoquent une élévation de la température de l'eau. L'eau de la nappe qui alimente la rivière crée un courant d'eau froide, constituant ainsi des zones de refuge pour la faune piscicole. Comme les débits sont faibles, les eaux de températures différentes mettent du temps à se mélanger.

Les échanges énergétiques à l'interface eau/sédiments résultent d'une combinaison des deux phénomènes de transport de chaleur : la convection provenant des résurgences des eaux souterraines dans la rivière et des échanges hyporhéiques et la conduction thermique à travers les sédiments et l'eau. Les eaux souterraines subissent peu de variations de température au cours du temps, mais gardent un cycle saisonnier similaire à celui de la température de l'eau. En période estivale, les eaux cours d'eau alimentées par les apports de nappes sont refroidis alors qu'en hiver ces apports amènent une température plus chaude et contribuent à augmenter la température. Story et al (2003) ont montré que les apports de nappe sur un petit cours d'eau pouvaient être responsables de 40 % du refroidissement de 3°C de la température maximale journalière. Les eaux hyporhéiques contribuent à la mise en réserve d'eaux de surface qui intègrent les influences climatiques de périodes pluri-journalières et peuvent montrer des décalages temporels et des amplitudes plus faibles (Arrigoni et al 2008). La réémergence des eaux hyporhéiques dans les cours d'eau a un impact sur la température de surface. La composition géologique du substrat et la géométrie du cours d'eau (surface d'échange nappe/river) peuvent affecter la quantité des apports d'eau souterraine dans la rivière et modifier les apports ou pertes énergétiques (O'Driscoll et DeWalle, 2006).

En Loire moyenne, l'élaboration d'un modèle hydrogéologique a permis de montrer que le régime thermique de la Loire est modifié par les apports d'eau souterraine ; en particulier par l'aquifère de Beauce (Monteil, 2011). Ces apports permettent de réduire d'environ 0,5°C la température de l'eau et même 1°C lors des fortes chaleurs estivales (Brugeron et al., 2013).

2.2.5 Influence anthropique

L'influence anthropique peut avoir des effets majeurs sur la température d'un cours d'eau.

2.2.5.1 Occupation des sols

L'occupation des sols agit à plusieurs niveaux. La végétation rivulaire fait de l'ombre et réduit le rayonnement absorbé, mais elle réduit aussi la vitesse du vent et diminue ainsi l'énergie dissipée par évaporation. La suppression de la végétation et l'imperméabilisation des surfaces peuvent augmenter la température du sol, réduire l'évapotranspiration et accroître le ruissellement, générant ainsi des pics de température dans les petits cours d'eau lors d'orages (Nelson et Palmer, 2007).

Le rôle de la ripisylve a en particulier été mis en évidence. En effet, l'ombre et la lumière contrôlent et organisent la production de la faune invertébrée et de la flore. Sur les petits cours d'eau de plaine, l'absence de ripisylve ou de boisement des versants peut amener une élévation de la température estivale de l'eau de plusieurs degrés (Sridhar et al., 2004 ; Johnson et al., 2014). La couverture végétale peut limiter les pertes par évaporation (Webb et Zang, 2004).

D'autres facteurs peuvent également influencer la température de l'eau, comme la géométrie du cours d'eau (largeur et profondeur), la morphologie du lit (en termes d'action sur la distribution transversale et longitudinale des températures, et au niveau de l'écoulement hyporhéique).

2.2.5.2 Barrages/retenues

Les retenues d'eau artificielles peuvent aussi modifier sensiblement la température d'un cours d'eau. La température dans les retenues connaît généralement des variations intra-annuelles plus réduites (sauf l'épilimnion, la couche d'eau supérieure), si bien que le cours d'eau en aval est loin de sa température d'équilibre en été ou en hiver. Le retour à l'équilibre peut prendre plusieurs centaines de kilomètres (Wright et al., 2008).

La présence de réservoirs et de barrages en amont des cours d'eau a de fortes conséquences sur leur régime thermique. La réduction du débit des rivières en été implique une diminution de la capacité de stockage thermique des rivières et une augmentation des variations thermiques. Les barrages modifient le transport solide et la géomorphie des cours d'eau. Les zones d'échanges avec les flux hyporhéiques sont ainsi moins nombreuses, ce qui réduit la capacité de stockage de l'énergie thermique. L'uniformisation de la température empêche les zones hyporhéiques d'agir comme des zones tampons (Croze, 2008).

La présence de réservoirs profonds peut augmenter la température moyenne annuelle des cours d'eau. Les pics de température estivale sont plus faibles et les températures hivernales sont plus élevées, ce qui peut empêcher les glaciations des cours d'eau. Le cycle annuel des températures se décale parfois d'un mois dans les cours d'eau régulés. En se modifiant, il agit sur les cycles biologiques des organismes aquatiques. Le cycle journalier en aval d'un réservoir peut être atténué en été par le relargage des eaux (Caissie, 2006).

Les seuils ou déversoirs situés sur les cours d'eau entraînent également des variations de la température. L'eau qui surverse de ces ouvrages est superficielle qui se réchauffe plus rapidement que l'eau profonde. En aval du seuil, nous retrouverons donc un courant d'eau chaude (Croze, 2008). Les ouvrages récents sont dotés de prises à diverses hauteurs pour atténuer cet impact thermique.

Pour les cours d'eau d'une certaine taille, les brusques variations thermiques en un point donné sont dues, la plupart du temps, aux lâchers d'eau des barrages. L'impact des barrages sur la température de l'eau varie en fonction de la capacité de stockage, du mode de gestion et de la profondeur de la prise d'eau. De manière générale, les grands barrages sont associés à une pollution thermique froide et les petits barrages à une pollution thermique chaude (Olden et Naiman, 2010). Cependant, l'influence du barrage sera amortie au fil de l'écoulement. Sur certains barrages, l'influence des lâchers d'eau peut être minimisée par des rejets d'eau à une température proche de celle du milieu récepteur, comme c'est le cas pour le barrage de Naussac.

2.2.5.3 Prélèvements/rejets d'eau

Les rejets thermiques peuvent être de nature diverse : industries, centrales électriques, station de traitement des eaux usées, vidange de bassins, climatisation...

La pollution thermique par des rejets industriels peut rendre des zones inhabitables pour certaines espèces aquatiques sur des petits cours d'eau, notamment du fait de la présence de contaminant et de l'augmentation de la température de l'eau (Caissie, 2006).

Les pompages effectués en rivière pour l'irrigation des champs, l'hydroélectricité ou les pompes à chaleur diminuent le débit de la rivière et influent sur le réchauffement des eaux. En effet, une petite partie de l'eau utilisée pour l'irrigation retourne à la rivière par un réseau complexe de fossés dans lesquels elle tend à s'échauffer du fait des faibles profondeurs et débits (Caissie, 2006 ; Poole et Berman, 2001). Des travaux ont également montré que la multiplication des installations géothermiques accentue la formation d'îlots de chaleur urbains et réchauffe les aquifères fortement sollicités (Cerema, 2018).

2.2.5.4 Agglomérations

Même si les facteurs atmosphériques et hydrologiques sont les principaux paramètres expliquant l'évolution des températures, le degré d'artificialisation des sols à proximité des petits cours d'eau semble avoir un effet non négligeable sur la température, essentiellement au cours de la saison hivernale. En matière d'amplitude comme de pics liés à des événements, l'hydrologie propre au cours d'eau semble rester un des éléments principaux d'explication des variations. En revanche, le petit cours d'eau urbain est soumis à de multiples influences qui affectent sa réponse aux événements pluvieux, mais aussi aux diverses perturbations anthropiques à l'échelle de la ville (Lery et al., 2017).

Le revêtement foncé absorbant fortement la chaleur ainsi que le ruissellement rapide des eaux pluviales sur les surfaces imperméables font que l'urbanisation peut avoir un impact important sur la température de l'eau (Jones et al., 2012 ; Somers et al., 2013). L'imperméabilisation des parkings génère un écoulement de l'eau plus rapide vers les cours d'eau, provoquant une augmentation de la température de l'eau du cours d'eau en été (Jones et al., 2012). Le phénomène inverse est observable en hiver, lorsque les eaux de pluie et de ruissellement ont une température inférieure à celle du cours d'eau (en raison de la température de l'air et du sol) (Bouarafa, 2016). Par ailleurs, les températures minimale et médiane élevées d'hiver sont relativement spécifiques des bassins les plus urbanisés et au couvert forestier le plus faible et peuvent ainsi servir d'indicateurs d'impact de l'urbanisation (Bouarafa, 2016).

Les rejets urbains par temps de pluie peuvent conduire à une augmentation locale de la température de l'eau dans le milieu récepteur. De par l'imperméabilisation progressive des sols et le développement des agglomérations, les eaux de ruissellement atteignent rapidement les cours d'eau et peuvent générer en été une augmentation de la température en début d'averse, lorsque les débits sont faibles. En effet, les surfaces imperméables en asphalte ou les toitures atteignent des températures importantes.

La température des cours d'eau varie en fonction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Elle est influencée par les conditions climatiques (rayonnement solaire, température de l'air, humidité, vent), l'hydrologie (débit, profondeur), les apports océaniques en estuaire, ainsi que par les eaux souterraines qui jouent un rôle de régulateur thermique.

Les échanges thermiques se produisent principalement à l'interface eau-atmosphère (80 %), l'évaporation pouvant avoir un effet de refroidissement, tandis que les rayonnements solaires augmentent la température selon la limpidité de l'eau. La relation entre la température de l'air et celle de l'eau est généralement forte, mais varie selon la profondeur et le temps de résidence de l'eau.

Les facteurs hydrologiques jouent un rôle essentiel : une faible profondeur favorise les variations de température, tandis que les grands débits tendent à stabiliser la température. En estuaire, la température est fortement influencée par les marées et les courants océaniques, qui présentent une forte inertie thermique.

L'influence humaine est également déterminante. L'urbanisation, la suppression de la végétation rivulaire et l'imperméabilisation des sols augmentent la température des cours d'eau. Les barrages modifient le régime thermique en atténuant les variations saisonnières et en retardant le retour à un équilibre thermique.

Enfin, les cours d'eau les plus sensibles aux changements climatiques sont ceux fortement exposés aux variations atmosphériques, notamment ceux avec un faible apport d'eau souterraine ou une faible profondeur. Cette sensibilité pourrait accentuer les effets du réchauffement global.

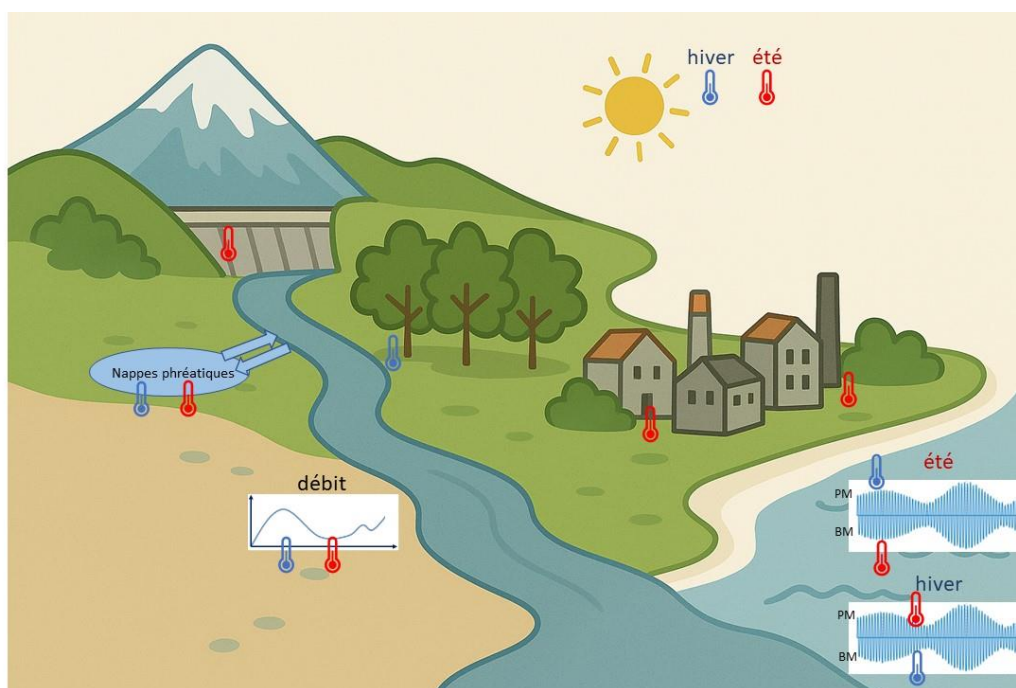


Figure 2 : Bilan des facteurs influençant la température de l'eau

2.3 Influence sur le milieu

La température de l'eau est un paramètre abiotique essentiel pour la qualité physico-chimique et écologique des eaux. Elle influence les cinétiques de décomposition de la matière organique et la solubilité de l'oxygène dissous. Elle peut également influencer sur les aires de répartition, le cycle de vie et le comportement des espèces aquatiques.

A l'échelle d'un bassin versant, les gradients de température entraînent une répartition spatiale des espèces, en fonction de leurs seuils thermiques. A une échelle plus locale, il existe également de fortes variations de température, qui forment une mosaïque d'habitats. D'un point de vue écologique, plus les ambiances thermiques sont diversifiées, plus la biodiversité est riche.

2.3.1 Effets sur les écosystèmes aquatiques

La température de l'eau est essentielle pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Il est cependant nécessaire de s'intéresser à la fois aux valeurs instantanées de température, mais aussi aux valeurs journalières, saisonnières et annuelles. La somme de jours avec des températures dans certaines gammes de valeurs impacte directement les organismes, en agissant sur leur physiologie. Les variations rapides de la température de l'eau peuvent également affecter les organismes.

2.3.1.1 Effets généraux

Les milieux aquatiques présentent une forte vulnérabilité aux variations de température des cours d'eau, d'une part, car elles ont un impact direct sur le cycle de l'eau et, d'autre part, car la majorité des espèces aquatiques sont des organismes à sang froid, plus sensibles aux modifications de la température de leur milieu. Les espèces affectionnant les eaux froides ont tendance à migrer vers les parties amont des bassins versants, d'où l'importance de préserver la continuité des cours d'eau. Les espèces supportant des températures plus tempérées colonisent un linéaire de plus en plus important des cours d'eau.

Le lien entre la température de l'eau et les organismes est clairement établi dans la littérature. Il est important de suivre l'évolution des températures afin de comprendre les modifications biologiques observées. La discrimination de l'impact d'un changement de la température par rapport à un changement de l'hydrologie peut s'avérer difficile.

La majorité des espèces aquatiques sont des ectothermes. Leur température interne n'est pas constante et s'adapte au milieu dans lequel elles vivent. Par conséquent, la température de l'eau joue un grand rôle dans l'ensemble des processus physiologiques et biochimiques des espèces, nécessaires à leurs fonctions vitales.

Les espèces aquatiques ont des limites physiologiques vis-à-vis de la température de l'eau, définies par un intervalle de tolérance thermique, qui détermine la répartition géographique des différentes espèces le long des cours d'eau. Une variation de la température de l'eau peut ainsi modifier la distribution de certaines espèces.

Des seuils de tolérance à la température de l'eau peuvent être définis pour chaque espèce, à partir d'études en laboratoire ou de la bibliographie.

Une modification trop importante de la température de l'eau peut entraîner une variation temporelle et spatiale des optima écologiques des espèces (Walther et al., 2002). L'intensité et la rapidité des changements peuvent déterminer la capacité d'adaptation des espèces, en fonction de leur stade de développement, de leur comportement et de leur tolérance environnementale. Les espèces peuvent alors mettre en place des adaptations physiologiques, avec par exemple la production de protéines résistantes à la chaleur, l'augmentation de la ventilation, la réduction de leur taille (Gardner et al, 2011). Le deuxième type de réponse est la modification de la phénologie (événements saisonniers). Le décalage temporel peut limiter les impacts d'une désynchronisation entre les conditions environnementales optimales et les dates clés de la reproduction, ponte ou floraison (Blaustein et al, 2010 ; Johansson et al., 2013). Le troisième type de réponse est le déplacement vers des zones plus favorable (Grenouillet et Comte, 2014).

Le taux de croissance des micro-organismes augmente généralement avec la température jusqu'à un maximum puis diminue très rapidement par la suite. La virulence de plusieurs virus et de bactéries pathogènes des poissons augmente aussi avec la température (Onema, 2014).

2.3.1.2 Cas des poissons

La littérature sur l'impact de la température des cours d'eau sur les poissons est très riche.

Les besoins en oxygène des organismes aquatiques augmentent avec la température. En effet, l'activité métabolique des poissons croît avec la température. Ainsi, pour supporter cette croissance d'activité, ils ont besoin de plus de nourriture et d'oxygène (Villeneuve et al., 2005).

Les espèces plus tolérantes, comme le brochet ou la brème, remplacent des espèces sensibles telles que les salmonidés. En effet, les fonctions vitales (digestion, respiration, maturation des gonades, croissance, nutrition, reproduction) des organismes aquatiques sont directement conditionnées par la température de l'eau. Les différentes espèces se sont adaptées à leur milieu. Ainsi, certaines montrent des préférences pour les eaux froides alors que d'autres préfèrent les eaux chaudes.

L'omble chevalier a besoin d'une température de 4 à 5 °C pour se reproduire. A ces températures, la carpe est totalement inactive. Elle ne peut frayer qu'à partir de 20 °C. La gamme de températures optimales pour le développement d'une espèce est appelée « zone de confort ». En dehors de cette zone, les espèces subissent une diminution de leurs fonctions vitales. À partir d'une certaine température, les conséquences peuvent aller jusqu'à la mort de l'organisme. On parle alors de température létale. Les variations répétées de la température peuvent aussi rendre les organismes aquatiques plus sensibles aux maladies (Choffel et al., 2020).

La température de l'eau influence le déroulement du cycle de vie des espèces. Elle influe sur le taux de croissance des poissons. L'atteinte d'un stade du développement est déterminée par l'accumulation de degrés-jours. Des modèles permettent d'estimer le nombre de jours entre la fertilisation et l'éclosion des œufs de poisson, en fonction de la température de l'eau (Crisp, 1981). La température de l'eau peut également déclencher des transitions dans le cycle de vie (montaison, dévalaison, migration vers d'autres types d'habitats...).

La migration hivernale annuelle des flets depuis les habitats estuariens plus froids vers des zones de frai côtières et offshore plus chaudes est considérée comme une réponse des poissons visant à maintenir une croissance gonadique plus élevée avant la ponte (Graham et Harrod, 2009). Dans la Manche et la mer du Nord, le décalage du moment du frai chez la sole (classiquement observé à la fin de l'hiver ou au printemps) a été lié au réchauffement des températures marines (Fincham et al., 2013). La phénologie du frai du flet pourrait également être modifiée par un tel changement climatique hivernal (Laurent et al., 2022). Le réchauffement des eaux des systèmes côtiers pourrait potentiellement compromettre son futur recrutement dans les estuaires de l'est de la Manche. Les juvéniles de Flet de la Seine pourraient présenter une tolérance plus faible au stress thermique par rapport aux poissons modérément contaminés du golfe de Gascogne (Lavergne et al., 2015).

Lorsque la température de l'eau augmente de 10°C, la consommation en oxygène dissous des vertébrés double. Des expériences menées sur des truites « steelhead » ont montré un retard certain de la croissance et une survie limitée des alevins lorsque la concentration en oxygène est trop faible au moment de l'éclosion. Dans des conditions analogues, des chercheurs ont constaté une réduction d'un tiers de la longueur des alevins nouveau-nés et un fort pourcentage d'individus anormaux. Certaines espèces sont capables de compenser en partie le manque d'oxygène dissous par respiration stomacale (Landrein, 1977).

Au-delà de la température moyenne du milieu, les perturbations thermiques peuvent résulter de variations brusques de la température de l'eau, induisant des chocs thermiques. Les poissons, en tant qu'organismes ectothermes, sont incapables de réguler activement leur température corporelle, ce qui les rend particulièrement sensibles à ces fluctuations rapides. L'adaptation métabolique nécessaire pour compenser ces variations exige une dépense énergétique conséquente, entraînant un état de stress physiologique. Ce stress peut se traduire par une anorexie

temporaire et, en cas d'amplitude thermique excessive, conduire à une mortalité accrue due à une altération des fonctions physiologiques essentielles (Hoffman et al., 2003).

Un choc thermique peut également provoquer une forte décharge d'hormones gonadotropes chez les femelles qui vont frayer le lendemain, même si les conditions optimales ne sont pas réunies (Gillet, 1989). Les alevins n'ont pas forcément fini leur développement. Ils seront fragilisés et ne pourront se développer dans les conditions idéales. De plus, ils ne seront pas en mesure de compenser métaboliquement les variations de température, ce qui implique une diminution de leur survie (Coutant, 2006).

L'eau peut absorber une partie de l'énergie thermique seulement si les variations sont faibles. C'est pourquoi les organismes ont développé des systèmes enzymatiques fonctionnant pour une échelle de température restreinte. Les fluctuations importantes pourront entraîner une mortalité chez les espèces sténothermes qui ne sont pas capables de s'adapter dans un temps relativement faible. La mort est causée par différents facteurs actuellement mal connus : des effets de dénaturation plus ou moins importants sur les macromolécules (Gilles et Ancill, 2006).

Des simulations prévoient un déplacement des aires de répartition des espèces de poissons d'eau froide vers les zones amont (Onema, 2014). Les espèces présentes en tête de bassin verraient leur habitat se restreindre à des refuges en altitude, augmentant ainsi le risque d'extinction dans les bassins de faible altitude. À l'inverse, les espèces situées plus en aval des bassins pourraient bénéficier de ces changements. En conséquence, certaines espèces devraient connaître une augmentation de leur richesse spécifique, bien que leur répartition géographique reste limitée (Daufresne et Boet, 2007).

2.3.2 Impact sur la flore

L'impact des variations de la température de l'eau sur la flore aquatique sont bien moins documentés.

La production de matière organique végétale (biomasse), issue de la photosynthèse, par des organismes autotrophes (producteurs primaires) est fonction de la disponibilité en lumière et en nutriments. Elle peut néanmoins être impactée par la température. Le taux de croissance du phytoplancton évolue en fonction de la température de l'eau, chaque espèce ayant sa plage de croissance optimale correspondant à une gamme de température. Une augmentation de la température favorise la production de biomasse, pouvant favoriser les phénomènes d'eutrophisation, lorsque les concentrations en nutriments sont suffisantes.

L'augmentation de la production primaire entraîne une augmentation de la production secondaire.

2.3.3 Effets sur la qualité de l'eau

La température de l'eau a une influence sur les paramètres physico-chimiques de l'eau. Elle contrôle la décomposition de la matière organique, la saturation de l'oxygène dissous et les processus de production primaire, la rétention de nutriments et donc la disponibilité de nourriture.

2.3.3.1 Relation température/oxygène

L'oxygène est un gaz peu soluble dans l'eau. La température détermine en partie la solubilité de l'oxygène (Figure 3) et influe donc directement sur sa concentration. Elle diminue quand la température augmente : de 0 à 30°C, la concentration en oxygène réduit de moitié. Le taux d'oxygène dissous à saturation varie également avec la salinité de l'eau (Villeneuve et al., 2005).

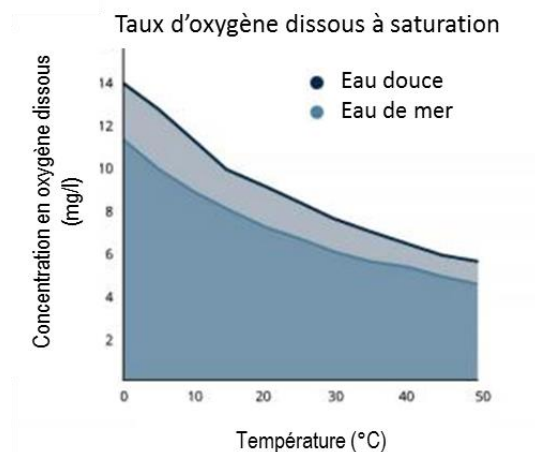


Figure 3 : Variation de la concentration d'oxygène dissous de l'eau en fonction de la température

Les conséquences biologiques de ces modifications sont significatives. Les organismes aquatiques, en particulier les espèces sténothermes comme les salmonidés, possèdent des mécanismes respiratoires étroitement dépendants des concentrations en oxygène dissous. Une élévation de température de °C peut réduire la solubilité de l'oxygène de 30 à 50%, compromettant potentiellement les processus métaboliques et la survie de nombreuses espèces.

Outre les conséquences sur le métabolisme des organismes aquatiques, le manque d'oxygène dans un cours d'eau entraîne une mauvaise qualité des eaux (Carpenter, 2005). L'élévation de la température de l'eau augmente le taux de décomposition des matières organiques, ce qui réduit également l'oxygène dissous (Benson & Krause, 1984). Effectivement, il y a consommation d'oxygène lors de la dégradation des matières organiques par les microorganismes (Wetzel, 2001).

Les conditions hypoxiques (faible teneur en oxygène) intensifient les problèmes dans les écosystèmes déjà touchés par l'eutrophisation (Smith & Schindler, 2009). En situation de faible oxygénation, les bactéries aérobies ne peuvent plus dégrader efficacement la matière organique qui s'accumule alors dans les sédiments (Correll, 1998). En surface, on observe une prolifération des algues qui accélèrent encore ce phénomène. En effet, le taux de croissance des algues dépend de la température, de la concentration des éléments nutritifs et de l'intensité lumineuse (Paerl & Huisman, 2008). Dans une zone de rejet d'eau chaude, il y aura une augmentation de la biomasse algale (O'Neil et al., 2012). Cette augmentation de la productivité des algues mène à une décomposition bactérienne plus importante lors de leur mort et donc, à une diminution plus marquée de la concentration d'oxygène dissous, créant ainsi un cercle vicieux écologique (Diaz & Rosenberg, 2008).

2.3.3.2 Relation température/polluants

Il est également important de noter que certains polluants (cyanures, nitrites) voient leur concentration et leur toxicité augmenter avec la température (Cairns et al., 1975). La solubilité des polluants chimiques augmente généralement avec la température (Schwarzenbach et al., 2003). Une température plus élevée conduit donc à un transfert des polluants fixés sur des particules, vers la phase dissoute de l'eau, les rendant plus biodisponibles pour les espèces aquatiques (Warren & Haack, 2001).

Néanmoins, l'augmentation des températures accélère les cinétiques de dégradation des substances chimiques dans l'environnement. Lorsque la température augmente, la biodégradation et la photodégradation sont plus intenses (Noyes et al., 2009).

Les mécanismes de transformation des contaminants sont régis par des principes thermodynamiques et cinétiques complexes. Les métaux lourds en particulier manifestent des comportements moléculaires remarquables sous l'effet de variations thermiques. L'augmentation de température modifie les équilibres d'adsorption et de désorption, altérant les interactions entre les ions métalliques et les matrices environnementales (Bradl, 2004). Les travaux de

Sauvé et al (2000) ont mis en évidence que chaque degré supplémentaire peut multiplier par un facteur 1,5 à 2,5 la mobilité ionique de certains métaux comme le cadmium et le plomb dans certaines conditions environnementales.

Les composés organiques présentent également des transformations significatives. Les mécanismes de volatilisation, de photodégradation et de biodégradation sont directement modulés par l'énergie thermique. L'augmentation de température accélère exponentiellement les réactions chimiques, avec un doublement approximatif de la vitesse de réaction pour chaque augmentation de 10°C dans de nombreux systèmes biologiques (Schwarzenbach et al., 2003). Cette accélération peut entraîner une dégradation plus rapide de certains polluants, mais aussi une transformation en métabolites parfois plus toxiques que les composés parents (van der Oost et al., 2003).

2.3.4 Réglementation

La gestion de la température de l'eau constitue un défi complexe et multidimensionnel en France, encadré par un dispositif réglementaire précis et évolutif. Depuis la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de 2000, les pouvoirs publics ont développé une approche globale visant à protéger les écosystèmes aquatiques tout en permettant les différents usages humains.

Le Code de l'environnement, à travers ses articles L.214-1 à L.214-6, établit les principes fondamentaux de protection des milieux aquatiques. Cette réglementation s'articule autour d'objectifs ambitieux : préserver la biodiversité, maintenir la qualité des eaux et assurer un équilibre délicat entre activités humaines et environnement naturel.

La vie aquatique sous surveillance thermique : Les poissons sont des indicateurs sensibles.

La réglementation reconnaît la vulnérabilité des écosystèmes piscicoles aux variations thermiques. Ainsi, l'arrêté du 11 janvier 2007 et la circulaire DCE 2007/23 définissent des seuils précis pour différentes espèces :

Pour les salmonidés (truites, saumons), la plage de température optimale se situe entre 9 et 14°C, avec des limites critiques entre 4 et 20°C. Au-delà de 25°C, la survie de ces espèces est compromise.

Les cyprinidés (poissons blancs) tolèrent des températures plus élevées, avec une zone optimale entre 15 et 25°C, et des limites critiques de 6 à 28°C.

L'arrêté du 25 janvier 2010 complète ces dispositions en établissant des critères d'évaluation de l'état écologique des eaux, reconnaissant la température comme un paramètre écologique essentiel.

Les usages humains : entre contraintes et nécessités

- Baignade et activités récréatives

L'arrêté du 5 février 2021 relatif aux critères de qualité des eaux de baignade définit des plages de température assurant le confort et la sécurité des usagers. La zone optimale se situe entre 20 et 25°C, avec des seuils d'alerte en dessous de 12°C et au-dessus de 30°C.

- Conchyliculture : un secteur sensible

L'arrêté du 21 mai 2010 encadre la production conchylicole, reconnaissant la sensibilité de ces écosystèmes aux variations thermiques. La croissance optimale des mollusques se déroule entre 10 et 20°C, avec un seuil de stress thermique identifié au-delà de 25°C.

- Contraintes industrielles : une réglementation stricte

L'arrêté du 2 février 1998 et la circulaire du 18 janvier 2013 imposent des normes drastiques aux rejets industriels:

Limitation de l'échauffement du cours d'eau à 1,5°C

Température maximale de rejet fixée à 30°C

Différence maximale de 2°C avec la température ambiante du milieu récepteur

- Eau potable : des normes sanitaires précises

Le décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 et l'arrêté du 11 janvier 2007 définissent des critères stricts pour l'eau destinée à la consommation humaine :

Température recommandée : 8-12°C au point de distribution

Température maximale admissible : 25°C

Critères organoleptiques imposant une température inférieure à 20°C

Un défi permanent : l'adaptation au changement climatique

La directive 2013/39/UE et l'arrêté du 17 décembre 2012 relatif au plan d'action pour le milieu marin soulignent la nécessité d'une approche dynamique. Le changement climatique impose une adaptation constante des normes et des pratiques, avec une vigilance accrue sur les écosystèmes de transition comme les estuaires.

La température de l'eau est un paramètre clé influençant la qualité et la dynamique des écosystèmes aquatiques. Elle conditionne la solubilité de l'oxygène, la répartition des espèces et leurs processus physiologiques, impactant ainsi leur croissance, reproduction et survie. Les espèces aquatiques, majoritairement ectothermes, s'adaptent aux variations thermiques via des migrations, des modifications physiologiques ou comportementales. L'élévation de température exacerbe la prolifération des microorganismes et des pathogènes, tout en affectant la qualité de l'eau par l'eutrophisation et l'altération des équilibres chimiques. Chez les poissons, les variations thermiques influencent la demande en oxygène, la croissance et la phénologie des cycles de vie. Des chocs thermiques peuvent engendrer un stress physiologique et des perturbations du développement. La température impacte aussi la flore, notamment la croissance du phytoplancton, pouvant favoriser l'eutrophisation. Enfin, la régulation thermique des cours d'eau reste un enjeu, avec une législation en évolution pour encadrer et limiter les effets des rejets thermiques sur les écosystèmes aquatiques.

2.4 Variabilité spatio-temporelle

2.4.1 Variabilité spatiale

Dans les cours d'eau, à l'échelle régionale, la température de l'eau augmente vers l'aval, en suivant un gradient longitudinal. La dynamique de la température des cours d'eau à l'amont des bassins versants est proche de celle des eaux souterraines, car ils sont situés à proximité des sources. Le temps d'équilibre entre les températures de l'air et de l'eau est insuffisant (Kelleher et al., 2012). Avec l'augmentation de la distance depuis la source, l'influence atmosphérique s'intensifie et contrôle plus fortement la température du cours d'eau.

L'eau se réchauffe naturellement lorsqu'elle s'éloigne de sa source. Cette augmentation n'est cependant pas linéaire. En effet, de manière générale, la température des petits cours d'eau augmente plus rapidement que celle des grands cours d'eau (Caissie, 2006), comme le montre le Tableau 1.

Tableau 1 : Réchauffement moyen des cours d'eau, en fonction de leur type (Caissie, 2006)

Type de cours d'eau	Réchauffement moyen
Petit cours d'eau	0,6 °C/km
Grand cours d'eau de plaine	0,09 °C/km

Dans les estuaires, cette augmentation de la température de l'eau n'est plus liée à la distance depuis la source.

A l'échelle du bassin versant de la Loire, de la source à Montjean-sur-Loire, l'augmentation des températures de l'eau entre l'amont et l'aval est visible (Figure 4).

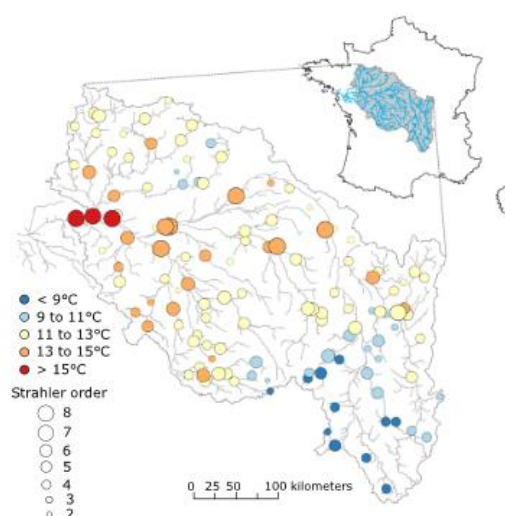


Figure 4 : Distribution spatiale de la température moyenne annuelle des cours d'eau (2008-2012) (Beaufort et al., 2020)

Bien qu'elle soit anecdotique par rapport aux plans d'eau, une stratification verticale peut être observée dans les cours d'eau, pour des profondeurs supérieures à 4 mètres (Caissie, 2006). Elle peut être liée à la présence d'échanges avec une nappe, ou l'apport d'eau avec une température et une densité différente (sous l'effet des marées dans les estuaires). Dans les petits cours d'eau, les stratifications peuvent être liées à l'influence de l'ombrage, des apports de nappe ou des échanges avec la zone hyporhéique (Moore et al., 2005). Dans les cours d'eau, la stratification verticale est néanmoins moindre que dans les plans d'eau.

Dans les estuaires, la stratification verticale des eaux est liée à l'apport d'eau salée, venant de l'océan, avec une densité plus importante que les eaux douces, arrivant de l'amont. Le mode de pénétration des eaux marines diffère

selon les conditions hydrologiques et entraîne une stratification de la colonne d'eau d'autant plus forte que le débit est élevé et le coefficient de marée faible.

2.4.2 Variabilité temporelle

Dans la zone fluviale de la Loire, la température de l'eau suit des variations dans le temps, à l'échelle interannuelle (Figure 5), à l'échelle saisonnière (Figure 6), à l'échelle des événements hydrologiques, à l'échelle journalière (Figure 7 et Figure 8). Dans la partie estuarienne, des variations de la température de l'eau sont également dues au cycle de la marée.

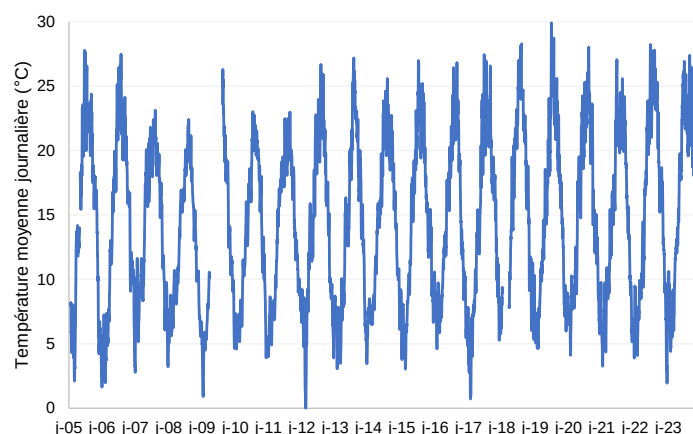


Figure 5 : Températures moyennes journalières de 2005 à 2023 à Montjean/Loire – variations interannuelles (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)

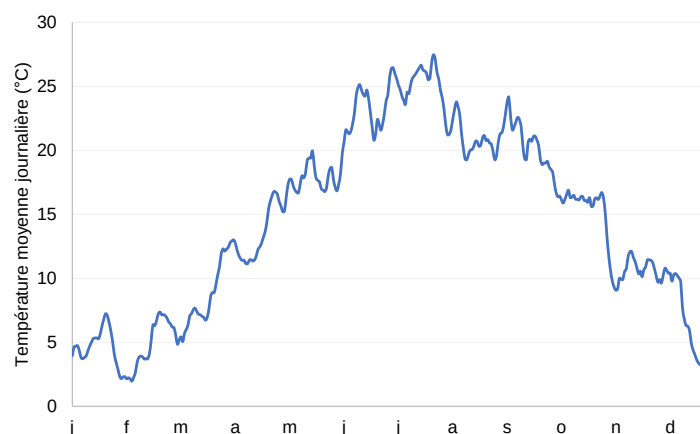


Figure 6 : Températures moyennes journalières en 2006 à Montjean/Loire – variations annuelles (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)

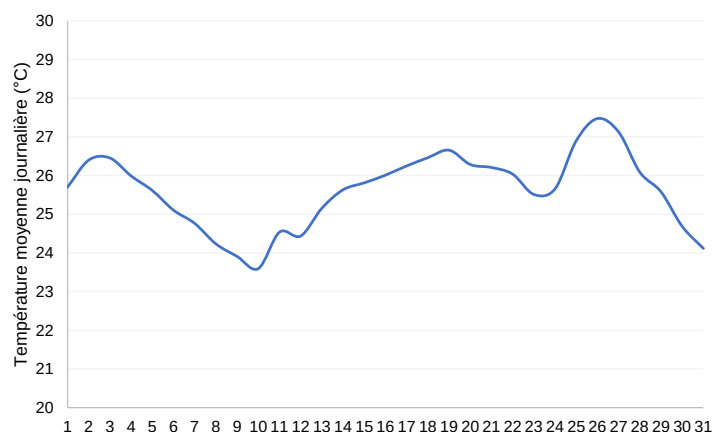


Figure 7 : Températures moyennes journalières en juillet 2006 à Montjean/Loire – variations journalières (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)

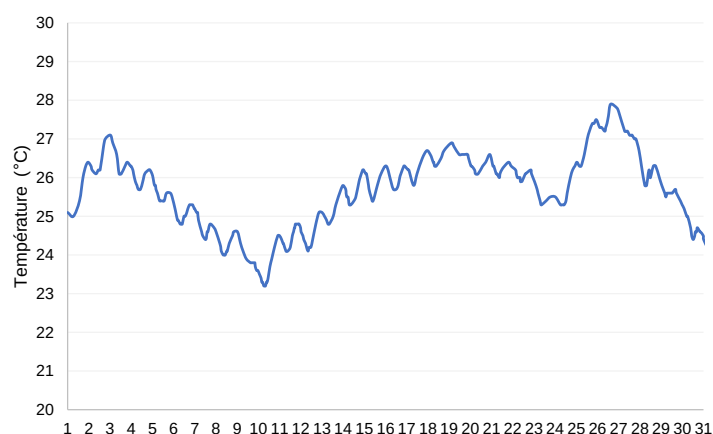


Figure 8 : Températures instantanées en juillet 2006 à Montjean/Loire – variations journalières (d'après DREAL Pays de la Loire, 2008)

Les variations de la température de l'eau observées à l'échelle de la semaine, du mois, ou de l'année dépendent des conditions climatiques, hydrologiques (débits du fleuve, apports des affluents, échanges avec les eaux souterraines) et des activités anthropiques. Au contraire, les variations à l'échelle de la journée sont plutôt gouvernées par l'énergie solaire et l'impact des marées dans les estuaires (Johnson et al., 2014).

A l'échelle de la journée, les températures de l'eau minimales sont mesurées respectivement à l'aube et en fin d'après-midi, en suivant les variations de la température de l'air (Caissie et al., 2006). Les grands cours d'eau ont une inertie thermique importante, liée en partie au débit, qui limite les amplitudes de température (Caissie, 2006). L'amplitude diurne est généralement maximale pour les cours d'eau avec une largeur supérieure à 50 mètres et une profondeur inférieure à 1,5 mètre (Caissie et al., 2006). Les conditions hydrologiques influencent les variations journalières de la température, en favorisant l'homogénéisation du cours d'eau lorsque le débit augmente. Une baisse de l'amplitude journalière est observée lors d'épisode de crues (Moatar et al., 2009). Enfin, plusieurs études ont montré que la présence de ripisylve peut diminuer les écarts de température, en limitant le maximum journalier (Garner et al., 2014).

La composante annuelle peut être représentée par une sinusoïde, qui atteint son maximum durant les mois de juillet et août. Le minimum est atteint en janvier. Elle explique généralement plus de 90% de la variance annuelle

des températures journalières moyennes (Smith, 1981). Les températures élevées en été sont liées au réchauffement saisonnier de l'atmosphère. La hausse de température est plus marquée lorsque les débits sont faibles. En hiver, les températures atmosphériques sont plus faibles et sont concomitantes aux apports d'eau froide provenant du Massif Central.

La température des cours d'eau varie selon des facteurs spatiaux et temporels.

Spatialement, elle augmente vers l'aval sous l'influence croissante de l'atmosphère, bien que ce réchauffement soit plus rapide dans les petits cours d'eau. Une stratification verticale peut apparaître dans les eaux profondes et les estuaires en raison des échanges avec les nappes et des apports marins.

Temporellement, la température fluctue à différentes échelles : interannuelle, saisonnière, journalière et en fonction des événements hydrologiques. Elle suit généralement une courbe sinusoïdale annuelle avec un maximum en été et un minimum en hiver. Les variations quotidiennes sont régies par l'ensoleillement et les marées, tandis que la ripisylve et les débits influencent l'amplitude thermique.

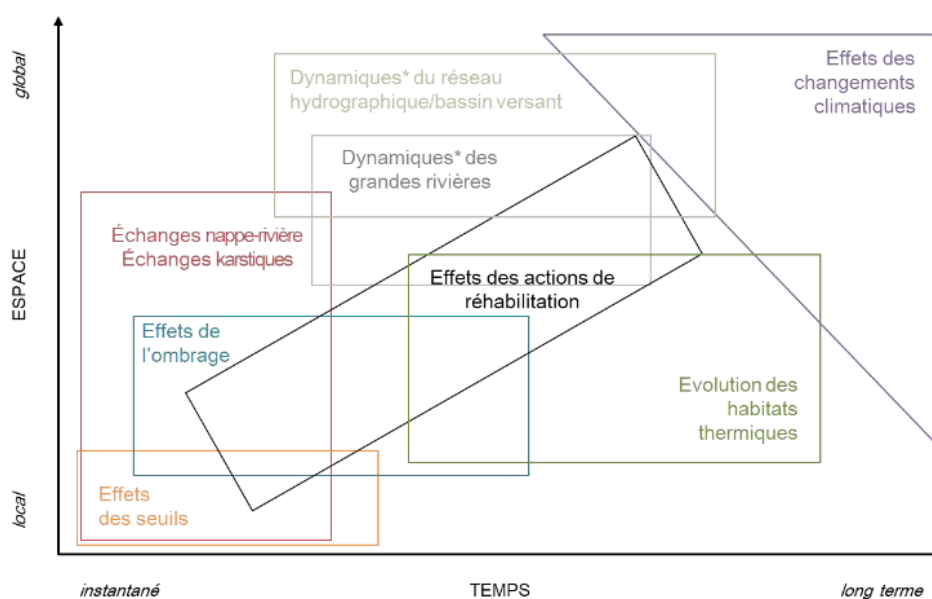


Figure 9 : Echelles spatiale et temporelle des enjeux et questions liés à la température des cours d'eau (Marteau et al., 2024)

2.5 Changement climatique et température de l'eau

Le changement climatique est déjà en cours sur le bassin de la Loire et ses affluents. Les impacts s'observent sur les variables influençant la température de l'eau dans l'estuaire : la température de l'air, les débits et la température de l'océan.

L'ensemble des études scientifiques internationales s'accordent sur une augmentation de la température moyenne de l'air au niveau mondial, en partie due aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Une augmentation significative des températures moyennes annuelles de l'air sur le bassin de la Loire est observée, depuis 1980 (entre 0,8°C et 1,5 °C selon les lieux). Selon le scénario RCP 2.6 défini dans les rapports du GIEC, le réchauffement de la température de l'air sur le bassin de la Loire est de l'ordre de 1 à 1,5 °C, à l'horizon 2055, par rapport à la période de référence 1976 - 2005. Avec un scénario pessimiste (RCP 8.5), la hausse des températures de l'air pourra atteindre 2°C à 2,5°C en 2055 (Raisson-Victor et al., 2022 ; Raisson-Victor et al., 2023). Outre le réchauffement des températures, le nombre de jours avec des températures supérieures à 35°C devrait également augmenter, passant de 3 jours au milieu du siècle, à plus de 10 jours en 2100. Les vagues de chaleur (définies comme des périodes de 5 jours ou plus avec une température maximale supérieure à 5°C par rapport à la normale) montrent la même tendance, avec des périodes plus longues (qui pourront atteindre 50 jours en 2071 – 2100), plus sévères et plus précoces.

Ces mêmes scénarios envisagent une diminution des débits de la Loire de 20 à 50 %, à l'horizon 2070, par rapport à la période de référence 1971 – 2000.

Le réchauffement de l'Océan Atlantique est également bien documenté. La température des eaux de l'Atlantique a plus augmenté au cours du dernier siècle que depuis la fin de la dernière période glaciaire. Ce phénomène devrait se poursuivre. L'océan absorbera 2 à 4 fois plus de chaleur à la fin du siècle, pour le scénario RCP 2.6, que pendant la période 1976 – 2015, et jusqu'à 5 à 7 fois plus pour le scénario RCP 8.5. Les vagues de chaleur marines seront plus nombreuses, plus longues et plus intenses (Raisson-Victor et al., 2022 ; Raisson-Victor et al., 2023).

Plusieurs travaux montrent une tendance à la hausse des températures de la Loire (Moatar et al., 2010 ; Beaufort et al., 2015 ; Raisson-Victor et al., 2022 ; Raisson-Victor et al., 2023). Moatar et Gailhard (2006) ont mis en évidence une augmentation de la température moyenne annuelle et estivale de la Loire d'environ 0,8°C, depuis le siècle dernier. Cette élévation de la température s'accroît depuis la fin des années 1980, du fait des températures de l'air plus élevées, de la diminution de la vitesse du vent, et de la diminution des débits d'étiage, notamment en période estivale (Gosse et al., 2009).

Cette augmentation des températures de l'eau est due à des températures de l'air plus chaudes et à un abaissement des débits et des niveaux piézométriques (Medde, 2012 ; Brugeron et al., 2013).

Le modèle T-NET, sur la base de 13 projections climatiques (4ème rapport du GIEC) et de 15 projections hydrologiques (modèle EROS, projet ICC-Hydroqual), simule une augmentation moyenne de la température de la Loire de 2,9 °C ($\pm 0,7^\circ\text{C}$), à l'horizon 2100, par rapport à la période 1994 - 2011. La hausse des températures sera plus importante au printemps et à l'automne (+ 3,0 °C), qu'en été (+2,6°C), sous l'effet de l'augmentation des pertes énergétiques (Beaufort et al., 2015).

L'augmentation des températures et la disponibilité en eau de la région entraînent une augmentation significative des pertes par évapotranspiration (entre +18 et +35 % selon les projections) (Monteil, 2011).

Le saumon d'Atlantique constitue un modèle emblématique de cette thermosensibilité. Un seuil critique de 24°C représente une température létale pour l'espèce, au-delà de laquelle les mécanismes physiologiques s'effondrent. Les projections climatiques anticipent un déplacement significatif de ce seuil critique, avec des conséquences potentiellement dramatiques pour les populations piscicoles.

Beaufort (2015) montre que l'occurrence simulée de températures supérieures à 24°C s'accroît fortement au cours du siècle sur l'ensemble du réseau. Alors que le seuil de 24°C se situe aujourd'hui à Villerest, il serait d'ici la fin du siècle vers Bas-en-Basset, une centaine de kilomètres en amont. Moatar montre également un avancement de

date du dépassement du seuil thermique de 16°C (température de reproduction de la grande alose) de 20 à 30 jours, sur la Loire, de Bas-en-Basset à Montjean-sur-Loire, à l'horizon 2081 – 2100, par rapport à la période 1971 – 1990 (Figure 10).

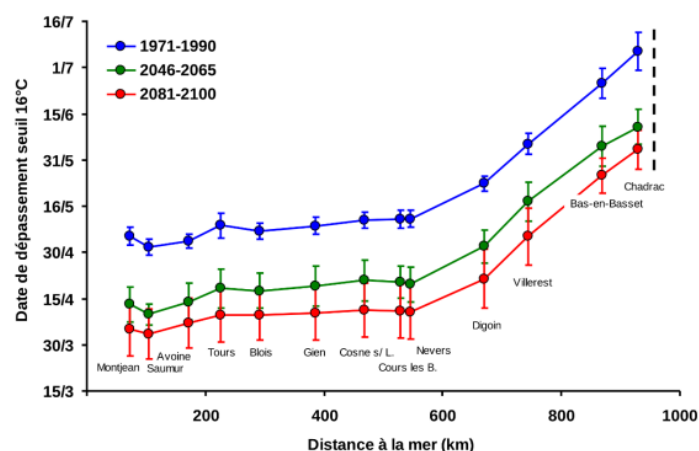


Figure 10 : Evolution de la date de dépassement du seuil de 16°C en fonction de la distance à la mer (en km) pour la période de référence 1971-1990 (en bleu), le milieu du siècle (en vert) et la fin du siècle (en rouge).
Extrait de Moatar (2014)

L'interaction entre température, débit et ressource hydrique crée un système de d'interactions complexes et potentiellement déstabilisantes. Les scénarios climatiques anticipent une diminution des débits de la Loire de 20 à 50% à l'horizon 2070, combinée à une élévation thermique significative. Cette double contrainte génère des effets multiplicateurs. La réduction des débits amplifie mécaniquement les variations de température. Les masses d'eau plus restreintes et moins dynamiques s'échauffent plus rapidement, réduisant leur capacité de thermorégulation naturelle.

Les pertes par évapotranspiration illustrent parfaitement ces mécanismes. Les projections indiquent une augmentation de 18 à 35% de ces pertes, traduisant une pression croissante sur les ressources hydriques. Chaque degré supplémentaire amplifie exponentiellement ces mécanismes de déperdition.

Les blooms algaux représentent un marqueur particulièrement révélateur de ces dynamiques. L'augmentation des températures favorise leur développement, avec des conséquences potentiellement dramatiques sur la santé des écosystèmes et les activités humaines.

Le changement climatique affecte déjà le bassin de la Loire, entraînant une augmentation des températures de l'air, une diminution des débits et un réchauffement de l'océan. Depuis 1980, la température moyenne annuelle de l'air a augmenté de 0,8 à 1,5°C et pourrait atteindre +2,5°C en 2055 selon les scénarios du GIEC. Les vagues de chaleur et les jours à plus de 35°C devraient aussi s'intensifier.

Les débits de la Loire pourraient chuter de 20 à 50 % d'ici 2070. L'Atlantique se réchauffe rapidement, augmentant les vagues de chaleur marines. Ces changements entraînent une hausse des températures de l'eau de la Loire,

avec une augmentation moyenne estimée à 2,9°C d'ici 2100. Ce réchauffement impacte les écosystèmes aquatiques, favorise l'évapotranspiration et modifie les seuils thermiques critiques pour les espèces comme le saumon et la grande alose.

Enfin, ces évolutions influencent les activités industrielles et humaines. Les blooms algaux estivaux risquent de devenir plus fréquents, affectant la santé et les loisirs.

2.6 Mesure de la température de l'eau

La mesure précise de la température dans les milieux aquatiques constitue un enjeu essentiel pour la compréhension des processus hydrodynamiques et des interactions thermiques avec l'environnement. La variabilité spatio-temporelle des gradients thermiques impose le recours à des méthodes instrumentales adaptées aux conditions spécifiques des milieux étudiés.

La température de l'eau est généralement exprimée en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$). La fréquence et le site de mesure peuvent varier en fonction des objectifs du suivi thermique. La température étant souvent un paramètre associé pour l'interprétation d'autres paramètres, la fréquence de mesure est adaptée au paramètre étudié et au contexte hydrologique. Dans les estuaires, les gradients peuvent être très marqués, la mesure de température se fait généralement à $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Au-delà du capteur, il est essentiel de considérer l'ensemble du montage, pour limiter les erreurs liées aux effets thermiques.

Le choix d'une technologie de mesure dépend de plusieurs paramètres. Tout d'abord, la précision requise joue un rôle déterminant dans la sélection du capteur, certains instruments offrant une résolution plus fine que d'autres. Ensuite, les conditions environnementales, qu'il s'agisse d'un milieu aquatique calme ou turbulent, influencent également le choix du dispositif. Les contraintes budgétaires doivent être prises en compte, car certaines technologies, comme le DTS ou l'imagerie infrarouge, nécessitent un investissement conséquent. Enfin, les objectifs de l'étude, qu'il s'agisse d'une surveillance continue, de campagnes de mesure ponctuelles ou d'une cartographie thermique détaillée, guident également la sélection de l'instrumentation la plus adaptée.

Les capteurs de température exploitent différentes propriétés physiques pour convertir une variation thermique en signal quantifiable. Certains capteurs utilisent la variation de résistance électrique des matériaux conducteurs, comme les RTD et les thermistances, tandis que d'autres, à l'image des thermocouples, reposent sur la génération d'une tension électrique aux jonctions de métaux différents. Il existe également des techniques plus avancées, comme le Distributed Temperature Sensing (DTS) et l'imagerie infrarouge, qui exploitent l'interaction des ondes lumineuses avec le milieu étudié.

Les performances des capteurs thermiques sont évaluées selon plusieurs critères. La précision détermine leur aptitude à fournir une valeur proche de la température réelle, tandis que la résolution caractérise la plus petite variation détectable. La linéarité, qui décrit la proportionnalité entre la variation thermique et le signal mesuré, influence directement la qualité des relevés. Le temps de réponse, qui représente la rapidité d'adaptation aux fluctuations thermiques, est également un paramètre crucial. Par ailleurs, la gamme de mesure détermine l'étendue des températures que le capteur peut enregistrer, tandis que la stabilité garantit le maintien des performances sur le long terme.

2.6.1 Capteurs à résistance électrique

Détecteurs de température à résistance (RTD)

Ces capteurs fonctionnent sur le principe de la variation linéaire de la résistance des métaux purs en fonction de la température. Ils sont particulièrement appréciés pour leur haute précision, qui peut varier de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ à $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, ainsi que pour leur excellente stabilité à long terme. Toutefois, leur temps de réponse relativement lent peut constituer un inconvénient dans certaines applications. Le platine est souvent utilisé comme matériau de référence, notamment dans les modèles Pt100 et Pt1000 (Techniques standard de métrologie thermique ISO 60751).



Thermistances

Contrairement aux RTD, les thermistances présentent une variation exponentielle de la résistance des semi-conducteurs en fonction de la température. Elles se distinguent par leur sensibilité élevée, qui permet des mesures très fines, et par leur temps de réponse rapide, souvent de l'ordre de la seconde. Toutefois, leur relation non linéaire entre résistance et température nécessite une calibration rigoureuse, et leur gamme de mesure est plus restreinte que celle des RTD



2.6.2 Technologies à transduction thermoélectrique

Thermocouples

Les thermocouples exploitent l'effet Seebeck, qui génère une tension aux jonctions de deux métaux différents soumis à un gradient thermique. Ils se distinguent par une plage de mesure très large, allant de -270°C à $+1372^{\circ}\text{C}$, ainsi que par un temps de réponse extrêmement rapide, de l'ordre de la milliseconde. Leur faible coût et leur robustesse en font des instruments privilégiés dans de nombreux contextes industriels et environnementaux. Cependant, leur précision est moindre par rapport aux RTD, et ils nécessitent une compensation pour corriger les écarts dus aux effets parasites. De plus, ils peuvent être sujets à une dérive à long terme (Normes industrielles IEC 60584).



2.6.3 Technologies optiques

Distributed Temperature Sensing (DTS)

Le Distributed Temperature Sensing (DTS) repose sur l'analyse des diffusions Raman dans une fibre optique, ce qui permet de mesurer la température en continu sur toute la longueur du câble. Cette technologie est particulièrement adaptée aux études environnementales nécessitant des mesures distribuées. Elle est couramment utilisée pour la cartographie thermique des cours d'eau et pour l'étude des interactions entre nappes et rivières. Toutefois, son principal inconvénient réside dans la complexité du traitement du signal, ainsi que dans son coût d'investissement élevé, ce qui peut limiter son déploiement à grande échelle.

2.6.4 Télédétection thermique

Imagerie infrarouge

L'imagerie infrarouge permet d'évaluer la température de surface de l'eau en analysant le rayonnement infrarouge qu'elle émet (Figure 11). Elle offre une résolution spatiale élevée et permet de couvrir de larges surfaces en un temps très court. Cette technique est particulièrement utilisée pour surveiller les variations thermiques sur de vastes territoires et pour détecter des anomalies thermiques locales. Toutefois, elle reste sensible aux conditions atmosphériques et aux effets de réflexion, ce qui peut introduire des incertitudes dans les mesures. De plus, une calibration rigoureuse est indispensable afin de limiter ces erreurs et garantir une mesure fiable (Marteau et al., 2024).

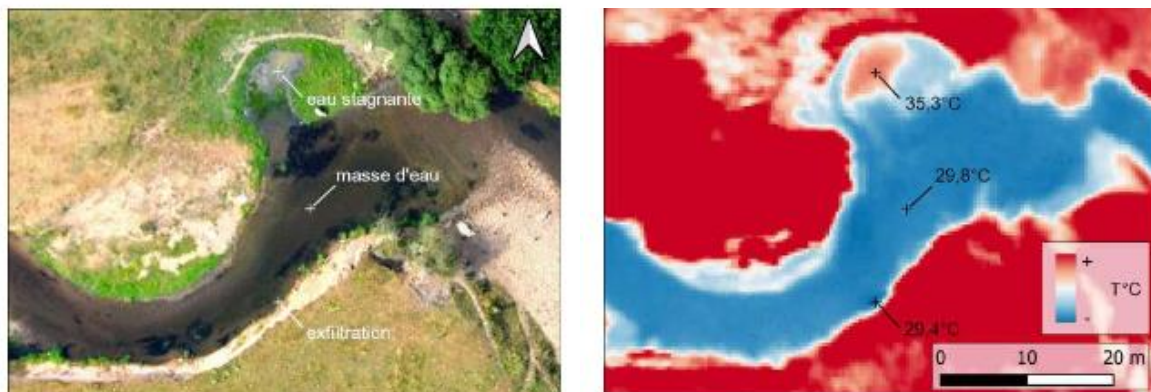


Figure 11 : Illustration de la température de la Bourbince (71). Survol réalisé le 24/07/2019, avec une température de l'air supérieure à 39°C. A gauche : orthophoto. A droite : image thermique, le bleu représentant les zones froides et le rouge les zones chaudes (Marteau et al., 2024)

3 Présentation des données

3.1 Présentation de la zone d'étude

Traversant 9 régions et 25 départements, la Loire est, avec ces 1012 km de long, le plus long fleuve de France (Figure 12). Subdivisé en trois parties : haute Loire, Loire moyenne et Loire océane (basse Loire) ; le fleuve prend sa source au Mont Gerbier de Jonc (Ardèche) et rejoint l'océan à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). Le bassin versant de la Loire couvre 118 000 km², soit près d'un cinquième du territoire métropolitain. Le régime hydrologique de la Loire témoigne également de sa spécificité, alternant périodes de crue et d'étiage, pour un débit moyen annuel à la station fluviale de référence de Montjean-sur-Loire de 845 m³/s. Les variations de son hydrologie sont relativement fortes avec un débit journalier minimal de 50 m³/s atteint lors de l'étiage très sévère de 1949 et maximal de 6300 m³/s lors de la crue centennale de 1910.

Au cours du temps, les usages anthropiques du fleuve ont façonné le territoire à travers le développement d'activités tournées principalement vers l'élevage, le maraîchage ou encore la viticulture. Bien que le fond de vallée soit inondable, les agglomérations se sont développées tout au long du fleuve, la plus peuplée étant Nantes (environ 680 000 habitants).

La vallée alluviale de Loire, de la Maine à la mer, se caractérise par une mosaïque de milieux de près de 55 000 hectares. La partie estuarienne en aval de Nantes, représente à elle seule, 20 000 hectares et est riche d'une grande diversité d'habitats (plus ou moins humides, plus ou moins salés) qui en fait un site remarquable composé de vasières, de roselières et de prairies humides.



Figure 12 : Carte du bassin versant de la Loire, de sa source à l'embouchure (d'après cartographie DIREN Centre, 2003 – Donnée ©SRTM NASA/JPL -© BDCarthage – IGN)

Lieu de rencontre entre le fleuve et l'océan, l'estuaire de la Loire s'étend sur 97 km de l'embouchure à Saint-Nazaire à Anetz. Les apports d'eau de mer à l'estuaire sont aujourd'hui estimés à 150 milliards de m³/an, quand ceux d'eau douce varient entre 13 et 45 milliards de m³/an. L'estuaire dynamique est caractérisé par la marée et le volume d'eau oscillant qu'elle génère. La notion de dynamisme est induite par une variation dans le temps et de l'intensité du phénomène de marée qui s'amortit peu à peu vers l'amont, par confrontation au débit du fleuve. En période de faible débit et de marée de vives eaux, l'impact de cette onde de marée peut être observé jusqu'à Anetz (97 km de l'embouchure à Saint-Nazaire), délimitant l'estuaire.

Les quantités d'eau apportées par le fleuve et l'océan s'inscrivent dans une géométrie donnée. Elles se traduisent par des hauteurs d'eau enregistrées en continu par une vingtaine d'appareils entre Les Ponts-de-Cé et Saint-Nazaire (Figure 13). Si la forme du lit du fleuve reste la même, les niveaux d'eau varient en fonction du débit du fleuve et du coefficient de marée, et sont influencés par les paramètres météorologiques : direction et force du vent, pression atmosphérique.

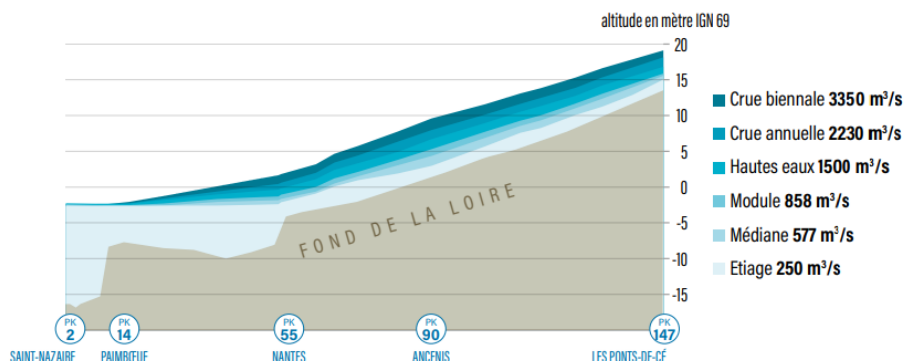


Figure 13 : Variation des hauteurs d'eau en fonction du débit du fleuve, en vives eaux et à basse mer

Dans la Loire, la hauteur d'eau peut varier de près de 8 mètres entre un étiage et une crue, en fonction des apports en eau. L'influence du débit sur la hauteur d'eau diminue en aval de Nantes pour quasiment disparaître en aval de Paimbœuf.

3.2 Température de l'eau

Les données de température utilisées dans le cadre de cette étude proviennent de différents producteurs.

3.2.1 Données du réseau SYVEL

Le territoire d'études du GIP Loire Estuaire se situe au débouché du bassin versant de la Loire, entre la Maine et l'océan Atlantique, sur une distance d'environ 150 km, des Ponts-de-Cé à Saint-Nazaire. L'estuaire de la Loire est un milieu complexe où se mélangent les eaux douces du fleuve et salées de l'océan. Une partie de ce territoire est soumise à l'influence de la marée. Un estuaire dynamique est ainsi défini jusqu'à Ancenis, à près de 100 km de Saint-Nazaire. Il comprend une zone de forte turbidité (aussi appelée « bouchon vaseux » qui se caractérise par une forte concentration en matières en suspension), des gradients de salinité, de température et d'oxygène dissous. La variabilité de ces phénomènes est forte et dépend en grande partie des apports en eau douce (débit du fleuve) et de la dynamique marine (coefficient de marée).

Le réseau de mesures SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire), propriété du GIP Loire Estuaire a été mis en place en 2006, pour un début opérationnel en janvier 2007. Les objectifs de ce réseau sont multiples. Il vise à suivre l'évolution à long terme des grands paramètres estuariens (salinité, oxygène dissous, matières en suspension), à quantifier les impacts des aménagements potentiels et à comprendre les différents processus mis en jeu.

Le réseau, composé de 10 stations (au 31/12/2023), mesure la température de l'eau à une fréquence de 10 à 30 minutes (selon l'année). D'autres paramètres sont également mesurés sur les stations. La mesure est effectuée à une profondeur d'un mètre sous la surface. Au niveau de la station de Donges, un deuxième point de mesure est installé à quatre mètres sous la surface. Les stations (à l'exception de Bellevue) sont installées sur des pontons, à proximité de la rive. La station de Bellevue est installée sur une pile de pont, dans le chenal. Les coordonnées des stations sont détaillées dans le Tableau 2.

Deux stations complémentaires, gérées par EDF à Cordemais et par Nantes Métropole à Mauves/Loire, mesurent les températures. Les données sont intégrées aux données du réseau SYVEL

Tableau 2 : Coordonnées des stations du réseau de mesures SYVEL

Station	Coordonnées (Lambert 93)		pK (référentiel GIPLE)	Profondeur de mesure
	X	Y		
Montoir-de-Bretagne	311 337	6 701 330	5,0	Sub-surface (-1m)
Donges	316 217	6 701 835	9,5	Sub-surface (-1m)
Donges	316 217	6 701 835	9,5	Fond (-4m)
Paimboeuf	320 835	6 699 610	15,0	Sub-surface (-1m)
Cordemais	331 618	6 697 256	26,0	Sub-surface (-1m)
Le Pellerin - avant 2009	339 832	6 689 032	38,0	Sub-surface (-1m)
Le Pellerin - après 2009	340 068	6 689 018	38,5	Sub-surface (-1m)
Trentemoult	353 253	6 687 311	52,0	Sub-surface (-1m)
Bellevue	361 824	6 690 829	62,0	Sub-surface (-1m)
Thouaré-Saint Julien	365 769	6 693 909	67,0	Sub-surface (-1m)
Pierre Percée	368 308	6 695 766	70,0	Sub-surface (-1m)
Oudon	376 230	6 702 300	81,5	Sub-surface (-1m)

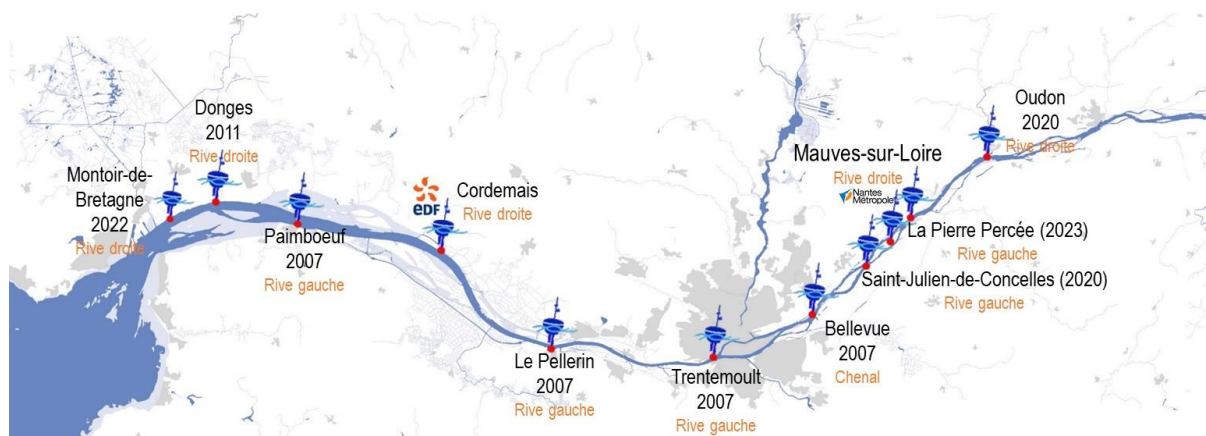


Figure 14: Carte du réseau SYVEL au 31/12/2023

La technologie de mesure a évolué depuis la mise en place du réseau de mesure en 2007 (Tableau 3). A l'origine, pour les stations de Trentemoult, Le Pellerin, Paimboeuf et Donges, des stations estuariennes de type MAREL étaient installées. Elles permettaient de prélever l'eau dans la Loire, et de l'acheminer vers une chambre de mesures où étaient situés les différents capteurs. La station de Bellevue, installée sur une pile de pont, était équipée d'une sonde multi-paramètres SMATCH. Ces capteurs, autonomes en énergie, étaient directement immergés dans la Loire.

Depuis 2018, les stations MAREL sont progressivement remplacées par des sondes multiparamètres de type SAMBAT ou WIMO. Ces capteurs, autonomes en énergie, sont directement immergés dans la Loire.

Les données de l'ensemble des stations sont transmises par GPRS ou FTP, sur les serveurs du GIPLE.

Tableau 3 : Descriptif du réseau de mesures SYVEL (2007-2023)

Station	Pas de temps de la mesure	Validation	Type sonde	Exactitude capteur	Période active	Gestionnaire
Oudon	10 minutes	Oui	WIMO	0,05°C	2021 - 2023	GIP Loire Estuaire
Thouaré/Saint Julien	10 minutes	Oui	WIMO	0,05°C	2021 - 2023	GIP Loire Estuaire
Bellevue	10 à 30 minutes	Oui	SMATCH / SAMBAT	0,05°C	2007 - 2023	GIP Loire Estuaire
Trentemoult Marel	10 à 30 minutes	Oui	MAREL	0,05°C	2007 - 2018	GIP Loire Estuaire
Trentemoult Sambat	10 minutes	Oui	SAMBAT	0,05°C	2018 - 2023	GIP Loire Estuaire
Le Pellerin Marel	10 à 30 minutes	Oui	MAREL	0,05°C	2007 - 2018	GIP Loire Estuaire
Le Pellerin Sambat	10 minutes	Oui	SAMBAT	0,05°C	2007 - 2023	GIP Loire Estuaire
Cordemais	1 heure	Contrôle		0,05°C	2007 - 2023	EDF Cordemais
Paimbœuf Marel	10 à 30 minutes	Oui	MAREL	0,05°C	2007 - 2018	GIP Loire Estuaire
Paimboeuf Sambat	10 minutes	Oui	SAMBAT	0,05°C	2018 - 2023	GIP Loire Estuaire
Donges -1 m Marel	15 minutes	Oui	MAREL	0,05°C	2011 - 2021	GIP Loire Estuaire
Donges -1 m Sambat	10 minutes	Oui	SAMBAT	0,05°C	2021 - 2023	GIP Loire Estuaire
Donges -4 m Marel	15 minutes	Oui	MAREL	0,05°C	2011 - 2021	GIP Loire Estuaire
Donges -4 m Wimo	10 minutes	Oui	WIMO	0,05°C	2021 - 2023	GIP Loire Estuaire
Montoir-de-Bretagne	10 minutes	Oui	WIMO	0,05°C	2022 - 2023	GIP Loire Estuaire

Les données de Nantes Métropole, à la station de Mauves/Loire, ne sont pas prises en compte dans cette étude. Le capteur est installé dans un pot à niveau constant dans une canalisation. La comparaison avec les autres données est difficile, les conditions de mesures n'étant pas identiques.

Des mesures complémentaires aux stations fixes sont disponibles, sous forme de campagnes, depuis 2000.

Les campagnes des années 2000 à 2006 ont été effectuées par le bureau d'études HOCER, pour le GIPLE.

Depuis 2019, le GIPLE réalise des profils hydrologiques, entre le pont de Mauves/Loire et le pont de Saint-Nazaire. Des mesures sont réalisées sur la colonne d'eau, à pleine mer locale et basse mer locale. Pour les campagnes longitudinales, les températures sont mesurées dans le chenal de navigation. Des transects sont également réalisés au droit des stations SYVEL.

Les profils sont réalisés avec une sonde multi-paramètres de type SAMBAT ou WIMO (fabricant NKE). Les mesures sont effectuées lors de la remontée de la sonde, après un temps de stabilisation de 5 minutes au fond. La fréquence de mesure est fixée à 5 secondes.

Le Tableau 4 reprend les conditions des différentes campagnes.

Tableau 4 : conditions des campagnes des profils réalisées par le GIPLE

Date campagne	02/09/2019	03/09/2019	11/02/2021	23/02/2021	25/05/2022	01/12/2022	07/07/2023
Coefficient marée	111-107	102-96	85-88	37-43	54-55	53	89-86
Débit journalier	99	98	3624	1510	228	303	207
Débit 30 jours	106	106	2423	2810	295	210	262
Sonde utilisée	Sambat 37022	Sambat 37022	Sambat 38012	Sambat 37022	WIMO 5256	WIMO 5247	WIMO 55f6
Conditions météorologiques	Ensoleillé	Ensoleillé	Neigeux	Ensoleillé			
Vent moyen	8,5	9,9	22,5	18,5			
Vent rafale	17,7	28,8	43,2	54,0	39,6	37,4	
Vent direction	N	NNO	E	SSE	O	NE	
Trajet effectué	Bellevue / Saint-Nazaire	Mauves-sur-Loire / Saint-Nazaire	Saint-Nazaire / Trentemoult	Saint-Nazaire / Coueron	Saint-Nazaire / Bellevue	Saint-Nazaire / Bellevue	Cordemais / Mauves sur Loire
Nombre mesures PM	28		7	11	12	19	13
Nombre mesures BM			11	12	21	16	13
Transects	Non	Station SYVEL	non	transects pk 13 et pk 15 au jasant		non	non

3.2.2 Données de la DREAL Pays de la Loire

La DREAL Pays de la Loire a mis en place un suivi de la température de l'eau, au droit des stations hydrométriques de Montjean-sur-Loire (depuis 2005) et Saumur (depuis 2012). Les capteurs transmettent des mesures en continu. Les données fournies sont des mesures à pas de temps variable (Tableau 5).

Tableau 5 : Coordonnées des stations de la DREAL Pays de la Loire

Station	Montjean/Loire	Saumur
Coordonnées X (Lambert 93)	408 856	467 503
Coordonnées Y (Lambert 93)	6 706 219	6 689 207
Date mise en service	21/01/2005	23/08/2012
Code station	M530 0010 10	L800 0010 20
Type capteur	sonde PT100	sonde PT100
Exactitude capteur	0,1°C	0,1°C
pK (référentiel GIPLE)	117	
Profondeur de mesure	fond	fond

3.2.3 Données de l'IFREMER

La station de mesure Molit constitue un des systèmes de mesure du service national d'observation (SNO) haute fréquence COAST-HF (Coastal Ocean observing SysTem High Frequency). Elle est installée depuis 2008 en baie de Vilaine (position : 47.460067 ; -2.656583). Elle est équipée d'une sonde multiparamètres MP6 qui mesure : température, salinité, oxygène dissous, turbidité et fluorescence. Les mesures sont réalisées à 2 niveaux (surface et fond) avec une fréquence horaire (Lesbats Stephane (2022)).

Les données sont récupérées le 08/08/2024, sur data.coriolis-cotier.org, pour la période 2008-2023 (Tableau 6).

Tableau 6 : Coordonnées de la Bouée Molit (IFREMER)

Station	Bouée Molit
Coordonnées X (Lambert 93)	274 201
Coordonnées Y (Lambert 93)	6 721 892
Date mise en service	03/04/2008
Code station	6200021 – Vilaine Molit
Type capteur	sonde multiparamètres MP6 (thermistance)
Exactitude capteur	0,05°C
Profondeur de mesure	surface

3.2.4 Qualification des données de température de l'eau issues du réseau de mesures SYVEL

Les données brutes issues des capteurs nécessitent une qualification et une validation, pour éliminer les valeurs aberrantes. Les étapes de validation permettent de détecter des valeurs fausses, liées à des dérives de capteur ou des défauts d'enregistrement, lors des opérations de maintenance ou lors de l'exondation de la sonde. Les mesures influencées par des effets anthropiques sont difficilement identifiables.

Pour les capteurs du réseau SYVEL, un protocole de maintenance est mis en place, afin d'assurer le bon fonctionnement du réseau, de limiter les dérives des capteurs et de fiabiliser les mesures. Ce protocole a évolué depuis la mise en place du réseau en 2007. Une maintenance trimestrielle est effectuée sur l'ensemble des stations.

Entre 2007 et juin 2021, lors des maintenances trimestrielles, les capteurs étaient envoyés en laboratoire, afin de vérifier les éventuelles dérives et les calibrer. A partir de juin 2021, il a été fait le choix de vérifier la cohérence des mesures in situ. Un capteur calibré en laboratoire est installé au droit de la sonde in situ, pendant 20 minutes, pour mesurer l'erreur entre les capteurs. Une calibration annuelle en laboratoire de l'ensemble des capteurs est conservée.

La validation des données est effectuée après vérification de la dérive des capteurs. Cette validation, en plusieurs étapes, permet de vérifier la pertinence et la fiabilité des données :

- Les données non comprises dans les gammes de mesure du capteur et les données mesurées lors d'opération de maintenance ou de sonde exondée sont supprimées.
- Les valeurs de température d'une station sont comparées aux stations amont et aval, pour vérifier la cohérence des données, et le signal longitudinal.

- Les phénomènes environnementaux, climatiques et hydrologiques sont analysés pour expliquer la variabilité des mesures.

- Au regard des rapports de vérification des capteurs, mesurant les dérives, les données sont qualifiées suivant les critères suivants (Tableau 7) : Si cette erreur est inférieure aux critères d'acceptation, la mesure est considérée comme valide. Si l'erreur est supérieure aux critères d'acceptation, mais inférieure aux critères de non-validité, la mesure est corrigée et validée. Enfin, si l'erreur est supérieure aux critères de non-validité, la mesure ne peut pas être validée.

Tableau 7 : Critères d'acceptation des données de température pour les stations du réseau SYVEL

Paramètre	Critère d'acceptation	Critère d'invalidité
Température	< 1%	> 2%

3.3 Température de l'air

Les données sont fournies par MétéoFrance (Tableau 8). Trois stations sont retenues pour l'analyse des températures de l'air : la station de Montoir (44), la station de Nantes-Atlantique (44) et la station de Mont-Bellay (49). La fréquence des mesures est de 1 heure.

Tableau 8 : Coordonnées des stations de température de l'air (Météo France)

Station	St Nazaire - Montoir	Nantes-Atlantique	Mont-Bellay
Coordonnées X (Lambert 93)	310 879	350 961	461 925
Coordonnées Y (Lambert 93)	6 703 094	6 682 380	6 674 706
Date mise en service	01/07/1957	01/05/1945	01/01/1986
Code station	44103001	44020001	49215002

3.4 Débits

Pour les stations de Donges à Montjean/Loire, le débit journalier de référence est mesuré à la station de Montjean-sur-Loire. Les données sont mises à disposition par la DREAL Pays de la Loire, sur l'Hydroportail.

Pour la station de Saumur, le débit considéré est mesuré à Saumur, mesuré par la DREAL Pays de la Loire.

Tableau 9 : Coordonnées des stations hydrométriques (DREAL Pays de la Loire)

Station	Montjean/Loire	Saumur
Coordonnées X (Lambert 93)	408 856	467 503
Coordonnées Y (Lambert 93)	6 706 219	6 689 207
Date mise en service	01/12/1842	01/01/1927
Code station	M530 0010 10	L800 0010 20
pK (référentiel GIPLE)	117	

3.5 Coefficients de marée

Les coefficients de marée au marégraphe de Saint-Nazaire sont fournis par le SHOM.

Tableau 10 : Coordonnées de la station marégraphique (SHOM)

Station	Saint-Nazaire
Coordonnées X (Lambert 93)	306 493
Coordonnées Y (Lambert 93)	6 690 742
Date mise en service	

La Figure 15 fait le bilan de l'emplacement des différentes stations de mesures, utilisées dans le cadre de cette étude.

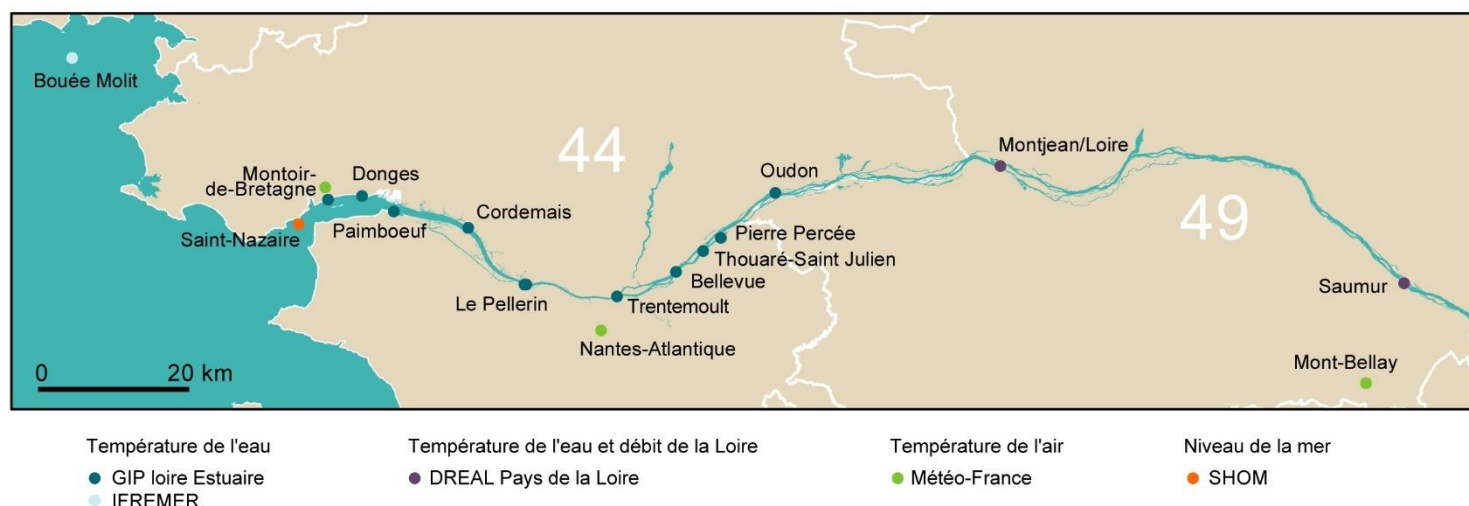


Figure 15 : Bilan des stations de mesures

3.6 Métriques utilisées pour l'analyse des températures de l'eau

L'analyse des températures de l'eau dans l'estuaire de la Loire est menée à l'aide de « métriques thermiques », qui permettent de calculer les valeurs moyennes, extrêmes (minima et maxima), ainsi que les amplitudes thermiques.

- Les températures moyennes journalières, mensuelles et annuelles sont calculées pour un pourcentage de données disponibles supérieur à 80%, pour la période considérée.
- Les températures maximales/minimales journalières sont calculées à partir du maximum et du minimum des températures instantanées, par jour, pour un pourcentage de données disponibles supérieur à 80%.
- Les températures maximales/minimales des moyennes journalières sont calculées à partir des températures moyennes journalières, pour un pourcentage de données disponibles supérieur à 80% sur la saison concernée (été pour la température maximale et hiver pour la température minimale).
- Les amplitudes thermiques journalières correspondent à la différence entre les valeurs journalières extrêmes.

- Le nombre de jour où la température est supérieure à 20°C et 25°C est calculé à partir des moyennes journalières.
- Les moyennes sur 7 jours ont été calculées avec une moyenne glissante sur 7 jours, pour la température de l'eau et la température de l'air, avec un pourcentage de données disponibles supérieur à 80% sur la période

L'analyse de l'effet de la saisonnalité est faite à partir de moyennes saisonnières. Les saisons sont définies :

- Hiver : décembre à février
- Printemps : mars à mai
- Été : juin à août
- Automne : septembre à novembre

4 Résultats

4.1 Variations temporelles

Les cours d'eau de plaine peu profonds - comme la Loire en amont de l'estuaire - sont en équilibre thermique rapide avec l'air et peu influencés par les apports en eau des affluents. Ainsi, leur température évolue selon un cycle jour-nuit avec une amplitude annuelle importante. Dans l'estuaire, d'autres paramètres impactent la température de l'eau, notamment les cycles de marée, à l'échelle de la journée (pleine mer /basse mer) et à l'échelle des cycles mortes eaux / vives eaux. L'océan, quant à lui, a une grande inertie thermique. Sa température évolue plus lentement, d'autant plus que l'air au large connaît une plus faible variabilité thermique que sur le continent. Un cycle journalier est parfois perceptible en surface. L'inertie thermique des océans explique en partie l'amplitude annuelle plus faible des températures journalières dans l'estuaire, à l'aval de Nantes.

4.1.1 Variations inter-annuelles

L'analyse des variations inter-annuelles permet d'évaluer les tendances de la température de l'eau sur plusieurs années. Dans l'estuaire de la Loire, la température moyenne annuelle de l'eau (TwA), entre 2007 et 2023, est comprise entre 13 et 16,5°C, pour l'ensemble des stations. Ces températures sont en cohérence avec les températures annuelles relevées sur l'amont du bassin versant. Beaufort (2015) observe des TwA comprises entre 10°C et 14°C pour 80 % des stations du bassin de la Loire (à l'amont de Montjean/Loire). Les cours d'eau situés à l'amont du bassin, dans le Massif Central ont une TwA inférieure à 10 °C, tandis que dans le bassin sédimentaire, la TwA dépasse les 14°C.

4.1.2 Variations saisonnières

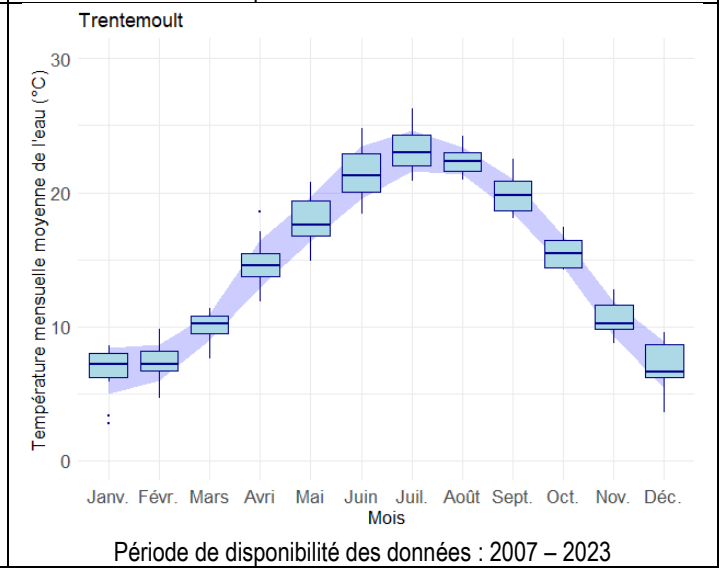
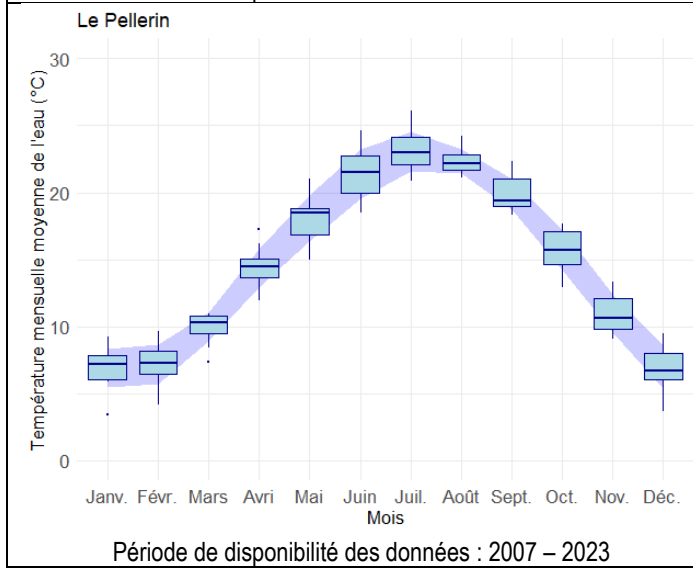
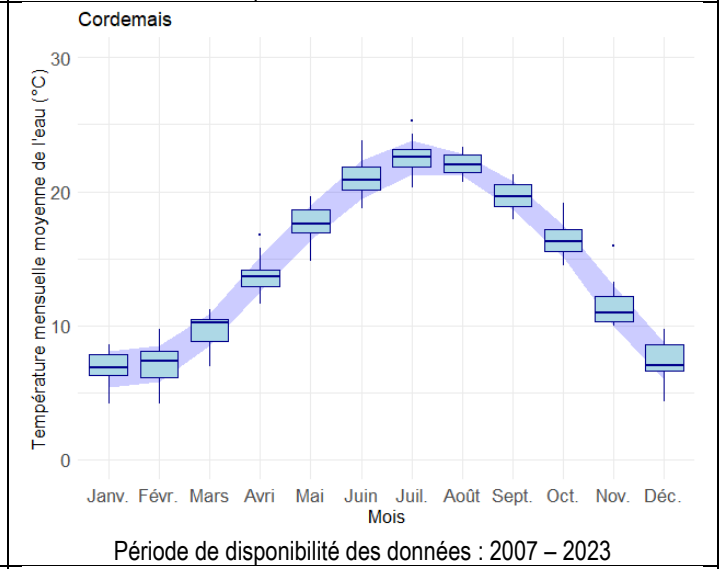
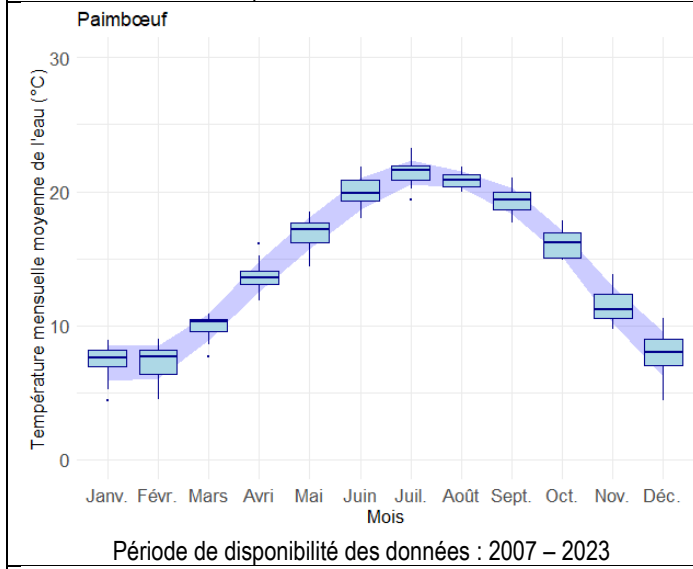
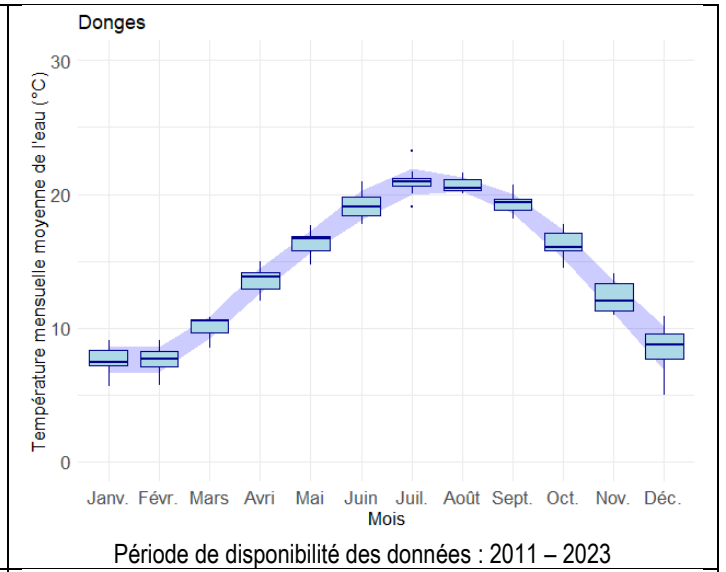
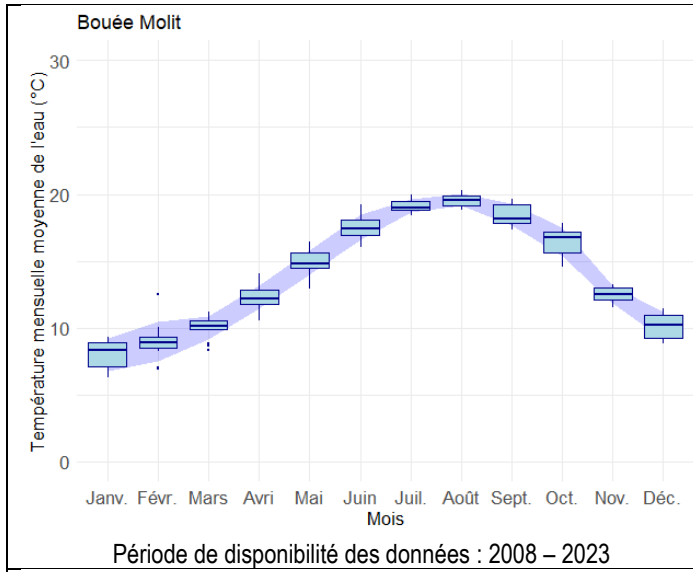
Les variations saisonnières de la température de l'eau permettent de caractériser les fluctuations intra-annuelles. L'évolution de la température moyenne mensuelle de l'eau (TwM) suit un cycle saisonnier. La Figure 16 présente les courbes enveloppes de la température moyenne mensuelle de l'eau, pour chaque station. Les courbes enveloppes sont calculées à partir des minimum et maximum des TwM, pour la période 2007-2023. Les box-plot des TwM sont également représentées sur la Figure 16, pour montrer la variabilité des TwM.

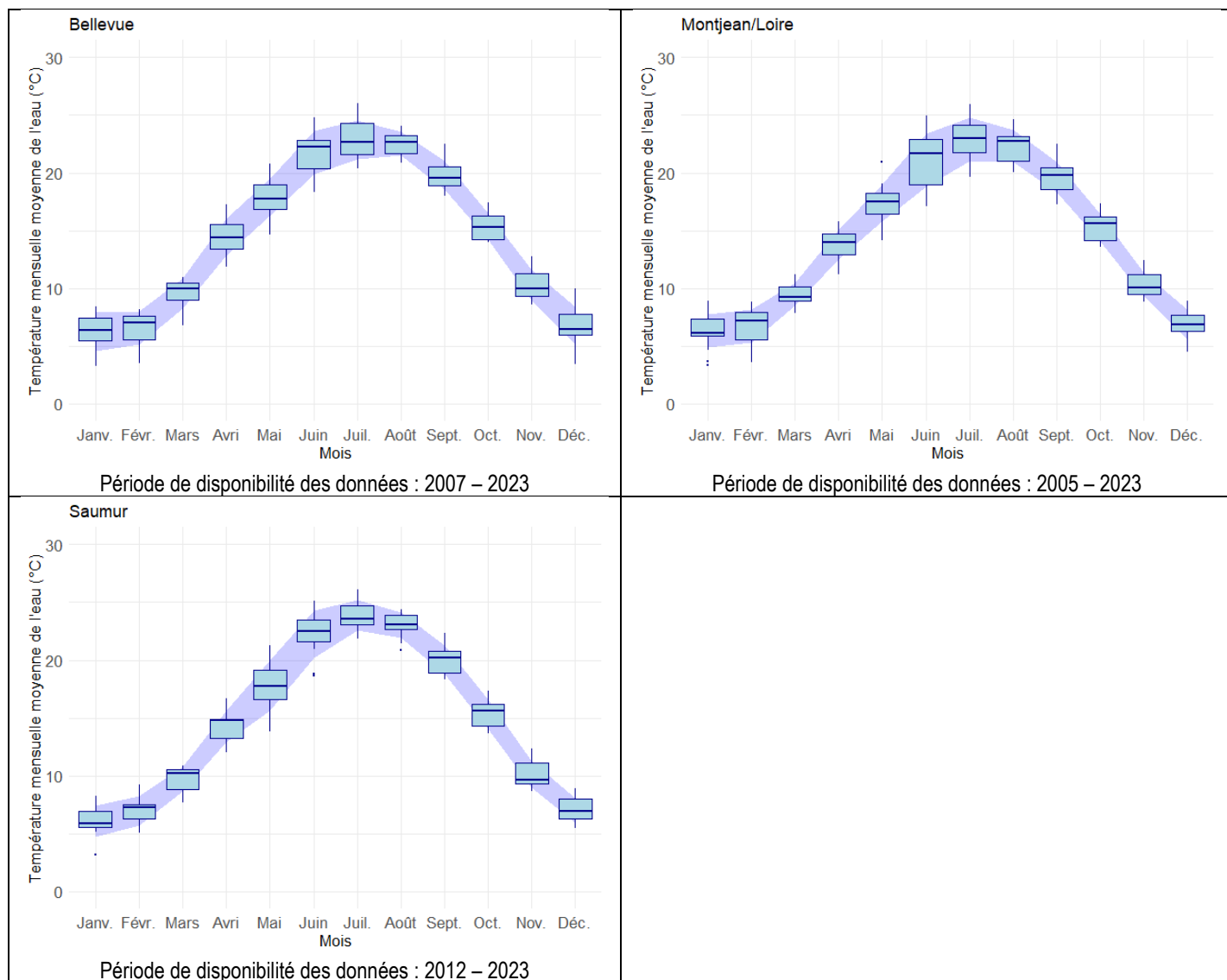
Sur l'ensemble des stations, les plus fortes TwM sont observées au cours de l'été, en juillet et les plus froides sont observées au cours de l'hiver, en janvier.

Sur les stations sous influence de la marée, la variabilité de TwM entre les stations est plus forte pendant l'été. La différence entre les stations les plus chaudes et les plus froides peut atteindre presque 3 °C. Les régimes thermiques des stations sont ainsi plus contrastés en période estivale, sous l'influence de multiples facteurs (débit, marée, conditions météorologiques...).

Les températures mensuelles les plus élevées du mois le plus chaud sont observées pour les stations amont du réseau SYVEL (Le Pellerin à Bellevue) et à l'amont, jusqu'à Saumur. La moyenne des températures mensuelles des mois de juillet (entre 2005 et 2023) atteint 23°C à Montjean/Loire. Plus les stations sont situées à l'aval de l'estuaire, plus les moyennes mensuelles sont faibles. A Donges, la moyenne des températures mensuelles des mois de juillet (entre 2011 et 2023) atteint 20,7°C.

La variabilité des températures mensuelles, entre les stations, est plus faible pendant l'hiver, et plus particulièrement en mars, avec une différence de 0,5°C. Les valeurs les plus basses des températures mensuelles du mois le plus froid sont observées pour les stations à l'amont de Nantes, avec des valeurs inférieures à 7°C, pour les mois de janvier. La station la plus chaude est la station de Donges, la plus à l'aval de l'estuaire, avec une moyenne de 7,6°C.





Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 16 : Courbes enveloppes et box-plot des températures mensuelles de l'eau, entre 2005 et 2023

Dans l'estuaire, l'amplitude des températures mensuelles entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid varie entre 18°C à l'amont (station de Bellevue) et 14°C à l'aval (station de Donges). A titre de comparaison, sur la station de Saumur, l'amplitude annuelle est de 18,7°C. A l'opposé, au niveau de la Bouée Molit, l'amplitude annuelle est de 10,8°C. Les amplitudes les plus élevées sont observées sur les stations sous influence principale des apports du fleuve. La température de l'eau a tendance alors à se rapprocher de la température de l'air, et de ses variations. Les stations à l'aval de l'estuaire sont plus fortement impactées par les apports océaniques, avec une plus grande inertie thermique et donc une amplitude annuelle moins grande.

4.1.3 Variations journalières

L'échelle journalière permet d'analyser les fluctuations thermiques de plus courte durée et d'évaluer l'influence des cycles naturels. Ces variations sont notamment modulées par les conditions atmosphériques et l'effet des marées.

4.1.3.1 Températures minimales, maximales

Les mois de janvier et juillet sont respectivement les mois les plus froids et les plus chauds. Néanmoins, les températures journalières extrêmes peuvent être également mesurées au cours des mois de février et juin.

La température journalière moyenne de l'eau varie entre l'amont et l'aval. Dans l'estuaire, les minimales journalières sont comprises entre 0°C et 3°C (respectivement à Bellevue et Donges), celle de l'océan est de 5°C. Les températures maximales journalières sont comprises entre 30°C et 25°C (respectivement à Bellevue et Donges). La température maximale de l'océan est de 23°C.

Le Tableau 11 présente les températures journalières minimales et maximales mesurées aux différentes stations, entre 2005 et 2023, pour les stations en fonctionnement. Entre 2007 et 2018, lors des épisodes de froid intense (2009, 2010 et 2012), les stations MAREL sont désinstallées temporairement, afin d'éviter le gel dans les tuyaux, et par conséquent la casse des stations. Les températures minimales peuvent être surestimées sur ces stations.

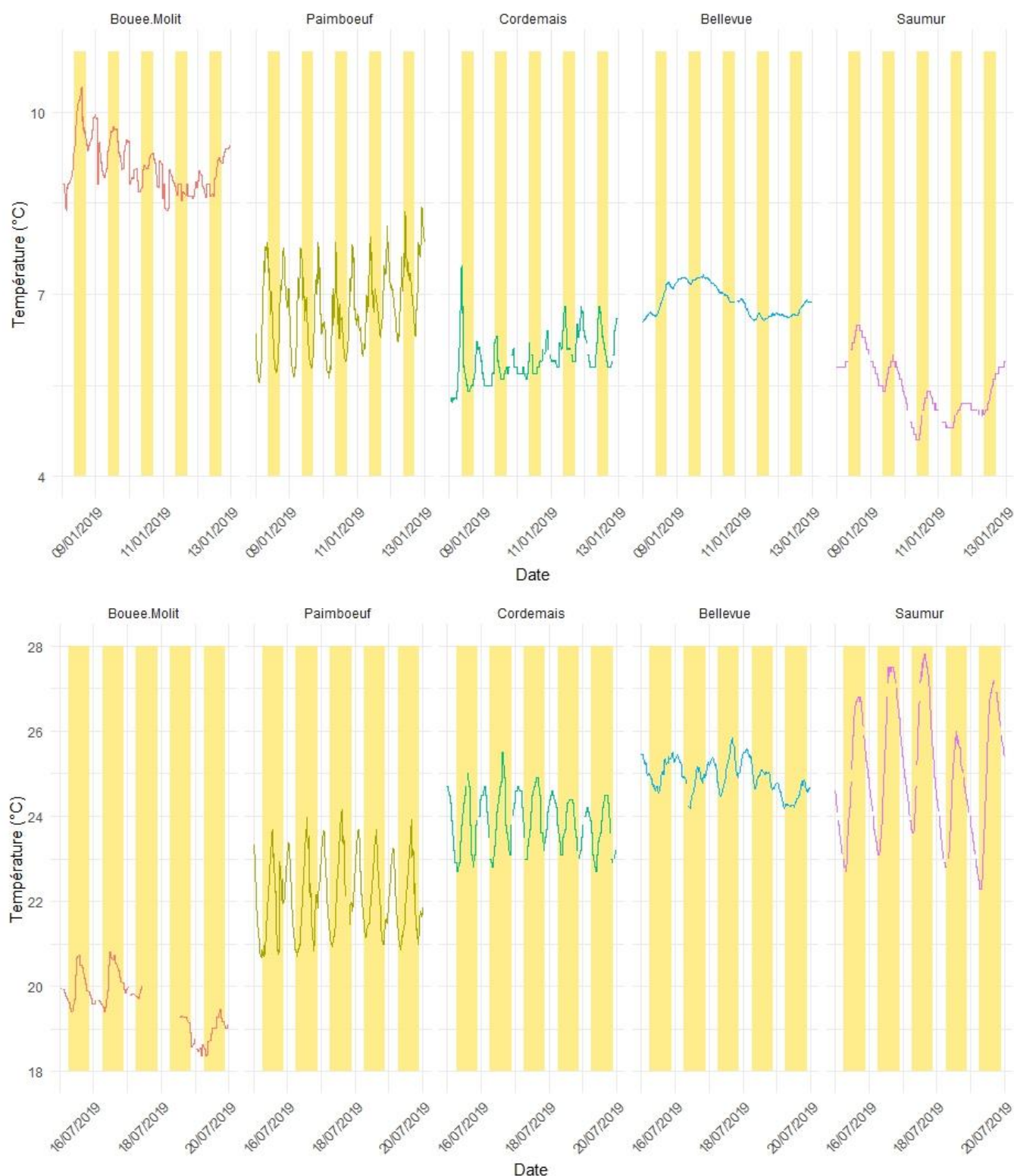
Tableau 11 : Températures journalières minimales et maximales, et température instantanée maximale

	Station	T° Min journalier (°C)	T° Max journalier (°C)	T° instantanée maximale (°C)
Océanique ↑ Fluvial	Bouée Molit	5,4 (01/2009)	23,2 (07/2021)	24,5
	Donges	3,1 (02/2012)	24,6 (07/2018)	26,9
	Paimbœuf	2,8 (01/2009)	24,1 (07/2018)	27,2
	Cordemais	1,1 (02/2012)	25,9 (07/2018)	27,6
	Le Pellerin	0,2 (02/2012)	27,2 (07/2019)	28,3
	Trentemoult	1,2 (01/2017)	27,6 (06/2017)	28,3
	Bellevue	0,0 (02/2012)	30,5 (06/2019)	31,2
	Montjean/Loire	0,0 (02/2012)	29,9 (06/2019)	30,6
	Saumur	0,4 (01/2017)	30,4 (06/2019)	32,2

Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER, Nantes Métropole

4.1.3.2 Mois le plus froid-janvier, mois le plus chaud - juillet : exemple de l'année 2019

L'analyse des températures journalières met en évidence une variabilité intra-journalière significative, influencée par les cycles de marée et les conditions atmosphériques. Ces moyennes journalières masquent une variabilité de la température de l'eau dans l'estuaire, au cours d'une journée, sous l'influence des conditions atmosphériques (température de l'air), mais aussi sous l'influence du cycle de marée. La Figure 17 montre les variations de la température de l'eau, au cours du mois de janvier 2019 et du mois de juillet 2019. Les zones en jaune représentent la durée des jours (du lever au coucher du soleil).



Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 17 : Variations diurnes, au cours des mois de janvier et juillet 2019

Au cours du mois de janvier 2019, la température de l'eau et le nombre de pics de température diminuent de l'aval vers l'amont, à mesure que l'influence de la marée diminue. Sur les stations de Paimboeuf et Cordemais, deux pics de température sont observés, au cours de la journée, indépendamment des heures d'ensoleillement. Ces pics sont liés aux apports d'eau plus chaude, de l'océan, lors des pleines mers, qui réchauffent les eaux du fleuve. L'impact des cycles de marée est détaillé au paragraphe 4.1.4. Au niveau de Bellevue, les variations sont moins

nettes et semblent décorrélérer des cycles de marée et de variation jour/nuit. À Montjean/Loire et Saumur, sur les stations non soumises à la marée, le cycle diurne est observé, avec des températures de l'eau plus chaudes en fin de journée, quand les conditions d'ensoleillement ont permis une accumulation de chaleur. Les températures les plus froides y sont mesurées à la fin de la nuit, après la dissipation maximale de la chaleur accumulée en journée.

En juillet 2019, la température de l'eau augmente de l'aval vers l'amont. Le nombre de pics de température diminue de l'aval vers l'amont. Sur les stations de Paimbœuf et Cordemais, les deux pics de température sont toujours visibles au cours d'une journée. Les maximums sont généralement mesurés lors des basses mers locales, survenant en période diurne. Les apports d'eau fluviale, plus chaude, ont un poids plus important que les apports d'eau de l'océan. À Bellevue, deux pics journaliers apparaissent. Les variations liées au cycle jour/nuit expliquent en partie les fluctuations de la température de l'eau. La présence d'un deuxième pic s'explique par l'influence du cycle de marée. Lors des pleines mers locales, l'apport d'eau de l'océan, plus froide, entraîne une diminution de la température de l'eau. Le pic le plus élevé est observé en fin de journée quand la pleine mer se produit dans la soirée ou la nuit suivante. Ce pic traduit l'accumulation de la chaleur liée à l'intensité de l'ensoleillement. À Saumur, un seul pic de température est mesuré, avec un maximum en fin de journée.

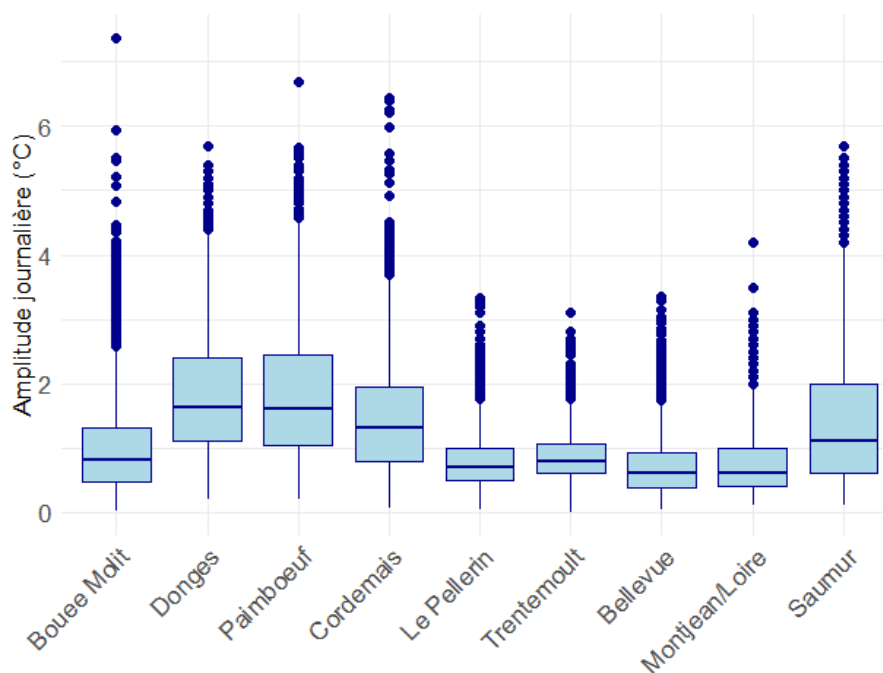
Les stations à l'aval sont influencées, toute l'année, par les apports d'eau de l'océan, à la faveur du cycle de pleine mer/basse mer. Au cours du mois de juillet, et en été de manière générale, les débits dans la Loire diminuent, favorisant une remontée de l'impact de la marée vers les stations amont. Les températures de l'eau sont alors influencées par les apports océaniques, lors des pleines mers locales. Deux pics de températures sont observés : un pic lié à la variation jour/nuit, avec un maximum en fin de journée, et un deuxième pic de plus faible intensité lié à la marée.

4.1.3.3 *Amplitudes journalières*

La température à un instant, ou sur une période, n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour étudier l'impact de la température de l'eau sur les écosystèmes et les usages. L'amplitude thermique journalière constitue un paramètre essentiel pour l'évaluation des impacts sur les écosystèmes aquatiques. La Figure 18 présente les amplitudes journalières, calculées à partir des valeurs journalières extrêmes, sur la période de disponibilité des données. À l'exception de Saumur, les stations à l'amont du Pellerin montrent une amplitude journalière moyenne inférieure à 1°C. Au niveau des stations à l'aval, l'amplitude journalière moyenne est supérieure à 1,5°C. Dans l'océan, l'amplitude journalière moyenne est inférieure à 1°C, sous l'effet de l'inertie thermique.

L'amplitude journalière observée sur les stations amont est liée au cycle diurne, avec l'influence de la variation des températures de l'air. Au contraire, les stations aval sont plus impactées par les apports océaniques. L'amplitude journalière est alors liée au cycle tidal.

Un point de pivot thermique peut être défini entre les stations de Cordemais et du Pellerin. À Cordemais, l'influence du cycle tidal est prépondérante. Au Pellerin, l'influence du cycle diurne devient dominante. Néanmoins, la présence d'un nombre important d'outliers dans les boîtes à moustache des stations de Cordemais à Bellevue peut signifier une influence partagée entre le cycle diurne et le cycle tidal, selon les conditions hydrologiques.



Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 18 : Amplitude journalière de la température de l'eau

4.1.3.4 Variations diurnes

Les variations diurnes sont modulées par la saisonnalité et l'influence des marées. Elles évoluent au cours de l'année, en fonction des stations. Le Tableau 12 reprend pour chaque station, la valeur de l'amplitude moyenne entre le jour le plus chaud et le jour le plus froid, sur la période de mesures.

Plus les stations sont soumises à l'influence de la marée, plus l'amplitude entre le jour le plus chaud et le jour le plus froid est faible. Les variations de l'océan sont inférieures à 14°C, alors que les variations à Saumur peuvent dépasser 25°C.

Tableau 12 : Amplitude moyenne de la température de l'eau, entre le jour le plus chaud et le jour le plus froid

Fluvial ↑ Océanique	Station	Amplitude moyenne entre le jour le plus chaud et le jour le plus froid (°C)
	Bouée Molit	13,6
	Donges	17,4
	Paimbœuf	17,9
	Cordemais	21,1
	Le Pellerin	22,4
	Trentemoult	22,5
	Bellevue	23,2
	Montjean/Loire	23,0
	Saumur	25,1

Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Le Tableau 13 présente les amplitudes journalières, aux différentes stations, au cours du mois le plus chaud (juillet) et le plus froid (janvier), pour l'ensemble de la période de mesures.

Tableau 13 : Amplitude journalière au cours du mois le plus chaud et du mois le plus froid, aux différentes stations

	Station	Amplitude journalière (°C)	
		Mois le plus chaud : juillet	Mois le plus froid : janvier
Fluvial ↑ Océanique	Bouée Molit	5,2	5,5
	Donges	5,3	4,1
	Paimbœuf	6,7	3,9
	Cordemais	4,5	5,5
	Le Pellerin	3,1	2,0
	Trentemoult	2,8	2,5
	Bellevue	3,0	1,4
	Montjean/Loire	4,2	1,9
	Saumur	5,3	1,7

Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

4.1.4 Cycle de marée

Parmi les facteurs influençant la température de l'eau dans l'estuaire de la Loire, le cycle de marée joue un rôle majeur en modulant les apports océaniques et fluviaux. Son impact varie selon les conditions hydrologiques, combinant l'effet du coefficient de marée et du débit du fleuve. L'influence des apports océaniques diminue de l'aval vers l'amont. Quatre situations hydrologiques sont étudiées pour analyser leur influence sur la température de l'eau (Figure 19) : hautes eaux/vives eaux, hautes eaux/mortes eaux, étiage/vives eaux et étiage/mortes eaux.

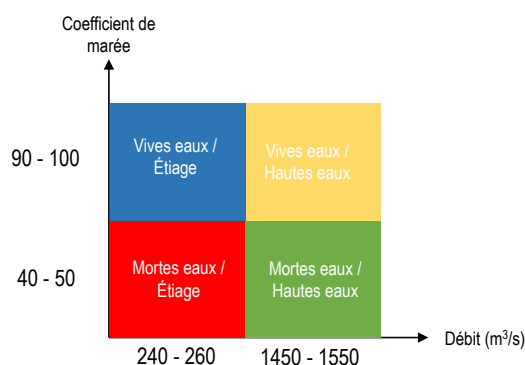


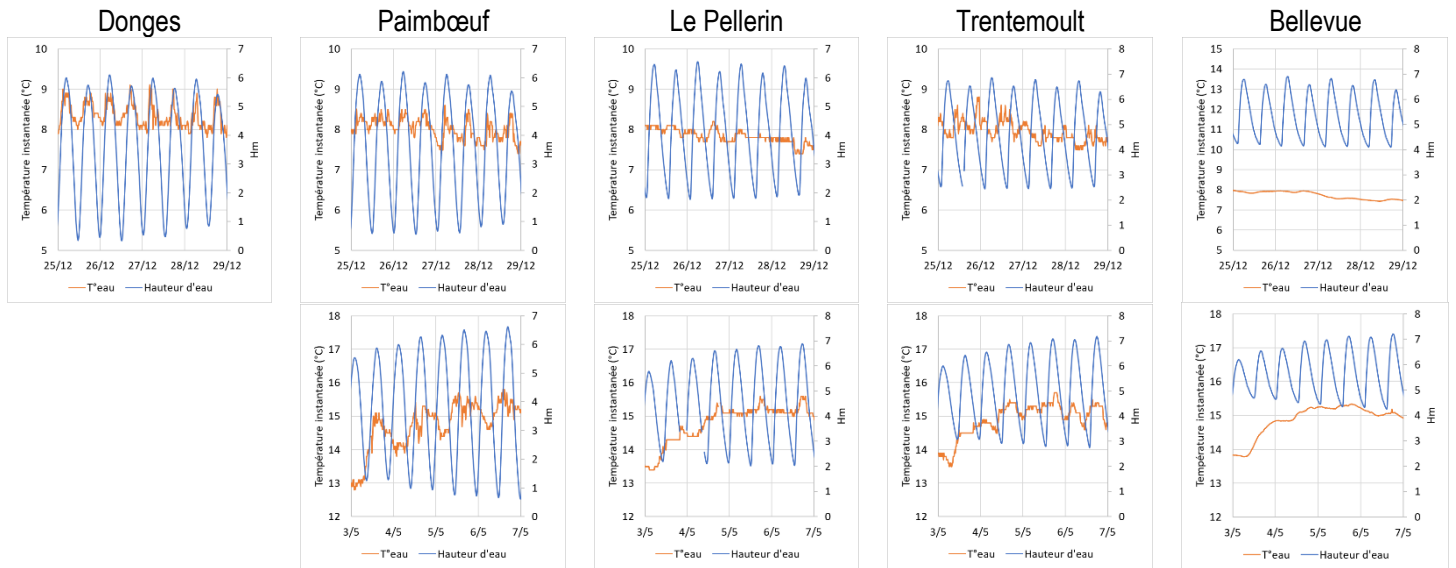
Figure 19 : Situations de référence

4.1.4.1 Hautes eaux/Vives eaux :

Les situations « hautes eaux/vives eaux » sont sélectionnées pour des débits compris entre 1450 et 1550 m³/s, et des coefficients de marée compris entre 90 et 100. Deux situations sont comparées (Figure 20) : le mois de décembre 2011 et le mois de mai 2012. Généralement, les situations de hautes eaux-vives-eaux sont rencontrées au cours des saisons automnales et printanières.

Décembre 2011

Mai 2012



Source des données : DREAL Pays de la Loire, GIPLE, GPMNSN

Figure 20 : Variation de la température de l'eau, en conditions de hautes-eaux/Vives-eaux

Dans les conditions de hautes eaux/vives eaux, l'impact du cycle de marée est différent selon les stations.

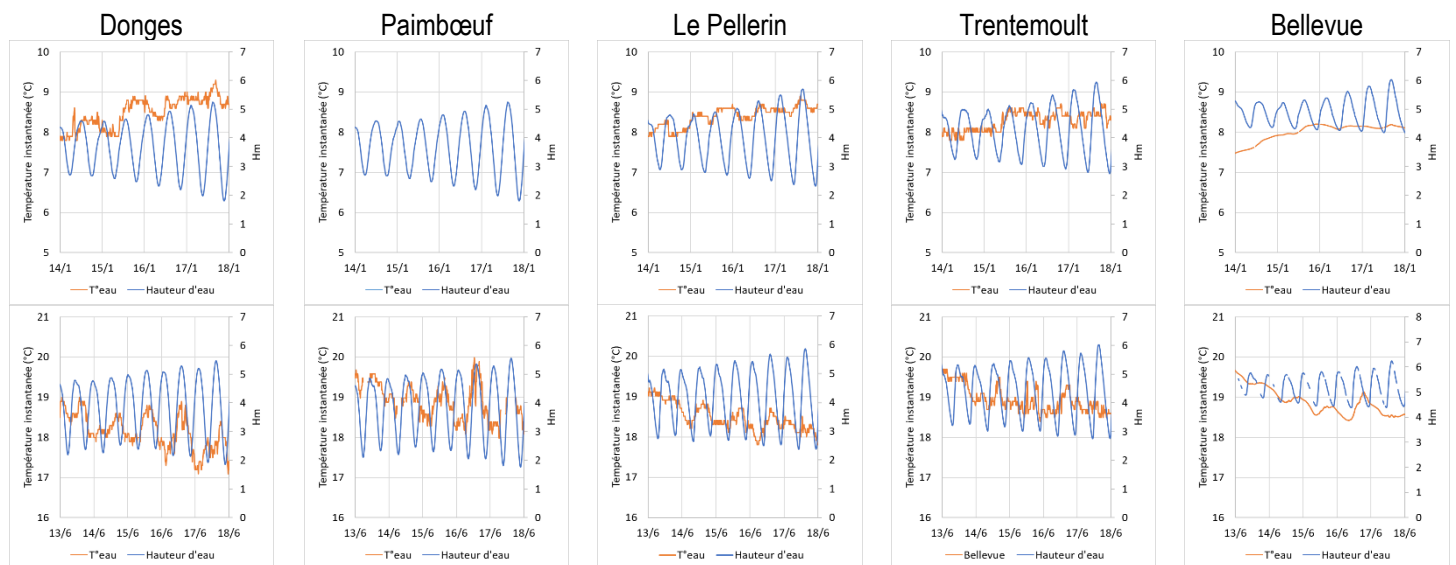
Sur les stations à l'aval (Donges et Paimbœuf), la température de l'eau suit le cycle des marées, et augmente avec les pleines mers locales. En hiver, la température augmente au flot, et est maximale à pleine mer. En effet, la température de l'eau apportée par l'océan est plus élevée que la température de l'eau du fleuve.

Sur la situation de mai 2012, la température de la Loire est plus élevée que la température de l'océan. Les variations liées au cycle de marée sont moins visibles. L'oscillation de la température au cours d'une marée des températures est principalement liée au cycle jour/nuit.

Sur les stations à l'amont du Pellerin, la marée n'a pas d'influence significative sur les variations journalières de la température de l'eau. La température de l'eau du fleuve est dominante.

4.1.4.2 Hautes eaux/Mortes eaux :

Les situations sont sélectionnées pour des débits compris entre 1450 et 1550 m³/s, et des coefficients de marée compris entre 40 et 50 (Figure 21). Deux situations sont comparées : le mois de février 2011 et le mois de juin 2016.



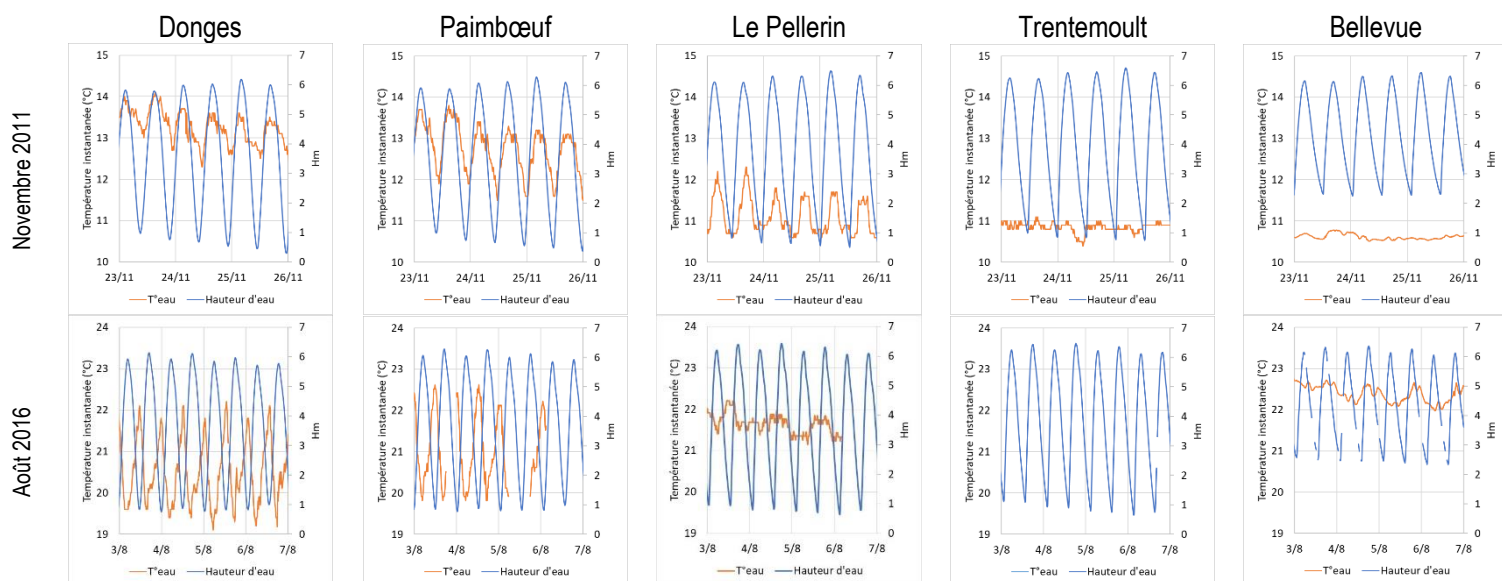
Source des données : DREAL Pays de la Loire, GIPLE, GPMNSN

Figure 21 : Variation de la température de l'eau, en conditions de hautes eaux/mortes eaux

Dans les conditions de hautes eaux/mortes eaux, les variations de la température de l'eau sont peu influencées par la marée, sur l'ensemble des stations. En période de morte eau, les quantités d'eau venant de l'océan sont moins importantes qu'en période de vive eau. L'impact de la marée sur la température de l'eau sera par conséquent plus faible, quelle que soit la saison. Les variations suivent les cycles jour/nuit.

4.1.4.3 *Etiage/Vives eaux :*

Les situations sont sélectionnées pour des débits compris entre 240 et 260 m³/s, et des coefficients de marée compris entre 90 et 100 (Figure 22). Deux situations sont comparées : le mois de novembre 2011 et le mois d'août 2016.



Source des données : DREAL Pays de la Loire, GIPLE, GPMNSN

Figure 22 : Variation de la température de l'eau, en conditions d'étiage/vives eaux

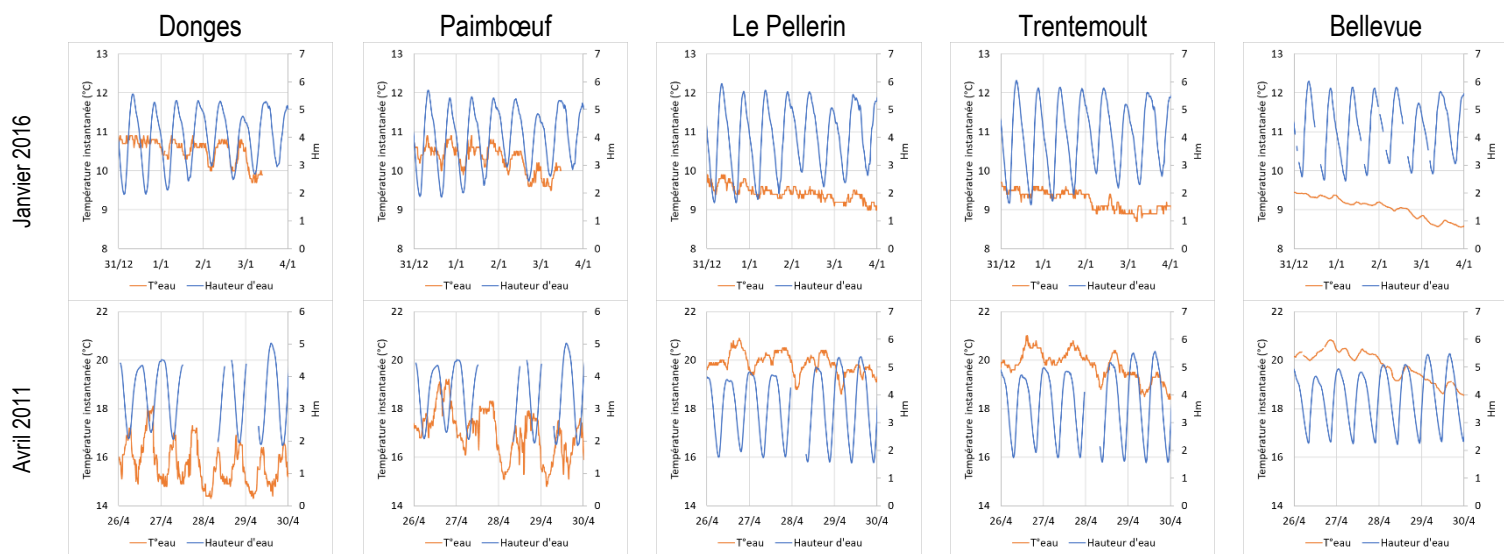
Dans les conditions d'étiage/vives eaux, l'impact du cycle de marée est différent selon les stations. À l'aval, au niveau des stations de Donges et Paimbœuf, la marée domine alors les apports du fleuve, qu'elle que soit la saison. En période hivernale, comme en hautes eaux, lorsque les apports océaniques ont une température plus élevée que les apports fluviaux, la température de l'eau à l'aval de l'estuaire est maximale à pleine mer locale. A l'inverse, en période estivale, l'océan apporte de l'eau plus fraîche que la Loire. La température de l'eau à l'aval de l'estuaire est alors maximale à basse mer locale, lorsque la proportion d'eau fluviale plus chaude augmente dans le mélange estuarien et devient prédominante par rapport à l'eau océanique plus.

La station du Pellerin, dans un secteur intermédiaire, en période hivernale, la marée apporte de l'eau chaude à pleine mer locale, augmentant la température de l'eau au cours des cycles de pleine mer/basse mer. A l'inverse, en période estivale, lorsque la température des apports amonts augmente, l'influence du cycle de marée est moins visible. La température de l'eau a néanmoins tendance à augmenter à basse mer locale.

A l'amont, au niveau des stations de Trentemoult et Bellevue, en période hivernale, l'influence de la marée est peu visible. En période estivale, la température de l'eau a tendance à légèrement augmenter sous l'influence de la basse mer locale.

4.1.4.4 Etiage/Mortes eaux :

Les situations sont sélectionnées pour des débits compris entre 240 et 260 m³/s, et des coefficients de marée compris entre 40 et 50 (Figure 23). Deux situations sont comparées : le mois de janvier 2016 et le mois d'avril 2011.



Source des données : DREAL Pays de la Loire, GIPLE, GPMNSN

Figure 23 : Variation de la température de l'eau, en conditions d'étiage/mortes-eaux

Dans les conditions d'étiage/mortes eaux, l'impact du cycle de marée est visible à l'aval du Pellerin. Au niveau des stations de Donges et Paimbœuf, la marée joue un rôle important, quelle que soit la saison. En période hivernale, lorsque les apports océaniques ont une température plus élevée que les apports fluviaux, la température de l'eau à l'aval de l'estuaire est maximale à pleine mer locale. A l'inverse, en période estivale, l'océan apporte de l'eau plus fraîche que la Loire. La température de l'eau à l'aval de l'estuaire est alors maximale à basse mer locale, lorsque le poids de l'eau fluviale plus chaude est plus important que le poids de l'eau océanique. A l'amont du Pellerin, l'influence de la marée est peu visible.

Le Tableau 14 fait la synthèse de l'influence de la marée sur la variation de la température de l'eau, en fonction des conditions hydrologiques.

Tableau 14 : Bilan de l'influence de la marée sur la variation de la température de l'eau, en fonction des conditions hydrologiques

		Donges	Paimbœuf	Le Pellerin	Trentemoult	Bellevue
HE/ME	Hiver	Pas d'impact significatif				
	Eté					
HE/VE	Hiver					
	Eté					
Etiage/ME	Hiver					
	Eté					
Etiage/VE	Hiver					
	Eté					

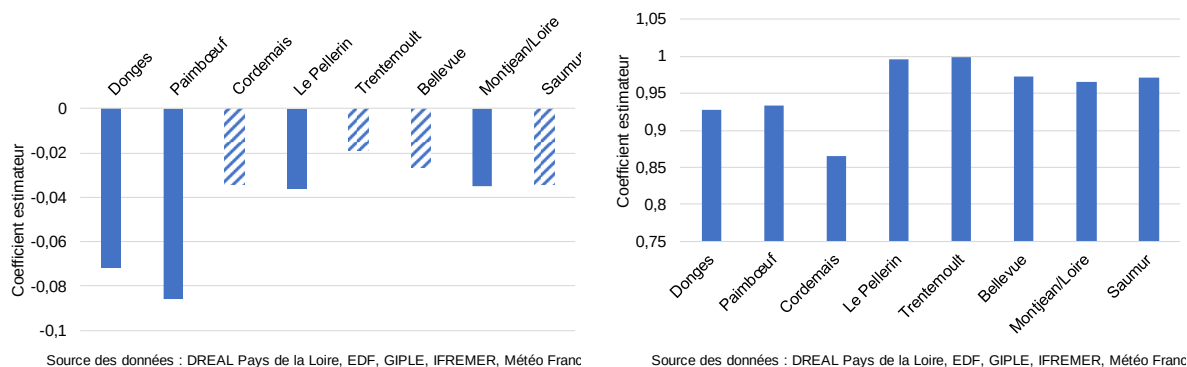
4.1.5 Influence des apports hydrauliques

Au-delà des effets de la marée, les variations de débit d'un cours d'eau influencent également la température de l'eau. L'augmentation de la température est en partie due à la diminution des débits et donc de la profondeur des cours d'eau ce qui va diminuer l'inertie thermique et accentuer les températures maximales en été (Beaufort et al., 2013).

Dans l'estuaire de la Loire, la diminution des débits est concomitante avec la hausse des températures de l'air, au cours de l'été. Afin de discriminer le poids de l'influence du débit et de la température de l'air, une régression multiple linéaire est réalisée sur les moyennes mensuelles, pour l'ensemble de la période de mesures. Le graphe suivant résume les valeurs des estimateurs, pour les paramètres débit et température de l'air. Pour rappel, un estimateur dans une régression linéaire multiple est une mesure de l'effet d'une variable indépendante (le débit ou la température de l'air) sur la variable dépendante (la température de l'eau), tenant compte des autres variables dans le modèle. La p-value est un indicateur de la significativité des estimateurs. Les variables explicatives ayant des ordres de grandeur différents, les données sont normalisées, afin de pouvoir comparer les coefficients entre eux.

La température de l'air prise en compte dans la régression linéaire multiple est la température mesurée à la station de Nantes-Atlantique, pour l'ensemble des stations, à l'exception de la station de Saumur, qui est analysée au regard de la température mesurée à la station de Mont-Bellay. Le débit de Montjean/Loire est utilisé pour l'ensemble des stations, à l'exception de la station de Saumur, qui est analysée au regard du débit mesuré à la station de Saumur.

La relation n'est pas testée pour la température de l'eau, au droit de la Bouée Molit, la station étant située en mer.



* Les barres hachurées correspondent aux tendances non significatives

Figure 24: Coefficients estimateurs pour les relations multi-linéaires entre la température de l'eau, le débit de la Loire (à gauche) et la température de l'air (à droite)

Quelle que soit la station, la corrélation entre la température de l'eau et le débit de la Loire est négative. Ainsi, plus le débit augmente, plus la température de la Loire diminue. A l'inverse, la température de l'air a une influence positive. Plus la température de l'air augmente, plus la température de l'eau augmente. Plus les stations sont proches de l'océan, plus l'estimateur est faible, signe d'une influence moins forte de la température de l'air, par rapport à d'autres facteurs explicatifs (impact des marées, inertie thermique des apports océaniques...).

Le ratio entre les estimateurs de la variable « Débit » par rapport à la variable « Température de l'air » est de 1 pour 30. Ainsi, dans l'estuaire, les moyennes mensuelles de température de l'eau s'expliquent majoritairement par l'influence de la température de l'air. Le débit de la Loire explique une petite partie de la température de l'eau.

Les régressions linéaires multiples sont réalisées sur les 3 mois les plus froids et les 3 mois les plus chauds. Au cours de l'hiver, le débit de la Loire n'est pas un facteur significativement explicatif de la température de l'eau. A l'inverse, au cours de l'été, le débit de la Loire permet d'expliquer significativement les températures de l'eau, entre Saumur et Le Pellerin. Le ratio entre les coefficients de débit et de température de l'air est de 1 pour 3.

Les cours d'eau de plaine peu profonds, comme la Loire en amont de l'estuaire, sont en équilibre thermique rapide avec l'air, évoluant selon un cycle jour-nuit avec une forte amplitude annuelle. Dans l'estuaire, la température de l'eau est influencée par les cycles de marée, tandis que l'océan, en raison de son inertie thermique, présente des variations plus lentes et modérées. Ainsi, la température de l'eau dans l'estuaire, en aval de Nantes, connaît une amplitude annuelle plus faible que dans les zones amont.

Entre 2007 et 2023, la température moyenne annuelle de l'eau dans l'estuaire de la Loire varie entre 13 et 16,5°C, en cohérence avec les températures relevées en amont du bassin versant. Les températures les plus basses sont observées dans le Massif Central, avec des valeurs inférieures à 10°C, tandis que dans le bassin sédimentaire, elles dépassent 14°C.

Sur l'ensemble des stations, la température moyenne mensuelle suit un cycle saisonnier, avec des valeurs maximales en juillet et minimales en janvier. Pendant l'été, la variabilité entre les stations sous influence de la marée est plus marquée, atteignant une différence de près de 3°C. Les stations amont, comme Montjean/Loire, enregistrent les températures estivales les plus élevées, jusqu'à 23°C, tandis qu'à Donges, plus en aval, la moyenne est de 20,7°C. En hiver, cette variabilité est plus faible, avec une différence maximale de 0,5°C en mars. Les températures les plus basses sont relevées en amont de Nantes, sous les 7°C en janvier, alors que Donges affiche une moyenne de 7,6°C. L'amplitude annuelle des températures varie entre 18°C à Bellevue et 14°C à Donges, les stations amont étant davantage influencées par la température de l'air, tandis que celles situées à l'aval subissent l'inertie thermique des apports océaniques.

Les températures journalières minimales sont comprises entre 0°C et 3°C à l'amont de l'estuaire et environ 5°C pour l'océan. À l'inverse, les températures maximales peuvent atteindre 30°C à Bellevue et 25°C à Donges, tandis que l'océan ne dépasse pas 23°C. Les stations les plus influencées par le fleuve enregistrent les extrêmes les plus marqués, alors que les stations aval subissent une atténuation des variations grâce aux apports océaniques.

En janvier 2019, la température de l'eau diminue de l'aval vers l'amont, avec un effet plus marqué de la marée dans les zones aval, où deux pics de température sont observés quotidiennement, dus aux apports océaniques lors des pleines mers. Plus en amont, les variations sont davantage liées au cycle jour-nuit. En juillet 2019, la température de l'eau augmente de l'aval vers l'amont, avec des maximums diurnes plus marqués en raison de l'ensoleillement et un deuxième pic, plus modéré, lié à l'influence des marées. L'été, la diminution des débits favorise la remontée de l'effet de la marée, influençant la température de l'eau plus en amont.

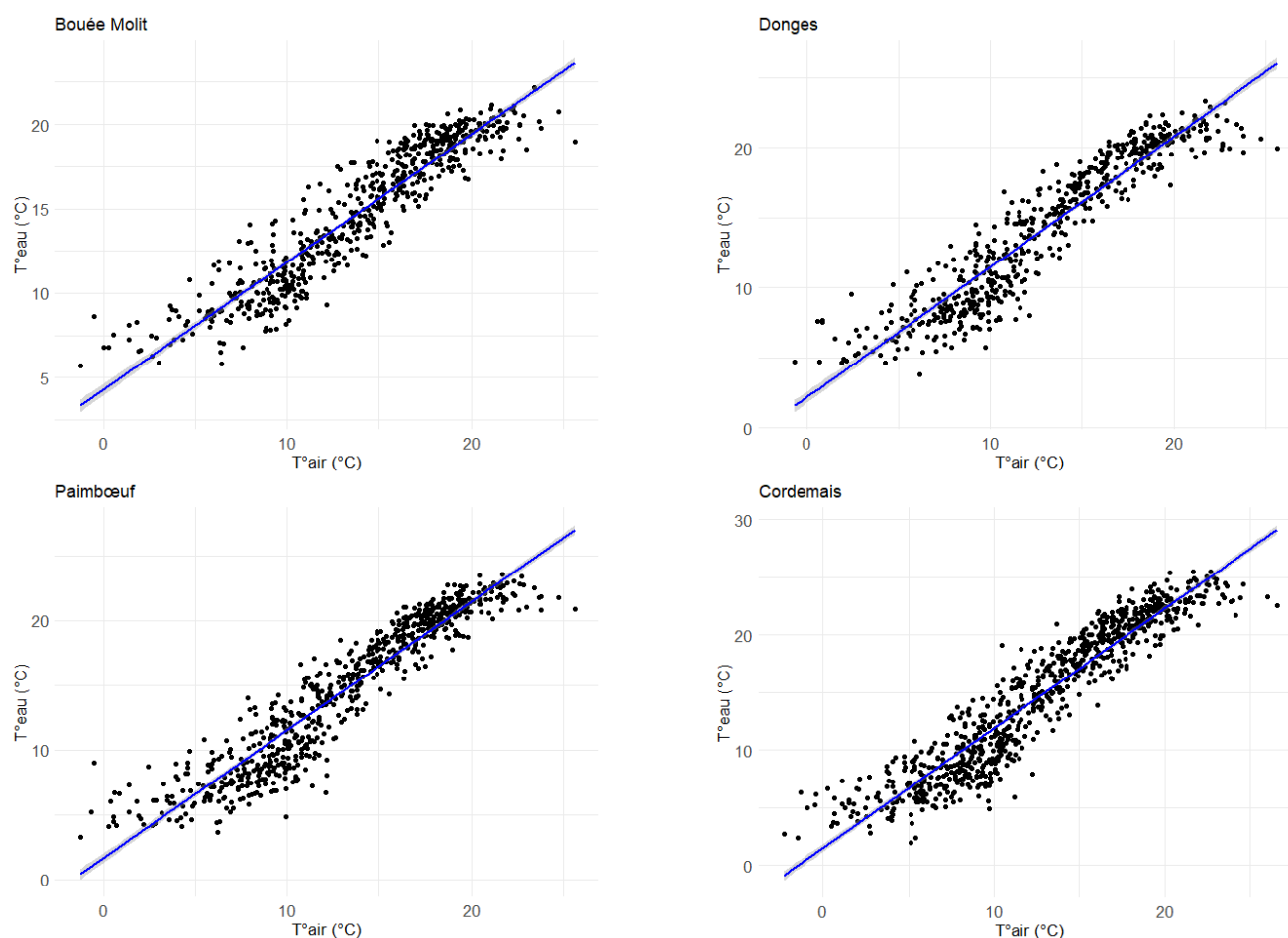
L'amplitude journalière de la température est un paramètre clé pour comprendre l'impact thermique sur les écosystèmes. Elle est inférieure à 1°C sur les stations amont et dépasse 1,5°C sur les stations aval, reflétant l'influence du cycle tidal. Un point de transition thermique est identifié entre Cordemais et Le Pellerin, où l'influence du cycle des marées diminue au profit du cycle diurne.

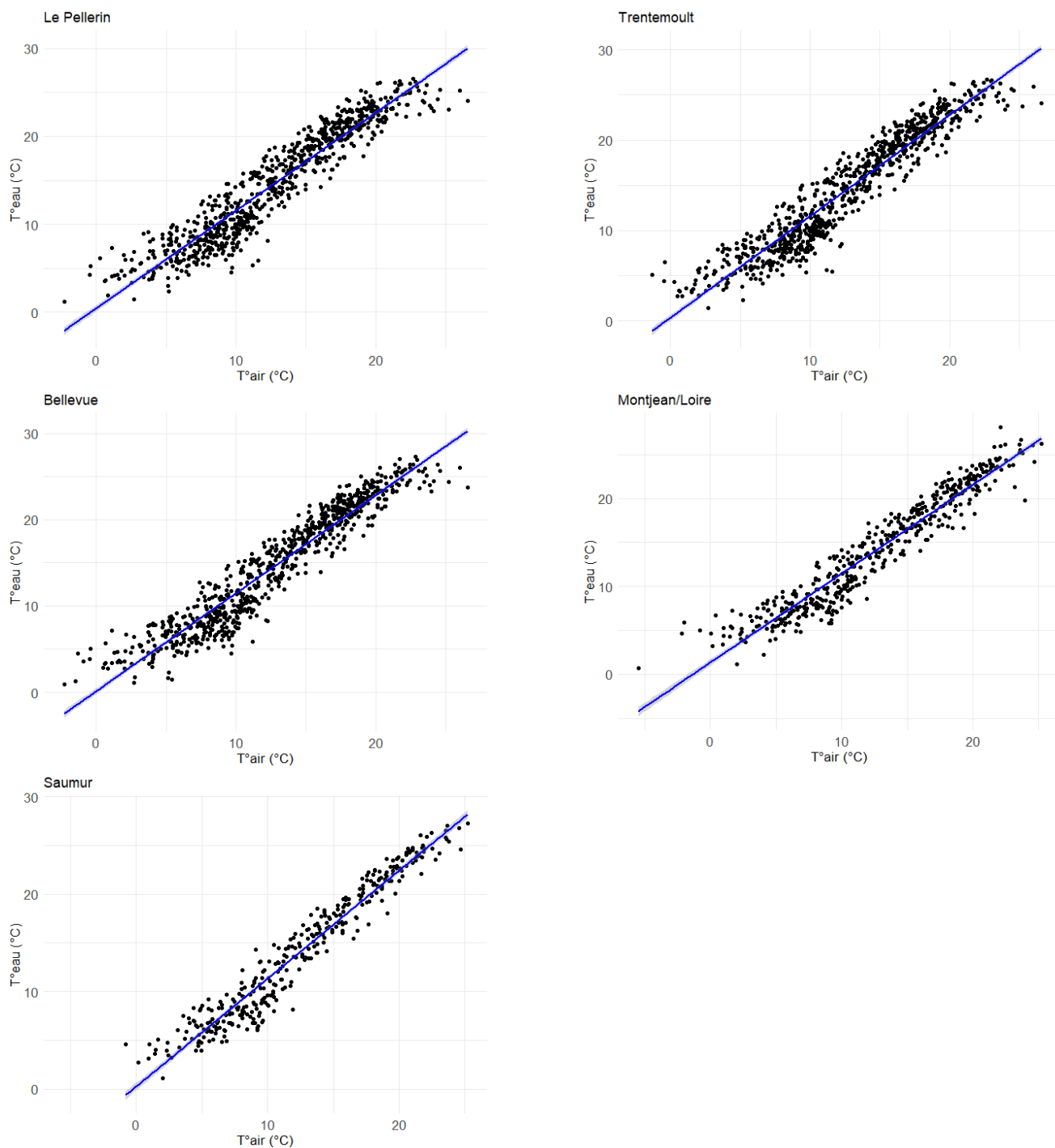
Les températures de l'eau sont principalement influencées par la température de l'air, avec un effet plus marqué en été qu'en hiver. L'influence du débit est significative en été, contribuant à moduler la température de l'eau, mais reste secondaire par rapport à celle de l'air. En hiver, l'impact du débit est négligeable. L'estuaire est marqué par l'alternance entre les apports du fleuve et ceux de l'océan, modulée par le cycle de marée et les conditions hydrologiques. En conditions de hautes eaux et vives eaux, la température de l'eau suit le cycle de marée, avec des augmentations lors des pleines mers, l'eau océanique étant plus chaude en hiver. En période de mortes eaux, l'influence de la marée diminue et la température suit principalement les cycles jour-nuit. L'effet des marées est encore plus atténué en période d'étiage, où la température de l'eau est fortement corrélée à celle de l'air.

4.2 Relation $T^{\circ}\text{air}/T^{\circ}\text{eau}$

La température de l'eau dans l'estuaire est conditionnée par l'influence conjointe des apports océaniques et fluviaux, qui modulent ses variations à différentes échelles temporelles et spatiales. Toutefois, la température de l'air constitue un paramètre déterminant dans cette dynamique thermique. L'analyse des relations entre ces deux variables permet de caractériser leur interaction et d'évaluer l'ampleur de l'influence atmosphérique sur la température des eaux estuariennes.

Les températures de l'eau et de l'air ont été moyennées sur 7 jours, avec une moyenne glissante. Une régression linéaire est effectuée entre ces deux variables (Figure 25). Pour les stations de Saumur et Montjean/Loire, la température de l'air est prise à la station de Mont-Bellay. Pour les stations de Bellevue, Trentemoult, Le Pellerin, Cordemais, la température de l'air est prise à la station de Nantes-Atlantique.





Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER, Météo France

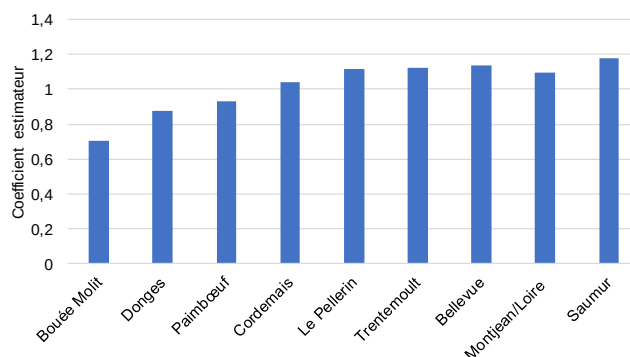
Figure 25 : Régression linéaire de la température de l'eau en fonction de la température de l'air (moyenne hebdomadaire)

Les relations entre la température de l'air et la température de la Loire, pour les stations fluviales (Montjean/Loire et Saumur) sont linéaires. Entre Bellevue et Donges, des plateaux apparaissent pour les températures extrêmes. Ces plateaux peuvent en partie s'expliquer par l'influence des apports océaniques, qui ont une inertie thermique importante. Ces apports avec une amplitude plus faible tendent à diminuer l'impact de la température de l'air lors des épisodes de froid ou de chaud. Il est important de préciser que cette linéarité n'est observée que sur une plage intermédiaire de températures. En effet, aux valeurs extrêmes, qu'elles soient basses ou élevées, la relation tend progressivement à s'aplanir, formant ces plateaux caractéristiques. Ce phénomène de non-linéarité aux extrémités

traduit une résilience du système fluvial face aux variations atmosphériques. Ainsi, malgré des pics de chaleur ou des vagues de froid, la température des eaux de la Loire se stabilise, influencée par l'inertie thermique de la masse d'eau, et l'effet tampon croissant des apports océaniques à proximité de l'estuaire.

Les coefficients estimateurs des relations sont résumés sur la Figure 26.

a



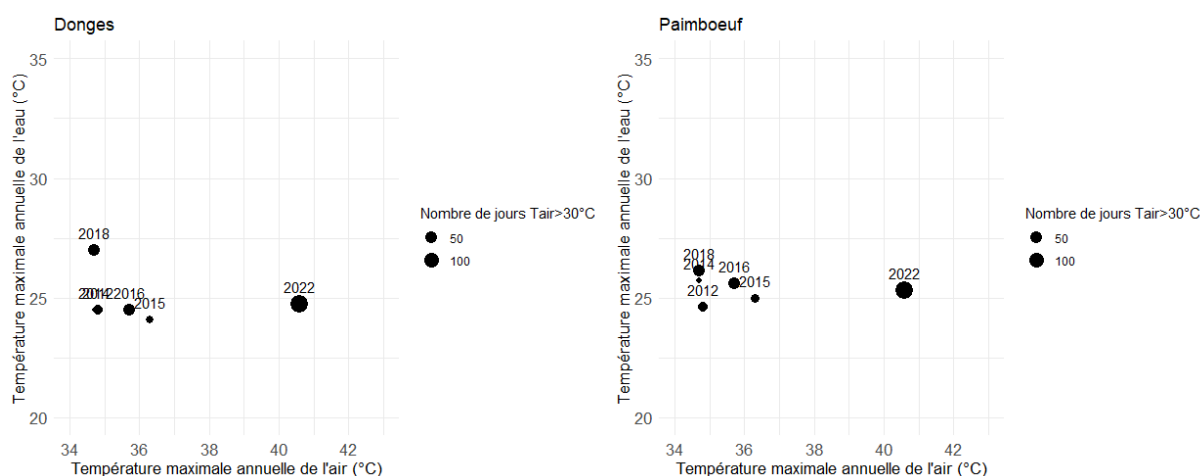
Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER, Météo France

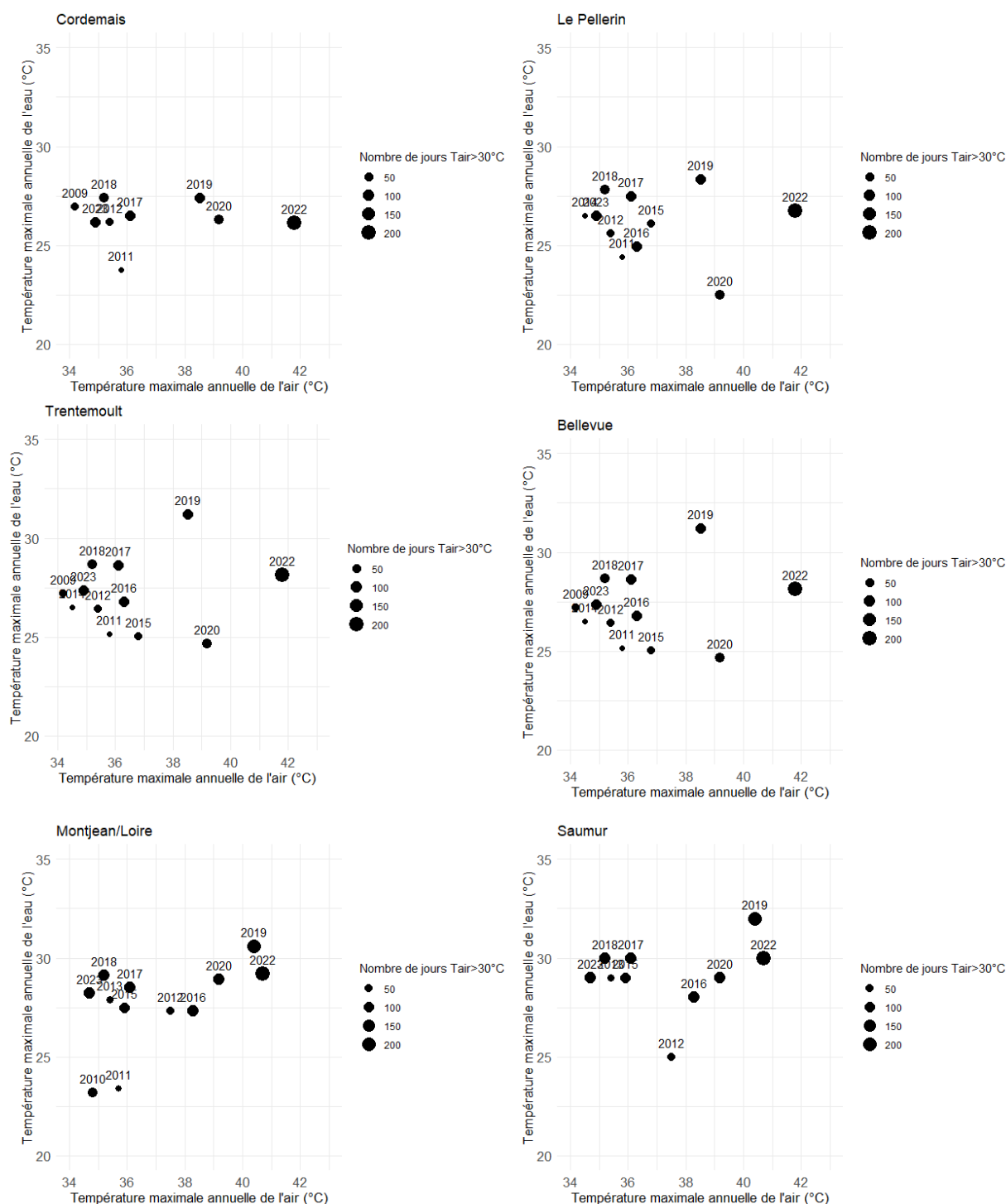
Figure 26 : Coefficients estimateurs des relations linéaires entre la température de l'eau et la température de l'air

Les relations sont toutes significatives. Le coefficient de détermination (r^2) est supérieur à 0,8 pour l'ensemble des stations. Néanmoins, il tend à diminuer de l'amont vers l'aval, signe de l'influence plus forte des apports océaniques sur les stations les plus proches de l'océan.

Les coefficients directeurs diminuent également de l'amont vers l'aval. Pour les stations avec un coefficient directeur proche de 1, la température de l'eau suit globalement la tendance de la température de l'air. Pour les autres stations, le coefficient directeur est inférieur à 1, la température maximale de l'eau est sensiblement plus faible que celle de l'air. L'une des raisons est l'influence des apports océaniques, qui diminuent la température de l'eau, notamment en période estivale.

Pour aller plus loin dans l'analyse, la Figure 27 suivante représente les maxima pour l'air et l'eau, par année. La taille des bulles correspond au nombre total de jours par année où la température de l'air a été supérieure à 30°C au courant de l'été (aux stations de Mont-Bellay, Nantes-Atlantique et Montoir-de-Bretagne).





Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, Météo France

Figure 27 : Relations entre la température maximale annuelle de l'eau et la température maximale annuelle de l'air

Les températures de l'eau les plus élevées sont observées en 2019, excepté pour la station de Donges. La température de l'air la plus élevée est mesurée en 2022, avec une maximale proche des 42°C. En 2019, la température maximale atteint 38,5°C. Les figures montrent bien que les températures de l'eau élevées sont atteintes lors d'épisodes de fortes températures de l'air. Néanmoins, l'intensité de la température de l'air ne suffit pas. D'autres paramètres influencent la température de l'eau.

La durée de l'épisode de canicule joue également un rôle essentiel. C'est l'exemple des années 2019 et 2020. Les températures de l'air restent supérieures à 35°C pendant 21 jours et 11 jours respectivement, à la station de Nantes-Atlantique. Les températures maximales de l'eau sont supérieures en 2019. En effet, les propriétés physiques de l'eau, dont sa capacité calorifique, font que l'eau n'emmagasine pas des calories instantanément. Il est nécessaire que la température de l'air reste élevée plusieurs jours pour augmenter la température de l'eau.

L'année 2022 est une année particulière. En effet, le nombre de jours avec une température de l'air supérieure à 30°C est le plus élevé de la chronique, avec 210 jours, à la station de Nantes-Atlantique. La température de l'eau n'atteint pas les records de 2019. D'autres phénomènes expliquent ces mesures. Dans l'estuaire, les eaux de la Loire ont été refroidies en été par un phénomène d'upwelling (Figure 28). Ce phénomène est caractérisé par une remontée d'eau océanique, depuis la profondeur vers la surface. L'eau profonde, plus froide, remplace l'eau en surface. La température de l'eau diminue. Ce mécanisme s'observe lorsque le vent souffle de la terre vers la mer (vent d'est dans l'estuaire de la Loire). Dans ce cas, le vent repousse au large l'eau de surface chauffée par le soleil, et l'eau venant des terres (plus chaude en été que l'eau océanique).

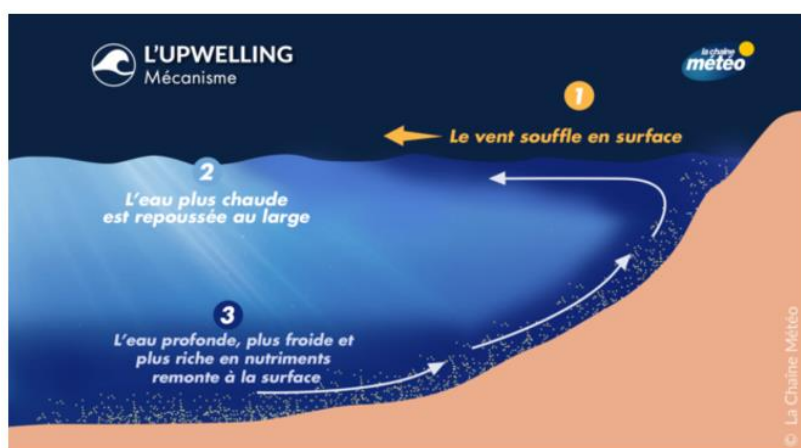


Figure 28 : Principe du phénomène de l'upwelling (source La Chaîne Météo)

L'année 2022 est marquée par des températures maximales de l'air records (42°C à Nantes le 18 juillet), et une moyenne annuelle de 14,4°C à la station de Nantes-Atlantique, soit 1,9°C de plus que les normales, sur la période 1981 – 2010 (Source InfoClimat). Dès le mois de mai, les stations SYVEL du Pellerin, de Trentemoult et de Bellevue mesurent des températures de l'eau élevées. A Trentemoult, la température moyenne journalière est supérieure aux températures journalières pour un mois de mai, du 10 mai au 24 mai, avec un maximum de 23,6°C le 22 mai. Le nombre de jours avec une température journalière supérieure à 20°C est plus élevé en 2022. À Bellevue, la température de l'eau reste supérieure à 20 °C pendant 111 jours consécutifs et supérieure à 25°C pendant 9 jours (respectivement 114 et 21 jours en 2018). Pourtant les températures journalières de l'eau n'atteignent pas les maximums pendant l'été. Deux phénomènes l'expliquent. Le phénomène d'upwelling, observé en juillet et août, a refroidi les eaux du littoral. Les eaux chaudes de surface sont repoussées vers le large grâce au vent d'Est. En parallèle, les faibles débits ont favorisé dans l'estuaire les eaux de l'océan, plus froides.

L'évolution de la température de l'eau dans l'estuaire de la Loire est influencée par les apports océaniques et fluviaux, ainsi que par la température de l'air. L'analyse statistique révèle une corrélation linéaire entre la température de l'air et celle de l'eau, bien que cette relation s'atténue vers l'aval en raison de l'inertie thermique des apports océaniques.

Les températures maximales de l'eau sont généralement enregistrées lors de fortes chaleurs prolongées, comme en 2019 et 2022. Toutefois, en 2022, malgré un nombre record de jours chauds, la température de l'eau n'a pas atteint les sommets de 2019, en raison d'un phénomène d'upwelling. Ce phénomène a refroidi les eaux de l'estuaire en remontant des eaux profondes plus froides sous l'effet des vents d'est. Ainsi, l'évolution de la température de l'eau résulte de plusieurs facteurs combinés, au-delà de la seule intensité des vagues de chaleur.

4.3 Inversion thermique

Dans l'estuaire, les eaux du fleuve et les eaux de l'océan se rencontrent. L'eau apportée par le fleuve offre une grande amplitude de température, alors que l'eau apportée par l'océan offre une plus grande inertie thermique. Ainsi, la température des eaux estuariennes varie suivant la saison (Figure 29). En hiver, l'eau apportée par l'océan est plus chaude que l'eau de la Loire. Inversement, en été, l'océan est plus froid que le fleuve.

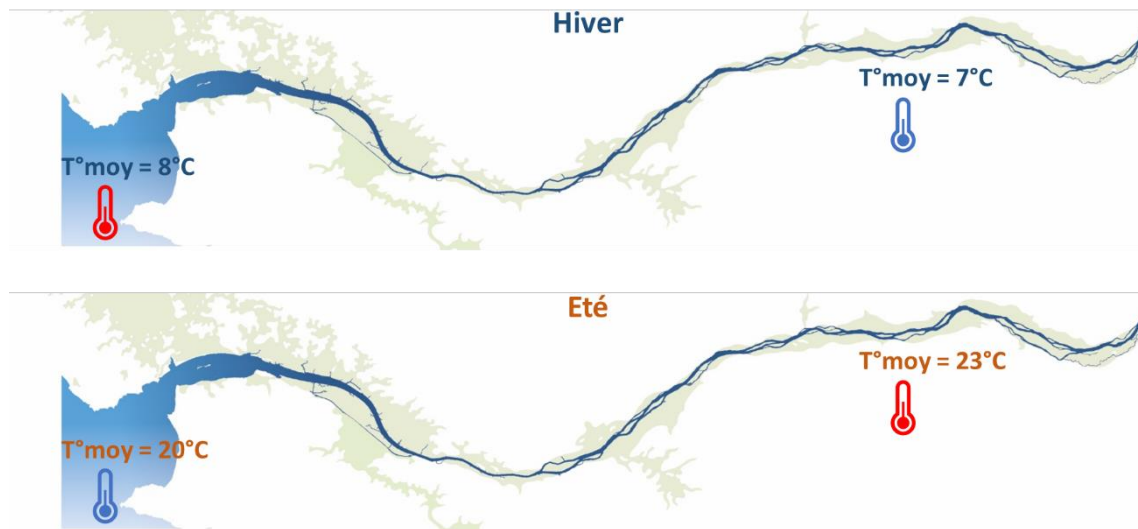


Figure 29 : Principe de l'inversion thermique dans l'estuaire

Ainsi, en hiver, la température de l'eau sera plus élevée sur les stations aval, alors qu'en été, elle sera plus élevée sur les stations amont. Un mécanisme d'inversion des températures de l'eau peut être observé, lorsque les températures à l'amont deviennent plus chaudes que les températures à l'aval, à la fin de la période hivernale. Le mécanisme inverse se produit à la fin de l'été, lorsque les températures à l'amont deviennent plus froides que les températures à l'aval.

Parvenir à définir une date à partir de laquelle l'eau du fleuve devient de manière prolongée, plus chaude que celle de l'océan, puis suivre cette date, devrait indiquer comment évoluent ces points de pivot thermiques annuels : un point de pivot à l'approche de l'étiage avec le réchauffement de la Loire, et un second quand les débits remontent à l'automne, que la température de l'air et la durée d'ensoleillement diminuent.

Les dates d'inversion thermique peuvent être déterminées visuellement pour chaque année, à partir des courbes de température moyenne journalière pour chaque station (Figure 30).

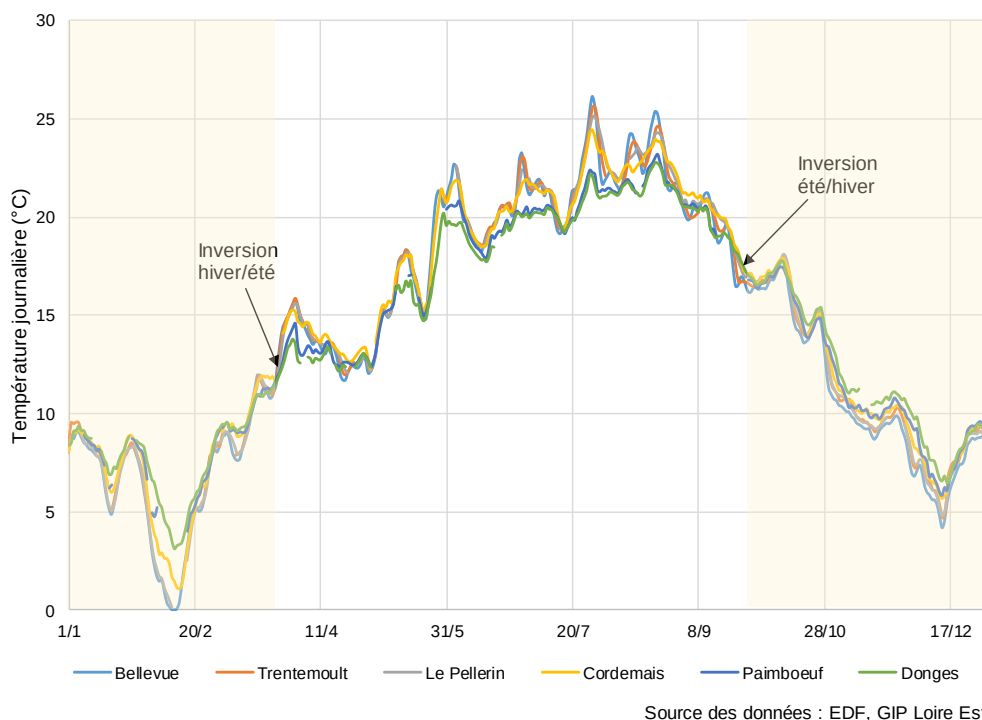


Figure 30 : Inversion de la température de l'eau dans l'estuaire, en fonction de la saison (les zones colorées représentent les périodes avec une température de l'eau plus chaude dans l'océan que dans le fleuve)

Sur la période 2007-2023, les inversions se produisent généralement entre mars et avril, pour l'inversion hiver/été et entre septembre et octobre, pour l'inversion été/hiver.

De manière à affiner l'analyse des dates d'inversion, le choix est fait d'étudier la différence de température journalière entre Paimboeuf et Montjean/Loire. La station de Paimboeuf, bien que moins à l'aval que la station de Donges est retenue pour sa chronique disponible depuis 2007. La station de Montjean/Loire est retenue pour sa position géographique, en zone strictement fluviale. La différence de température journalière est présentée sur la Figure 31.

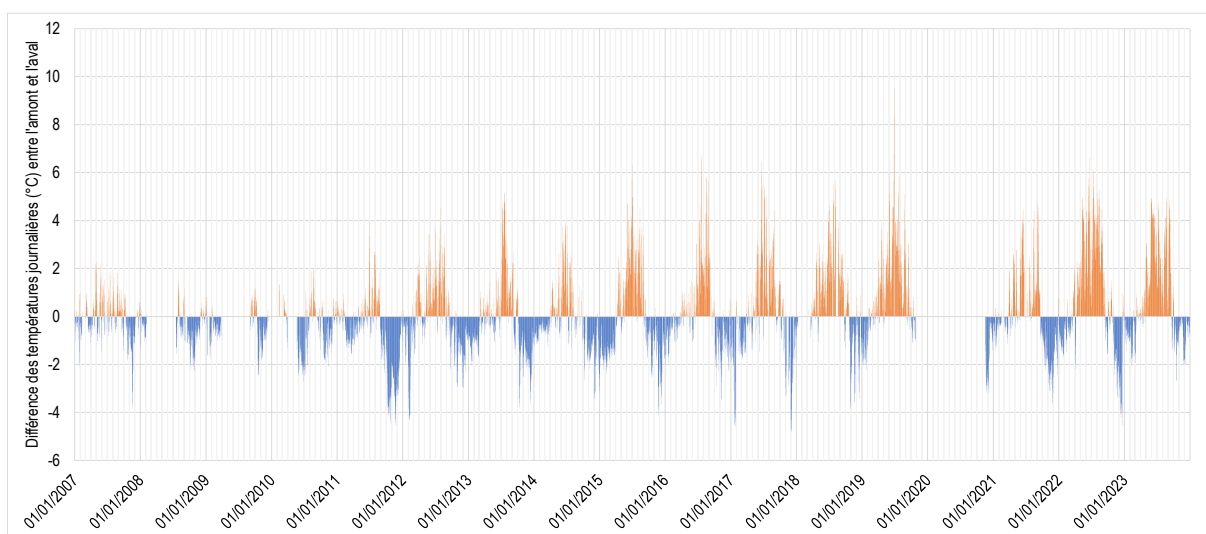


Figure 31 : Différence des températures journalières entre l'amont (Montjean/Loire) et l'aval (Paimboeuf) entre 2007 et 2023

Les valeurs sont positives lorsque la température journalière à Montjean/Loire est supérieure à celle de Paimbœuf. Au début de la chronique, particulièrement entre 2007 et 2011, le signal semble incohérent avec une alternance de valeurs positives et négatives, ce qui contredit l'hypothèse d'une eau fluviale plus chaude en été et plus froide en hiver.

Pour s'affranchir du signal entre 2007 et 2011, l'analyse est menée sur les stations de Donges et Paimbœuf, pour l'aval, et les stations de Trentemoult et Bellevue pour l'amont. Les températures journalières sont moyennées sur l'aval et l'amont, pour augmenter le nombre de situations analysées (Figure 32).

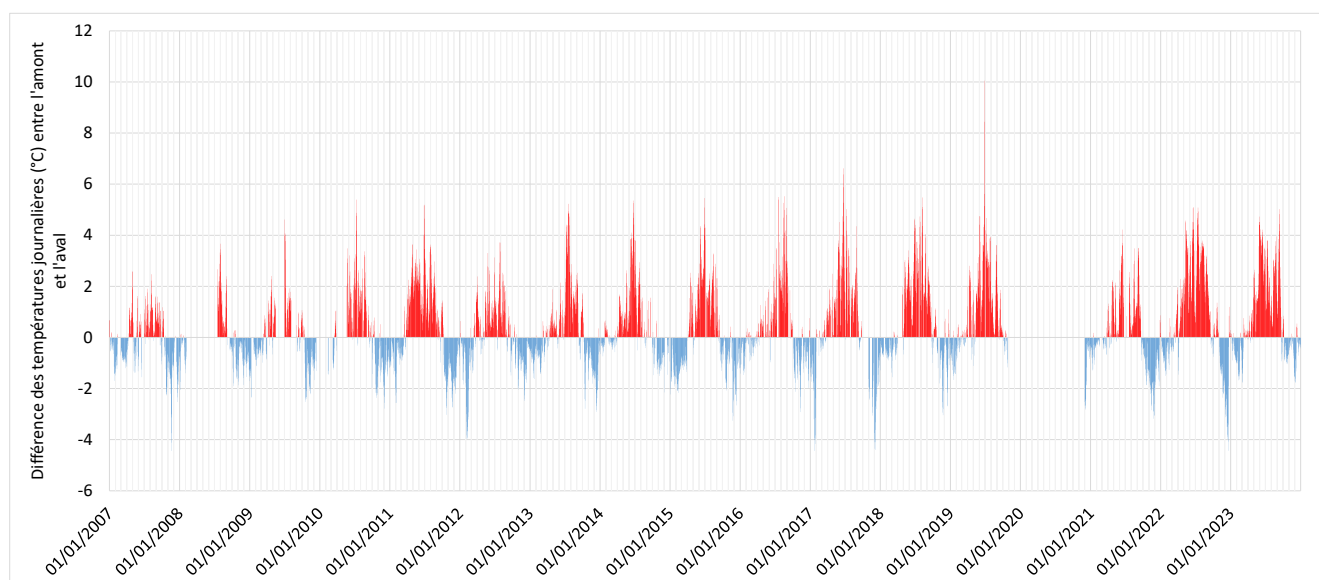


Figure 32 : Différence des températures journalières entre l'amont (moyenne Bellevue/Trentemoult) et l'aval (moyenne Paimbœuf/Donges) entre 2007 et 2023

Le signal de la différence des températures journalières montre une alternance saisonnière, avec des températures plus chaudes à l'amont lors des périodes estivales, et des températures plus froides à l'amont en hiver.

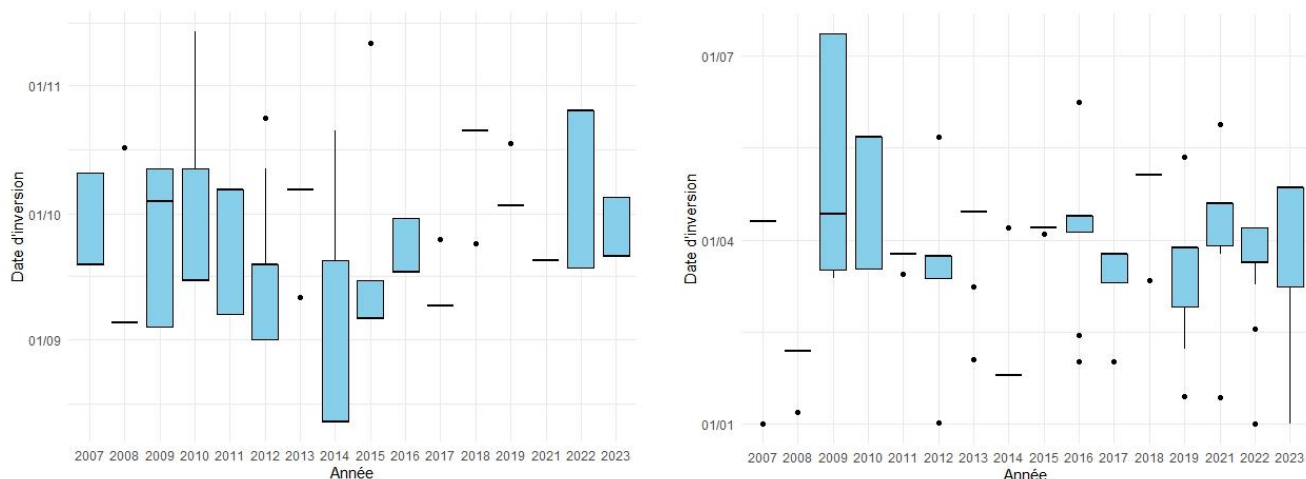
Une dissymétrie est observée dans le signal thermique, caractérisée par des différences positives (amont plus chaud que l'aval) d'amplitude supérieure aux différences négatives (amont plus froid que l'aval). Elle peut être attribuée à plusieurs mécanismes physiques et environnementaux qui interagissent au sein du continuum fluvio-estuarien.

L'asymétrie thermique s'explique principalement par la différence d'inertie thermique entre les masses d'eau continentales et maritimes. Les stations amont (Bellevue/Trentemoult) sont soumises à un régime thermique continental caractérisé par une plus faible inertie thermique, entraînant une réactivité accrue aux variations de température atmosphérique. À l'inverse, les stations aval (Paimbœuf/Donges), sous influence maritime, bénéficient de l'effet tampon thermique de l'océan qui atténue les variations extrêmes.

La dynamique tidale constitue un facteur de régulation thermique significatif dans la zone estuarienne. Les volumes d'eau importants mobilisés lors des cycles de marée induisent un brassage vertical et horizontal qui homogénéise les températures à l'aval, limitant ainsi l'amplitude des écarts négatifs hivernaux. Ce phénomène est particulièrement marqué durant les périodes de vives-eaux, où l'intrusion d'eau marine exerce une influence stabilisatrice sur le régime thermique estuarien.

A partir des différences des températures journalières, entre les stations amont (Bellevue/Trentemoult) et aval (Paimbœuf/Donges), les dates d'inversion sont déterminées. En première intention, la date est définie dès

l'apparition du changement de signe. Afin d'éliminer les artefacts liés aux oscillations transitoires du signal, des critères de persistance sont appliqués, nécessitant la stabilité du changement de signe sur des intervalles temporels entre 2 et 21 jours consécutifs. Les résultats pour l'ensemble des critères sont présentés sur la Figure 33.



Source des données : GIP Loire Estuaire

Figure 33 : Variabilité de la date des inversions thermiques dans l'estuaire, entre 2007 et 2023 (à gauche : été/hiver ; à droite : hiver/été)

Les résultats montrent que les périodes avec un faible nombre de jours entraînent des biais d'analyse, avec des inversions dès le début du mois de janvier, et jusqu'en décembre, en contradiction avec les analyses graphiques prenant en compte l'ensemble des stations. La période de 21 jours peut être contraignante, notamment pour l'inversion hiver/été, avec des dates de début d'inversion nettement plus élevées (en 2009, la période de 21 jours indique une date d'inversion au 12/07, alors que les périodes de 10 et 14 jours indiquent une date d'inversion au 14/04). Le choix du nombre de jours est un facteur impactant fortement la détermination de la date d'inversion. L'analyse des périodes d'inversion thermique révèle des phénomènes complexes qui méritent d'être approfondis.

En effet, lors des périodes transitionnelles (printemps et automne), on observe fréquemment l'établissement d'un quasi-équilibre thermique entre les masses d'eau fluviale et marine. Cette situation se traduit par des oscillations régulières de la température autour d'une position d'équilibre avant qu'une inversion franche ne s'établisse durablement. Ces périodes d'équilibre instable caractérisent les mi-saisons et peuvent s'expliquer par deux facteurs principaux :

- Des conditions météorologiques intermédiaires, avec des températures atmosphériques modérées qui réduisent les contrastes thermiques entre les masses d'eau continentale et maritime.
- Des débits fluviaux se maintenant autour de valeurs moyennes, limitant tant l'influence maritime lors de faibles débits que la dominance fluviale lors de forts débits.

La proximité entre stations retenues (à l'amont et à l'aval) peut également influencer la détection des inversions thermiques. Dans un système où les stations de mesure seraient trop rapprochées, les gradients thermiques pourraient être insuffisamment marqués pour permettre une identification claire des périodes d'inversion. La sensibilité aux oscillations augmente lorsque les différences thermiques sont faibles.

Enfin, la corrélation avec les cycles de marée constitue une hypothèse pertinente. Les coefficients de marée influencent directement le volume d'eau marine pénétrant dans l'estuaire. Lors des périodes de vives-eaux, l'intrusion saline plus importante pourrait temporairement inverser le gradient thermique, tandis que les périodes de mortes-eaux favoriseraient la dominance de l'influence fluviale. Cette cyclicité semi-mensuelle des coefficients

de marée pourrait ainsi se superposer au signal saisonnier et expliquer certaines oscillations observées dans les dates d'inversion, particulièrement lorsque le système est proche de l'équilibre thermique.

Ces considérations suggèrent qu'un critère de persistance optimal pour déterminer les dates d'inversion devrait tenir compte à la fois des variations saisonnières et des cycles tidaux, avec une durée suffisante pour filtrer le bruit induit par les cycles de marée sans être excessive au point de masquer les transitions saisonnières réelles.

Néanmoins, sur la période de mesures, aucune tendance significative à l'avancement ou au recul des dates d'inversion ne peut être mise en évidence.

Une analyse plus approfondie pourra être menée notamment pour analyser l'influence la précision sur la valeur de température et pour étudier l'évolution spatiale du point d'inversion thermique.

Dans l'estuaire de la Loire, les eaux fluviales et océaniques interagissent, entraînant des variations thermiques saisonnières. En hiver, l'océan est plus chaud que le fleuve, tandis qu'en été, il est plus froid. Cette dynamique crée des inversions thermiques : à la fin de l'hiver, l'amont devient plus chaud que l'aval, et l'inverse se produit en fin d'été. L'analyse des dates d'inversion thermique entre 2007 et 2023 montre qu'elles se situent généralement entre mars-avril et septembre-octobre, sans tendance significative à leur évolution.

4.4 Stratification verticale

Les inversions thermiques saisonnières mettent en évidence les interactions complexes entre les eaux fluviales et océaniques dans l'estuaire. Au-delà des variations longitudinales de température, ces échanges influencent également la répartition verticale des masses d'eau. Il a été montré que la température des eaux douces, venant de l'amont, est plus froide en hiver et plus chaude en été, que la température des eaux salées de l'océan.

Au sein de l'estuaire de la Loire, deux masses d'eau se rencontrent : les eaux douces du fleuve et les eaux salées de l'océan. La densité des eaux salées est plus importante, ces eaux auront donc tendance à remonter dans l'estuaire, par le fond. Au contraire, les eaux douces, avec une densité plus faible, restent en surface, créant une stratification verticale des eaux. La superposition des eaux douces et des eaux salées engendre une stratification thermique et haline, dont l'intensité varie en fonction des conditions hydrologiques et hydrodynamiques.

Différentes campagnes d'analyses (Tableau 15) ont été menées dans l'estuaire de la Loire, pour évaluer la stratification verticale de la température, en fonction des conditions hydrologiques.

Tableau 15 : Bilan des conditions des campagnes d'analyse de la stratification de la température de l'eau

	Etiage < 150 m³/s	Etiage 200 – 300 m³/s	Hautes eaux	Crue
Vives eaux	Septembre 2019 Septembre 2006 Août 2005	Juillet 2023 Juillet 2005		Février 2021 Janvier 2004
Mortes eaux		Mai 2022 Décembre 2022	Février 2021	

4.4.1 Etiage/vives eaux

Les campagnes d'étiage/vives eaux sont réalisées au cours de l'été (Figure 34).

A l'aval, à basse mer locale, la température diminue de la surface vers le fond. Le gradient thermique mesuré au niveau de Saint-Nazaire est d'environ 0,2°C. La stratification est légèrement amplifiée à pleine mer locale (gradient de 0,3°C), lorsque les eaux apportées par l'océan au fond sont plus froides que les eaux apportées en surface par le fleuve.

Le gradient vertical diminue en remontant l'estuaire. Sur les stations amont, à pleine mer locale, le gradient vertical est faible, avec une différence de température de 0,1 °C entre la surface et le fond. L'effet de la marée est moindre, ce qui favorise l'homogénéité des températures.

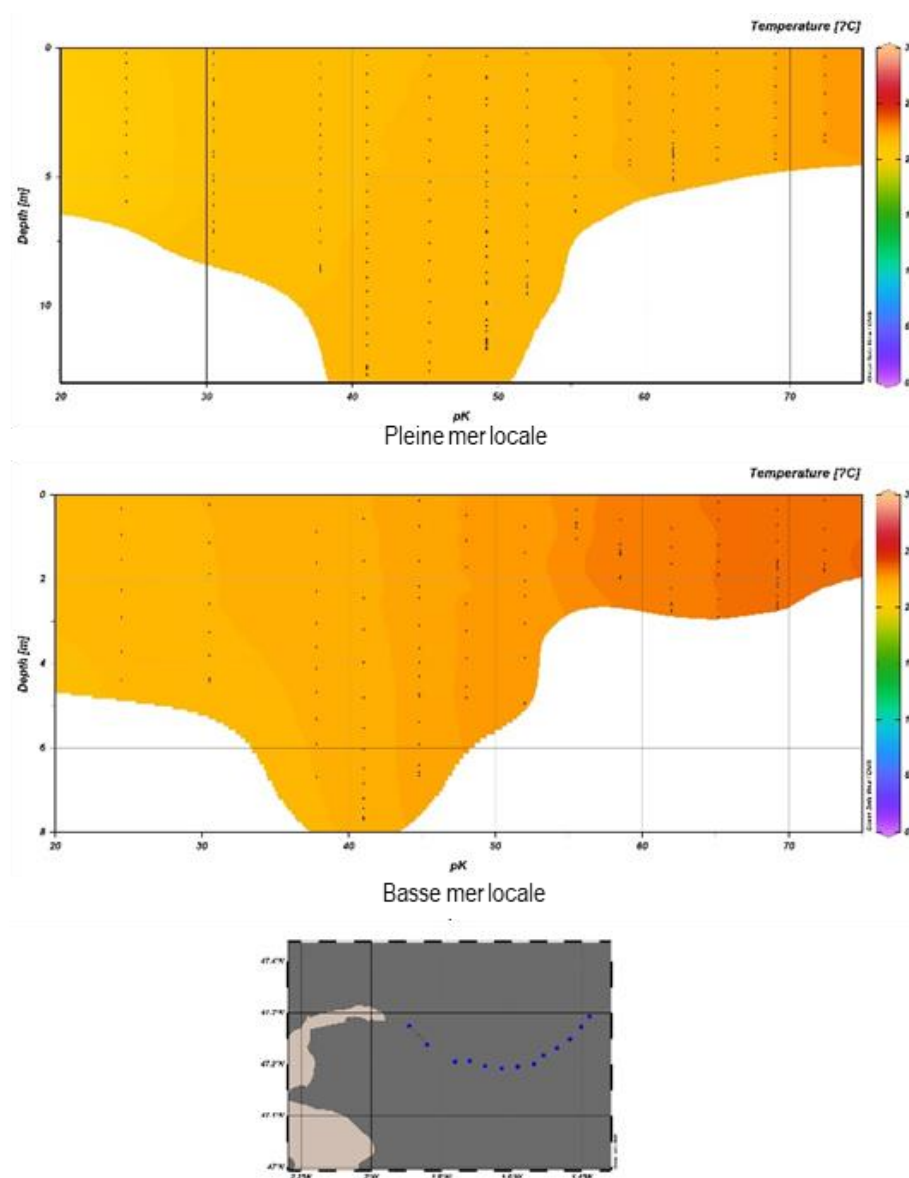


Figure 34 : profils hydrologiques – étiage juillet 2023

4.4.2 Étiage /mortes eaux

Deux campagnes « étiage/mortes eaux » sont organisées au printemps (Figure 35) et en hiver (Figure 36), afin d'observer l'effet de la saisonnalité sur la stratification verticale.

Au cours de la campagne de printemps, la température en surface est plus élevée à l'amont, avec des températures comprises entre 21°C (à pleine mer) et 20,3°C (à basse mer). A l'aval, les températures sont comprises entre 17°C (à pleine mer) et 18,5°C (à basse mer).

La température est plus élevée en surface, entre Saint-Nazaire et Nantes. La stratification verticale est plus importante à l'aval. Lors de la pleine mer locale, l'effet du gradient diminue de l'aval vers l'amont. Au niveau de Saint-Nazaire, une différence de 1,5°C est observée entre la surface et le fond. A l'amont du Pellerin, le gradient diminue pour s'annuler au niveau de Nantes.

Lors de la basse mer locale, le gradient vertical est plus important à Saint-Nazaire. Néanmoins, le gradient semble s'annuler plus à l'aval (au droit de Cordemais), par rapport à la pleine mer locale.

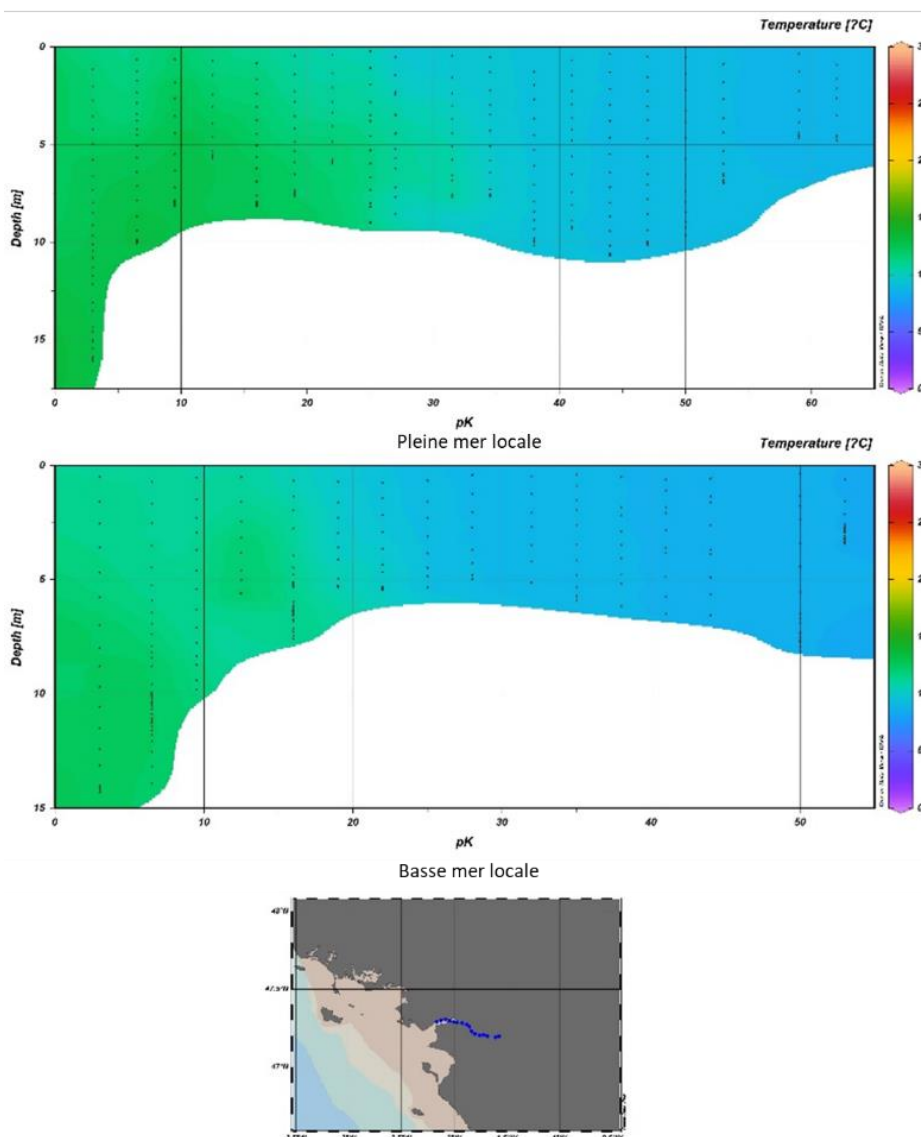


Figure 35 : profils hydrologiques - étiage mai 2022

Au cours de la campagne d'hiver, la température en surface est plus élevée à l'aval, avec des températures comprises entre 11,7°C (à pleine mer) et 11,3°C (à basse mer). A l'amont, la température est stable au cours du cycle de marée, autour de 8,6°C.

La température est plus élevée au fond, entre Saint-Nazaire et Le Pellerin. La stratification verticale est plus importante à l'aval. Lors de la pleine mer locale, l'effet du gradient diminue de l'aval vers l'amont. Au niveau de Saint-Nazaire, une différence de 1,3°C est observée entre le fond et la surface. Le gradient s'annule au niveau du Pellerin.

A basse mer locale, le gradient vertical est identique à Saint-Nazaire. A Cordemais, il devient négligeable.

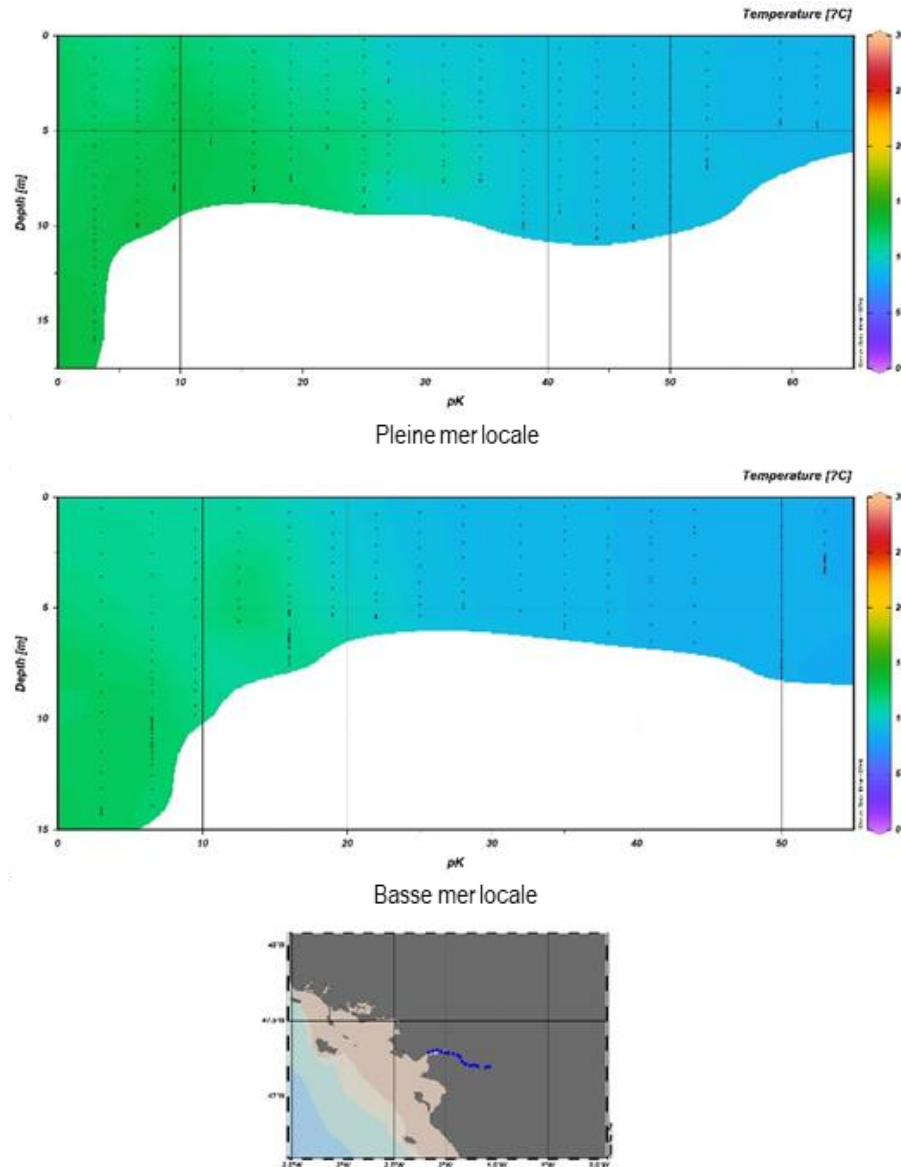


Figure 36 : profils hydrologiques – étiage décembre 2022

L'effet de la saisonnalité est important sur la stratification verticale. Lorsque les températures des eaux fluviales sont plus chaudes que les températures des eaux océaniques, le gradient vertical est plus observé sur une distance plus importante, et avec une amplification du phénomène à basse mer. La remontée des eaux océaniques, par le fond, est plus marquée.

Les courants de marée ont un effet important sur la stratification. En vive-eau, les courants augmentent, entraînant une diminution de la stratification.

4.4.3 Hautes-eaux

La campagne en hautes-eaux est réalisée en hiver, suite à un épisode de crue (Figure 37).

En 2021, en surface, le gradient thermique entre l'amont et l'aval est faible. Au niveau du Pellerin, la température oscille entre 9,3°C (à pleine mer) et 9,2°C (à basse mer). A l'aval, à Saint-Nazaire, la température varie entre 9,3°C (à pleine mer) et 8,6°C (à basse mer).

De Saint-Nazaire à Paimbœuf à basse mer locale, la température diminue lorsque la profondeur augmente. A l'amont de Cordemais, le gradient vertical de température n'est plus visible.

A pleine mer locale, le gradient vertical est mesuré jusqu'à Cordemais, sous l'effet des apports d'eau océaniques.

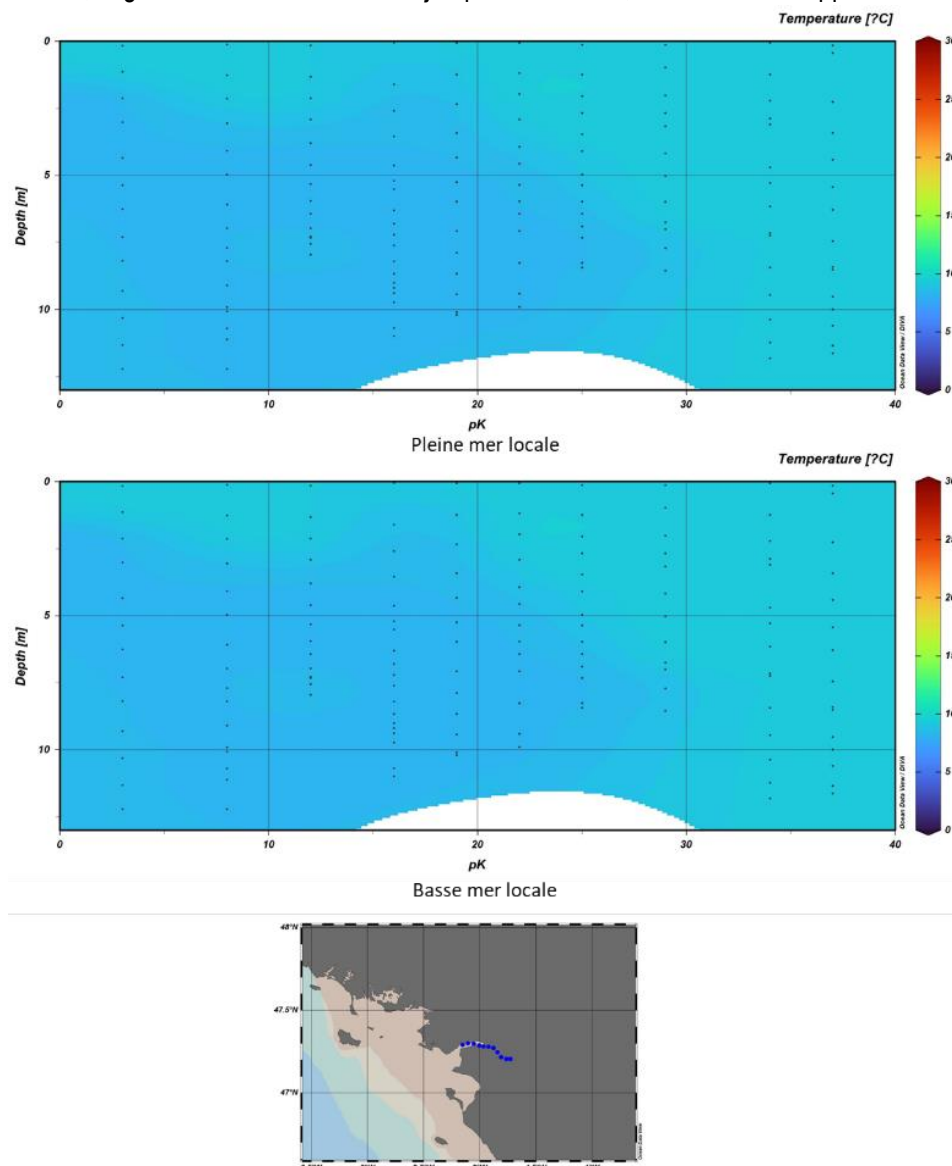


Figure 37 : profils hydrologiques - Hautes eaux février 2021

4.4.4 Crue

Les campagnes en crue sont réalisées en hiver (Figure 38).

En 2021, en surface, le gradient thermique entre l'amont et l'aval est de $-0,8^{\circ}\text{C}$. Les eaux fluviales sont plus froides, avec des températures de l'ordre de $6,3^{\circ}\text{C}$. A l'aval, les eaux océaniques ont des températures comprises entre 7°C (à pleine mer) et $6,9^{\circ}\text{C}$ (à basse mer).

A l'aval (entre St Nazaire et Donges), à basse mer locale, une augmentation de la température en profondeur est observée, avec un écart d'environ $1,5^{\circ}\text{C}$, par rapport à la surface. A l'amont de Donges, le gradient thermique disparaît.

A pleine mer locale, l'intrusion des eaux océaniques accentue le gradient thermique, avec une différence de $2,5^{\circ}\text{C}$ entre le fond et la surface. Le gradient vertical disparaît à l'amont de Cordemais.

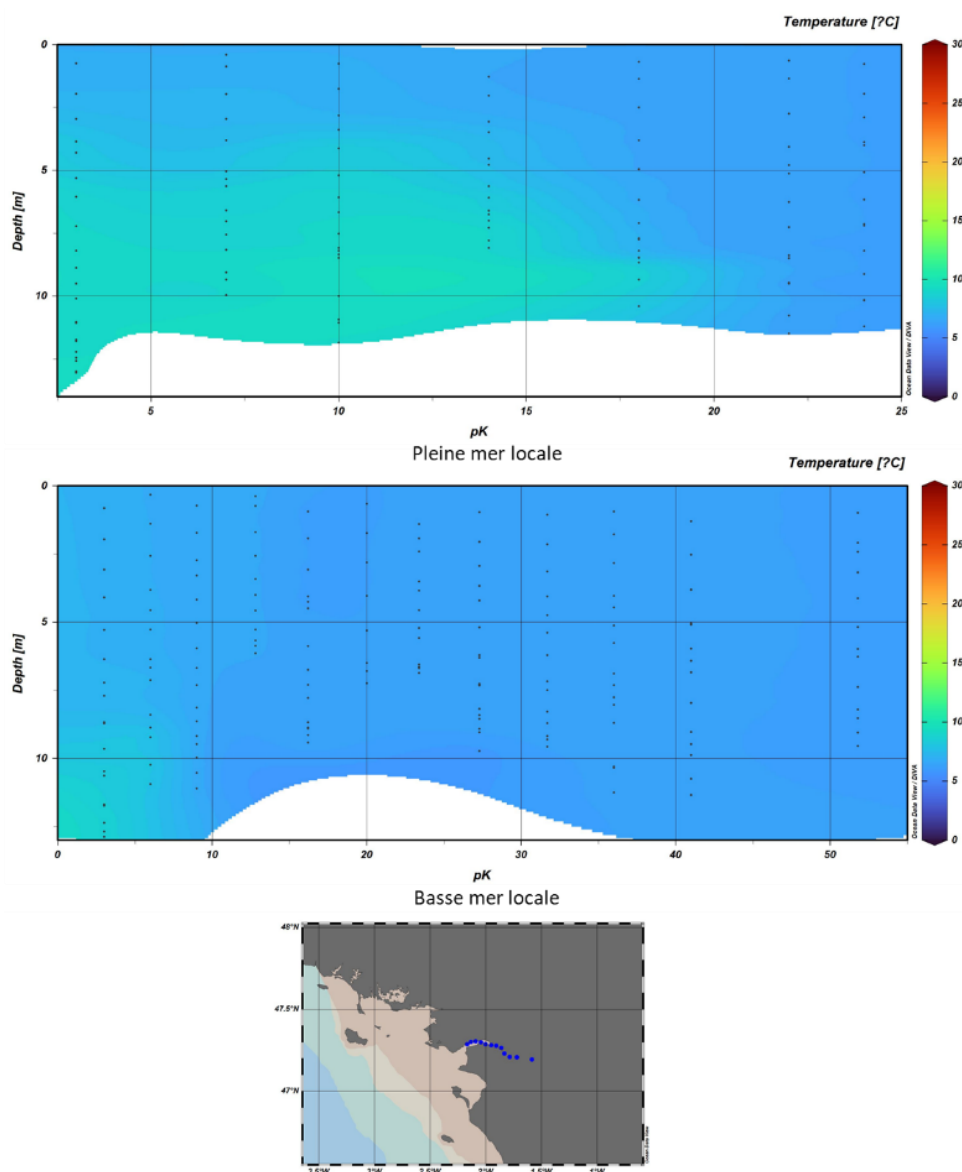


Figure 38 : Profils hydrologiques - crue février 2021

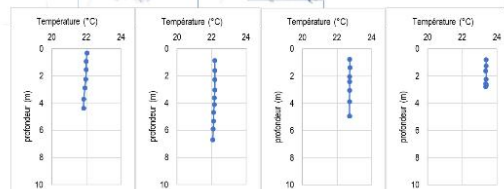
La stratification des masses d'eau résulte de l'influence des conditions hydrologiques : le coefficient de marée impacte l'oscillation de la masse d'eau saline au sein de l'estuaire, alors que le débit fluvial va contrôler sa position et limiter la remontée du front de salinité. La stratification devient plus forte lors des marées de mortes-eaux.

Dans l'estuaire de la Loire, les eaux douces du fleuve et les eaux salées de l'océan se superposent en raison de leur différence de densité, entraînant une stratification verticale. La température des eaux fluviales varie plus fortement que celle des eaux océaniques, influençant cette stratification selon les saisons et les conditions hydrologiques.

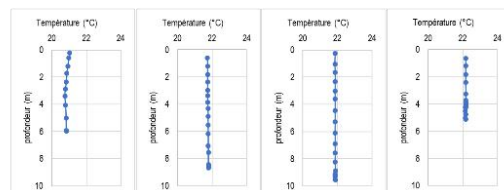
Les campagnes d'analyse montrent que la stratification est plus marquée à l'aval et s'atténue en remontant l'estuaire. En période d'étiage, la stratification est plus prononcée à pleine mer locale. Au printemps et en hiver, les gradients thermiques sont plus visibles à l'aval, notamment en basses eaux. Lors des hautes eaux et des crues, la stratification diminue sous l'effet des forts débits fluviaux. Les marées vives réduisent la stratification, tandis que les marées de mortes-eaux la renforcent.

Etiage

Vives eaux

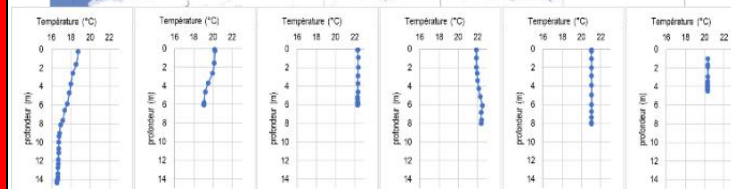


Basse mer locale

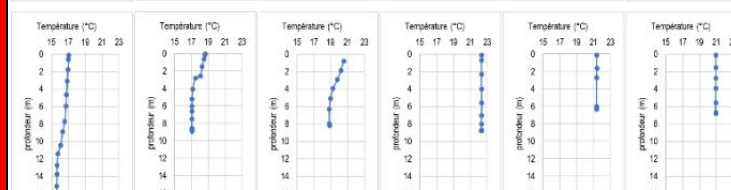


Pleine mer locale

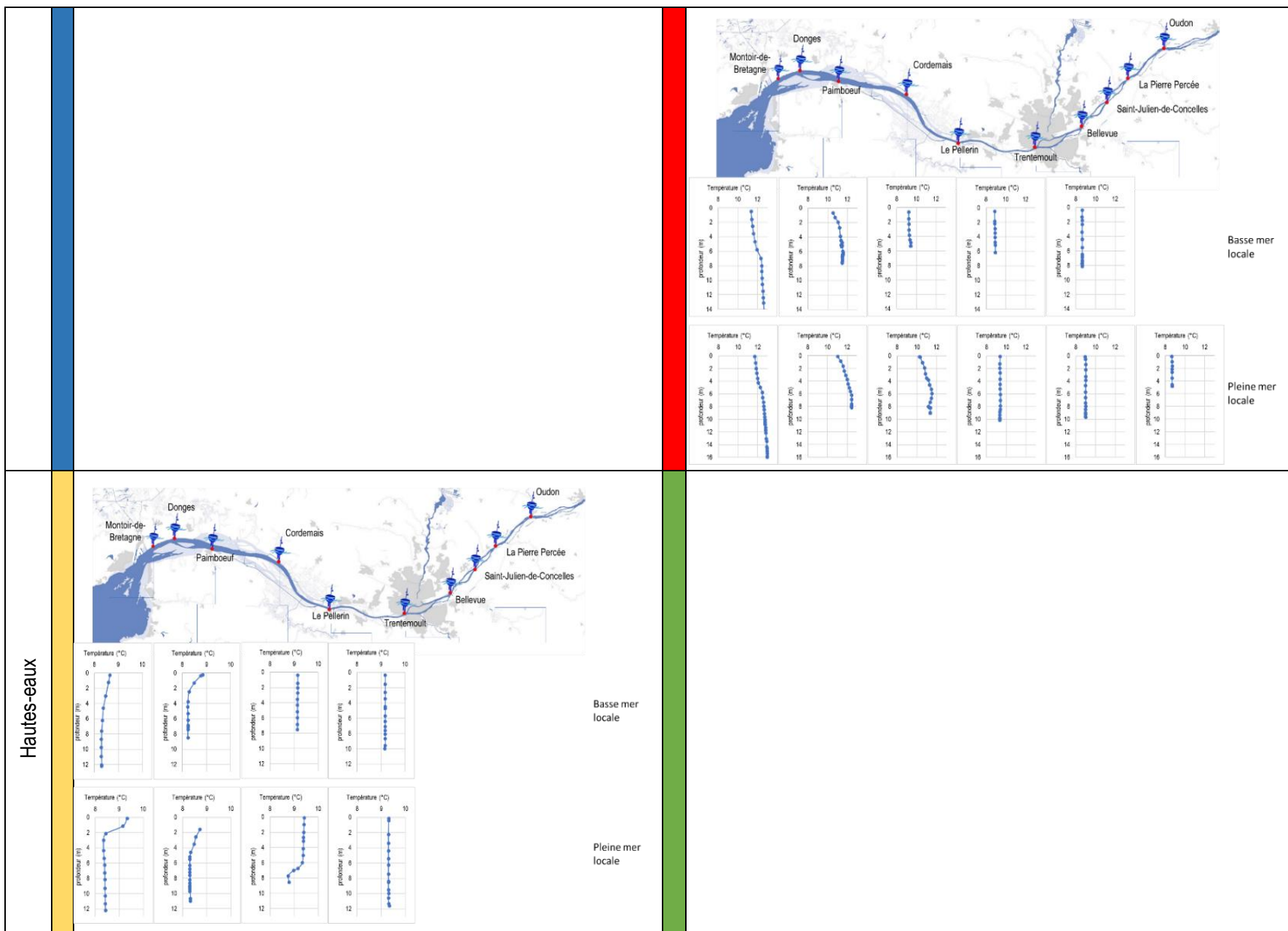
Mortes eaux



Basse mer locale



Pleine mer locale



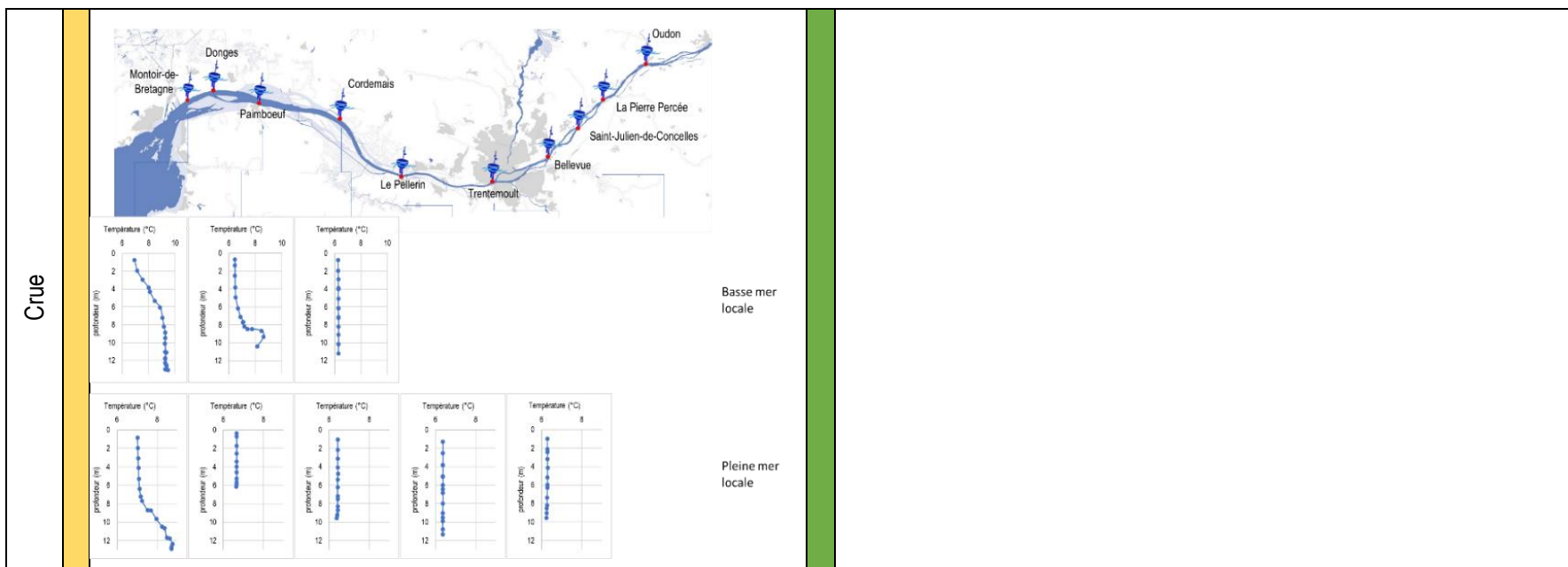
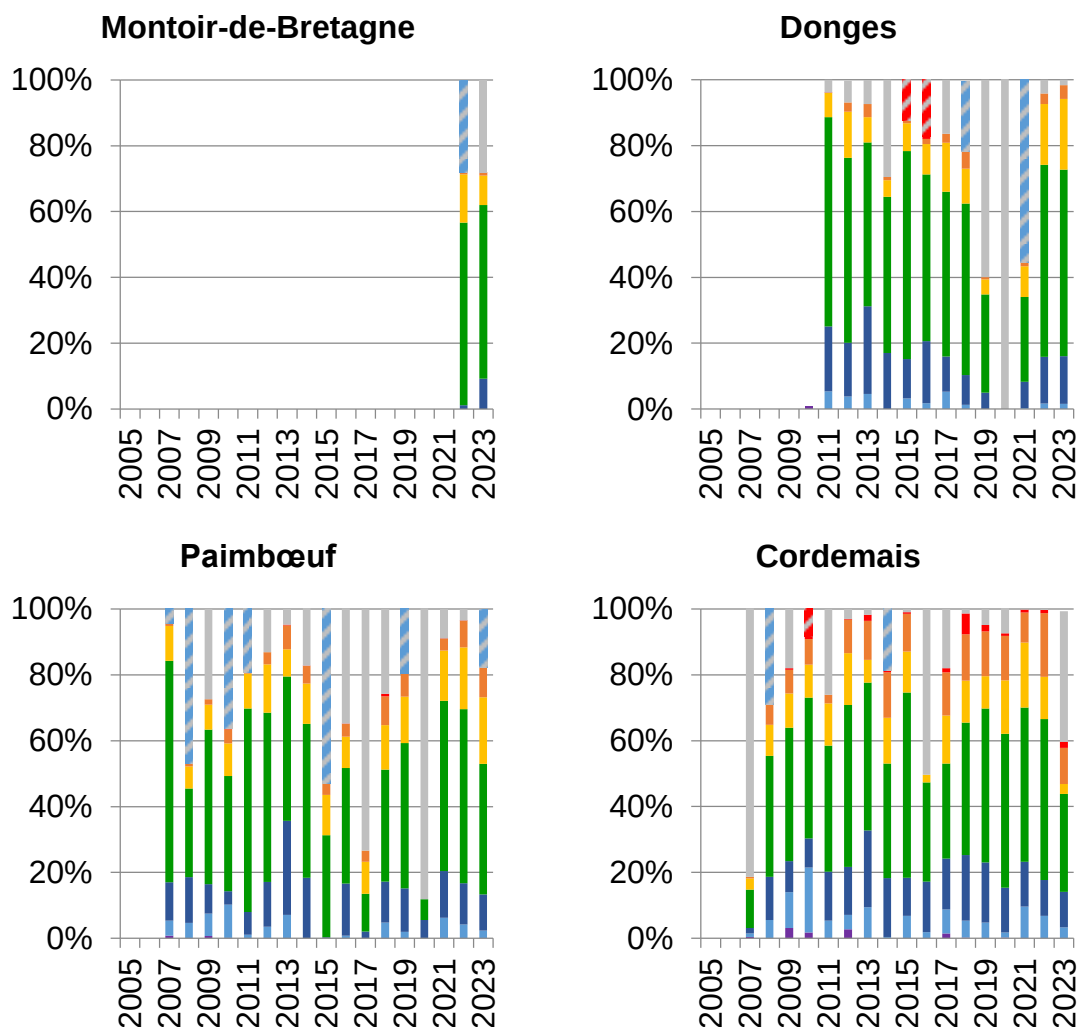


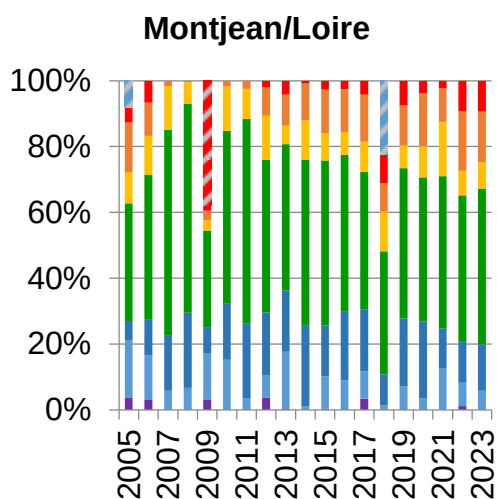
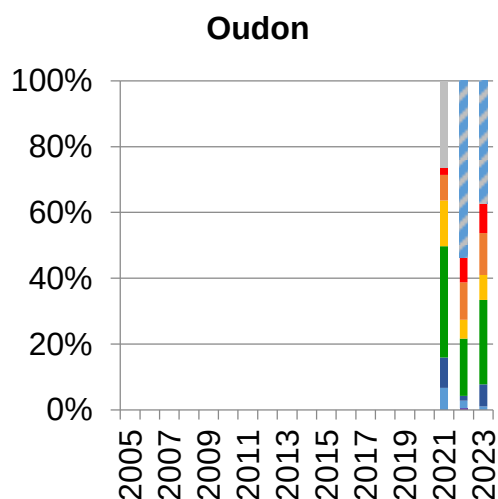
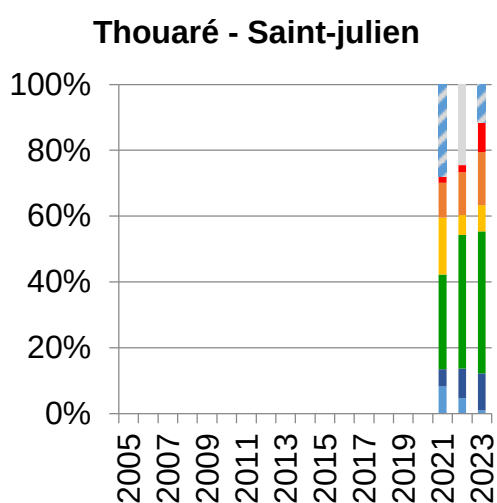
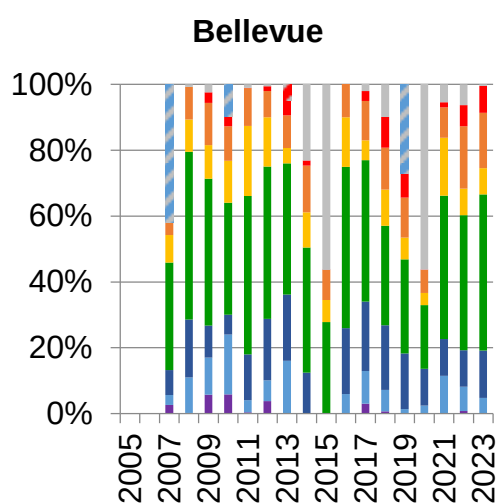
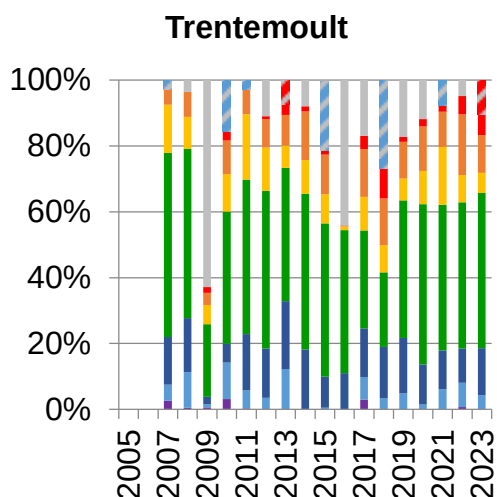
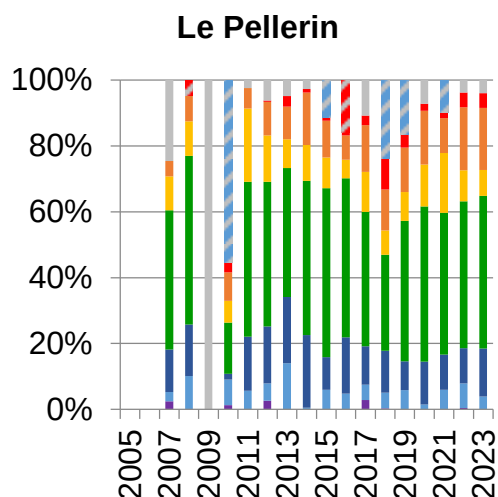
Figure 39 : Bilan de la stratification de la température, dans l'estuaire, en fonction des conditions hydrologiques

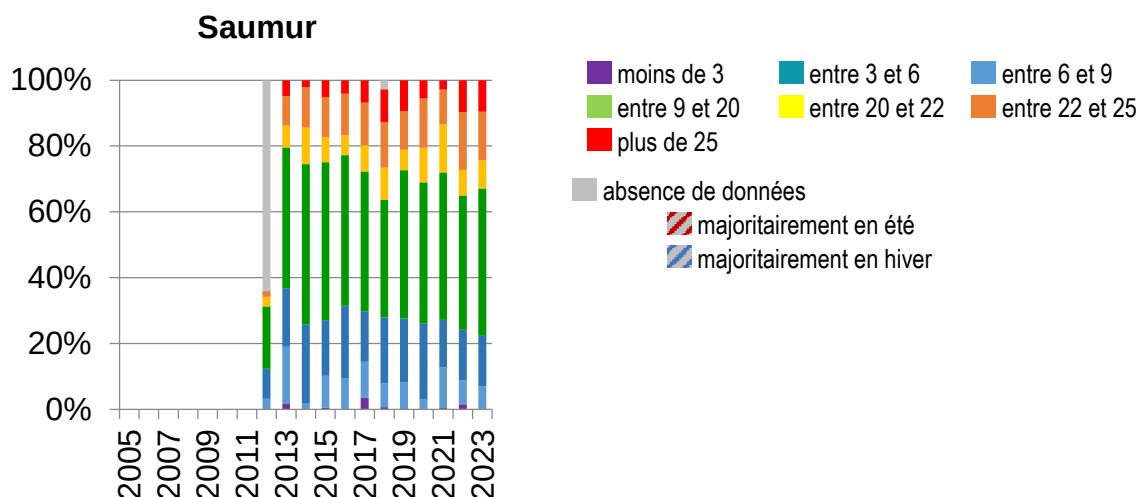
4.5 Evolution 2005-2023

L'analyse des variations thermiques sur une période prolongée permet d'identifier les tendances significatives et d'évaluer les potentielles modifications des régimes thermiques dans l'estuaire. L'acquisition de données à haute fréquence temporelle depuis 2005 constitue une série chronologique fiable pour caractériser ces évolutions et contextualiser les observations contemporaines dans une perspective décennale.

Les températures sont mesurées sur certaines stations depuis 2005, à haute fréquence. La Figure 40 suivante présente les pourcentages de temps, pour chaque station, par gamme de température.







Source des données : DREAL Pays de la Loire, GIPLE

Figure 40 : Distribution des gammes de température par station (2005-2023)

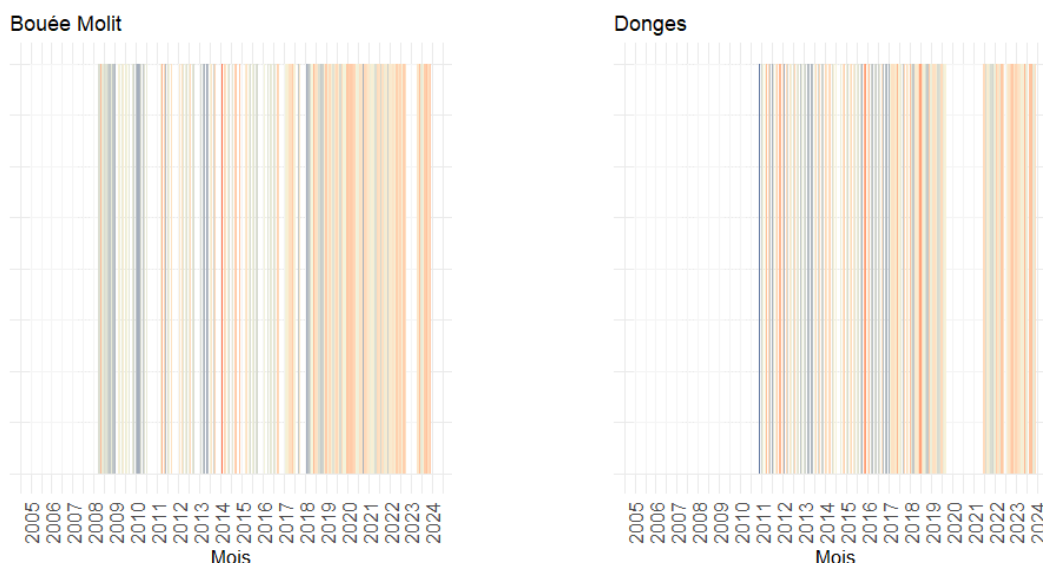
Pour l'ensemble des stations, le pourcentage de temps avec une température de l'eau comprise entre 9 et 20°C varie entre 40 et 60% de l'année. Ces pourcentages sont plus faibles sur les stations amont, et ont tendance à augmenter et à atteindre 60% pour les stations à l'aval, sous influence plus forte de l'océan.

Sur les stations à l'aval (de Montoir-de-Bretagne à Paimbœuf), les températures restent comprises entre 3 et 25°C, comme cela a déjà été montré dans les différents paragraphes de cette étude.

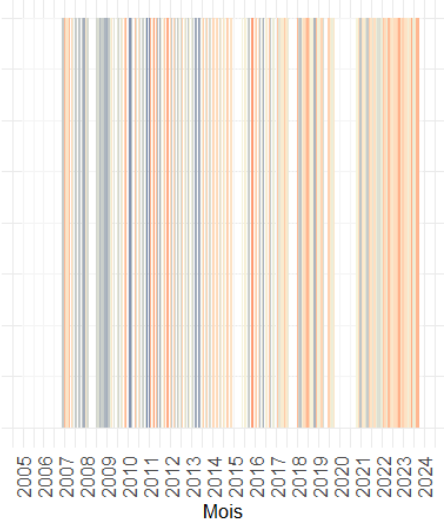
Sur la période 2005-2023, la température de l'eau est largement dépendante des conditions météorologiques avec des étés chauds et secs (2011, 2015, 2018, 2019 et 2022), et des hivers froids (2009, 2012, 2017).

L'étude des températures supérieures aux seuils 20 et 25°C fait l'objet d'un paragraphe spécifique (cf 4.6). Le paragraphe 4.7 revient sur les températures basses.

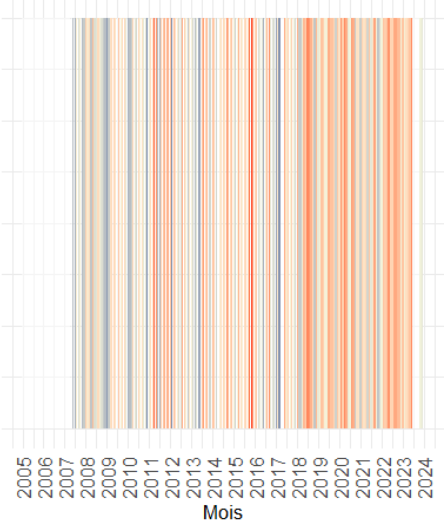
L'analyse des séries temporelles depuis 2005 permet de montrer un réchauffement des températures de l'air et de l'eau, sur le long terme. La Figure 41 présente les anomalies des températures mensuelles (différence entre la température mensuelle et la moyenne interannuelle des températures mensuelles, pour chaque station).



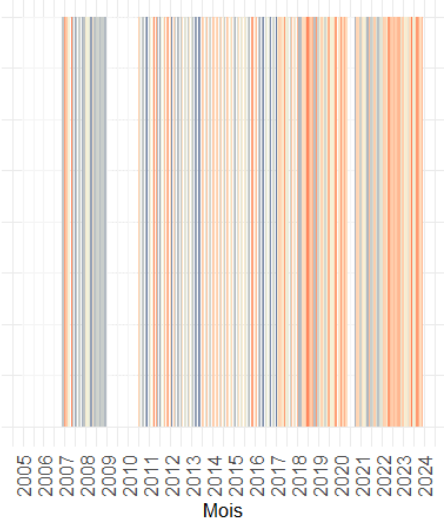
Paimbœuf



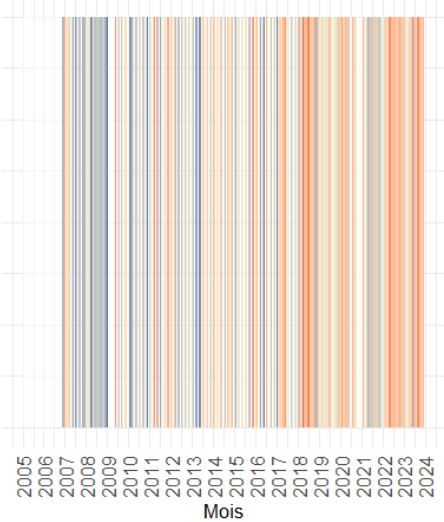
Cordemais



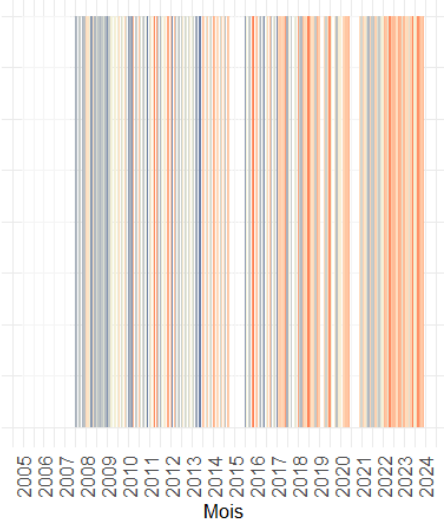
Le Pellerin



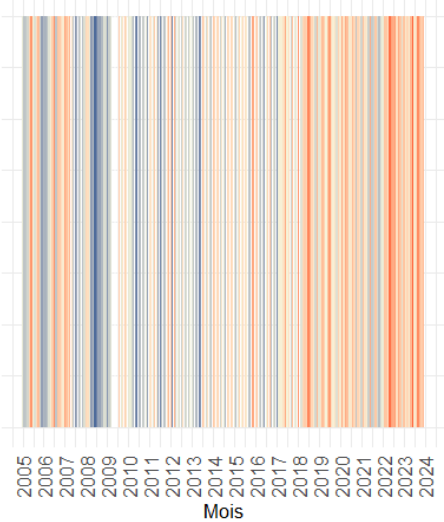
Trentemoult

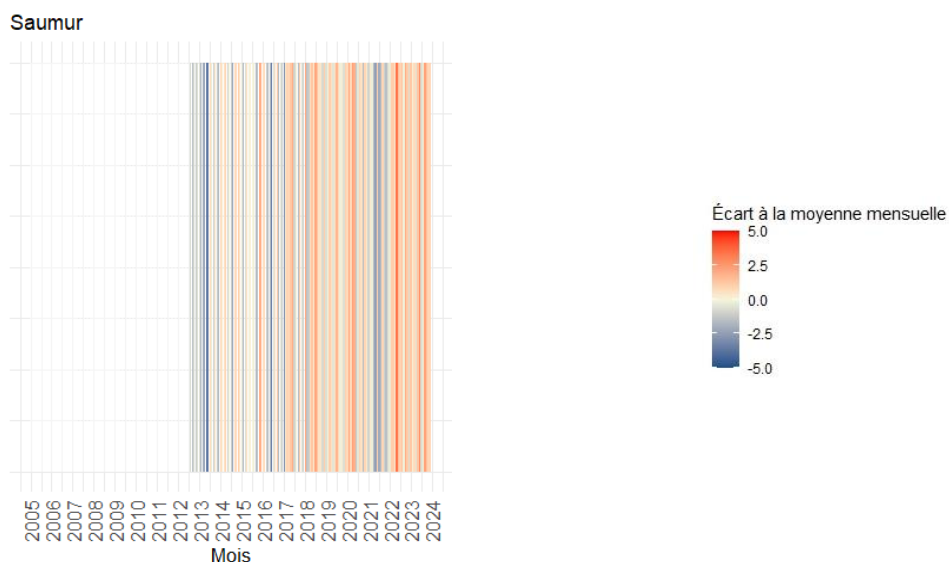


Bellevue



Montjean/Loire

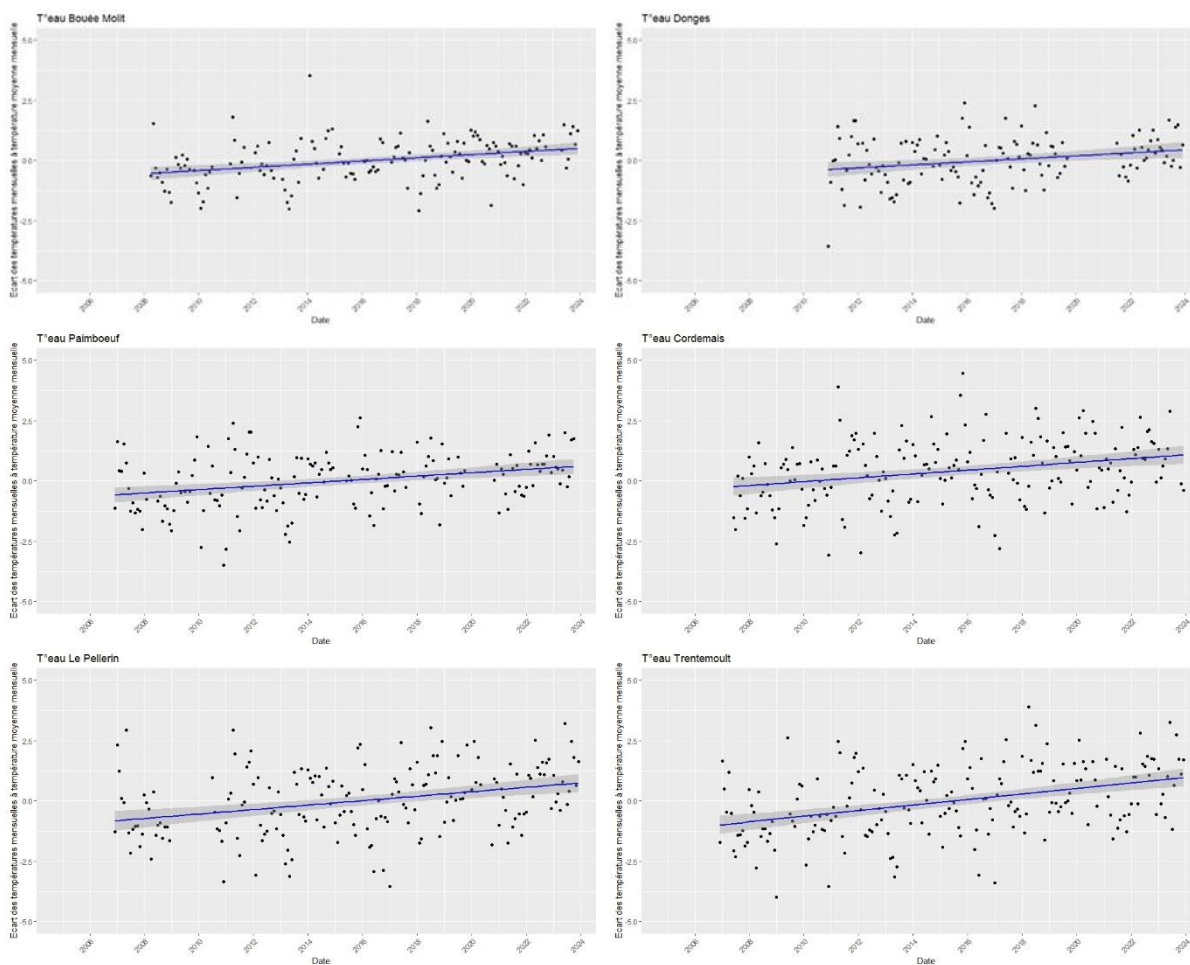


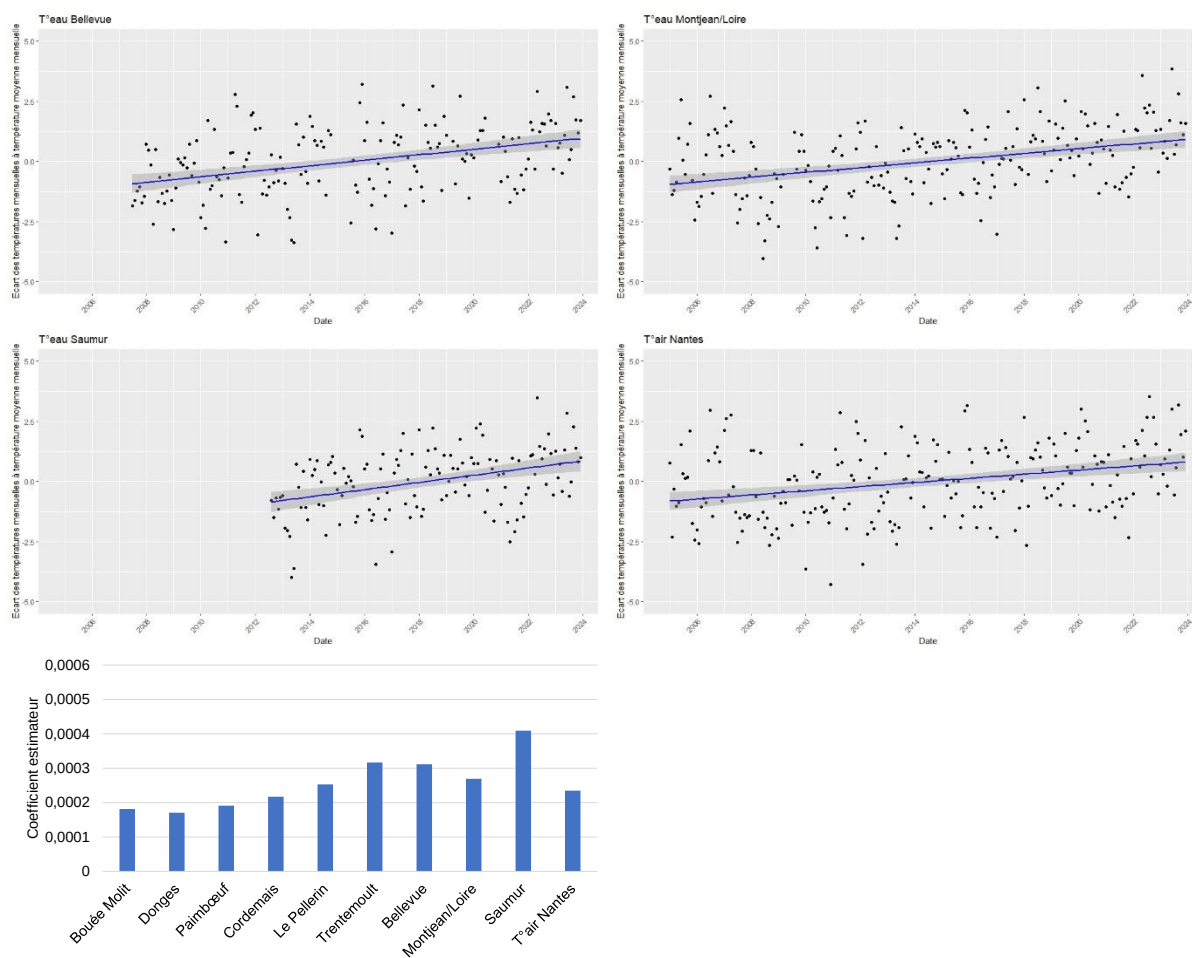


Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 41 : Ecart des températures mensuelles à la moyenne des températures par mois, sur la période 2005-2023

Les anomalies des températures mensuelles augmentent de manière significative sur l'ensemble des stations. Les régressions linéaires sont présentées ci-dessous (Figure 42).





Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER, Météo France

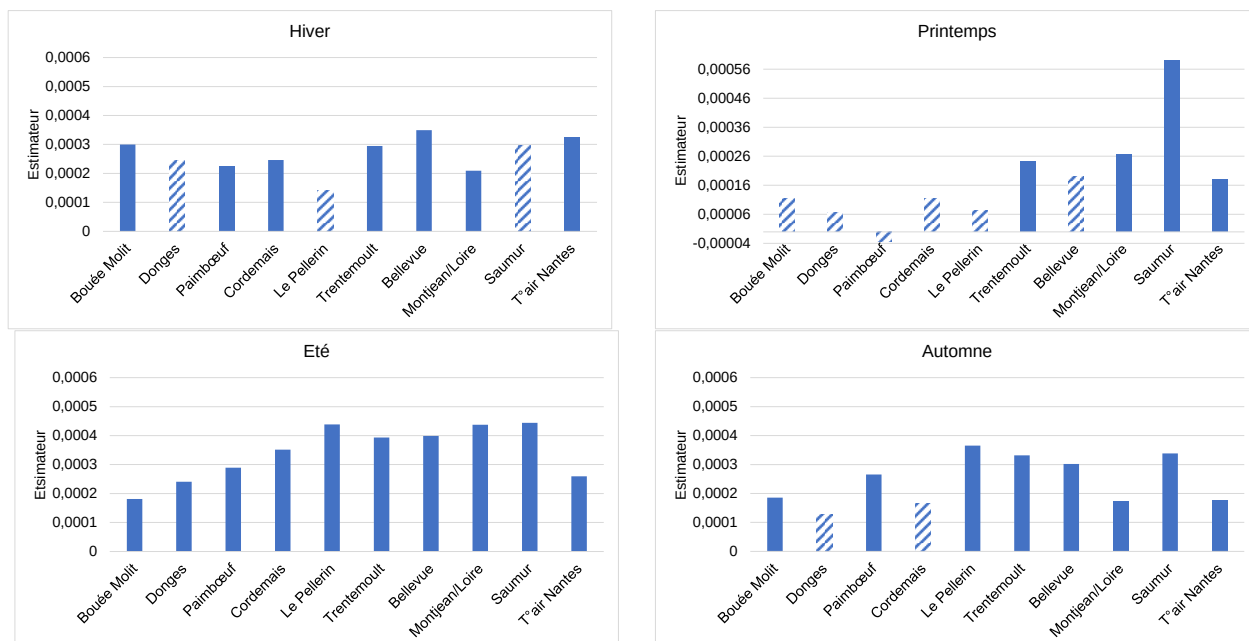
Figure 42 : tendance pour les anomalies des températures mensuelles, avec un modèle de régression linéaire – tendance des coefficients estimateurs

Les coefficients estimateurs de chaque station montrent une diminution de l'amont vers l'aval, pour la température de l'eau. Le réchauffement des températures mensuelles est plus faible sur les stations aval, soumises aux apports océaniques avec une plus grande inertie thermique. Le réchauffement des cours d'eau est plus rapide et plus important.

Le réchauffement de la température de l'air est plus faible que celui de la température de l'eau pour les stations à l'amont du Pellerin, n'expliquant pas en totalité le réchauffement des températures de l'eau.

La même analyse est menée sur les températures saisonnières (Figure 43). Les courbes sont présentées en annexe. Globalement, l'air et l'eau se réchauffent pendant toutes les saisons. Néanmoins, la tendance est moins significative au printemps.

En été, les températures augmentent plus, pour toutes les stations, par rapport aux autres saisons.



* Les barres hachurées correspondent aux tendances non significatives.

Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER, Météo France

Figure 43 : tendance des coefficients estimateurs, pour les régressions linéaires des moyennes saisonnières des températures de l'eau et de l'air

Depuis 2005, les températures de l'eau sont mesurées en continu sur plusieurs stations de l'estuaire de la Loire. Environ 40 à 60 % du temps, elles varient entre 9 et 20°C, avec une influence océanique plus marquée à l'aval. Les températures extrêmes sont principalement observées en été et en hiver, suivant les conditions météorologiques.

L'analyse des données de 2005 à 2023 révèle une tendance au réchauffement des températures de l'air et de l'eau, avec une hausse plus marquée en été. Le réchauffement est plus important à l'amont, tandis que l'aval, soumis à l'influence océanique, montre une inertie thermique plus grande. Ce réchauffement dépasse l'évolution de la température de l'air, suggérant des facteurs additionnels influençant les cours d'eau.

4.6 Seuils 20°C – 25°C

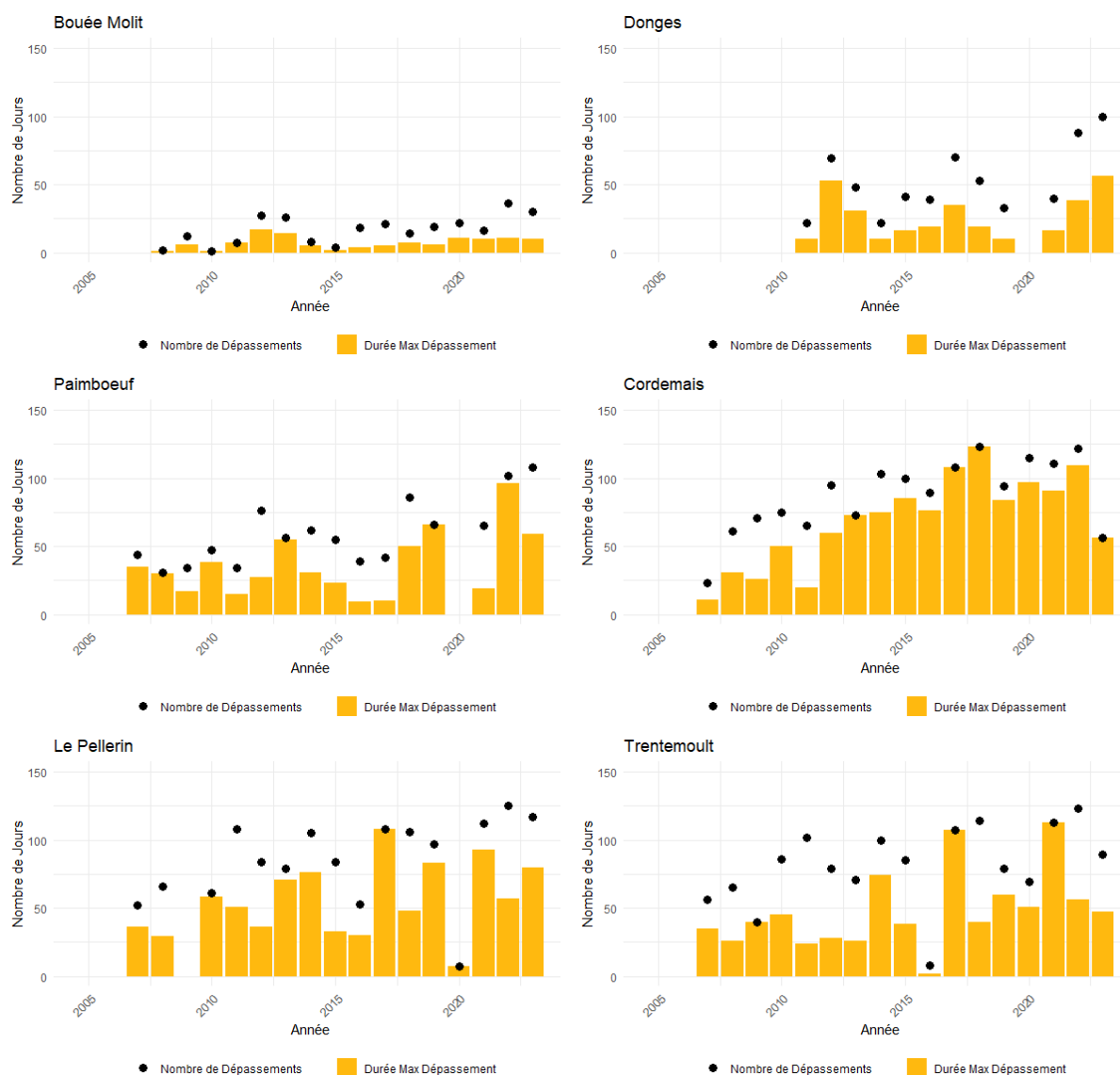
Des températures de l'eau élevées peuvent avoir un impact significatif sur les organismes aquatiques directement, mais aussi sur les paramètres physico-chimiques. Deux seuils sont définis pour des températures de 20°C et 25°C. Ces seuils correspondent à des contraintes de migration pour les espèces de poisson. A 20°C, la migration est limitée. A 25°C, des mortalités de poissons peuvent apparaître.

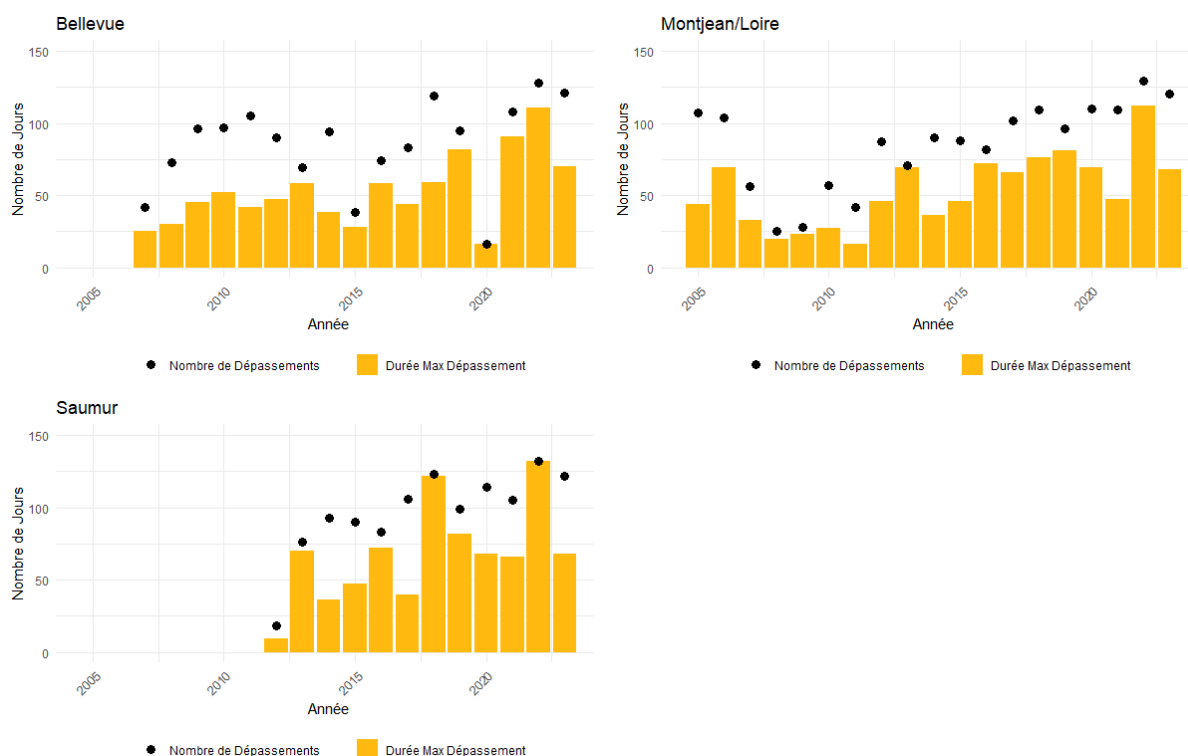
Les analyses présentées sont réalisées à partir des moyennes journalières, calculées à partir des jours avec au minimum 80 % de données.

Sur les stations de la Bouée Molit, Donges et Paimboeuf, aucune température moyenne journalière supérieure à 25°C n'est observée, sur la période 2007-2023.

4.6.1 Durée de dépassement

Pour les températures au-dessus de 20°C et 25°C, le nombre de jours est calculé pour chaque station. Le nombre de jours total, par année, pour chaque seuil, est représenté par un point. Le nombre maximal de jours consécutifs au-dessus des seuils est représenté par le diagramme en barre. Il est calculé en considérant les périodes avec une température supérieure au seuil, sans retour en arrière de plus de 1°C (Figure 46).



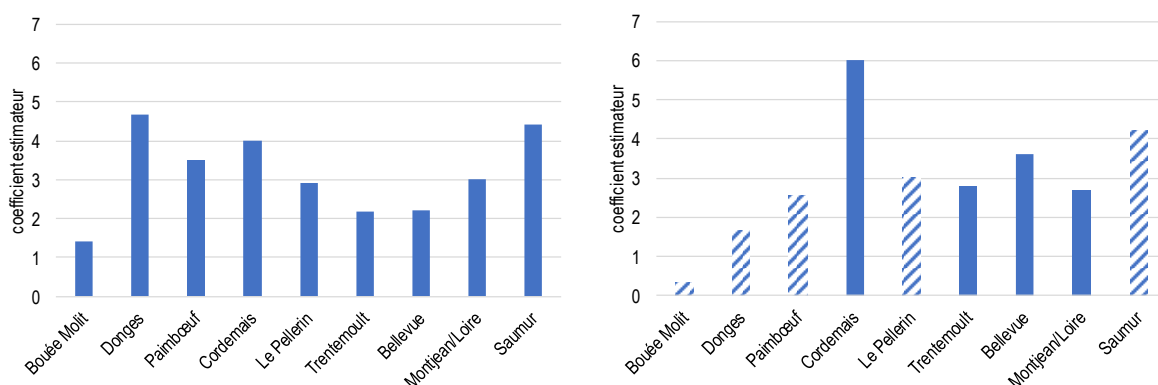


Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 44 : Durée de dépassement du seuil 20°C, en nombre de jours

Sur l'ensemble des stations, il y a une augmentation significative du nombre de dépassement du seuil de 20°C (Figure 45). Dans l'estuaire, plus les stations sont à l'aval, plus le coefficient augmente, signe que l'augmentation du nombre de dépassement est plus importante. Le nombre de dépassement, au droit de la Bouée Molit, augmente moins vite.

La durée maximale de dépassement augmente de manière significative sur les stations à l'amont du Pellerin. La tendance à Saumur, ainsi que sur les stations aval, n'est pas significative, mais le nombre d'années prises en compte est plus faible.

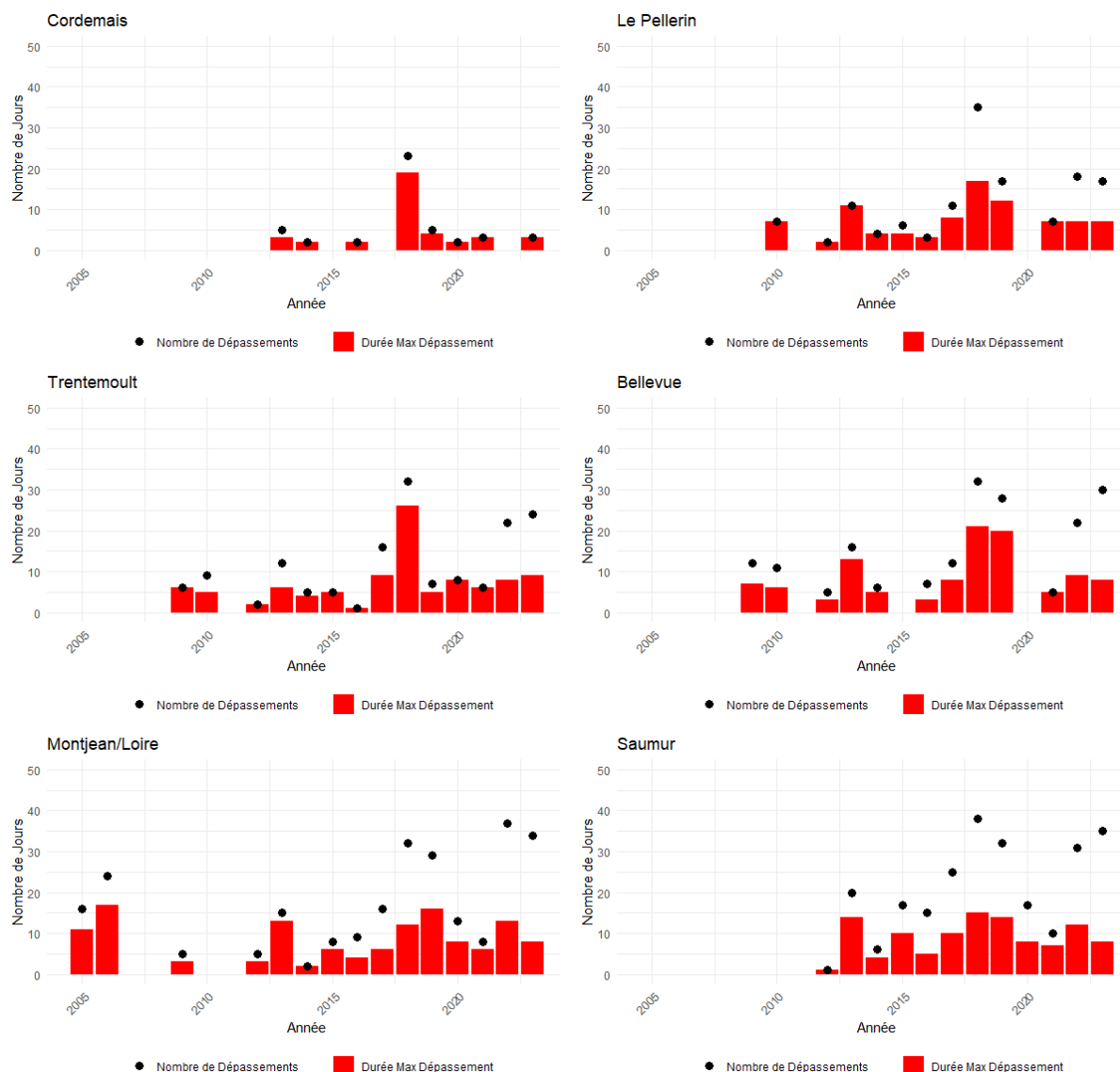


Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

* Les barres hachurées correspondent aux tendances non significatives.

Figure 45 : Coefficients estimateurs des régressions linéaires du nombre de dépassements (à gauche) et de la durée maximale de dépassement (à droite), en fonction du temps, pour le seuil 20°C

Pour le dépassement du seuil de 25°C, aucune relation n'est significative (Figure 46). Il n'y a pas de tendance à l'augmentation du nombre de jours de dépassement ou de la durée de dépassement continu.



Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, IFREMER

Figure 46 : durée de dépassement du seuil 25°C, en nombre de jours

Ces nombres de jours de dépassement sont comparés avec les données de débit et de température de l'air. Pour ces corrélations, seules les années avec au minimum 80% des données sur la période du 01/04 au 31/10 sont prises en compte. Pour le débit, sont considérés les nombres de jours, par an, avec un débit journalier inférieur à 200 m³/s et inférieur à 150 m³/s, au niveau des stations de Saumur et Montjean/Loire. Pour la température de l'air, sont considérés les nombres de jours, par an, avec une température moyenne journalière supérieure à 20°C et 25°C, au niveau des stations de Mont-Bellay, Nantes Bouguenais et Saint-Nazaire.

Le bilan des corrélations est présenté dans le Tableau 16. Toutes les relations ont été testées. Les x et les – correspondent respectivement aux corrélations significatives et aux corrélations peu significatives. En cas d'absence de corrélation, les cases ne sont pas remplies dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 16 : Bilan des corrélations entre le nombre annuel de jours avec dépassement des seuils 20°C et 25°C, le nombre annuel de jours avec des débits inférieurs à 150 m³/s et 200 m³/s, et le nombre annuel de jours avec une température de l'air supérieure à 20°C et 25°C

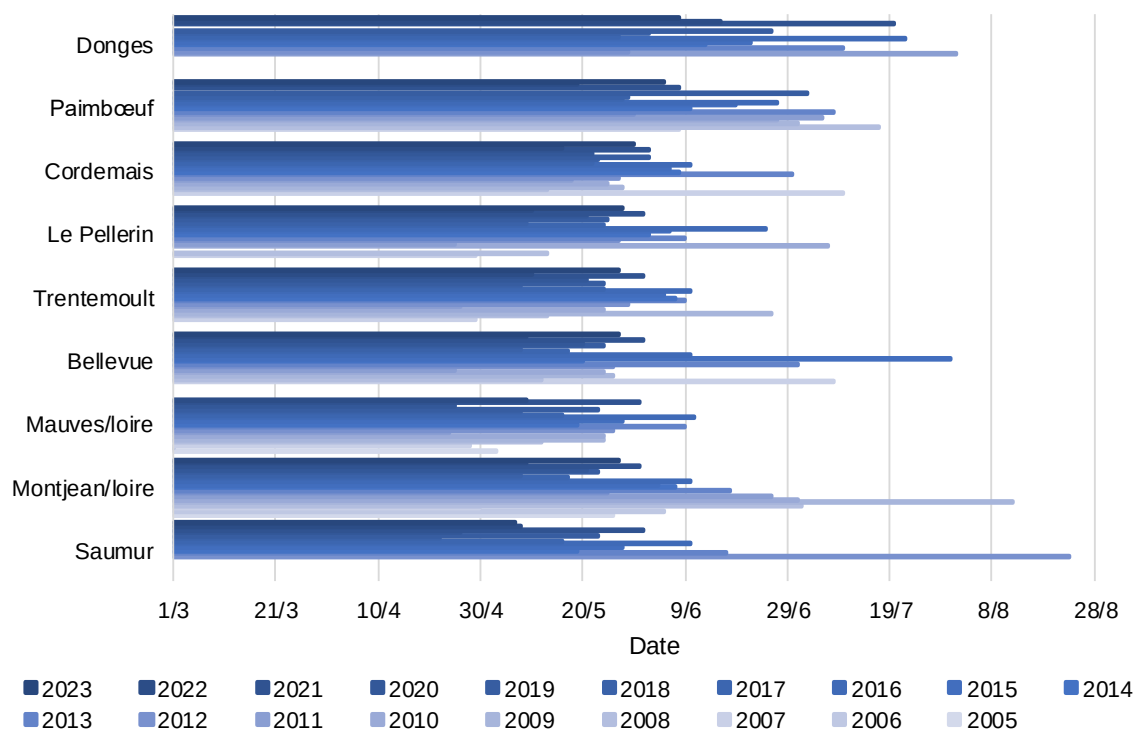
>20°C	débit <200 m³/s	débit <150 m³/s	Tair >20°C	T air >25°C
Donges				
Paimbœuf				
Cordemais			x	-
Le Pellerin				
Trentemoult			x	
Bellevue			x	
Montjean/Loire		x	x	x
Saumur		x	x	x

>25°C	débit <200 m³/s	débit <150 m³/s	Tair >20°C	T air >25°C
Cordemais				
Le Pellerin			x	-
Trentemoult			x	x
Bellevue	x		x	
Montjean/Loire	x	-	x	x
Saumur	x		x	-

Globalement, le temps de dépassement des seuils de température de l'eau à 20°C et 25°C est corrélé au nombre de jours avec une température de l'air supérieure à 20°C. Sur les stations en amont, le dépassement du seuil à 25°C est corrélé également avec les débits inférieurs à 200 m³/s. L'impact du débit diminue, de l'amont vers l'aval, lorsque l'impact des apports océaniques augmente.

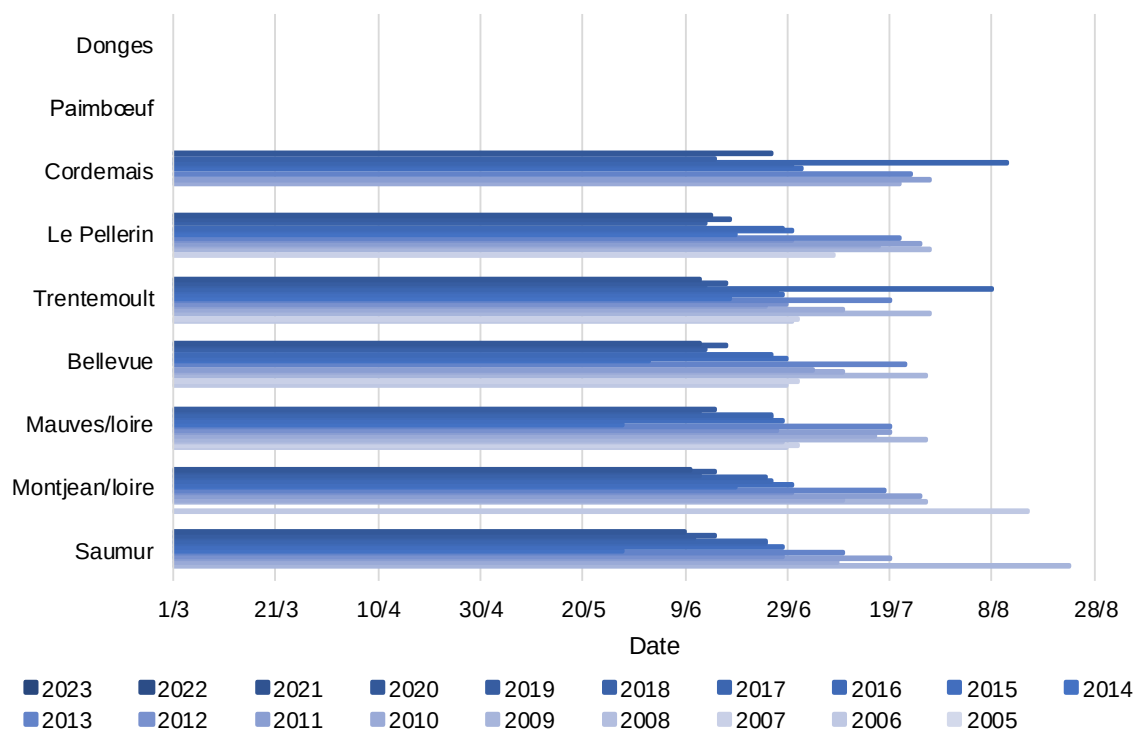
4.6.2 Date de dépassement

Au-delà de la durée de dépassement des seuils, qui peut être un indicateur de la pression thermique sur les espèces, il est également nécessaire de regarder la date de début de dépassement de ces seuils. De nombreuses espèces sont présentes à un instant de leur développement dans l'estuaire. La date de début de dépassement peut impacter de manière différente ces espèces, en fonction de leur stade (reproduction, migration...). Pour chaque station, chaque année et chaque seuil, la date du dépassement des températures journalières à 20°C et 25°C est déterminée (Figure 47 et Figure 48).



Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, Nantes Métropole

Figure 47 : Date de dépassement du seuil 20°C



Source des données : DREAL Pays de la Loire, EDF, GIPLE, Nantes Métropole

Figure 48 : Date de dépassement du seuil 25°C

Le seuil de 20°C est dépassé sur l'ensemble des stations, sur les années de fonctionnement. Le seuil de 25°C n'est jamais atteint sur les stations les plus à l'aval Paimbœuf et Donges. Il n'est pas atteint toutes les années sur les autres stations.

Pour le seuil de 20°C, une tendance à l'avancement de la date de dépassement semble apparaître sur certaines stations, mais la significativité est faible. Pour le seuil de 25°C, il n'est pas observé de tendance significative à l'avance de la date de dépassement.

Ces dates de dépassement sont comparées avec les données de débit à Saumur et Montjean/Loire (du jour de dépassement, moyenne des débits sur 5 jours avant le jour du dépassement, moyenne des débits sur 30 jours avant le dépassement) et les données de température de l'air à Mont-Bellay, Nantes-Bouguenais et Saint-Nazaire (du jour de dépassement, moyenne des températures de l'air sur 5 jours avant le jour du dépassement, moyenne des températures de l'air sur 30 jours avant le jour du dépassement). D'autres durées sont également testées : 2 jours, 10 jours, 60 jours.

Le bilan des corrélations (pour des durées de 5 et 30 jours) est présenté dans le Tableau 17. Toutes les relations ont été testées. Les x et les – correspondent respectivement aux corrélations significatives et aux corrélations peu significatives. En cas d'absence de corrélation, les cases ne sont pas remplies dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 17 : Bilan des corrélations entre la date de dépassement des seuils 20°C et 25°C, le débit du jour de dépassement, le débit moyenné sur 5 jours, le débit moyenné sur 30 jours, et la température de l'air du jour de dépassement, la température de l'air moyennée sur 5 jours, la température de l'air moyennée sur 30 jours

>20°C	débit	débit 5 j	débit 30 j	T air	T air 5 j	T air 30 j
Donges						
Paimbœuf			x			
Cordemais						-
Le Pellerin	x					
Trentemoult	x					
Bellevue	x					
Montjean/Loire		-	-			
Saumur						

>25°C	débit	débit 5 j	débit 30 j	T air	T air 5 j	T air 30 j
Cordemais						
Le Pellerin		x	x		x	x
Trentemoult					-	-
Bellevue		x	-		-	-
Montjean/Loire			-	-	-	-
Saumur	-		-		-	

Pour la date du dépassement du seuil à 20°C, aucune tendance n'est observée. Pour le dépassement du seuil à 25°C, il semble que le débit moyen et la température de l'air moyenne soient corrélées avec la date de dépassement, en considérant les données à 5 jours et à 30 jours.

Le dépassement de ces seuils peut avoir un impact important sur certaines espèces de poissons, présents dans l'estuaire. Quatre espèces de poissons sont considérées : 2 grands migrateurs anadromes (saumon et alose), 1 poisson plat (flet), et 1 poisson estuarien (gobie). Le saumon est emblématique de la Loire, avec une importante

sensibilité à la qualité physico-chimique de l'eau. Cette espèce est en voie de disparition dans le bassin de la Loire. L'aloise est également une espèce sensible, en voie de disparition en Loire. Ces deux espèces anadromes vivent en mer et remontent les rivières au stade adulte pour se reproduire en eau douce. Le flet est l'espèce principalement retrouvée dans les inventaires récents. Enfin, les gobies sont des poissons estuariens, qui restent dans l'estuaire tout au long de leur cycle de vie. La Figure 49 présente les périodes de présence des poissons migrateurs dans l'estuaire de la Loire.

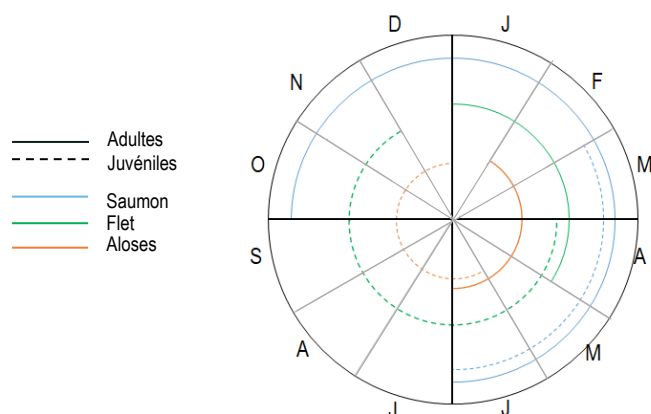


Figure 49 : périodes de présence des poissons migrateurs dans l'estuaire

Le Tableau 18 montre les impacts potentiels des dépassements de température. L'impact est quantifié est possible (+), probable (++) et fort (+++), en fonction des périodes de présence des espèces et de leur température létale. Les saumons juvéniles (smolts) peuvent rencontrer des températures supérieures à 25°C, lors d'épisodes de chaleur précoce (2021, 2022 ou 2023). Les saumons adultes peuvent être soumis à des températures supérieures à 20 °C, limitant la montaison. Ce seuil est régulièrement dépassé dès le mois de mai. Les aloses juvéniles sont fortement impactées par le dépassement des seuils de 20°C et 25°C ; leur présence étant avérée entre juin et décembre, et leur température létale étant de 22°C. Les adultes sont quant à eux moins sensibles à ces dépassements. Des températures supérieures à 30°C sont très rarement mesurées entre février et juin, dans l'estuaire. Les flets juvéniles, présents entre avril et novembre, sont très fréquemment soumis à des températures de l'eau élevées (supérieure à 25°C), pouvant les fragiliser. Enfin, pendant les périodes de fortes températures, les gobies (juvéniles et adultes) sont impactés. Les juvéniles sont plus fragiles, et par conséquent plus affectés. Ces espèces ont néanmoins une certaine capacité d'adaptation : augmentation des seuils de température létale, suite aux acclimations à des températures élevées ; modification des périodes de montaison ou dévalaison...

Tableau 18 : Impact des seuils de température sur les poissons

Espèce	Stade	Période présence dans l'estuaire	T° optimale (°C)	T° létale (°C)	T° inhibition de la montaison (°C)	Impact
Saumon (<i>Salmo salar</i>)	juvénile	Mars à juin		25 – 28 °C		+
	adulte	Octobre à juin		25 °C	> 20 °C	++
Alose (<i>Alosa fallax</i>)	juvénile	Juin à décembre		22 °C		+++
	adulte	Février à Juin		30 °C		+
Flet (<i>Platichthys flesus</i>)	juvénile	Avril à novembre	18 – 20 °C	27 °C		+++
	adulte	Janvier à avril				
Gobies buhotte (<i>Pomatoschistus minutus</i>)	juvénile	Toute l'année		25 °C		+++
	adulte	Toute l'année	17 – 22 °C	30 – 31 °C		++

(Christensen et al., 2021 ; Taverny et al., 2009)

Les températures élevées de l'eau affectent directement les organismes aquatiques et modifient les paramètres physico-chimiques. Deux seuils de température sont définis à 20°C et 25°C. À 20°C, la migration des poissons est limitée, tandis qu'à 25°C, des mortalités peuvent se produire. Les données sont analysées à partir des moyennes journalières, avec au moins 80 % de données disponibles. Entre 2007 et 2023, aucune température moyenne journalière supérieure à 25°C n'a été observée sur les stations de la Bouée Molit, Donges et Paimbœuf.

Pour la durée de dépassement des seuils, le nombre de jours où les températures dépassent 20°C et 25°C a été calculé pour chaque station. Une augmentation du dépassement du seuil de 20°C a été notée, tandis qu'aucune tendance significative n'a été observée pour le dépassement du seuil de 25°C. Les dépassements sont également liés aux températures de l'air, surtout pour les stations en amont.

Les dates de dépassement des seuils sont importantes car elles peuvent affecter les espèces en fonction de leur stade de développement. Le seuil de 20°C est souvent dépassé, mais le seuil de 25°C n'est atteint que sur certaines stations et pas chaque année. Les dates de dépassement ne montrent pas de tendance significative, mais des corrélations ont été observées avec les conditions de débit et de température de l'air.

L'impact des dépassements de température est évalué pour quatre espèces de poissons (saumon, alose, flet et gobie), selon leur période de présence et leur tolérance thermique. Le saumon, en danger, est particulièrement vulnérable aux températures supérieures à 20°C, limitant sa migration. L'alose, également menacée, est fortement affectée par des températures supérieures à 20°C. Le flet et le gobie, plus résistants, peuvent néanmoins être fragilisés, surtout pendant les périodes de fortes températures. Ces augmentations de température peuvent donc avoir un impact important sur les espèces de poissons migrateurs, en fonction des variations saisonnières et des conditions environnementales.

4.7 Températures basses

Contrairement aux températures élevées, l'analyse des seuils de températures basses est plus difficile à mener. En effet, comme il est mentionné au début de cette étude, entre 2007 et 2018, lors des épisodes de froid intense (2009, 2010 et 2012), les stations MAREL sont désinstallées temporairement, afin d'éviter le gel dans les tuyaux, et par conséquent la casse des stations. En conséquence, pour les stations de Trentemoult et Le Pellerin, les données des seuils bas sont indisponibles.

D'une intensité moindre que les épisodes de 1914, 1963 ou 1985, plusieurs périodes de gels ont pu être relevées entre 2007 – 2023.

Deux épisodes en début et fin d'année 2009 ont été observés, ainsi qu'un épisode en mars 2018. Depuis l'installation du réseau de mesures SYVEL, en 2007, l'évènement le plus intense est celui de février 2012. La Loire charrie des glaçons, formés en amont.



Figure 50 : Les eaux de la Loire gelées, dans le bras de Pirmil, le 13 février 2012 (source : GIP Loire Estuaire)

En février 2012, des températures proches de 0°C sont observées entre Bellevue et Le Pellerin. De Cordemais à Donges, l'influence de l'océan en hiver entraîne une légère augmentation de la température de l'eau avec un minimum à 1,1 °C à Donges, le 13 février 2012.

Conclusion

L'étude de la température de l'eau dans l'estuaire de la Loire met en évidence un système thermique dynamique, influencé par une combinaison de facteurs climatiques, hydrologiques et océaniques. La Loire en amont de l'estuaire, soumise aux variations diurnes et saisonnières, présente une grande amplitude thermique, tandis que l'océan, en raison de son inertie thermique, modère les fluctuations en aval. L'estuaire constitue ainsi une zone de transition thermique, où la température de l'eau résulte d'interactions complexes entre les apports fluviaux et océaniques, modulées par l'effet des marées et la température de l'air.

L'analyse des données de 2007 à 2023 révèle des tendances significatives. La température moyenne annuelle de l'eau varie entre 13 et 16,5°C, avec des maxima atteints en juillet et des minima en janvier. L'amplitude annuelle est plus marquée à l'amont de Nantes (18°C à Bellevue) qu'en aval (14°C à Donges), où l'influence océanique atténue les variations. L'impact des cycles hydrologiques est également important : lors des hautes eaux, la marée a une influence plus marquée en aval, tandis qu'en période d'étiage, l'effet des apports fluviaux domine en amont.

Un estuaire thermique peut être caractérisé notamment par l'inversion thermique, un phénomène marquant observable dans la Loire. En hiver, lorsque l'eau océanique est plus chaude que l'eau fluviale, la température de l'eau diminue en remontant l'estuaire. À l'inverse, en été, l'eau douce plus chaude entraîne un gradient inverse, avec des températures plus élevées en amont qu'en aval. L'analyse des données de 2007 à 2023 montre que ces inversions se produisent généralement entre mars-avril et septembre-octobre, sans tendance significative à leur évolution. Ce phénomène, bien que récurrent, peut être modulé par la stratification verticale et l'effet des marées, influençant la répartition des masses d'eau et leur mélange dans l'estuaire.

Sur la période d'observation (2007 – 2023), une tendance au réchauffement est observée, en particulier durant les mois d'été et à l'amont de l'estuaire. Cette évolution est fortement corrélée à la hausse des températures de l'air et à la diminution des débits fluviaux, qui réduisent l'inertie thermique du fleuve et amplifient les températures maximales. Toutefois, des phénomènes comme l'upwelling, observé en 2022, montrent que d'autres processus océanographiques peuvent localement tempérer ces augmentations.

Ces modifications thermiques sont susceptibles d'avoir des répercussions directes sur l'écosystème estuarien. L'augmentation des températures peut affecter la stratification verticale des masses d'eau, influençant la répartition des espèces et la disponibilité en oxygène. L'analyse des seuils critiques (20°C et 25°C) met en évidence un allongement de la période durant laquelle ces températures sont atteintes, en particulier dans les stations situées en amont. Cela peut avoir des conséquences sur la faune aquatique, notamment sur les espèces migratrices comme le saumon et l'aloise, dont les migrations et la survie sont limitées par des températures élevées.

Les variations thermiques observées dans l'estuaire influencent significativement d'autres paramètres physico-chimiques essentiels à l'équilibre écologique. La solubilité de l'oxygène dissous, facteur limitant pour la vie aquatique, diminue avec l'augmentation de la température, créant un risque accru d'hypoxie durant les périodes estivales, particulièrement lors des épisodes caniculaires. Cette relation inverse est exacerbée dans les zones de turbidité maximale, où la demande biologique en oxygène s'intensifie. Par ailleurs, les fluctuations thermiques modifient la dynamique des matières en suspension : en été, la stratification thermique limite le brassage vertical et favorise la sédimentation, tandis que les températures élevées accélèrent les processus de minéralisation de la matière organique. À l'inverse, durant les crues hivernales, l'augmentation des débits associée à des températures plus basses entraîne une remise en suspension plus importante des sédiments. L'analyse des données montre également que la variation saisonnière de température influence la floculation des particules fines et, par conséquent, la turbidité générale de l'estuaire, avec des implications sur la pénétration de la lumière et la production primaire. Ces interactions complexes entre température, oxygène dissous et MES constituent un système d'interdépendances dont l'équilibre pourrait être davantage perturbé par le réchauffement climatique, notamment avec l'augmentation prévue de la fréquence des épisodes extrêmes et la modification du régime hydrologique de la Loire.

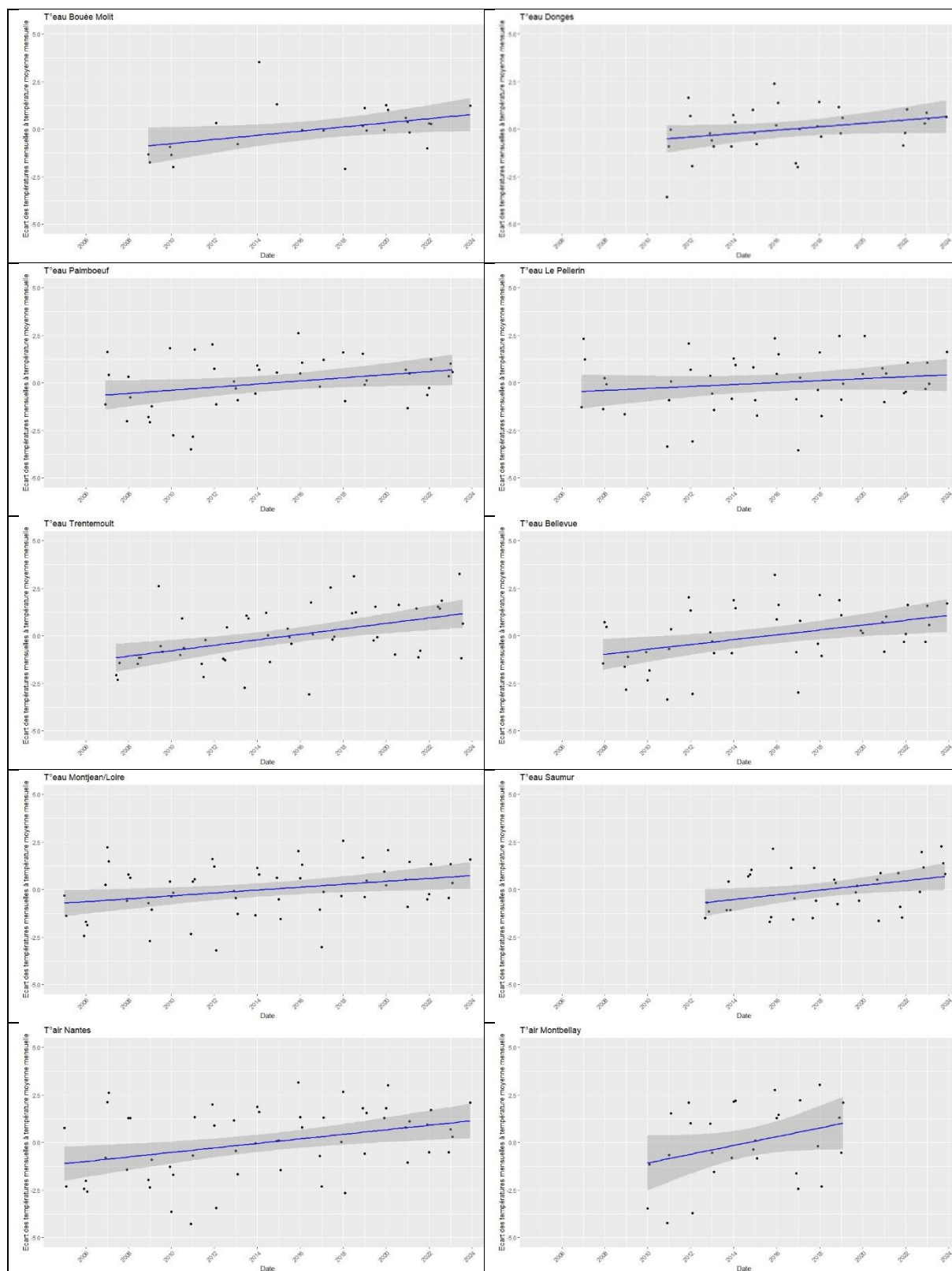
Cette étude n'avait pas pour objectif d'analyser les effets de la température sur les paramètres estuariens, néanmoins, l'augmentation progressive de la température de l'eau dans l'estuaire de la Loire engendre des effets

sur la qualité globale de l'eau. En premier lieu, la diminution de la solubilité de l'oxygène couplée à l'accélération des processus métaboliques et de dégradation bactérienne conduit à un déficit en oxygène plus prononcé, susceptible de créer des zones mortes temporaires, particulièrement préoccupantes lors des périodes d'étiage estival. Par ailleurs, les températures plus élevées favorisent la prolifération d'organismes pathogènes et d'algues potentiellement toxiques, dont certaines cyanobactéries capables de produire des toxines dangereuses pour la faune aquatique et la santé humaine. La cinétique des réactions chimiques étant accélérée, la biodisponibilité de certains contaminants (métaux lourds, pesticides) peut augmenter, affectant les organismes benthiques et la chaîne trophique dans son ensemble. Les cycles biogéochimiques des nutriments sont également perturbés : l'azote et le phosphore sont remobilisés plus rapidement des sédiments vers la colonne d'eau, contribuant à des phénomènes d'eutrophisation plus intenses et fréquents. Cette dégradation générale de la qualité de l'eau compromet non seulement l'intégrité écologique de l'estuaire, mais menace également les usages anthropiques (pêche, aquaculture, prélèvements pour l'eau potable, activités récréatives). Dans une perspective de gestion intégrée, ces impacts soulignent l'urgence d'établir des stratégies d'adaptation et de mitigation prenant en compte les interactions complexes entre température, paramètres physico-chimiques et réponses biologiques au sein de cet écosystème estuarien particulièrement vulnérable.

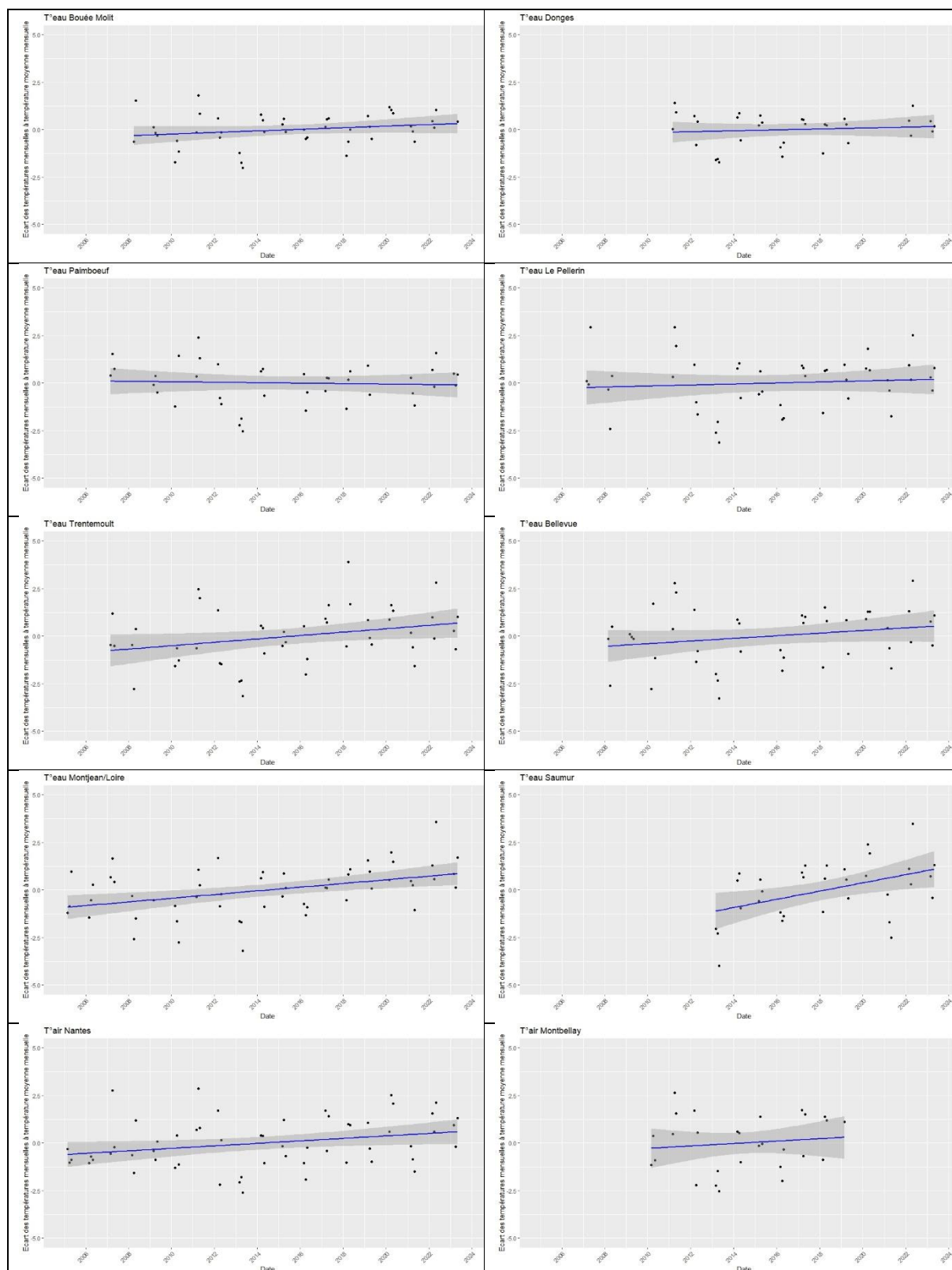
Enfin, notre étude souligne ainsi l'importance d'un suivi continu des paramètres thermiques et hydrologiques pour anticiper les évolutions futures et adapter la gestion de l'estuaire. La hausse des températures de l'eau, associée au changement climatique et aux variations de débit, pourrait modifier durablement l'équilibre de cet écosystème. La dynamique thermique de l'estuaire de la Loire illustre les interactions complexes entre l'eau douce et l'eau salée, soulignant la nécessité de mettre en relation les études portant sur la biologie, les processus biogéochimiques et la particularité des phénomènes thermiques dans l'estuaire, tels que nous les avons montrés, afin d'évaluer les effets potentiels des changements globaux.

Annexes

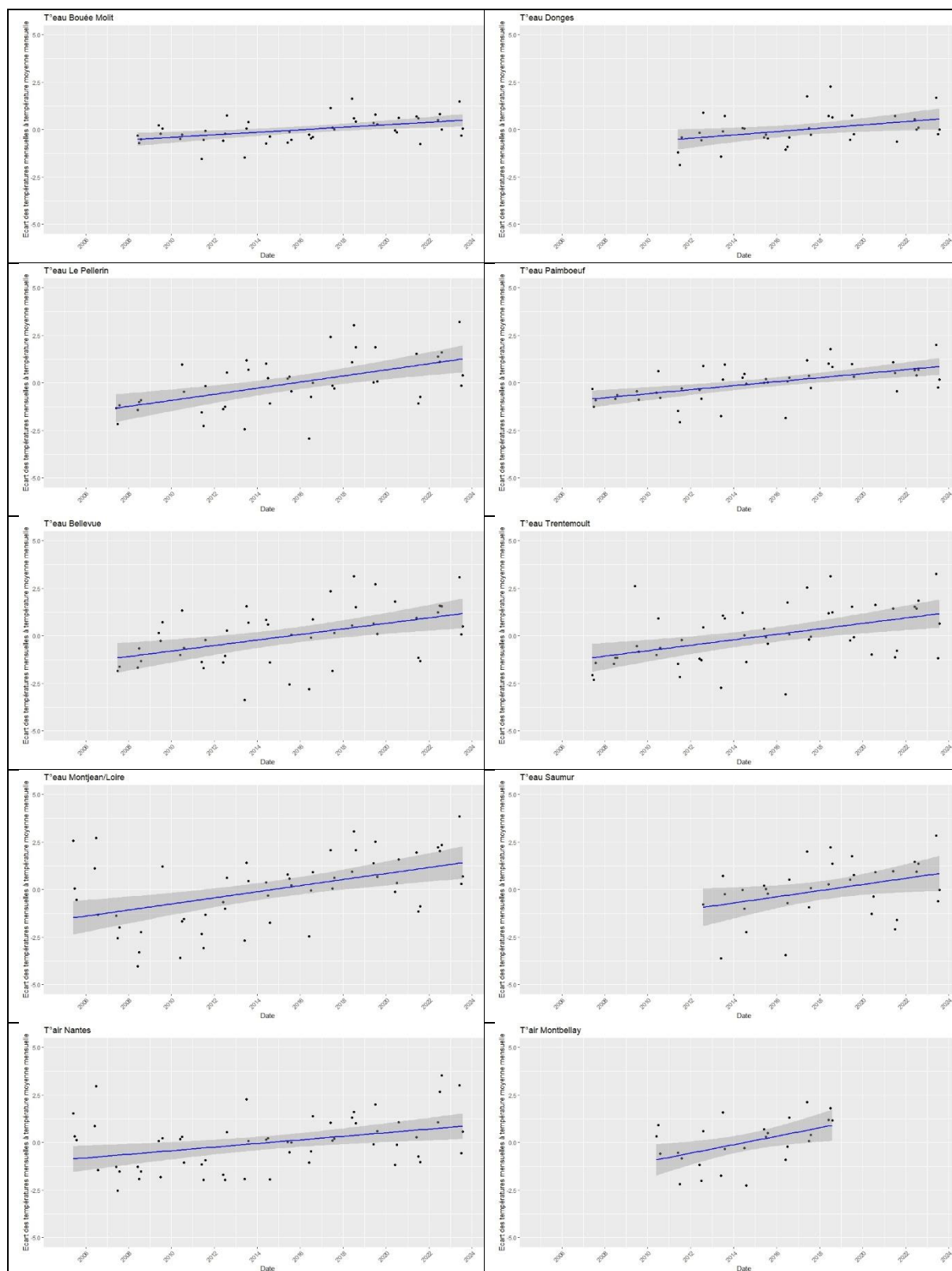
Anomalies des températures mensuelles : Hiver



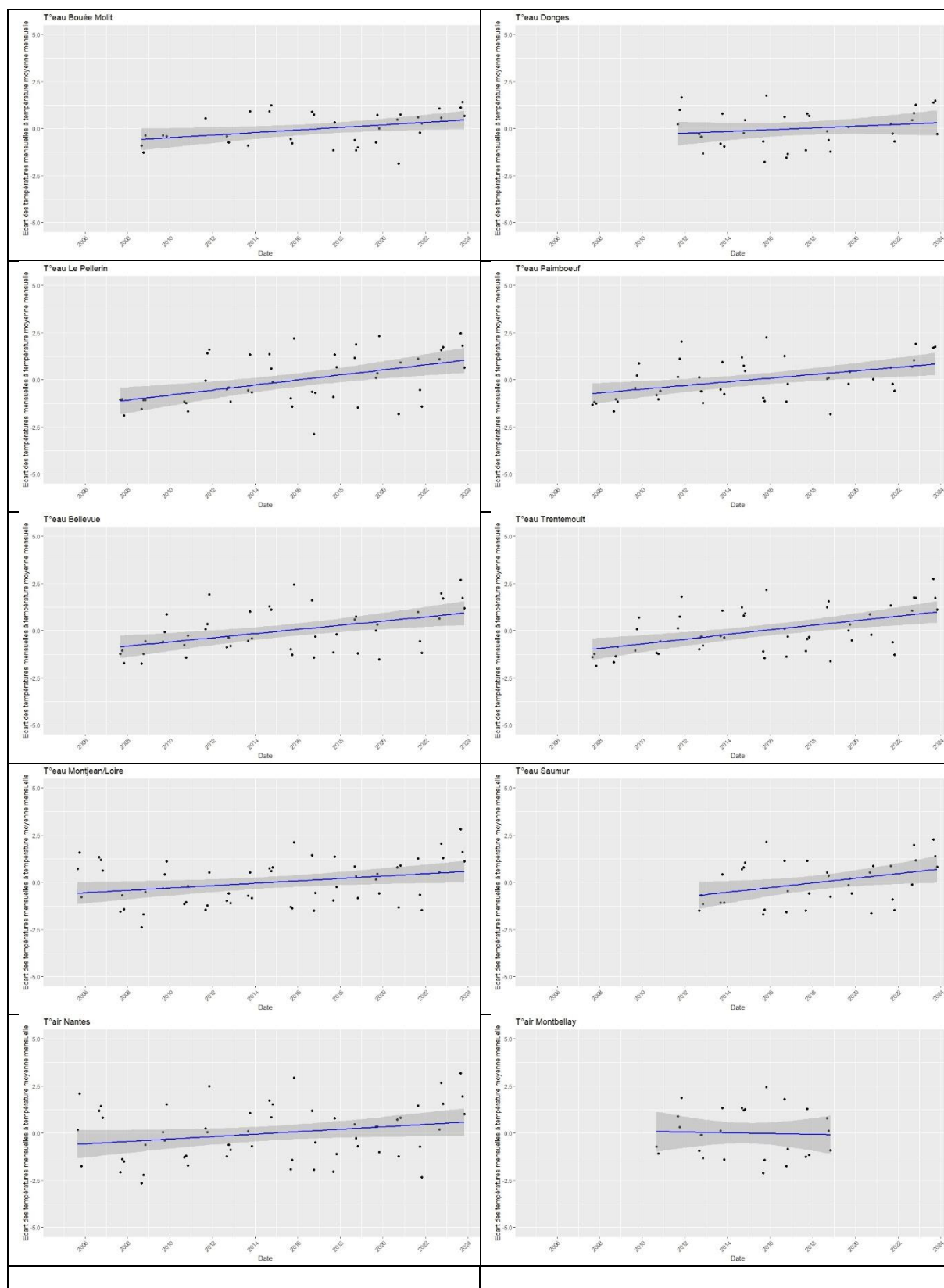
Anomalies des températures mensuelles : Printemps



Anomalies des températures mensuelles : Eté



Anomalies des températures mensuelles : Automne



Glossaire :

Abiotique : En écologie, les facteurs abiotiques représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème

Ectotherme : Les organismes ectothermes sont des organismes ne produisant pas ou peu de chaleur.

Hyporhéique : La zone hyporhéique est une zone en dessous et à côté du lit d'un ruisseau d'eau douce, où il y a mélange des eaux souterraines profondes et des eaux de surface.

Ripisylve : La ripisylve est un espace d'échanges, entre les milieux terrestres et le milieu aquatique.

Bibliographie

Arrigoni, A. S., Poole, G. C., Mertes, L. A. K., O'Daniel, S. J., Woessner, W. W., & Thomas, S. A. (2008). Buffered, lagged, or cooled ? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels. *Water Resources Research*, 44(9). <https://doi.org/10.1029/2007wr006480>

Beaufort, A (2015). Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : Application au bassin versant de la Loire, PhD Thesis, Université de Tours

Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F. (2015). Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire – Rapport final

Beaufort, A., Moatar, F., Curie, F., Ducharne, A., Bustillo, V., Thiéry, D. (2015). River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire river bassin, France. *River Research and Applications*.

Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P., & Hannah, D. M. (2020). Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes*, 34(3), 583-597.

Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E. (2020). Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France, INRAE UR RiverLy, Université de Tours GÉHCO, 63p.

Beaufort, A., Curie, F., Moatar, F., Ducharne, A., Melin, E., & Thiéry, D. (2016). T-NET, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology. *Hydrological Processes*, 30(13), 2196-2210.

Beaufort, A., Moatar, F., Sauquet, E., Loicq, P., & Hannah, D. M. (2020). Influence of landscape and hydrological factors on stream–air temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes*, 34(3), 583-597.

Benson, B. B., & Krause Jr, D. (1984). The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere 1. *Limnology and oceanography*, 29(3), 620-632.

Blaustein, A. R., Walls, S. C., Bancroft, B. A., Lawler, J. J., Searle, C. L., & Gervasi, S. S. (2010). Direct and indirect effects of climate change on amphibian populations. *Diversity*, 2(2), 281-313.

Bouarafa, Sofia. 2016. « Analyse des températures des eaux comme marqueur de l'hydrologie urbaine ». Rapport de Master. Ecole Centrale de Nantes.

Bradl, H. B. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of colloid and interface science*, 277(1), 1-18.

Brugeron, A., Doukouré, C., Flipo, N., Krimissa, M., Monteil, C., Peron, S., Poulin, M., Schomburgk, S., Ferry, C., Poulhe, P. et Winckel, A. (2013). Contribution des principaux aquifères du bassin au fonctionnement hydrologique et thermique de la Loire à l'étiage – Modélisation de la Loire et des aquifères pour la prévision des débits d'étiage de la Loire Moyenne – Synthèse. Rapport technique, 69 pages.

Cairns Jr, J., Heath, A. G., & Parker, B. C. (1975). Temperature influence on chemical toxicity to aquatic organisms. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 267-280.

Caissie, D., & Giberson, D. J. (2003). *Temporal variation of stream and intragravel water temperatures in an Atlantic salmon (Salmo salar) spawning area in Catamaran Brook (New Brunswick)*. Fisheries and Oceans.

Caissie, D., Satish, M. G., & El-Jabi, N. (2007). Predicting water temperatures using a deterministic model: Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 303-315.

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers : a review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389-1406.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

Carpenter, S. R. (2005). Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(29), 10002-10005.

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. (2018). *Impact thermique de la géothermie sur eau de nappe*. Cerema.

Choffel, Q., Cairault, A., & Donati, F. (2020). Les apports de la température pour une gestion intégrée des milieux aquatiques. *Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement*, (45), 153-166.

Christensen, E. A., Norin, T., Tabak, I., van Deurs, M., & Behrens, J. W. (2021). Effects of temperature on physiological performance and behavioral thermoregulation in an invasive fish, the round goby. *Journal of Experimental Biology*, 224(1), jeb237669.

Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. *Journal of environmental quality*, 27(2), 261-266.

Croze, O. (2008). *Impact des seuils et barrages sur la migration anadrome du saumon atlantique (Salmo salar L.)* (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique (Toulouse)).

Daufresne, M., & Boet, P. (2007). Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology*, 13(12), 2467-2478.

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *science*, 321(5891), 926-929.

DREAL Pays de la Loire (2008). Mesures en continu des températures sur quelques rivières des Pays de la Loire – période 2003-2008. 16p.

Ducharne, A. (2008). Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 797-810.

Ebersole, J. L., Liss, W. J., & Frissell, C. A. (2003). Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(10), 1266-1280.

Evans, E. C., McGregor, G. R., & Petts, G. E. (1998). River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological processes*, 12(4), 575-595.

Floury, M., Delattre, C., Ormerod, S. J., & Souchon, Y. (2012). Global versus local change effects on a large European river. *Science of the total environment*, 441, 220-229.

Gardner, J. L., Peters, A., Kearney, M. R., Joseph, L., & Heinsohn, R. (2011). Declining body size: a third universal response to warming?. *Trends in ecology & evolution*, 26(6), 285-291.

- Garner, G., Hannah, D. M., Sadler, J. P., & Orr, H. G. (2013). River temperature regimes of England and Wales : spatial patterns, inter-annual variability and climatic sensitivity. *Hydrological Processes*, 28(22), 5583-5598.
- Garner, G., Malcolm, I. A., Sadler, J. P., & Hannah, D. M. (2014). What causes cooling water temperature gradients in a forested stream reach?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5361-5376.
- Gilles, R., & Ancil, M. (2006). Physiologie animale. De Boeck Supérieur.
- Gosse, P., Gailhard, J., & Hendrickx, F. (2008). Analyse de la température de la Loire moyenne en été sur la période 1949 à 2003. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 233-274.
- Gravellier, A., Imbert, A., Marchais, H. (2007), Risques sanitaires liés à la production et à la distribution d'une eau de boisson à une température élevée, RENNES. 69.
- Grenouillet, G., & Comte, L. (2014). Illuminating geographical patterns in species' range shifts. *Global change biology*, 20(10), 3080-3091.
- Johansson, J., Bolmgren, K., & Jonzén, N. (2013). Climate change and the optimal flowering time of annual plants in seasonal environments. *Global change biology*, 19(1), 197-207.
- Johnson, M. F., Wilby, R. L., & Toone, J. A. (2014). Inferring air–water temperature relationships from river and catchment properties. *Hydrological Processes*, 28(6), 2912-2928.
- Jones, Matthew P., William F. Hunt, et Ryan Winston. 2012. « Effect of Urban Catchment Composition on Runoff Temperature ». *Journal of Environmental Engineering* 138 (décembre):1231-36.
- Kelleher, C., Wagener, T., Gooseff, M., McGlynn, B., McGuire, K., & Marshall, L. (2012). Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrological Processes*, 26(5), 771-78.
- Laurent, J., Lavergne, E., Couteau, J., Le Floch, S., Ouddane, B., Cachot, J., ... & Laroche, J. (2022). Impacts of chemical stress, season, and climate change on the flounder population of the highly anthropised Seine estuary (France). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59751-59769.
- L'heureux, J. (2002). Analyse des relations entre température des cours d'eau et température de l'air dans le bassin de la Seine. Mémoire de maîtrise. Université Pierre et Marie Curie.
- Lesbats, S. (2022). Station de mesure MOLIT en baie de Vilaine. <https://image.ifremer.fr/data/00787/89922/>
- Lery, S., Bouarafa, S., Chancibault, K., & Pineau, L. (2017, March). Températures de cours d'eau urbains: mesures, interprétations et singularités. In *Hydrométrie 2017* (p. 8p).
- Maire, A., Thierry, E., Viechtbauer, W., & Daufresne, M. (2019). Poleward shift in large-river fish communities detected with a novel meta-analysis framework. *Freshwater Biology*, 64(6), 1143-1156.
- Marteau, B., Piégay, H., Moatar, F. (2024). L'infrarouge thermique aéroporté, un outil de connaissance des rivières face au changement climatique : guide méthodologique et recommandations.
- MEDDE, (2012). Hydrologie de surface – A1 – Rapport de synthèse. Projet Explore 2070, rapport technique. 148 pages.

MEDDE, (2012). Hydrologie de surface – B4 – Etude de la thermie des cours d'eau. Projet Explore 2070, rapport technique. 67 pages.

Moatar, F., & Gailhard, J. (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes rendus. Géoscience*, 338(5), 319-328.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E., & Vidal, J. P. (2010). La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences*, 12, 78-87.

Moatar, F., Meybeck, M., & Poirer, A. (2009). Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance a long terme : exemple de la Loire moyenne. *La Houille Blanche*, 95(4), 91-99.

Moatar, F., Miquel, J., & Poirer, A. (2001). A quality-control method for physical and chemical monitoring data. Application to dissolved oxygen levels in the river Loire (France). *Journal of Hydrology*, 252(1-4), 25-36.

Monteil, C. (2011). Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Thèse, Mines Paris Tech.

Moore, R. D., Sutherland, P., Gomi, T., & Dhakal, A. (2005). Thermal regime of a headwater stream within a clear-cut, coastal British Columbia, Canada. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(13), 2591-2608.

Morin, G., & Couillard, D. (1990). Predicting river temperatures with a hydrological model. *Encyclopedia of fluid mechanic, surface and groundwater flow phenomena*, 10, 171-209.

Mohseni, O., & Stefan, H. G. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of hydrology*, 218(3-4), 128-141.

Nelson, K. C., & Palmer, M. A. (2007). Stream temperature surges under urbanization and climate change: data, models, and responses 1. *JAWRA journal of the American water resources association*, 43(2), 440-452.

Noyes, P. D., McElwee, M. K., Miller, H. D., Clark, B. W., Van Tiem, L. A., Walcott, K. C., ... & Levin, E. D. (2009). The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world. *Environment international*, 35(6), 971-986.

O'Driscoll, M. A., & DeWalle, D. R. (2006). Stream–air temperature relations to classify stream–ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), 140-153.

Olden, J. D., & Naiman, R. J. (2010). Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55(1), 86-107.

O'Neil, J. M., Davis, T. W., Burford, M. A., & Gobler, C. J. (2012). The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*, 14, 313-334.

Paerl, H. W., & Huisman, J. (2008). Blooms like it hot. *Science*, 320(5872), 57-58.

Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental management*, 27, 787-802.

Raisson-Victor, V., Charlot, A., Bechet, B., Bertrand, J. L., Chancibault, K., Devisme, L., ... & Vacher, P. (2022). *GIEC DES PAYS DE LA LOIRE*. 1er rapport—Juin 2022.

- Raisson-Victor, V., Charlot, A., Bechet, B., Bertrand, J. L., Chancibault, K., Fleury-Bahi, G., ... & Vacher, P. (2023). *GIEC DES PAYS DE LA LOIRE*. 2e rapport—Avril 2023.
- Sautour, B., & Baron, J. (éds.). (2020). *L'estuaire de la Gironde : un écosystème altéré ?* (1-). Presses Universitaires de Bordeaux. <https://doi.org/10.4000/books.pub.44868>
- Sauvé, S., Norvell, W. A., McBride, M., & Hendershot, W. (2000). Speciation and complexation of cadmium in extracted soil solutions. *Environmental Science & Technology*, 34(2), 291-296.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., & Imboden, D. M. (2016). *Environmental organic chemistry*. John Wiley & Sons.
- Sinokrot, B. A., & Stefan, H. G. (1994). Stream water-temperature sensitivity to weather and bed parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(6), 722-736.
- Smith, K. (1981). The prediction of river water temperatures/prédiction des températures des eaux de rivière. *Hydrological Sciences Journal*, 26(1), 19-32.
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here?. *Trends in ecology & evolution*, 24(4), 201-207.
- Seyedhashemi, H., Vidal, J. P., Diamond, J. S., Thiéry, D., Monteil, C., Hendrickx, F., ... & Moatar, F. (2022). Regional, multi-decadal analysis on the Loire River basin reveals that stream temperature increases faster than air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(9), 2583-2603.
- Somers, K. A., Bernhardt, E. S., Grace, J. B., Hassett, B. A., Sudduth, E. B., Wang, S., & Urban, D. L. (2013). Streams in the urban heat island: spatial and temporal variability in temperature. *Freshwater Science*, 32(1), 309-326.
- Sridhar, V., Sansone, A. L., LaMarche, J., Dubin, T., & Lettenmaier, D. P. (2004). PREDICTION OF STREAM TEMPERATURE IN FORESTED WATERSHEDS 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40(1), 197-213.
- Story, A., Moore, R. D., & Macdonald, J. S. (2003). Stream temperatures in two shaded reaches below cutblocks and logging roads: downstream cooling linked to subsurface hydrology. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(8), 1383-1396.
- Taverny, C., Elie, P., Boët, P. (2009). La vie piscicole dans les masse d'eau de transition : proposition d'une grille qualité pour la température, l'oxygène dissous, la salinité et la transparence. *Rapport de recherche, IRSTEA*, pp.51.
- Tonina, D., & Buffington, J. M. (2009). Hyporheic Exchange in Mountain Rivers I : Mechanics and Environmental Effects. *Geography Compass*, 3(3), 1063-1086. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00226.x>
- Van der Oost, R., Beyer, J., & Vermeulen, N. P. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental toxicology and pharmacology*, 13(2), 57-149.
- Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J., & Vincent, W. (2006). Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des sciences de l'eau*, 19(4), 259-274.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., ... & Bairlein, F. (2002). *Ecological responses to recent climate change*. *Nature*, 416(6879), 389-395.

- Warren, L. A., & Haack, E. A. (2001). Biogeochemical controls on metal behaviour in freshwater environments. *Earth-Science Reviews*, 54(4), 261-320.
- Webb, B. W., Clack, P. D., & Walling, D. E. (2003). Water–air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. *Hydrological processes*, 17(15), 3069-3084.
- Webb, B. W., & Crisp, D. T. (2006). Afforestation and stream temperature in a temperate maritime environment. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(1), 51-66.
- Webb, B. W., & Zhang, Y. (2004). Intra-annual variability in the non-advective heat energy budget of Devon streams and rivers. *Hydrological Processes*, 18(11), 2117-2146.
- Webb, B. W., Hannah, D. M., Moore, R. D., Brown, L. E., & Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(7), 902-918.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: lake and river ecosystems*. gulf professional publishing.
- Wright, S. A., Anderson, C. R., & Voichick, N. (2009). A simplified water temperature model for the Colorado River below Glen Canyon Dam. *River Research and Applications*, 25(6), 675-686.