



Évolution des températures de l'eau du Rhin de 1978 à 2023

Commission Internationale pour la Protection du Rhin

Rapport n° 301

Clause de non-responsabilité sur l'accessibilité aux documents

La CIPR s'efforce de faciliter l'accès à ses documents dans la plus grande mesure possible. Par souci d'efficacité, il n'est pas toujours possible de rendre tous les documents totalement accessibles dans les différentes langues (par ex. avec des passages explicatifs pour tous les graphiques ou dans un langage aisément compréhensible). Le présent rapport contient éventuellement des figures et des tableaux. Pour plus d'explications, veuillez contacter le secrétariat de la CIPR au 0049261-94252-0 ou à l'adresse courriel sekretariat@iksr.de.

Mentions légales

Editeur :

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Coblenz
Postfach : 20 02 53, D 56002 Coblenz
Téléphone : +49-(0)261-94252-0
Téléfax : +49-(0)261-94252-52
Courrier électronique : sekretariat@iksr.de
www.iksr.org

Évolution des températures de l'eau du Rhin de 1978 à 2023

- Pilotage :** Marieke Frassl (Office fédéral de l'hydrologie, Allemagne)
Alex Zavorsky (Office fédéral de l'hydrologie, Allemagne)
- Collaboration :** Tanja Bergfeld-Wiedemann (Office fédéral de l'hydrologie, Allemagne)
Pascal Boderie (Deltares, Pays-Bas)
Colet Eggermont (Rijkswaterstaat, Pays-Bas)
Thilo Herold (Office fédéral de l'environnement, Suisse)
Sibylle Jacob (Office de la nature, de l'environnement et de la protection des consommateurs de NRW, Allemagne)
Carmen de Jong (Université de Strasbourg, France)
Ulrich Kaul, Thomas Vergers (Office bavarois pour l'environnement, Allemagne)
Matthias Kremer (Office hessois de la protection de la nature, de l'environnement et de la géologie, Allemagne)
Mandy Praechter (Ministère hessois de l'agriculture et de l'environnement, de la viticulture, de la sylviculture, de la chasse et des régions, Allemagne – présidence du GE STEMP)
Marc Steichen (Administration de la Gestion de l'Eau, Luxembourg)
Manoj Sanyasee Thapa (Office fédéral de l'hydrologie, Allemagne)
Carl Love Råman Vinnå (Université de Bâle, Suisse)
Beate Zedler (Ministère hessois de l'agriculture et de l'environnement, de la viticulture, de la sylviculture, de la chasse et des régions, Allemagne)
- Traduction :** Dominique Falloux, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs, Gwénaëlle Janiaud (Commission Internationale pour la Protection du Rhin, CIPR)
- Coordination et rédaction :** Nikola Livrozet (Commission Internationale pour la Protection du Rhin, CIPR)

Table des matières

1. Introduction	4
2. Informations techniques d'arrière-plan	5
2.1 Description physique du régime thermique	5
2.2. Études réalisées jusqu'à présent sur la température de l'eau du Rhin ..	6
3. Mesure en continu de la température de l'eau	8
3.1 Technique de mesure	8
3.2 Gestion des lacunes de données et homogénéisation des chroniques	9
3.3 Période couverte par la banque de données	9
4. Analyse des chroniques de température de l'eau	12
4.1 Évolution de la température sur le profil longitudinal du Rhin	12
4.2 Analyse de fréquence (valeurs extrêmes)	16
4.3 Analyse de tendances	20
4.4 Impact des grands affluents sur la température de l'eau du Rhin	28
4.5 Impact des grands rejeteurs thermiques sur la température du Rhin	30
5. Impact des étiages sur la température de l'eau	31
6. Conclusions	34
7 Perspectives	34
Remerciements	35
Bibliographie	36
Annexe : Vue générale des jours de dépassement à la hausse et à la baisse	38

1. Introduction

La température de l'eau est un paramètre central des processus chimiques et biologiques, étant donné qu'il se répercute sur les taux de conversion chimique ainsi que sur la reproduction, la croissance et la propagation d'organismes (CIPR 2013). Les impacts que les changements de température de l'eau sont susceptibles d'avoir sur la biocénose aquatique sont détaillés dans le [rapport CIPR n° 204](#).

Le présent rapport découle du mandat issu à l'occasion de la Conférence ministérielle sur le Rhin de 2020 visant à une mise à jour de la stratégie d'adaptation au changement climatique d'ici 2025. L'accent est ici mis sur le régime hydrologique (crues et étiages) ainsi que sur la température de l'eau. En conséquence, le groupe d'experts « Températures de l'eau » (GE STEMP) a reçu le mandat d'actualiser le [rapport CIPR n° 209](#) sur l'évolution sur le long terme des températures de l'eau du Rhin d'ici fin 2024.

Depuis les années 1970, la température de l'eau est mesurée sur tout le cours du Rhin (sur certaines stations d'analyse, les mesures régulières existent même depuis le début du XX^e siècle) et consignée. Au départ, les mesures étaient effectuées généralement à un rythme quotidien. Avec la mise en place progressive d'appareils de mesure immergés en permanence et enregistrant automatiquement les données, la température de l'eau est désormais relevée à de nombreux endroits avec une plus haute résolution temporelle. Outre les impacts du changement climatique, les rejets thermiques, par exemple des stations d'épuration, de l'industrie et des centrales électriques, sont les facteurs ayant la plus grande influence sur le régime thermique de l'eau du Rhin.

Depuis le dernier rapport sur l'évolution sur le long terme des températures de l'eau du Rhin (1978-2011) ([rapport CIPR n° 209](#)) de 2013, les facteurs ayant le plus d'influence ont changé. Ainsi, les rejets thermiques ont en général diminué, étant donné que les dernières centrales nucléaires ont été mises à l'arrêt successivement depuis 2011 en Allemagne¹. De plus, le changement climatique a continué à progresser, entre autres avec une hausse perceptible des températures moyennes de l'air. Au cours de certaines années particulièrement chaudes du passé proche, de nouvelles températures de l'eau maximales ont été mesurées. Ces modifications et une analyse fondée des tendances qui en découlent jusqu'en 2023 sont documentées dans le présent rapport.

L'évolution des futures températures de l'eau du Rhin est présentée dans le rapport « Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development » (publication en tant que rapport CIPR n° 302 au printemps/été 2025), qui est une actualisation du [rapport CIPR n° 214](#). Les modifications du régime hydrologique du Rhin sont présentées dans le [rapport CIPR n° 297](#). Ces trois rapports dressent une image très complète du régime thermique et hydrologique du Rhin avec des projections pour l'avenir.

¹ Le GE STEMP a établi pour son usage interne un inventaire des rejets thermiques 2010-2020 (valeurs autorisées et réelles > 200 MW).

2. Informations techniques d'arrière-plan

Une brève explication du régime thermique des eaux de surface sur le plan physique est dressée dans ce chapitre et les études sur la température de l'eau du Rhin menées jusqu'à présent sont présentées.

2.1 Description physique du régime thermique

Le régime physique des eaux de surface est largement décrit dans de nombreuses ressources bibliographiques (p. ex. CAISSIE 2006 ; LAWA 2012 ; WEBB & ZHANG 1997 ; WETZEL 2001) et n'est que brièvement résumé ci-dessous. Le bilan thermique d'un cours d'eau est influencé par différents composants du rayonnement, par des flux thermiques et par des apports thermiques (figure 1).

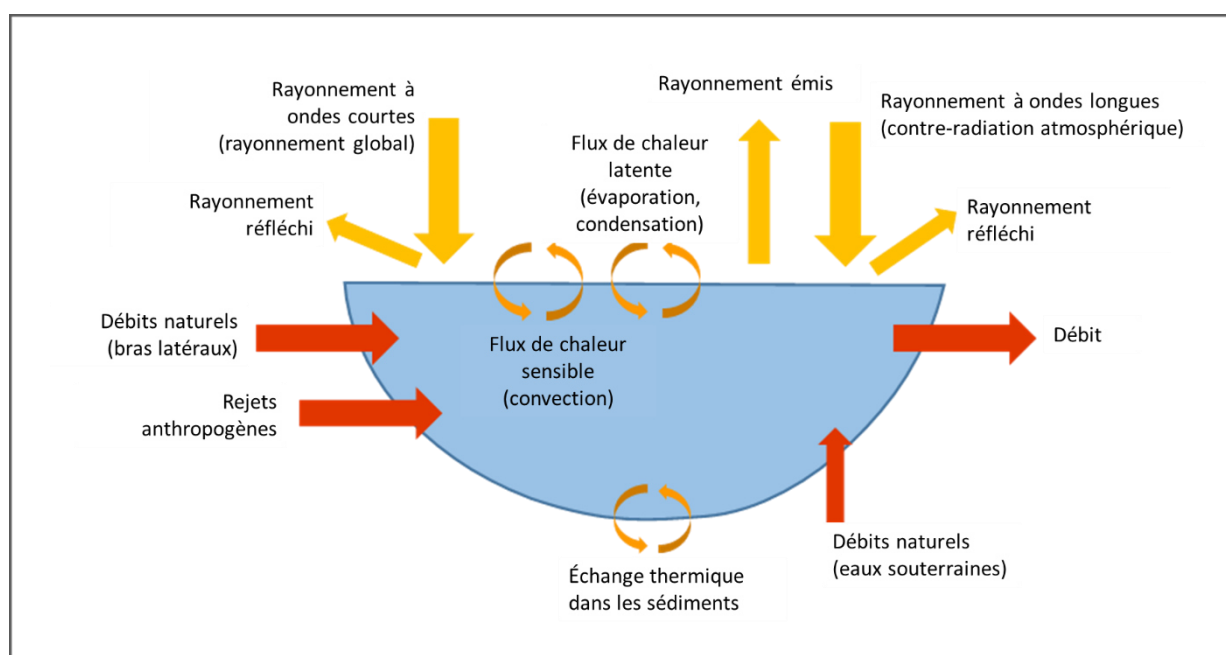


Figure 1 : Schéma du bilan thermique des eaux de surface et de l'influence des différentes composantes du rayonnement (en jaune), des flux thermiques (en orange) et des apports thermiques (en rouge).

Un apport thermique majeur provient des rayonnements à ondes courtes (rayonnement global) et longues (contre-radiation atmosphérique). Ces deux éléments sont influencés par la position du soleil et la couverture nuageuse. Les rayonnements à ondes longues dépendent en plus de la composition gazeuse de l'atmosphère, par exemple de la teneur en vapeur d'eau. Une partie du rayonnement vers le bas, une partie est réfléctée, l'autre partie réchauffe les masses d'eau. En fonction de la température de l'eau, le cours d'eau dégage de la chaleur à sa surface. D'autres processus de réchauffement, mais aussi de refroidissement, peuvent être engendrés par le flux de chaleur latent et sensible ainsi que par l'échange de chaleur avec les sédiments. La différence entre la température de l'eau et celle de l'air (flux de chaleur sensible), entre la température de l'eau et celle des sédiments (échange de chaleur avec les sédiments), la vitesse du vent (flux de chaleur sensible et latent) et la pression de la vapeur (flux de chaleur latent) conditionne un apport ou une émission de chaleur. De plus, une modification de la température de l'eau peut avoir lieu sous l'effet d'apports thermiques directs issus d'affluents, de masses d'eaux souterraines ou encore de rejets anthropogènes. La température et le volume de ces rejets provoquent soit un réchauffement, soit un refroidissement du cours d'eau.

2.2. Études réalisées jusqu'à présent sur la température de l'eau du Rhin

Le [rapport CIPR n° 209](#) regroupe les études publiées jusqu'en 2013 présent sur la température de l'eau du Rhin (tableau 1). Le rapport résume l'évaluation comme suit :

- Les données mesurées des températures de l'eau sont corrélées avec celles de la température de l'air.
- Des épisodes de chaleur particuliers sont apparus dans l'évolution à long terme, par exemple les étés 2003 et 2006.
- Sur la période analysée, une tendance à un réchauffement peut être observée, mais elle n'est pas linéaire.
- Le réchauffement dû à des rejets thermiques est limité à certaines régions.
- Les grands affluents Neckar, Main et Moselle ont un effet plutôt refroidissant au cours des mois d'automne et d'hiver.
- On remarque une forte hausse des dépassements des valeurs seuils observées 22 °C et 25 °C au cours de la dernière décennie.
- La mise à l'arrêt de plusieurs usines laisse supposer une diminution de la hausse des températures.

Tableau 1 : Synthèse des moyennes annuelles et des tendances au réchauffement indiquées (rapport CIPR n° 209)

Station	PK	Période de référence	Moyenne	Tendance	Type d'évaluation	Source
Kehl	292,2	1850-1859	10,9 °Re (13,6 °C)		Moyenne décennale	CIPR 2013
Freiburg	env. 220,0	1889-1892	10,8 °Re (13,5 °C)		Moyenne quadriennale	FORSTNER 1894 (CIPR 2013)
Spire	400,6	1889-1892	10,2 °Re (12,8 °C)			FORSTNER 1894 (CIPR 2013)
Maxau	362,3	1951-1960	11,8 °C		Moyenne des mesures journalières	WUNDT 1940 & 1967 (CIPR 2013)
Kaub	546,3	1946-1960	11,1 °C			WUNDT 1940 & 1967 (CIPR 2013)
Rees	837,4	1951-1960	11,2 °C			WUNDT 1940 & 1967 (CIPR 2013)
Bâle	164,3	1954-2003		> 2°C		OFEFP 2004 (CIPR 2013)
Bimmen	865,0	1977-2012		> 1°C		MUNLV 2009 (CIPR 2013)
Lobith	862,2	1908-2000		> 3°C		LIEFVELD & POSTMA 2007 (CIPR 2013)
Rekingen	90,7	1978-2011		1,7 °C	Test de Mann-Kendall, moyenne annuelle	CIPR 2013
Mayence	498,5	1978-2011		1,3 °C		CIPR 2013
Coblence	590,3	1978-2011		1,2 °C		CIPR 2013

Les paragraphes suivants présentent des études publiées après 2013. Plusieurs études se concentrent sur des années particulières sur le plan climatique (BFG 2021 ; SCHWANDT et al. 2019) ou sur la simulation des tendances au réchauffement dû au changement climatique (HARDENBICKER et al. 2017 ; MANNFELD & FISCHER 2020 ; VINNÅ et al. 2023).

Les deux stations Coblenze et Lobith ont été étudiées dans le rapport de la BfG sur la séquence d'étiages des années 2015-2018 (BFG 2021). Les données de mesure de la séquence d'étiage 2015-2018 ont été comparées avec la moyenne décennale des années 2005-2014. Les effets se produisant pendant l'étiage, comme un réchauffement plus important de l'eau, ont été soulignés, étant donné que le rayonnement sur l'eau réchauffe un volume d'eau relativement petit. 2018, année particulièrement chaude et au cours de laquelle la température a été pendant plusieurs mois presque sans interruption au-dessus de la moyenne pluriannuelle, s'est démarquée dans cette analyse. Au cours d'autres années, la température de l'eau a été supérieure à la moyenne pluriannuelle à l'automne (en 2016) et au début du printemps / de l'été (en 2017). Une comparaison des températures de l'eau en fonction de l'occurrence d'un épisode d'étiage estival ou non a montré une légère tendance dans le Rhin à des températures plus élevées en cas d'étiage. La moyenne des températures de l'eau à la station de Coblenze était légèrement plus faible que celle de la référence. Aucun lien général ne peut être établi entre les moyennes mensuelles des températures de l'eau et le débit. Les auteurs en concluent qu'un étiage ne provoque pas une hausse de la température de l'eau, mais le favorise.

Dans le cadre de la séquence d'étiage 2018-2020, des années de chaleur extrême ont également été étudiées pour la station de Coblenze (SCHWANDT et al. 2019). Selon cette étude, la moyenne journalière de la température de l'eau a dépassé en 2018 pendant 31 jours le seuil de 25 °C. Cette valeur n'a été dépassée qu'au cours de l'été très chaud de 2003, avec une température de plus de 25 °C pendant 38 jours (SCHWANDT et al. 2019).

Plusieurs études ont analysé les évolutions futures de la température de l'eau du Rhin due au changement climatique. Pour le tronçon de Karlsruhe à Bimmen, un réchauffement moyen de -0,2 °C à +1,8 °C a été calculé pour le futur proche (2021-2050) et de +0,4 °C à +3,4 °C pour le futur lointain (2071-2100) (HARDENBICKER et al. 2016). Cette étude utilise les températures de l'eau mesurées entre 2000 et 2008 pour la validation du modèle. Le même tronçon a été étudié dans un projet de recherche ultérieur avec de nouvelles données d'entrée climatiques (MANNFELD & FISCHER 2020). Dans ce cadre, des tendances au réchauffement de +1,1 °C à +2,2 °C ont été calculées pour le futur proche (2031-2060) et de +2,7 °C à +3,8 °C pour le futur lointain (2070-2099).

Une modification de la température de l'eau a été calculée avec une approche de modélisation semi-empirique pour la Suisse (VINNÅ et al. 2023). Le modèle a été calibré au moyen des températures de l'eau mesurées entre 1990 et 2020. Pour le Rhin, sept stations ont été évaluées et les modifications entre la période de référence (1990-2019) et le futur proche (2030-2059) ainsi qu'entre la période de référence et le futur lointain (2070-2099) ont été étudiés pour divers indices. Pour deux stations du Rhin, la tendance au réchauffement calculée à partir des mesures de la période 1990-2019 est indiquée (tableau 2).

Tableau 2 : Tendence au réchauffement calculée à partir des mesures pour deux stations du Rhin suisses sur la période 1990-2019 (VINNÅ et al. 2023).

Tendance (°C/décennie)	Printemps	Été	Automne	Hiver
Rheinau (bief amont)	0,18 °C	0,58 °C	0,54 °C	0,23 °C
Diepoldsau, Rietbrücke	0,20 °C	0,38 °C	0,31 °C	0,11 °C

La LAWA (communauté de travail 'Eaux' de la Fédération et des Länder allemands) a beaucoup travaillé sur les rejets d'eaux de refroidissement dans les eaux de surface et a décrit dans une recommandation d'actions à la fois les principaux facteurs de modification de la température de l'eau et les répercussions hydromorphologiques d'une telle modification (LAWA 2013).

L'effet de rejets thermiques de centrales et d'autres rejets industriels sur la température de l'eau du Rhin a été étudié par ZAVARSKY & DÜSTER (2020). À l'aide d'un modèle de régression, les facteurs naturels ont été distingués des facteurs anthropogènes des modifications de la température de l'eau. L'étude utilise des données de Bâle, Worms, Coblenz et Cologne. Outre le réchauffement de la température de l'air, l'étude a également trouvé des effets de rejets thermiques décroissants en provenance de centrales nucléaires et une corrélation entre les dernières modifications de la température de l'eau et les indicateurs de la production industrielle.

Sont liés au présent rapport les rapports CIPR [n° 297](#) et n° 302 (publication prévue au printemps/été 2025) sur l'étude des modifications futures de la quantité et la température de l'eau. Outre les projections sur les futures températures de l'eau, le dernier rapport se concentre aussi sur l'effet des rejets thermiques dans le Rhin. Les calculs montrent un réchauffement moyen entre 0,5 °C et 1 °C. L'effet d'une température de l'eau modifiée sur la biologie est présenté dans le [rapport CIPR n° 204](#) et sera également actualisé d'ici mi 2025.

3. Mesure en continu de la température de l'eau

Les paragraphes ci-dessous traitent de la technique de mesure de la température, de la manière de gérer les lacunes et de l'homogénéisation des chroniques ainsi que de la période couverte par les données disponibles.

3.1 Technique de mesure

La température de l'eau est généralement obtenue par mesure de la résistance électrique. On utilise pour cela un thermomètre à résistance de type Pt100 ou Pt1000. Ce sont des résistances de platine, qui modifient leur résistance électrique en fonction de leur température. Pour cela, il existe des fonctions standardisées qui transforment la résistance mesurée en une température. Cette opération est automatique dans les systèmes de mesure usuels. En règle générale, une exactitude absolue de l'ordre de 0,1 °C est atteinte. L'exactitude relative, c'est-à-dire en cas de modification de la température, est généralement meilleure. Cette exactitude est suffisante pour les évaluations de cette étude. L'équipement exact des stations en matière de technologies de mesure n'est pas connu, mais la technologie décrite ci-dessus est standardisée depuis des décennies et est intégrée dans la plupart des systèmes de mesures.

Pour les mesures de l'eau fluviale, une distinction est faite entre mesures ex situ et in situ. Les mesures in-situ sont effectuées directement dans le cours d'eau. Les mesures ex-situ sont effectuées dans de l'eau fluviale qui a été prélevée auparavant dans le cours d'eau. Ceci est effectué généralement par un système de pompes. Cette influence potentielle doit être étudiée pour chaque station d'analyse et dépend du site des mesures. On part du principe que les stations de mesure sont gérées avec soin et qu'aucun écart majeur dû à la méthode de mesure n'apparaît. La position/localisation des points de mesure (de prélèvement) sont beaucoup plus importants. La répartition de la température dans le cours d'eau peut être très hétérogène à la fois en profondeur (verticale) et en largeur (horizontale). Les changements de site peuvent engendrer des modifications significatives de la température. On peut toutefois supposer qu'un point de mesure / prélèvement, une fois défini et sans changement, fournit une bonne description du champ de température et

des modifications de température. Le point de mesure est un proxy² pour le régime thermique du cours d'eau (Rhin) à cet endroit. Il est donc important que les points de mesure ne changent pas. Si la série de mesures est rigoureuse en soi, des analyses de la modification du régime thermique peuvent en découler. Ceci n'est pas possible en cas de rejets thermiques ponctuels à proximité du point de mesure. Ici, une évaluation individuelle doit être effectuée.

Afin d'éviter les problèmes susmentionnés, les modifications des températures sont utilisées dans ce rapport là où cela est possible à la place des températures absolues. Pour une comparaison des stations d'analyse entre elles, il est plus pertinent d'étudier les modifications des différences, étant donné que les niveaux de températures absolues des stations peuvent fortement varier.

3.2 Gestion des lacunes de données et homogénéisation des chroniques

L'agrégation des données originales est indiquée dans le tableau 3. Elle couvre généralement une journée, même si les mesures sont en règle générale effectuées en continu avec une fréquence de mesure élevée. Pour chaque analyse, les données ont été recensées jusqu'à obtenir des valeurs annuelles. Les données manquantes allant jusqu'à deux semaines ont été interpolées. La série de données Bimmen/Lobith, où une interpolation jusqu'à 30 jours a été faite, constitue une exception. Cela est dû au fait que la lacune de données a eu lieu pendant la période de transition au printemps et qu'une modification continue de la température de l'eau peut être attendue. La série de données de Lobith (1911-2011) a été prolongée jusqu'à 2023 avec la série de données de Bimmen (2005-2023). Les deux stations d'analyse ne sont éloignées que de 2,7 km l'une de l'autre (tableau 3) et on a pu prouver pendant la période de recoupement de 2005-2011 que les valeurs corrélaient suffisamment, ce qui justifie cette approche.

3.3 Période couverte par la banque de données

En raison de données de meilleure qualité depuis le dernier rapport, la base de données a pu, une nouvelle fois, être nettement agrandie (tableau 3). Ainsi, les tendances sur le long terme ont pu être calculées de manière plus fiable et les évolutions sur le long terme ont pu être mieux estimées. La station de Bimmen/Lobith a la plus longue chronique (mesures depuis 1911). Une grande partie des mesures sur les stations ont commencé autour des années 1970. Entre-temps, des données quotidiennes et avec une meilleure résolution dans le temps sont disponibles pour beaucoup de stations (tableau 3). La station d'analyse de Düsseldorf-Flehe a été mise à l'arrêt après 2011, elle n'est donc pas étudiée dans le présent rapport. En outre, la fréquence de mesure à la station de Lobith a été élargi, ce qui a pu être compensé en combinant les séries de données des stations de Lobith et de Bimmen (chapitre 2.2).

Les stations dans le Rhin alpin (Rhin en amont du lac de Constance, figure 2) et du lac de Constance n'ont pas été prises en compte. Par rapport aux cours d'eau, le lac de Constance réagit différemment en termes de régime thermique et de température de l'eau. Avec une profondeur moyenne de 90 m, le lac réagit de manière beaucoup plus inerte que les eaux courantes aux modifications de températures en raison de son énorme volume, et ses processus dynamiques de mélange et de stratification (anomalie de densité) sont également très différents. Le Rhin alpin est séparé du haut Rhin par le lac de Constance. Le temps de séjour de l'eau dans le lac de Constance est si long qu'il déconnecte les deux tronçons du Rhin, qui peuvent être étudiés indépendamment l'un de l'autre.

² Un proxy, ou un « mandataire/délégué », est un paramètre indirect qui se comporte de la même manière que le paramètre à identifier en réalité.

Tableau 3 : Vue d'ensemble des chroniques de température de l'eau.

Stations de surveillance	Fleuve/rivière	PK	Période couverte****	Évaluation des données	Source	Analyses
Neuhausen	Rhin	47	2009-2023	journalière	OFEV	1, 2
Rheinau	Rhin	56	1971-2023	journalière	OFEV	1, 2
Rekingen*	Rhin	90,7	1969-2023	journalière	OFEV	1, 2, 3
Laufenburg	Rhin	123	1970-2023	journalière	OFEV	1, 2
Rheinfelden (CH)	Rhin	149	1970-2023	journalière	OFEV	1, 2
Bâle (<i>Weil am Rhein*</i>)	Rhin	174	1977-2023	journalière	OFEV, LUBW	1, 2, 3
Iffezheim	Rhin	334	1992-2023	journalière	LUBW	1, 2
Karlsruhe*	Rhin	359,2	1988-2023	journalière	LUBW	1, 2
Mannheim	Rhin		1975-2023	toutes les 2 semaines	LUBW	4
Worms	Rhin	443,3	1971-2023	journalière	LfU RP	1, 2, 3
Mayence	Rhin	498,5	1980-2023	journalière	LfU RP	1, 2, 4
Coblence, Rhin*	Rhin	590,3	1978-2023	journalière	BfG	1, 2, 3, 4
Bad Honnef	Rhin	640	2004-2023	journalière	LANUV	1, 2
Cologne	Rhin		1985-2023	journalière	WSV	1, 2, 3
Düsseldorf-Flehe	Rhin	732,2	2004-2011	journalière	LANUV	
Lobith*	Rhin	862,3	1911-2011	journalière	RWS	1, 2
Lobith*	Rhin	862,3	1990-2022	toutes les 2 semaines	RWS	
Bimmen	Rhin	865	2005-2023	journalière	LANUV	2
Bimmen*	Rhin	865	1978-2022	toutes les 2 semaines	CIPR	1
Bimmen/Lobith**	Rhin		1911-2023	journalière		2,3
Amerongen (1 m)***	Rhin, Nederrijn-Lek	975	1990-1992	mensuelles	RWS	
Amerongen (3 m)***	Rhin, Nederrijn-Lek	975	2001-2023	journalière	RWS	1, 2
Kampen	Rhin, IJssel	992	2000-2021	mensuelle	RWS	1
Brienoord brug	Rhin, Nieuwe Maas	995,2	2000-2021	mensuelle	RWS	1
Beerenplaat (2 m)***	Rhin, Oude Maas	996,1	1994-2022	journalière	RWS	1, 2
Middelharnis (2 m)***	Rhin, Haringvliet	1005	2006-2021	journalière	RWS	1, 2
Hoek van Holland (2.5 m)***	Nieuwe Waterweg	1030,1	1999-2021	journalière	RWS	1, 2

Bovensluis	Rhin, Haringvliet		1991-2021	mensuelle	RWS	
Hollandsch Diep (mond Dordtsche Kil west)	Rhin, Hollands Diep		2010-2021	mensuelle	RWS	
Brienoordbrug rive droite	Rhin, Nieuwe Maas		1999-2021	journalière	RWS	
Maassluis	Rhin, Nieuwe Waterweg		1990-2021	toutes les 2 semaines	RWS	
Puttershoek	Rhin, Oude Maas		1990-2021	mensuelle	RWS	
Coblence, Moselle*	Moselle	2	1978-2022	journalière	BfG	4
Mannheim, Neckar	Neckar	3	1985-2023	journalière	LUBW	4
Bischofsheim	Main	4	2004-2023	journalière	HLNUG	4

Légende :

- * Principales stations internationales d'analyse du programme d'analyse chimique Rhin de la CIPR
- ** Regroupement des séries de données de Lobith et de Bimmen (chapitre 2.2)
- *** Profondeur d'analyse des stations en mètres
- **** La période couverte indiquée ici s'étale sur l'ensemble des années des chroniques de mesures, les mesures commençant parfois un peu plus tôt ou plus tard.
- 1 Analyse de l'évolution de la température sur le profil longitudinal du Rhin et « climate stripes » (chapitre 3.1)
- 2 Analyse du dépassement de valeurs seuils (chapitre 3.2)
- 3 Analyse des tendances (chapitre 3.3)
- 4 Comparaison de la température de l'eau des grands affluents avec celle du Rhin

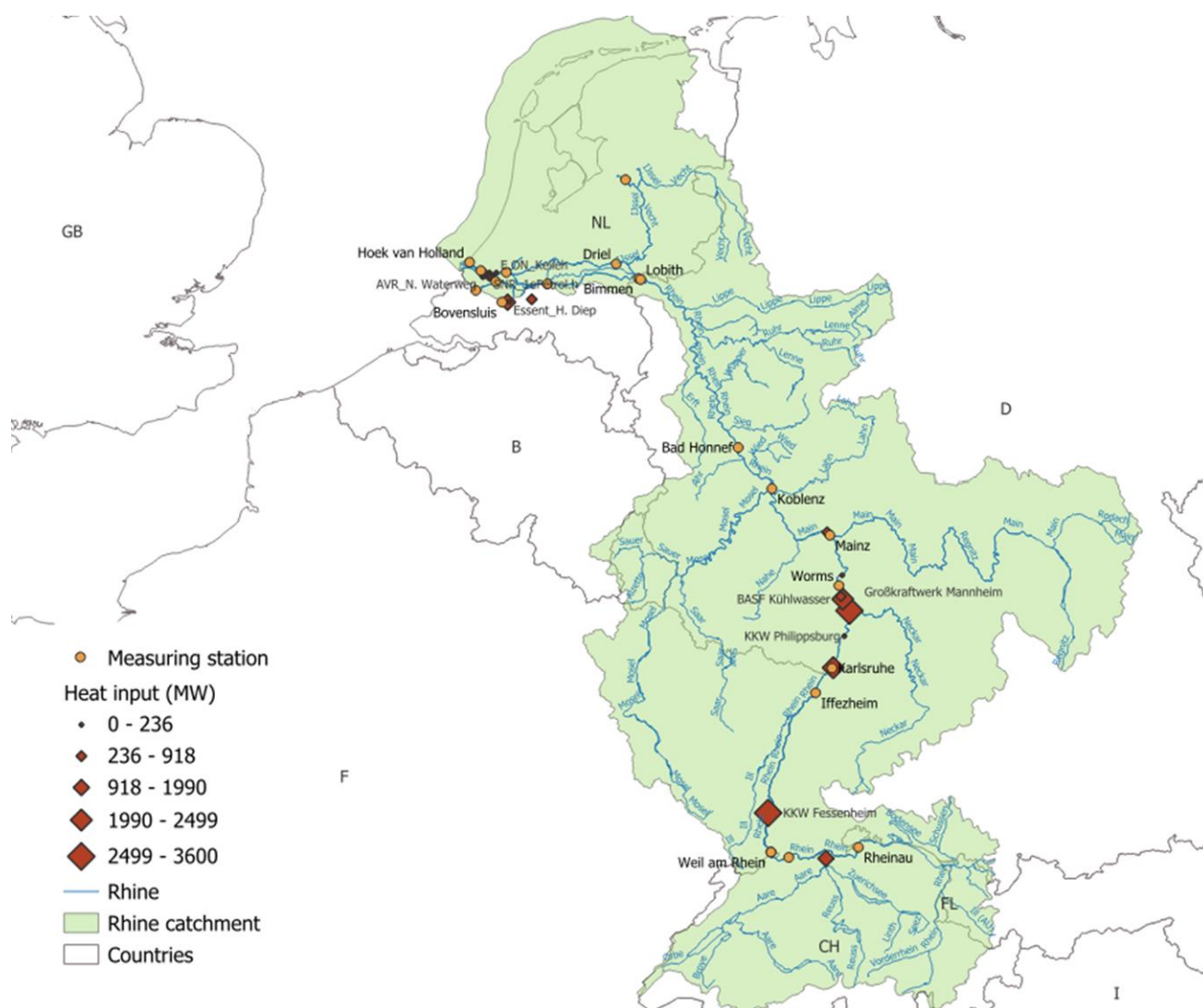


Figure 2 : Bassin du Rhin (vert) avec les stations d'analyse de la température de l'eau (points orange) et les rejets thermiques autorisés (2020) le long du Rhin (rouge). Source : Deltares (2024) dans le rapport CIPR n° 302 (publication prévue au printemps/été 2025).

4. Analyse des chroniques de température de l'eau

Les chroniques de température de l'eau sont analysées au moyen d'une série de facteurs.

4.1 Évolution de la température sur le profil longitudinal du Rhin

Pour l'étude de l'évolution des températures de l'eau sur le profil longitudinal du Rhin, les températures moyennes annuelles de l'eau ont été agrégées par tronçons du Rhin pour les années 2009-2021 (figure 3). Le haut Rhin (lac de Constance jusqu'à Bâle) est marqué par des températures de l'eau relativement froides (moyenne : 12,6 °C). Le Rhin supérieur (Bâle à Bingen³) a les températures moyennes annuelles les plus élevées (moyenne : 14,3 °C). Ceci est dû à divers facteurs. Le Rhin supérieur se trouve dans une région relativement chaude d'un point de vue climatique. De plus, la succession de barrages sur le Rhin supérieur provoque une diminution de la vitesse d'écoulement, ce qui fait que l'eau a plus le temps de se réchauffer. Dans ce tronçon, on observe également les répercussions des rejets thermiques dans le Rhin. Ils sont également visibles dans les mesures des deux

³ au nord de Mayence

tronçons suivants que sont le Rhin moyen (de Bingen à Cologne) et le Rhin inférieur (de Cologne à Lobith) (moyennes respectives de 13,9 °C et 13,8 °C), sur le cours desquels la température de l'eau diminue toutefois globalement. En direction du débouché du Rhin et sur le delta du Rhin (de Lobith à Hoek van Holland), le Rhin continue à se refroidir (moyenne : 13,1 °C). Le Rhin subit ici en partie l'influence de la mer.

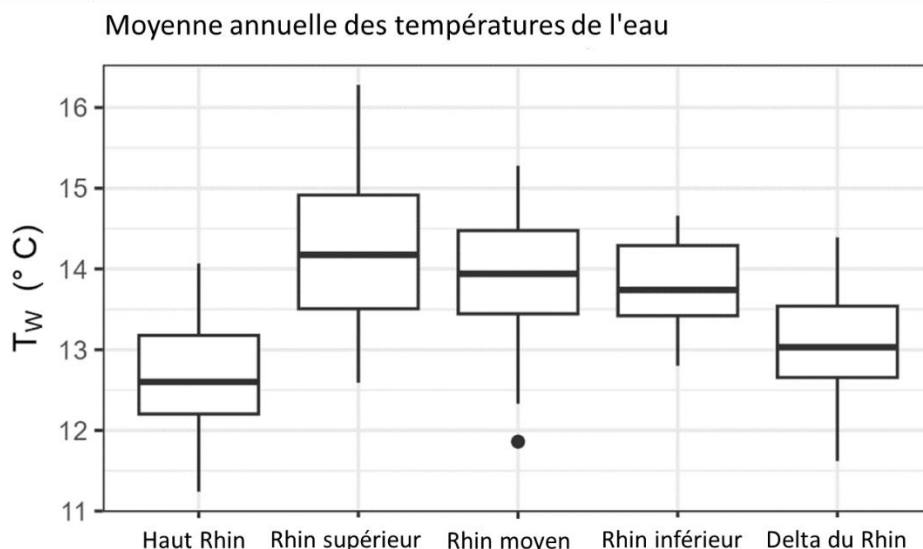


Figure 3 : Températures moyennes annuelles (2009-2021) sur le profil longitudinal du Rhin. Haut Rhin : Lac de Constance à Bâle, Rhin supérieur : Bâle à Bingen, Rhin moyen : Bingen à Cologne, Rhin inférieur : Cologne à Lobith, delta du Rhin : Lobith à Hoek van Holland. Les côtés inférieurs et supérieurs des boîtes à moustache représentent les 25^e et 75^e percentiles, la ligne noire dans la boîte est la médiane, le point montre un résultat anormal (ici : moyenne annuelle de la station de Cologne, 2021).

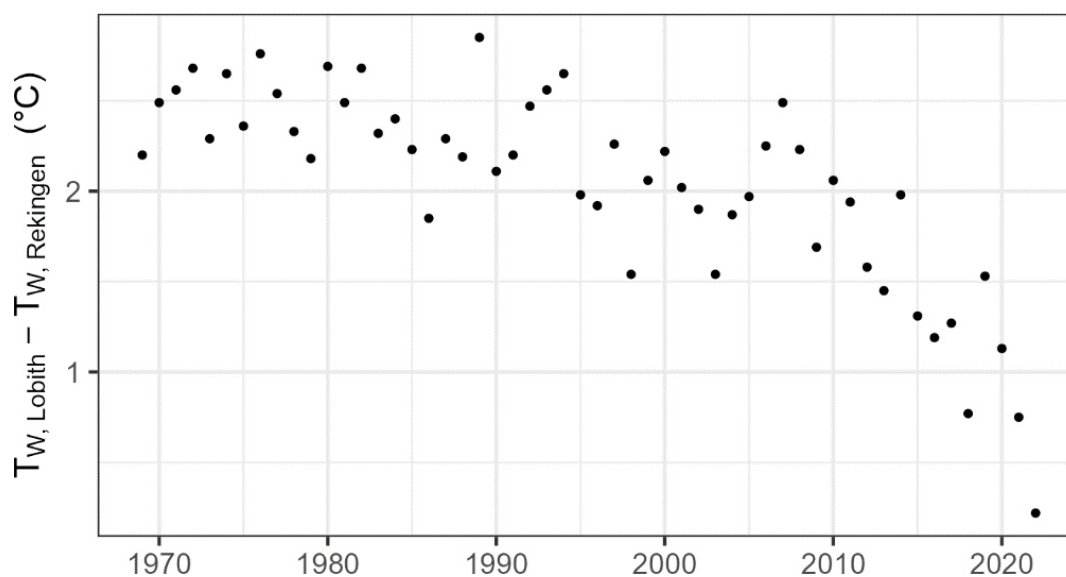
De la première station (Neuhausen) à la dernière station (Hoek van Holland), la température annuelle de l'eau augmente entre 2009 et 2021 en moyenne de 0,4 °C, avec un maximum de 1,1 °C et un minimum de -0,4 °C (rafraîchissement) (tableau 4).

La marge de variation de la différence entre ces deux stations va de -0,4 °C à 1,1 °C, ce qui signifie qu'un refroidissement peut également se produire en moyenne annuelle. Cet effet peut toutefois aussi découler de l'influence marine sur la station de Hoek van Holland. La marge de variation du réchauffement entre les stations de Rekingen et de Lobith est de 0,22 °C à 2,9 °C avec un réchauffement moyen de 2,0 °C. On remarque que les faibles différences de températures entre ces deux stations sont observées en majorité au cours des dix dernières années (figure 4). Ceci est vraisemblablement dû à la tendance au réchauffement plus marquée à Rekingen (chapitre 3.1).

Au total, les différences de températures entre les stations sont comparables à celles du [rapport CIPR n° 209](#) (tableau 1).

Tableau 4 : Différence de températures entre les valeurs moyennes annuelles des deux stations d'analyse nommées.

Tronçon	Période	Moyenne (°C)	Minimum (°C)	Maximum (°C)
Neuhausen-Hoek van Holland	2009-2021	0,4	-0,4	1,1
Rekingen-Lobith	1969-2022	2,0	0,2	1,1
Rekingen-Karlsruhe	1988-2023	1,3	0,6	2,1
Karlsruhe-Mayence	1988-2023	1,2	0,5	2,1
Karlsruhe-Worms	1988-2023	1,6	0,7	2,3
Mayence-Coblence	1980-2023	-0,4	-1,1	0,3
Coblence-Bad-Honnef	2004-2023	-0,4	-1,1	0,0
Bad Honnef-Cologne	2004-2023	-0,3	-1,7	0,5
Cologne-Lobith	1985-2022	-0,1	-1,9	1,1
Lobith-Amerongen	2001-2022	-0,8	-2,5	0,1

**Figure 4** : Différence des moyennes annuelles des températures de l'eau (Lobith-Rekingen).

Pour le calcul de la modification relative, la différence entre la température moyenne annuelle de chaque année et celle de 2010 a été présentée par station (figure 5). 2010 a été sélectionnée comme année de référence étant donné que des mesures sur toutes les stations sont disponibles sur toute cette année. Une variabilité interannuelle similaire entre les stations et une tendance au réchauffement sur la période observée se dessinent pour les températures moyennes annuelles relatives (figure 5, paragraphe 4.3). Des différences plus marquées apparaissent pour les stations de Cologne, Amerongen et Brienenoord brug, qui présentent en partie une variabilité plus élevée avec des anomalies positives plus fortes que les autres stations par rapport à 2010.

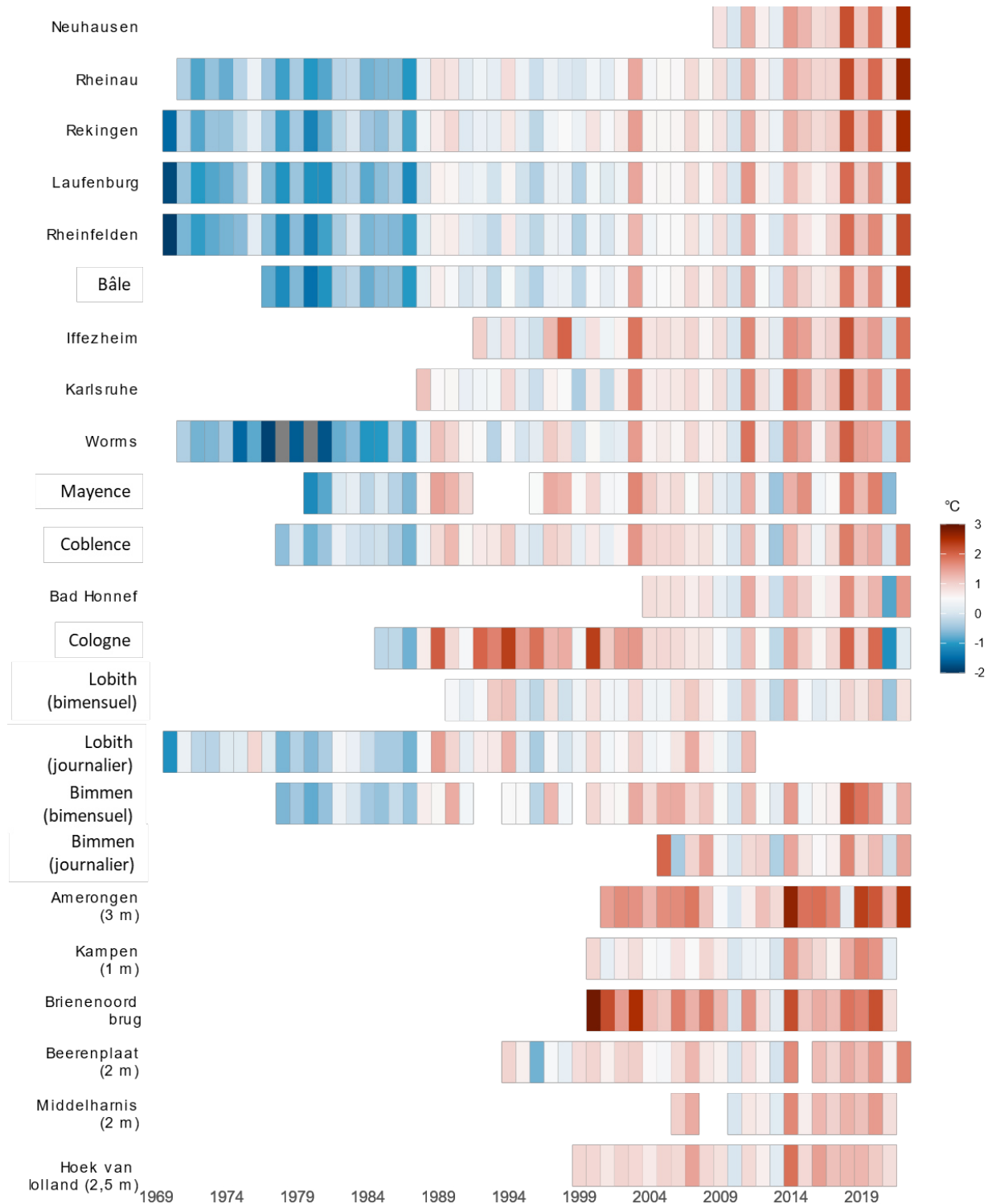


Figure 5 : Les « climate stripes » de la température de l'eau sur les stations d'analyse rhénanes et leur évolution dans le temps. Est présentée la différence de la température moyenne annuelle par rapport à l'année de référence 2010. Elle a été retenue car on dispose de mesures sur toutes les stations pour cette année.

4.2 Analyse de fréquence (valeurs extrêmes)

Le nombre de jours dépassant certaines valeurs seuils spécifiques est un paramètre pertinent pour les rejets thermiques et pour les questions d'ordre écologique. Pour l'évaluation de la propagation d'espèces néobiotiques, les températures en hiver sont pertinentes. Ainsi, les jours à plus de 10 °C peuvent par exemple permettre d'estimer les chances de reproduction. Pour une analyse de fréquence, les jours par an où la température moyenne journalière est inférieure ou supérieure à une valeur seuil sont additionnés. Pour ce rapport, les valeurs seuils de 25 °C (figure 6), 28 °C (figure 8), 10 °C (figure 9) et 3 °C (figure 10) en raison de sa pertinence pour la biologie, ainsi que les valeurs additionnelles de 21,5 °C, 23 °C et 30 °C (tableau A.1) ont été sélectionnées conformément à la directive cadre Eau et aux réglementations nationales.

Une série de jours de dépassement des valeurs 25 °C, 28 °C et 10 °C est visible sur la partie septentrionale du Rhin supérieur et sur le Rhin moyen (figures 6-9). Les années particulièrement chaudes (1994, 2003, 2006, 2018, 2020 et 2022), au cours desquelles des dépassements de la température moyenne journalière de 25 °C sont visibles sur presque tout le Rhin, ressortent également (figure 6).

Des températures de l'eau moyennes journalières étaient disponibles pour ce rapport pour la plupart des stations. Pour l'évaluation de la situation pendant l'été, on se sert généralement de la température maximale journalière. Ainsi, le nombre de jours par an où la température maximale journalière dépassait 25 °C a été calculé pour la comparaison de quelques stations (figure 7). Ce type d'évaluation ne change pas la tendance générale, mais le nombre de jours de dépassement augmente logiquement au cours des années chaudes. Pour un dépassement de la température maximale de l'eau, il suffit que la température de l'eau dépasse le seuil de 25 °C pendant un intervalle de mesure, alors que la température de l'eau doit être nettement plus élevée sur l'ensemble de la journée quand on observe la valeur moyenne journalière.

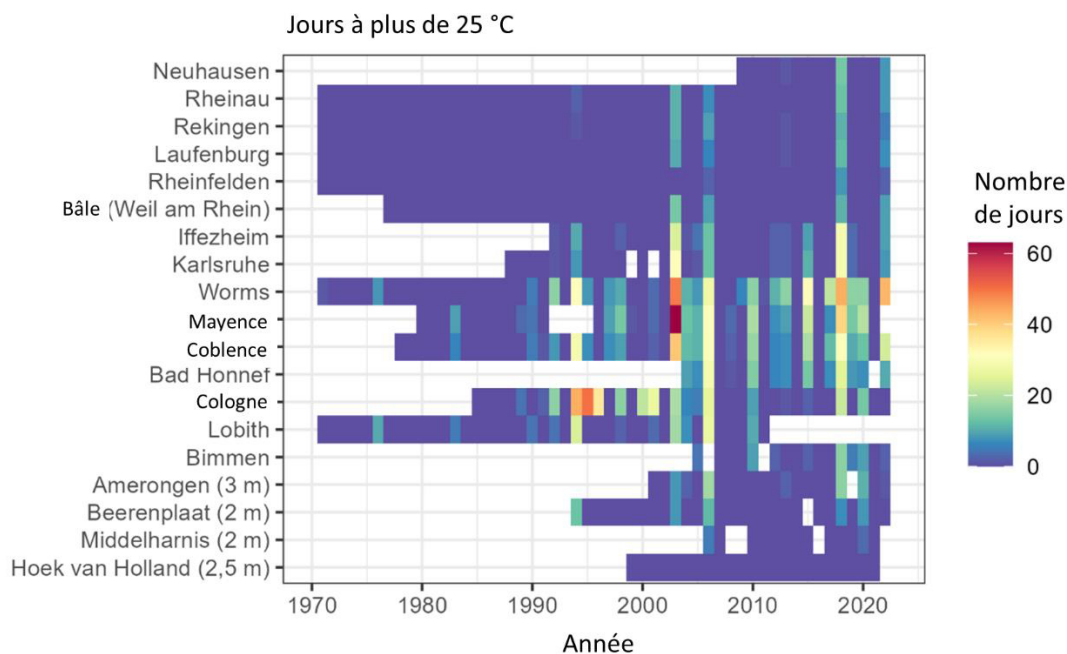


Figure 6 : Nombre de jours avec une température moyenne journalière > 25°C.

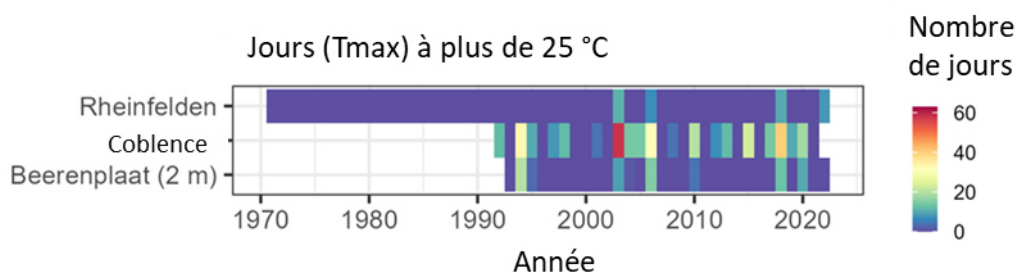


Figure 7 : Nombre de jours avec une température maximale journalière > 25 °C.

La valeur seuil de 28 °C n'a jusqu'à présent été dépassée que sur un nombre réduit de stations (de Worms à Cologne) et d'années (1994, 1995, 2003, 2006 et 2018). Il convient ici de souligner qu'il s'agit pour l'évaluation de températures moyennes journalières. La valeur seuil de 28 °C a très probablement été dépassée sur plusieurs heures pour différentes stations et années (figure 8).

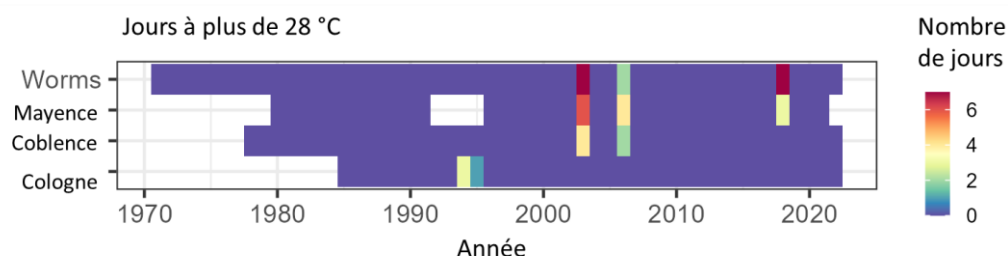


Figure 8 : Nombre de jours avec une température moyenne journalière > 28°C. Sont représentées ici uniquement les stations ayant connu un dépassement de la valeur seuil. Pour toutes les autres stations, cette valeur seuil n'a pas été dépassée.

Les valeurs obtenues inférieures à la valeur seuil de 10 °C suivent le même modèle que les dépassements de la valeur de 25 °C, avec un nombre de valeurs inférieures plus fréquent dans la partie septentrionale du Rhin supérieur et dans le Rhin moyen. Toutefois, une tendance à des températures inférieures à cette valeur seuil plus rares dans le haut Rhin et dans la partie méridionale du Rhin supérieur au cours des 15 dernières années est clairement visible. L'hiver 2006/2007 se distingue comme étant particulièrement chaud (figure 9).

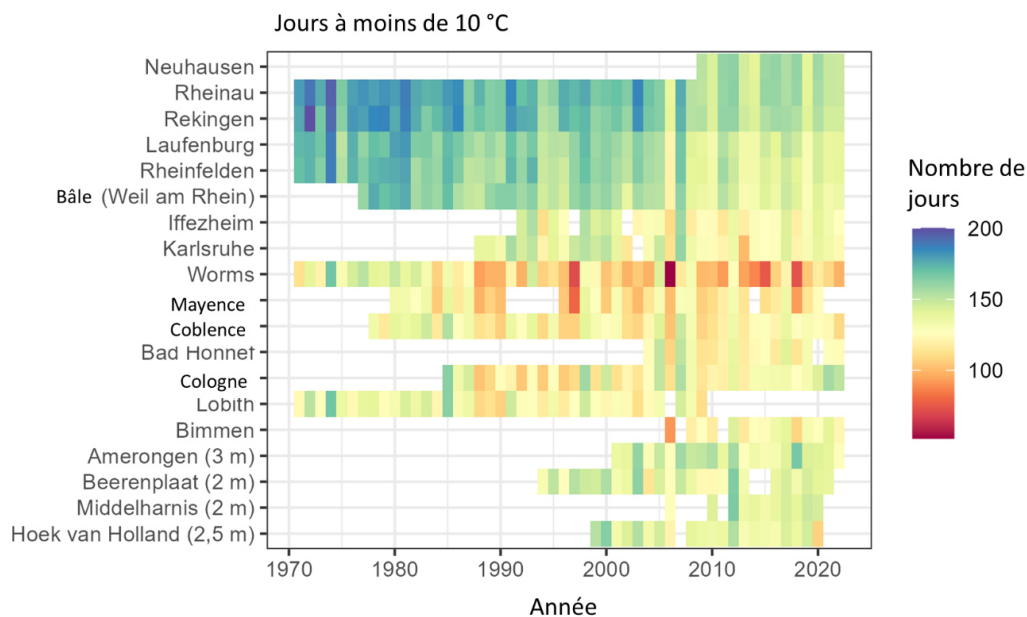


Figure 9 : Nombre de jours en hiver (novembre-avril) avec des températures moyennes journalières < 10 °C. L'année indiquée correspond à l'année précédente, par exemple 2000 pour l'hiver 2000/2001. Les années où plus d'un quart des valeurs moyennes journalières d'hiver n'étaient pas disponibles n'ont pas été prises en compte.

Pour les jours où la température de l'eau est inférieure à 3 °C, on observe une tendance à la baisse (figure 10). Des jours inférieurs à cette température de 3 °C ont été en partie observés par le passé (1984/85-1986/87) sur l'ensemble du Rhin (pas de mesures pour le delta du Rhin sur cette période). Après 1990 (et après 1995 jusqu'après 2005), des périodes de plus de 20 jours en-dessous de cette température n'étaient plus visibles que dans le haut Rhin ou le delta du Rhin. Certaines années froides ont continué à se produire sur l'ensemble du Rhin (2011/12 et 2016/17). On observe aussi à intervalles fréquents des hivers chauds au cours desquels aucune température moyenne journalière inférieure à 3 °C n'a été observée (1987/88-1989/90, 1994/95, 2003/04, 2006/07, 2013/14-2015/16, 2019/20 et 2021/22).

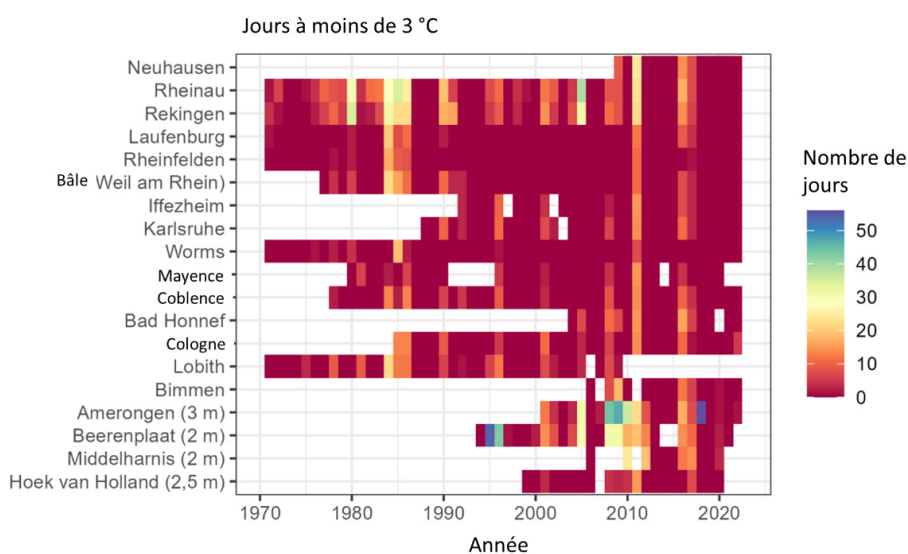


Figure 10 : Nombre de jours en hiver (novembre-avril) avec des températures moyennes journalières < 3 °C. L'année indiquée correspond à l'année précédente, par exemple 2000 pour l'hiver 2000/2001.

La station de Lobith joue un rôle particulier. En raison des longues chroniques de valeurs moyennes journalières, les dépassements des valeurs seuil peuvent être calculés sur une période de 99 ans (figure 11). Au début du XX^e siècle, la température de 25 °C n'a presque jamais été dépassée sur la station de Lobith. Une augmentation marquée des jours de dépassement est visible en particulier dans les 20 dernières années de la chronique observée. À l'été 2006, qui était très chaud, la valeur seuil de 25 °C a été dépassée pendant presque un mois complet. Une tendance encore plus nette se présente pour les jours en-dessous de 10 °C et en-dessous de 3 °C. Ici aussi, on observe une nette tendance au réchauffement avec une baisse des jours en-dessous de la valeur seuil respective.

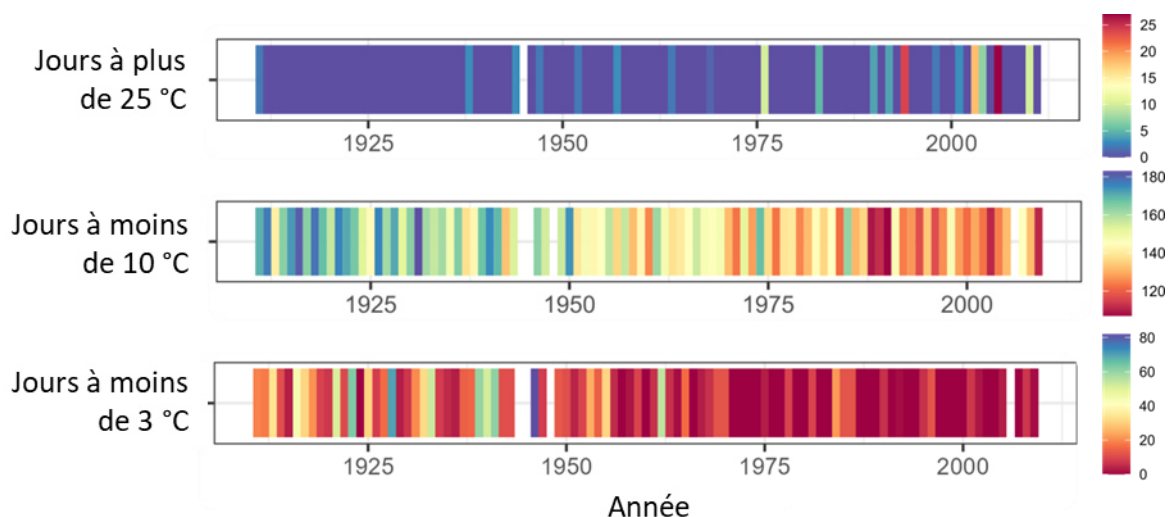


Figure 11 : Nombre de jours de dépassement à la hausse et à la baisse à la station de Lobith. Nombre de jours avec une température moyenne journalière > 25°C (en haut). Nombre de jours en hiver (novembre-avril) avec des températures moyennes journalières < 10 °C (au milieu). Nombre de jours en hiver (novembre-avril) avec des températures moyennes journalières < 3 °C (en bas). L'année des paramètres hivernaux indiquée correspond à l'année précédente, par exemple 2000 pour l'hiver 2000/2001. Les années où plus d'un quart des valeurs moyennes journalières d'hiver n'étaient pas disponibles n'ont pas été prises en compte.

La durée des dépassements de la température de 25 °C correspond dans la plupart des cas au nombre de jours de dépassement. De brèves chutes des températures conduisent sur un nombre relativement restreint d'années et de stations à plusieurs brefs épisodes de dépassement de la valeur seuil.

Les températures de l'eau inférieures à 10 °C sur une longue période varient le long du Rhin (figure 12). Dans le Rhin supérieur et le delta du Rhin, la phase froide commence plus tôt que dans le Rhin moyen et le Rhin inférieur. Ceci est plus marqué à la date de fin calculée de la phase froide. Cette date de fin est plus tardive dans le haut Rhin et plus précoce dans le Rhin moyen et le Rhin inférieur que dans les autres tronçons. De ce fait, on observe les mêmes tendances sur la durée de la période froide. Ainsi, celle-ci dure le plus longtemps dans le haut Rhin alors qu'elle est la plus courte dans le Rhin moyen. Ceci pourrait être dû à l'influence des rejets thermiques.

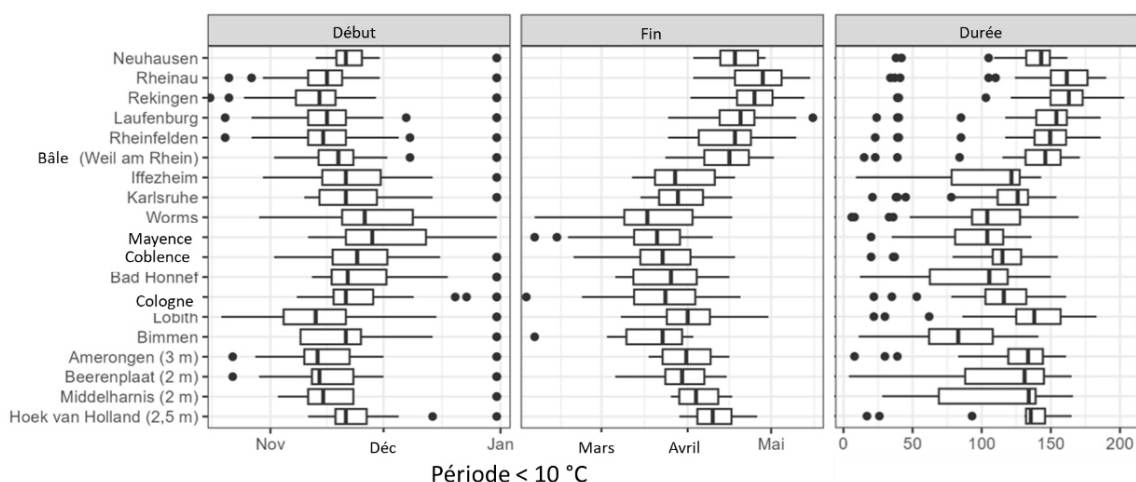


Figure 12 : Début, fin et durée de la période froide (< 10 °C) en hiver pour 2009-2021. Les côtés gauches et droits des boîtes à moustache représentent les 25^e et 75^e percentiles, la ligne noire dans la boîte est la médiane, les points montrent des résultats anormaux.

4.3 Analyse de tendances

La température moyenne de l'air dans le bassin du Rhin augmente en tendance pendant la période observée (figure 13). Les figures 14 à 19 affichent l'évolution relative de la température de l'eau dans les stations d'analyse implantées le long du Rhin. Cette évolution relative décrit la différence entre la température mesurée et la moyenne de la période de référence de l'OMM⁴ de 1991 à 2020.

Les évolutions des courbes de température sont différentes pour chaque station (tableau 5). La température de l'air est fondamentalement un proxy des interactions entre l'eau du fleuve, l'atmosphère et le rayonnement (chapitre 2.1). Les rejets thermiques anthropogènes proviennent fréquemment de l'industrie et des centrales.

Tableau 5 : Tendances de l'évolution dans le long terme des températures de l'eau (TE) en °C par décennie. On a sélectionné pour l'évaluation des stations implantées le long du Rhin, disposant de chroniques relativement longues et couvrant les différents tronçons du Rhin.

		TE Rekingen	TE Bâle	TE Worms	TE Coblenche	TE Cologne	TE Bimmen/ Lobith	Température de l'air
Période		1969-2023	1977-2023	1970-2023	1978-2023	1986-2023	1911-2023	1910-2023
Période totale	min.	0,20	0,36	0,45	0,10	0,09	0,28	0,15
	moyenne	0,44	0,50	0,54	0,29	-0,11	0,28	
	max.	0,58	0,66	0,69	0,61	-0,37	0,30	
1910-1930								-0,06
1920-1940							0,64	0,04
1930-1950							0,19	0,33
1940-1960							0,50	0,21
1950-1970							0,33	-0,14

⁴ Organisation météorologique mondiale

1960-1980						0,47	0,14
1970-1990	0,35					0,26	0,20
1980-2000	0,65	0,60	1,15	0,63		0,37	0,55
1990-2010	0,24	0,43	0,16	0,02	-0,41	0,06	0,29
2000-2020	0,40	0,32	0,53	0,12	-0,24	0,17	0,35

La température de l'air dans le bassin du Rhin fait apparaître une tendance à la hausse de 0,15 °C/décennie sur l'ensemble de la période observée (figure 13 en haut). Si l'on considère des périodes de 20 ans (figure 13 en bas), les tendances sont assez variables. On note en effet pour la période comprise entre 1910 et 2023 à la fois des phases de refroidissement et des phases de réchauffement faibles à fortes. L'évolution de la température de l'air est un bon paramètre comparatif pour la modification de la température de l'eau, étant donné que la température de l'air est un facteur central dans le régime thermique des cours d'eau, qu'elle émet un signal climatique clair et qu'elle décrit ainsi les impacts climatiques sur la température de l'eau.

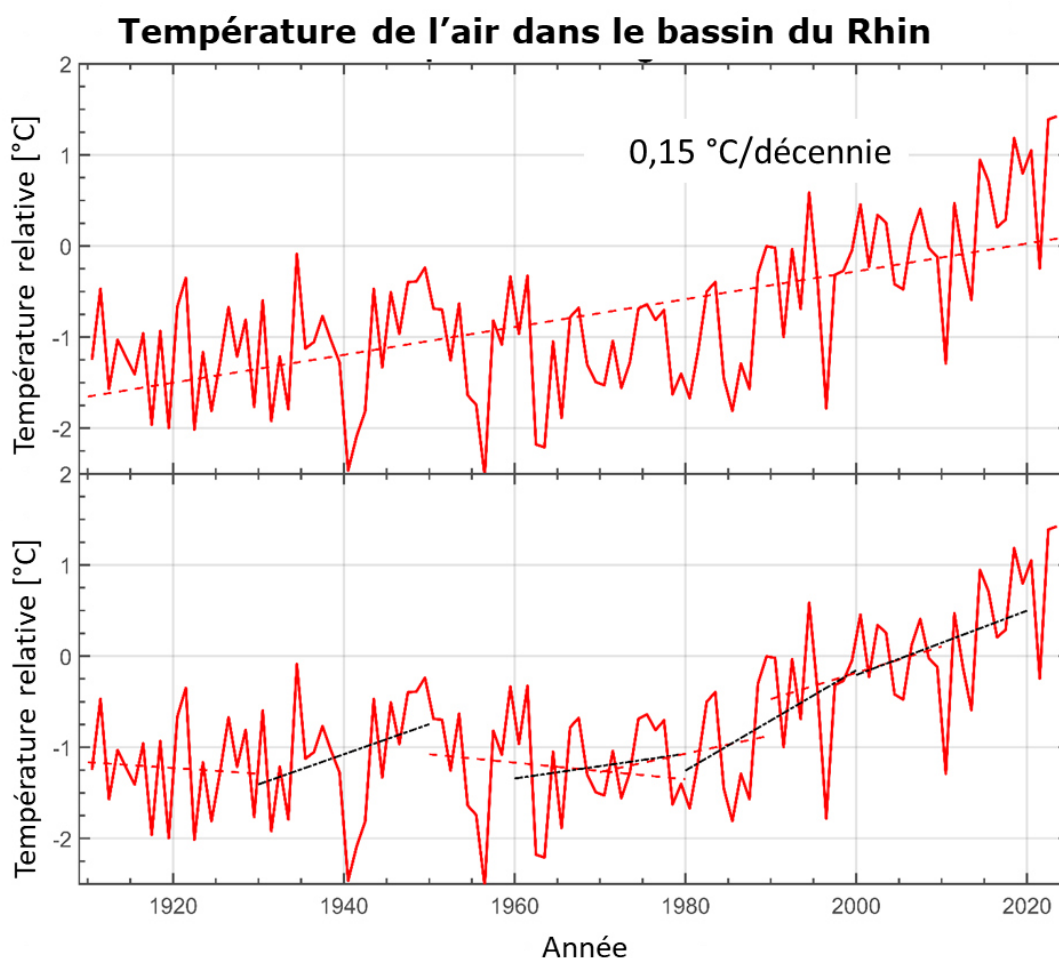


Figure 13 : En haut : évolution de la température moyenne annuelle de l'air dans le bassin du Rhin depuis 1900. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données avec la progression de l'ajustement indiquée en °C par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

La figure 14 montre l'évolution de la température de l'eau à Rekingen. Rekingen est située au PK Rhin 90,7 en amont des grands centres industriels rhénans (Bâle, Mannheim, Ludwigshafen, Francfort) et en aval du lac de Constance. Pour la période comprise entre 1970 et 2020, on obtient une tendance de 0,40 °C/décennie. Dans le même temps, l'air s'est réchauffé de 0,34 °C par décennie. Par rapport aux autres stations d'analyse plus en aval, le Rhin est ici assez peu impacté. Et pourtant, on constate des hausses distinctes entre température de l'air et température de l'eau. La différence peut s'expliquer par le calcul de la moyenne sur l'ensemble du bassin du Rhin, ce qui n'est pas représentatif pour le Rhin supérieur, le Rhin alpin et le lac de Constance. En outre, il est possible que des rejets thermiques rehaussent déjà ici la température de l'eau.

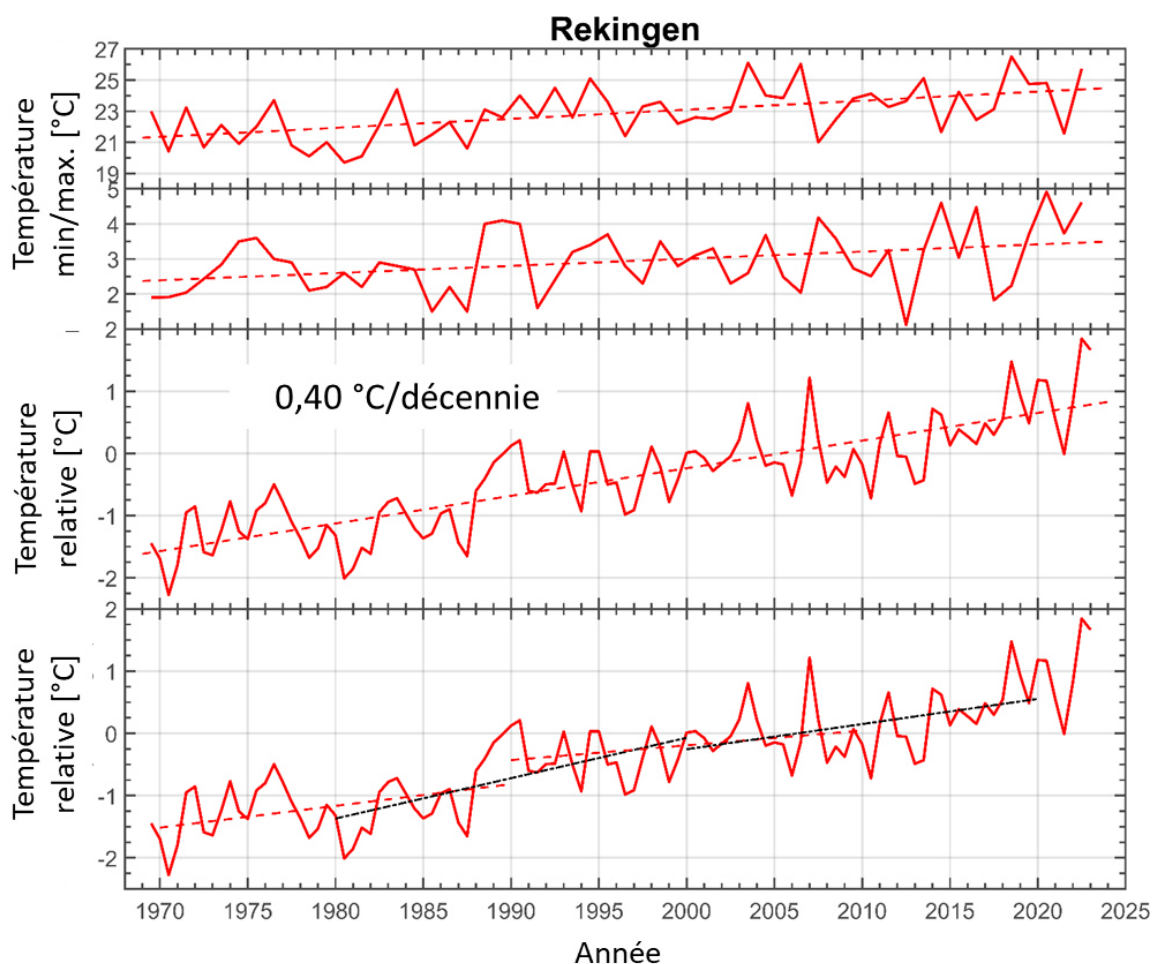


Figure 14 : Données de température de l'eau de la station de Rekingen, PK Rhin 90,7.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

La figure 15 montre l'évolution de la température de l'eau à Bâle. Ici, la tendance affiche une hausse de 0,50 °C par décennie depuis 1978. Cette hausse est supérieure à l'augmentation moyenne de la température de l'air. On suppose que ceci est dû au nombre croissant de rejets thermiques industriels et urbains.

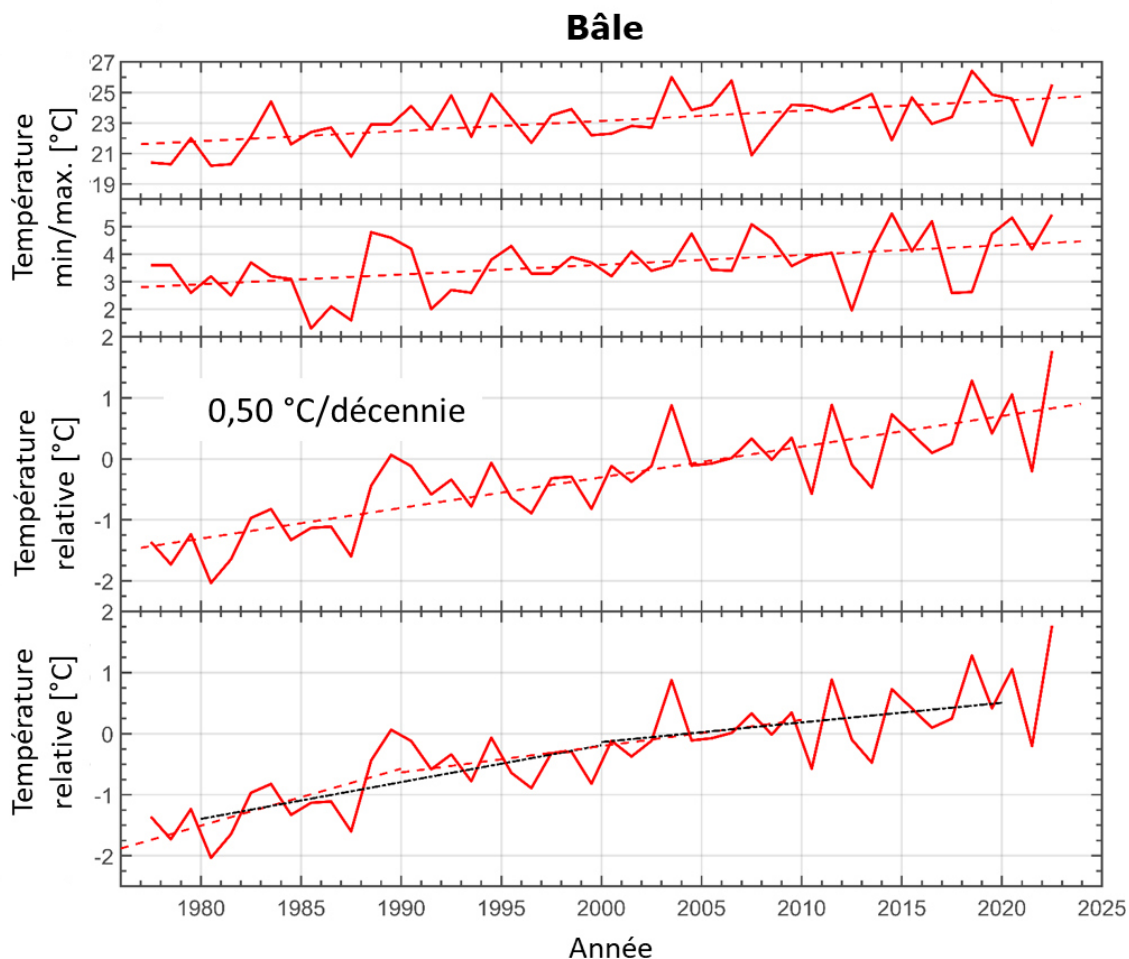


Figure 15 : Données sur la température de l'eau à la station de Bâle, PK Rhin 174.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

La figure 16 montre l'évolution de la température de l'eau à Worms. Il est intéressant de constater que qu'une hausse importante de la température est surtout visible entre le début des années 1970 et la fin des années 1980. Ceci peut s'expliquer d'une part par une modification des conditions climatiques (HARI et al. 2006) et d'autre part par des rejets thermiques accrus de centrales nucléaires entrées en service pendant cette période sur le Rhin (figure 22).

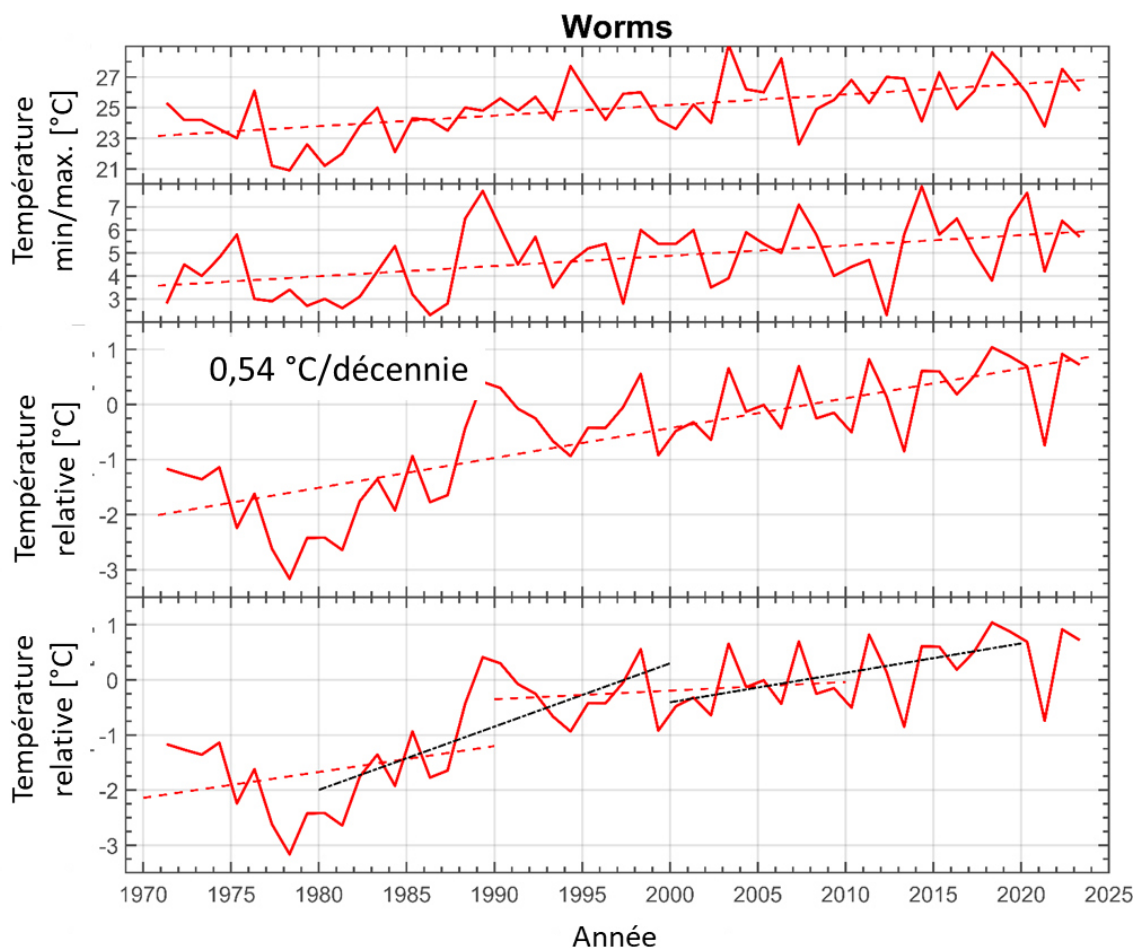


Figure 16 : Données de température de l'eau de la station de Worms, PK Rhin 443,3.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

L'évolution de Coblenz (figure 17) est similaire à celle de Coblenz (figure 16), sachant qu'on note ici aussi une montée plus rapide de la tendance probablement due à un mélange de rejets thermiques et de modifications climatiques, surtout entre 1980 et 1990.

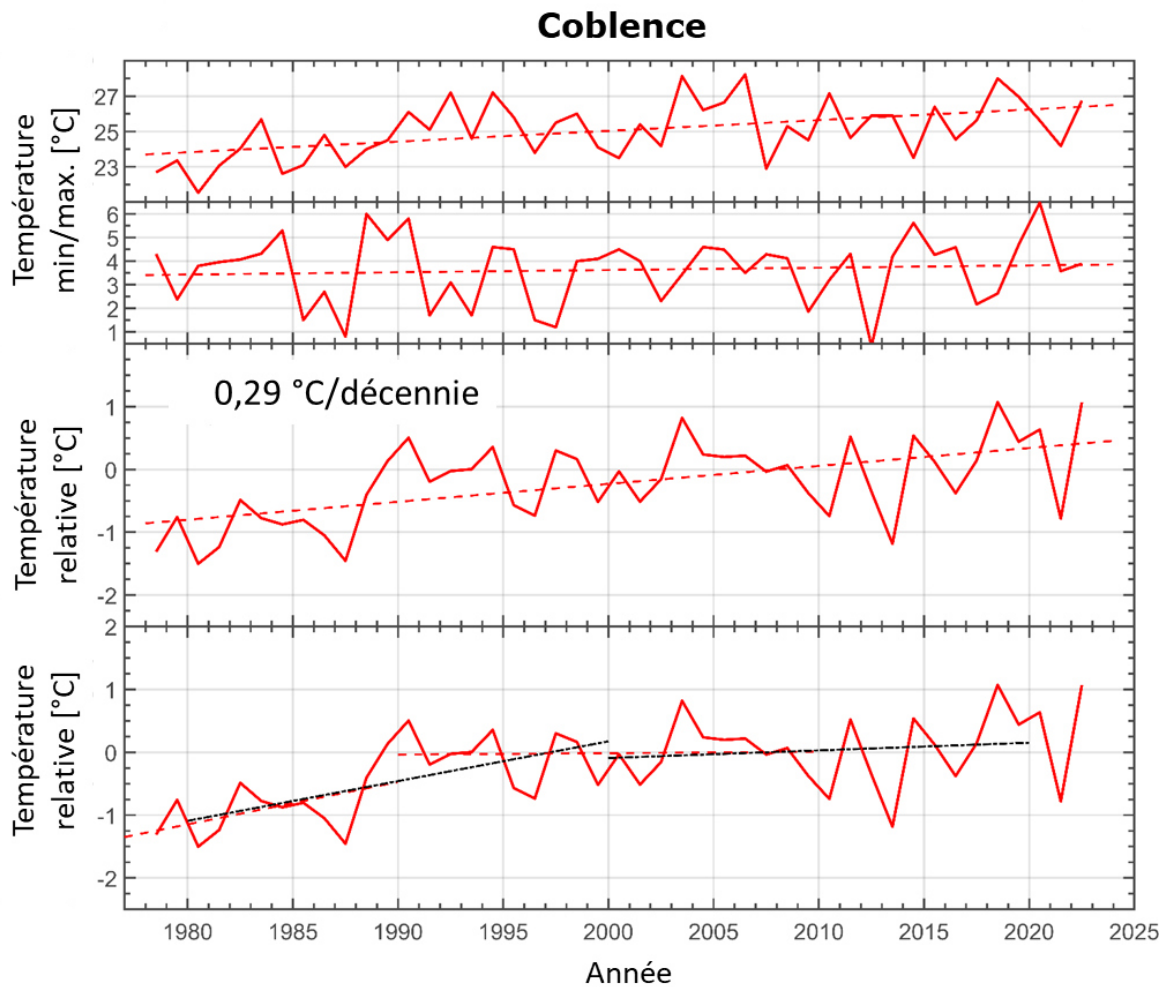


Figure 17 : Données de température de l'eau de la station de Coblenz, PK Rhin 590,3.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

Les analyses effectuées à Cologne (figure 18) sont à considérer à part. On relève ici la seule tendance négative des séries de mesures sur le Rhin. Ceci peut s'expliquer par la courte chronique, car on ne dispose pas de données avant 1985 et les seules données exploitables sont celles enregistrées après la forte hausse de température de l'air et le démarrage des centrales nucléaires. Cette série temporelle intègre la période de la production maximale d'électricité à partir de centrales nucléaires jusqu'à leur mise hors service. On estime en outre que des effets locaux font aussi effet ici. Il pourrait par ex. y avoir eu des changements sur le site industriel de Wesseling perceptibles dans le régime thermique au droit de la station d'analyse de Cologne.

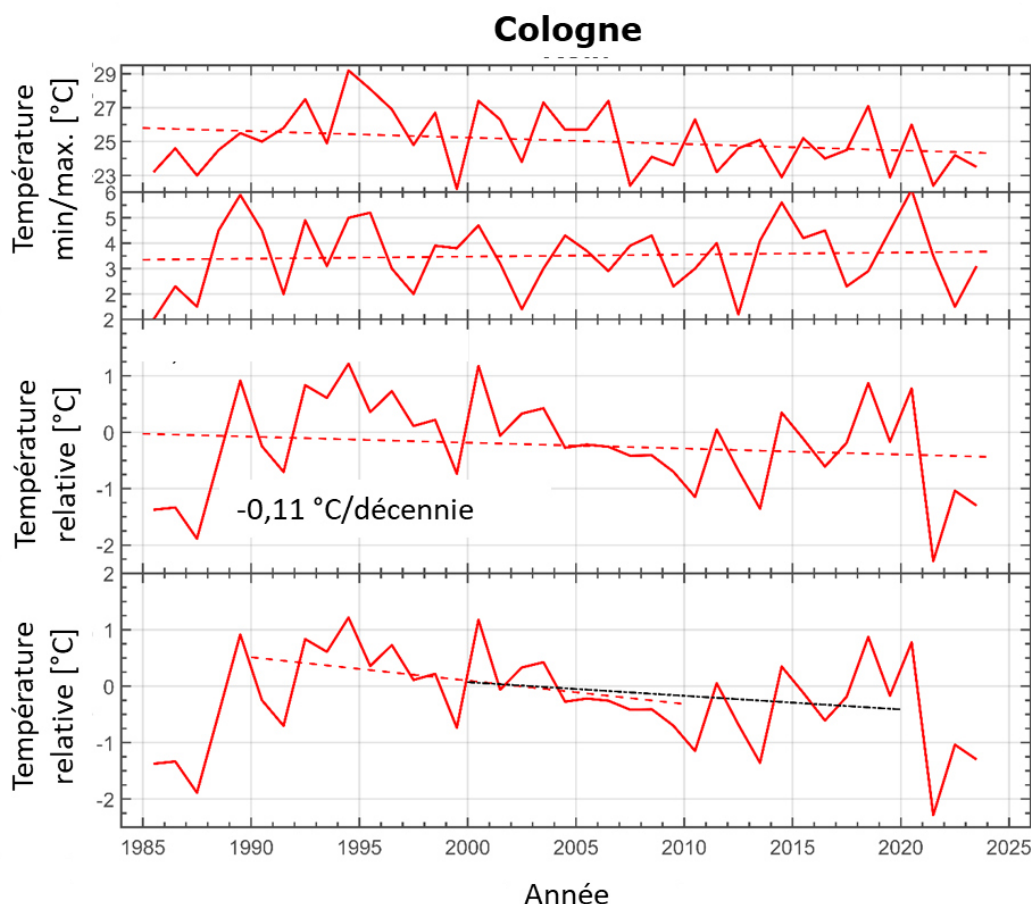


Figure 18 : Données sur la température de l'eau à la station de Cologne, PK Rhin 688.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

Un aspect très intéressant à souligner est celui de l'évolution de la chronique la plus longue de toutes celles disponibles sur la température de l'eau du Rhin à hauteur de la station regroupée de Bimmen/Lobith (figure 19, chapitre 2.2). Sur toute la période, la température de l'eau augmente de 0,28 °C par décennie et la température de l'air de 0,15 °C par décennie. La différence s'explique probablement par des rejets thermiques industriels et il conviendrait ici aussi d'estimer dans quelle mesure la température de l'air du bassin du Rhin dans son ensemble est représentative de la température de l'air à Lobith. Au niveau de ce point de mesure, la température de l'eau ne progresse plus, alors que la température de l'air continue à augmenter pendant cette période. Il pourrait s'agir des répercussions de mises à l'arrêt de centrales nucléaires, de mesures d'amélioration du rendement énergétique sur les sites de rejets thermiques ou d'une baisse de production sur des sites industriels le long du Rhin.

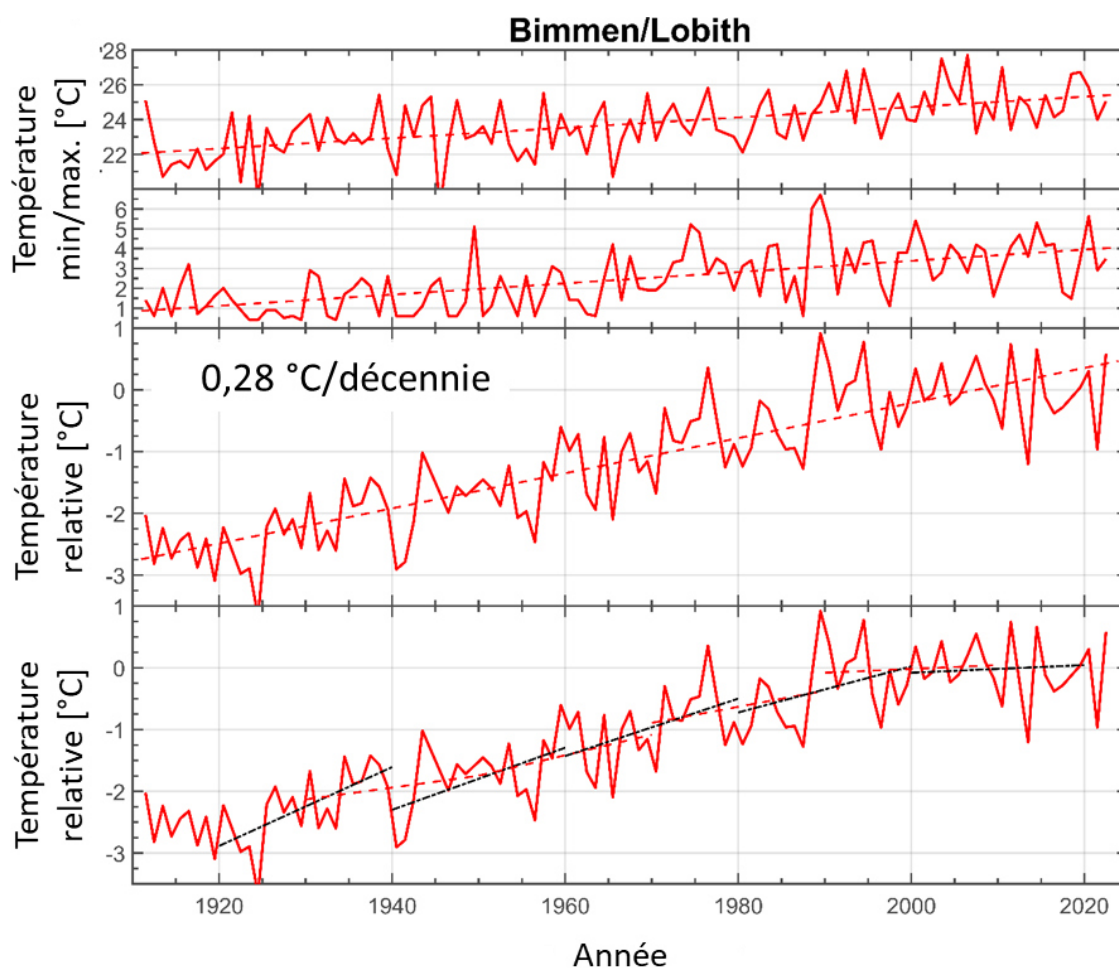


Figure 19 : Données de température de l'eau de la station de Bimmen/Lobith, PK Rhin 862,3.

En haut : évolution de la température journalière maximale et de la température minimale de l'année.

Au milieu : évolution de la température moyenne annuelle relative. La température moyenne de 1990 à 2020 a été retirée de la température absolue. La ligne discontinue montre l'ajustement linéaire sur tout le jeu de données. La hausse de l'ajustement est indiquée par décennie.

En bas : les lignes discontinues montrent la modification linéaire dans la période de temps correspondante. Les progressions calculées de chaque ajustement sont indiquées dans le tableau 5.

4.4 Impact des grands affluents sur la température de l'eau du Rhin

La différence moyenne de température entre les températures annuelles moyennes du **Rhin** et celles du **Neckar** sur la période 2004-2022 est d'env. 1,1°C (figure 20 en haut), la plus petite étant de 0,4 °C en 2020 et la plus grande de 1,7 °C en 2009. Sur toute la période considérée, la différence moyenne de température est d'env. 0,8 °C, la plus petite étant mesurée en 1998 avec 0 °C et la plus grande restant celle de 2009 avec 1,7 °C.

La différence moyenne de température entre les températures annuelles moyennes du **Rhin** et celles du **Main** sur la période 2004-2022 est d'env. 0,7 °C (figure 20 au milieu), la plus petite étant de 0,2 °C en 2012 et la plus grande de 1,2 °C en 2015.

La différence moyenne de température entre les températures annuelles moyennes du **Rhin** et celles de la **Moselle** sur la période 2004-2022 est d'env. 1,0 °C (figure 20 en bas), la plus petite étant de 0,6 °C en 2021 et la plus grande de 1,6 °C en 2004. Sur toute la période considérée, la différence moyenne de température est d'env. 1 °C, la plus petite étant mesurée en 1999 avec 0,4 °C et la plus grande en 1993 avec 1,9 °C.

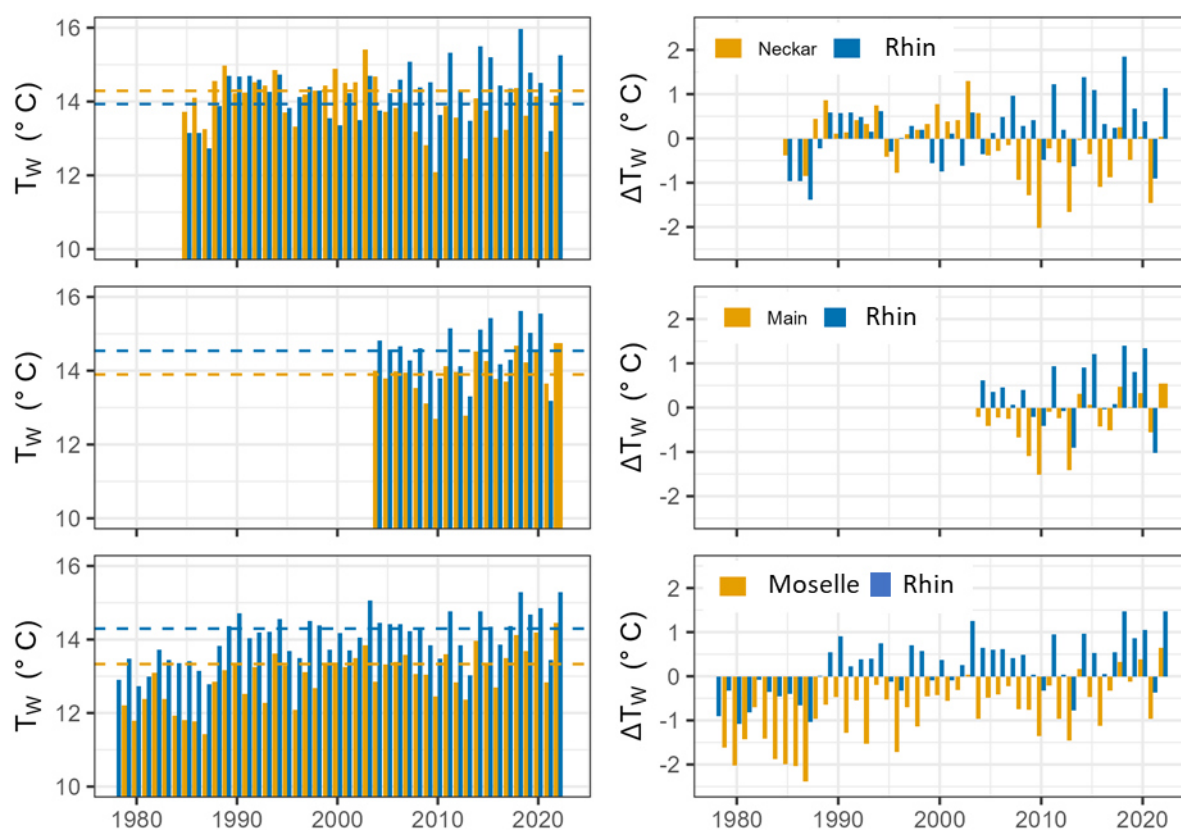


Figure 20 : Comparaison entre les températures de l'eau du cours principal du Rhin et celles des affluents (Neckar, Main, Moselle).

À gauche : moyennes annuelles de la température de l'eau du Rhin (en bleu) et des affluents (en orange). Les lignes en pointillé montrent les moyennes respectives sur la période 2004-2022 (des données sont ici disponibles pour les trois stations).

À droite : différence entre les températures annuelles moyennes de l'eau du Rhin et celles des deux cours d'eau sur la période 2004-2022. La somme des colonnes par année correspond à la différence de température entre le Rhin et ses affluents.

Les évolutions de la différence de température entre les affluents et le Rhin sont nettement distinctes. On remarque ainsi que le **Neckar** a été souvent plus chaud que le

Rhin au début de la chronique, dans les années 1980 et plus tard autour de l'an 2000. Les deux cours d'eau affichent des températures d'eau relativement similaires au cours des années 1990. Depuis 2005, la différence va dans un sens opposé et c'est le Rhin qui est plus chaud que le Neckar la plupart des années. Ceci est en relation, comme il est déjà décrit dans le [rapport CIPR n° 209](#), avec la mise à l'arrêt de la centrale nucléaire d'Obrigheim. Vers la fin de la chronique, le Neckar est un peu plus frais que la moyenne pluriannuelle des moyennes annuelles des deux cours d'eau.

Au début de la chronique de mesures, la **Moselle** est relativement fraîche par rapport à la moyenne pluriannuelle des moyennes annuelles des deux cours d'eau de 2004 à 2022 (figure 20 en bas). Avec le réchauffement de la Moselle, les moyennes annuelles se rapprochent de la moyenne pluriannuelle et la dépassent fréquemment au cours des dernières années. Le réchauffement du Rhin est bien antérieur et visible depuis 1989 avec des valeurs souvent supérieures à la moyenne pluriannuelle. La différence de température n'est négative qu'au cours de quelques années froides.

La différence de température journalière entre le Rhin et la Moselle varie dans le courant d'une année (figure 21). Alors que la Moselle est plus fraîche que le Rhin pendant le semestre d'hiver, elle est légèrement plus chaude au début de l'été, vers le mois de juin. La raison en est certainement la différence de volume d'eau de ces deux cours d'eau. En raison de son moindre volume d'eau et de la plus lente vitesse d'écoulement, la Moselle se réchauffe plus rapidement que le Rhin qui réagit plus lentement et maintient plus longtemps ses températures. En hiver, l'effet est éventuellement plus élevé dans le Rhin que dans la Moselle en raison des rejets anthropogènes et renforce la différence de température entre les deux fleuves.

On constate au total que l'influence des affluents est variable. Par le passé, les cours d'eau ont ainsi eu autant un effet de réchauffement (le Neckar en gros jusqu'au passage au nouveau millénaire) qu'un effet de rafraîchissement (la Moselle et le Neckar au cours des deux dernières décennies). De plus, la différence de température varie entre affluent et Rhin sur le cours d'une année (figure 21), ce qui fait que les affluents peuvent avoir un effet de réchauffement ou de refroidissement selon les saisons. Globalement, les affluents continuent à avoir un effet légèrement rafraîchissant sur le Rhin ([rapport CIPR n° 209](#)).

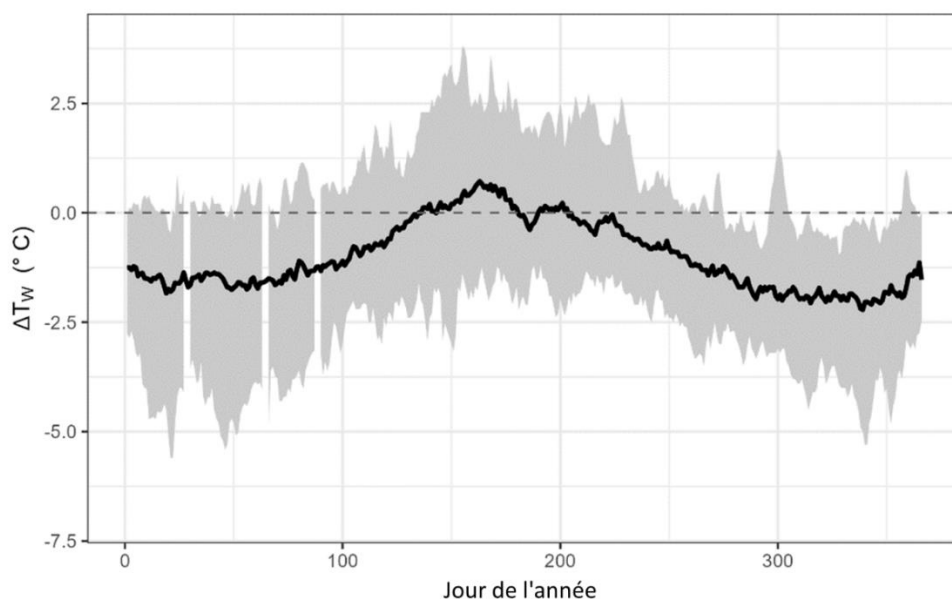


Figure 21 : Fourchette de variation de la différence de température entre la température de l'eau de la Moselle et du Rhin par jour dans le courant de l'année (en gris) et moyenne par jour de l'année, respectivement pour les années observées de la période 1978-2022.

4.5 Impact des grands rejeteurs thermiques sur la température du Rhin

Les conditions d'encadrement de la gestion des températures des cours d'eau européens sont définies par la directive cadre Eau. Les valeurs seuils qui en sont tirées pour la température de l'eau, eu égard aux rejets thermiques, sont réglementées par des dispositions spécifiques nationales. En Allemagne par ex. le règlement sur les eaux de surface (OGewV) prescrit la température maximale à respecter pour les rejets thermiques en fonction du type de rivière et plus encore de l'ichtyocénose en présence.

Sur le Rhin, ce sont surtout les entreprises industrielles et les centrales thermiques qui utilisent l'eau du fleuve pour refroidir leurs processus. Les législations des États riverains du Rhin permettent ici d'intervenir de manière régulatrice. On peut agir par ex. à moyen et long terme sur l'utilisation de l'eau du Rhin comme moyen de refroidissement par le biais de la délivrance d'autorisations de rejets thermiques. Dans les cas d'événements accompagnés de température extrêmes de l'air (vagues de chaleur) induisant des hausses de température de l'eau, le législateur n'a pour seule possibilité que celle de limiter les rejets thermiques au travers de dispositions adressées à l'industrie. Ces mesures visent à protéger la flore et la faune du stress thermique et ont le plus souvent pour conséquence de réduire la production ou d'amener les entreprises à utiliser des moyens alternatifs de refroidissement.

L'étude la plus étendue réalisée sur les rejets thermiques dans le Rhin est celle publiée en 2009 par le BUND. En outre, ZAVARSKY & DÜSTER (2020) ont estimé les changements survenus au niveau des rejets thermiques des centrales nucléaires sur la base de données de production.

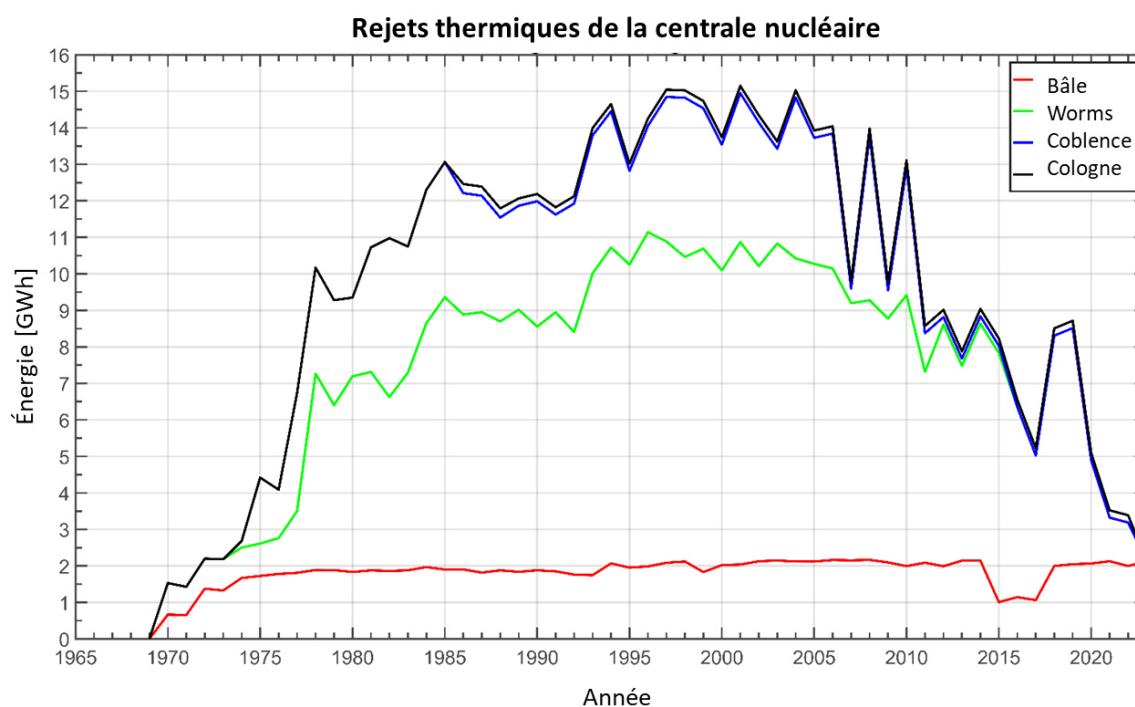


Figure 22 : Rejets thermiques des centrales nucléaires (CN) en amont de la station d'analyse respective. Le terme énergie décrit le rejet de la charge thermique en GW/h par an.

La figure 22 décrit les rejets thermiques des centrales nucléaires en amont des stations d'analyse respectives. Les rejets thermiques atteignent leur maximum entre 1995 et 2005. Cependant, les centrales nucléaires suisses contribuent, pour une part constante, au budget thermique depuis les années 1970. Depuis la catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011 et la décision de l'Allemagne de sortir du nucléaire, les rejets thermiques des

centrales nucléaires allemandes baissent progressivement. Depuis que la centrale nucléaire français de Fessenheim a été mise hors service en juin 2020, il ne reste dans le bassin du Rhin plus que celles de la Suisse et la centrale française de Cattenom sur la Moselle.

La mise à l'arrêt des centrales nucléaires allemandes et la transformation de la production énergétique et de l'industrie ont probablement modifié en profondeur les rejets thermiques dans le Rhin au cours des dernières années, de sorte qu'on peut supposer une baisse des pressions thermiques ces dernières années⁵. En raison de ces modifications des rejets thermiques, une nouvelle étude aussi détaillée que celle du BUND (2009) devrait être visée. En raison de ces modifications des rejets thermiques, une nouvelle étude aussi détaillée que celle du BUND (2009) devrait être visée, sachant que l'on ne peut généralement obtenir que les quantités maximales de rejets fixées dans les autorisations, alors que la charge thermique réellement rejetée est fréquemment plus basse. On peut s'attendre globalement à une baisse quantitative des rejets thermiques dans le Rhin avec l'arrêt des centrales nucléaires et l'augmentation du rendement énergétique de l'industrie parallèle à la hausse des coûts énergétiques.

5. Impact des étiages sur la température de l'eau

Au cours des décennies passées, le Rhin a été marqué par plusieurs phases d'étiage prolongées (BFG 2021). Des années d'étiage particulières ont été analysées dans différents rapports (BFG 2021; [rapport CIPR n° 263](#) ; SCHWANDT et al. 2019) et n'ont donc pas à être considérées plus en détail ici. Les données de la station de Rheinfelden sont présentées dans ce chapitre de manière exemplaire en raison de la très bonne base de données et de l'emplacement de cette station à l'endroit où débute le cours du Rhin analysé.

Si l'on compare les écarts entre les moyennes annuelles de la température de l'eau et la moyenne pluriannuelle de différents paramètres hydrologiques et météorologiques, on voit apparaître des corrélations claires pour le débit, le temps d'ensoleillement et la température de l'air (figure 23). La corrélation avec les précipitations est moins prononcée. La corrélation la plus nette est celle entre la température de l'air et la température de l'eau ainsi que celle entre le temps d'ensoleillement et la température de l'eau. Ainsi, les années particulièrement chaudes avec de fortes températures de l'air et notamment les années d'ensoleillement intense sont également celles de températures élevées de l'eau. Ce constat est peu surprenant car ces deux facteurs sont des paramètres importants dans le régime thermique des cours d'eau (chapitre 1.1). Les années plus chaudes sont plutôt celles de faibles débits (figure 23, A) et affichent en tendance une corrélation avec les années d'étiage.

⁵ Le GE STEMP a établi pour son usage interne un inventaire des rejets thermiques 2010-2020 (valeurs autorisées et réelles > 200 MW).

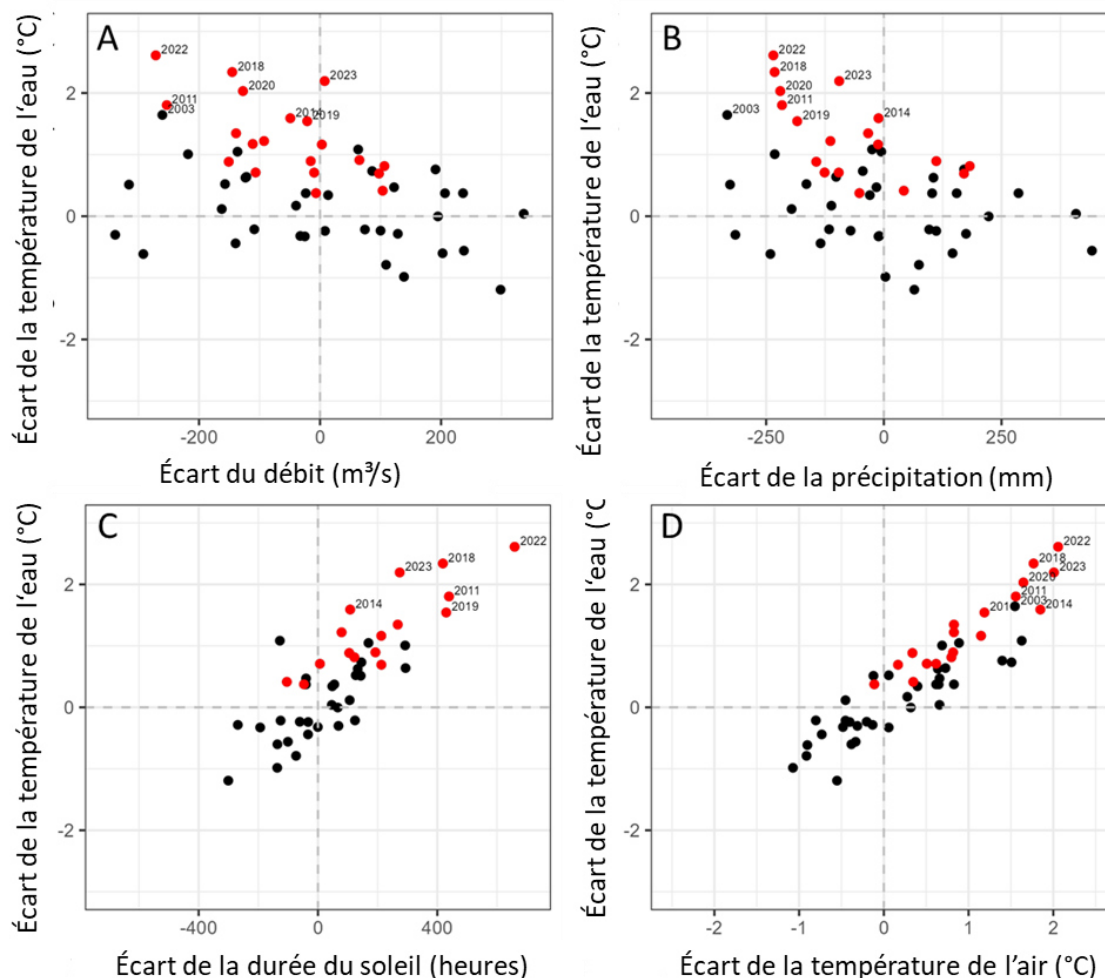


Figure 23 : Écart en les moyennes annuelles du débit (A), la somme annuelle des précipitations (B), la somme annuelle du temps d'ensoleillement (C), les moyennes annuelles de la température de l'air (D) et la température de l'eau en moyenne pluriannuelle (1970-1999) pour la station de Rheinfelden (CH). Les vingt dernières années, c'est-à-dire 2004-2023 sont surlignées en rouge.

L'année la plus chaude, celle de 2022, a été pendant 145 jours plus chaude que la moyenne pluriannuelle de la période de référence 1970-1999 (figure 24 en haut). Au cours de cette année, le débit est longtemps resté inférieur à la médiane de la période de référence. Il a été inférieur pendant 48 jours au débit minimal observé pendant la période de référence (figure 24 en bas). Pendant les deux périodes de canicule sévères (relatives pour la saison) à la fin du printemps et au début de l'été, le débit est déjà faible mais dans la marge des mesures de la période 1970-1999. À la fin de l'été, le débit exceptionnellement bas coïncide avec une température élevée de l'eau. À la fin de l'automne et en hiver, les températures de l'eau sont à nouveau supérieures au maximum pluriannuel, alors que le débit est à un niveau moyen.

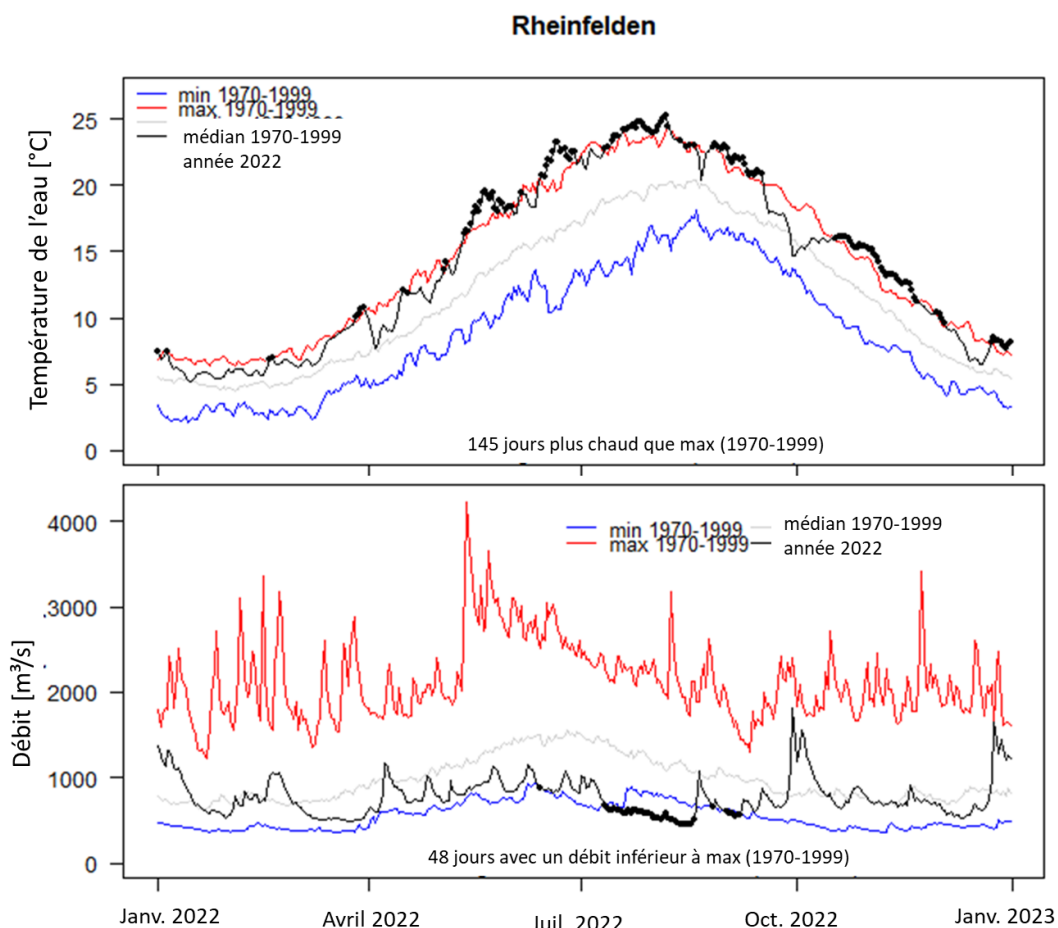


Figure 24 : Évolution annuelle de la température de l'eau (en haut) et du débit (en bas) pour une année très chaude (2022) à la station de Rheinfelden.

On constate que les facteurs d'impact principaux de la température de l'eau sont les paramètres du régime thermique décrits au chapitre 1.1. Un étiage peut aggraver l'impact d'une période de canicule sur la température de l'eau, car le volume d'eau qui est réchauffé est moins important qu'en situation normale (BFG 2021, SCHWANDT et al. 2019). Les projections d'avenir indiquent que le débit du Rhin augmentera certes en hiver, mais qu'il baissera en été ([rapport CIPR n° 297](#)). Le réchauffement de l'eau dû au changement climatique progressif peut donc être renforcé par la baisse des débits estivaux.

6. Conclusions

La base de données des températures de l'eau mesurées pour le présent rapport a pu être sensiblement agrandie avec l'ajout de stations supplémentaires en Suisse et aux Pays-Bas ; elle couvre désormais l'ensemble du bassin du Rhin en aval du lac de Constance.

Une augmentation des jours de dépassement de seuils critiques de température continue à être observée sur l'ensemble du Rhin et le nombre de jours de dépassement est le plus élevé dans le Rhin moyen.

Les jours froids baissent en hiver. Ces changements sont particulièrement visibles dans le haut Rhin et le Rhin supérieur.

Quelques épisodes particulièrement chauds ressortent de la courbe d'évolution dans le long terme. Plusieurs années chaudes sont venues s'ajouter aux étés 2003 et 2006 depuis le dernier rapport de la CIPR sur l'évolution des températures de l'eau (2018, 2020, 2022).

La température de l'air est un facteur central agissant sur le régime thermique des cours d'eau et sur leur réchauffement et, de ce fait, un bon paramètre comparatif pour la modification de la température de l'eau.

Toutes les stations analysées pour déterminer des tendances mettent en évidence un réchauffement progressif de l'eau, à l'exception de Cologne où la tendance est négative. Ceci s'explique par des effets locaux de mesure au niveau de la station de Cologne qui reflètent le recul des rejets industriels à proximité de cette station. Les tendances au réchauffement les plus marquées sont constatées dans le haut Rhin, le Rhin supérieur et le Rhin moyen.

Les grands affluents Neckar, Main et Moselle ont tous en moyenne un effet plutôt rafraîchissant sur la température de l'eau du Rhin.

Du fait de l'arrêt des centrales nucléaires et de l'augmentation du rendement énergétique de l'industrie, le volume des rejets thermiques dans le Rhin a régressé.

Les étiages survenus dans un passé récent ont contribué à renforcer le réchauffement de l'eau du Rhin.

7 Perspectives⁶

La fréquence de mesure a augmenté grâce à la mise en place de capteurs de mesure automatisés sur de nombreuses stations, ce qui a permis de réaliser des évaluations plus poussées, par ex. pour l'analyse des différences de température entre le jour et la nuit. Dans ce cadre, il est également conseillé pour un rapport consécutif d'évaluer les jours de dépassement des températures de l'eau maximales journalières. Ces dernières peuvent être calculées à partir d'une chronique avec une fréquence de mesure plus élevée que des données journalières.

Les longues chroniques sont particulièrement précieuses car elles autorisent une évaluation dans un contexte climatique (moyennes sur 30 ans) et améliorent par ailleurs la situation pour de futures études. Il est important que les stations existantes restent en service, ceci pour disposer de longues chroniques des quantités d'eau et des températures de l'eau.

On recommande de réaliser une étude de données et de sources bibliographiques plus détaillée qui résume les évaluations de températures de l'eau parfois très anciennes et qui regroupe, dans la mesure du possible, les analyses réalisées dans un passé lointain, afin

⁶ Les recommandations mentionnées dans les 'Perspectives' seront soumises à discussions dans l'atelier « Changement climatique et ses répercussions sur le bassin du Rhin » en mars 2025.

de prolonger les séries de données et de pouvoir faire des déclarations encore plus fondées sur l'évolution des tendances.

Les rejets thermiques industriels et les rejets des centrales ont progressivement diminué⁷. Il apparaît que l'utilisation du fleuve pour des besoins thermiques va nettement changer. À l'avenir, l'exploitation de la géothermie fluviale pourrait gagner en importance et son effet pourrait être analysé dans le cadre d'une prochaine remise à jour du rapport.

Par ailleurs, on recommande d'effectuer une étude plus détaillée sur les rejets thermiques, comparable à celle du BUND en 2009, au regard des nombreux changements passés et actuels concernant ces rejets.

On trouvera des informations complémentaires dans le [rapport CIPR n° 297](#) qui décrit les modifications du régime hydrologique du Rhin, de même que dans le rapport « Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development » (publication comme rapport CIPR n° 302 prévue au printemps/été 2025), qui explique l'évolution des futures températures de l'eau du Rhin.

Remerciements

Nous remercions les services ayant mis à notre disposition les très nombreuses données d'analyse des températures de l'eau. Nos remerciements s'adressent tout particulièrement aux collègues qui ont recensé les données pendant de nombreuses années et continuent de le faire. Les données de séries pluriannuelles sont infiniment importantes pour l'analyse des évolutions de l'eau du Rhin et de son bassin dans le long terme. Sans elles, nous resterions aveugles aux modifications survenant dans le milieu aquatique.

⁷ Le GE STEMP a établi pour son usage interne un inventaire des rejets thermiques 2010-2020 (valeurs autorisées et réelles > 200 MW).

Bibliographie

- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ (BUND) (2009): Wärmelast Rhein.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) (2021): Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland. Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr. 35. Koblenz.
- CAISSIE, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*. 51(8). 1389-1406.
- CIPR (2013) : Rapport n° 204. État des connaissances sur les éventuelles répercussions de modifications du régime hydrologique et de la température de l'eau sur l'écosystème du Rhin et actions envisageables.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0204.pdf
- CIPR (2013) : Rapport n° 209. Présentation de l'évolution des températures de l'eau du Rhin sur la base de températures mesurées et validées de 1978 à 2011.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0209.pdf
- CIPR (2014) : Rapport n° 214. Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development - Extensive version.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/EN/rp_En_0214.pdf
- CIPR (2020) : Rapport n° 263. Rapport sur l'épisode d'étiage de juillet-novembre 2018.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0263.pdf
- CIPR (2024) : Rapport n° 297. Scénarios de débits induits par le changement climatique pour le bassin du Rhin.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0297.pdf
- FORSTNER, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. – Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, S. 1-95. Universität Wien.
- HARDENBICKER P., VIERGUTZ, C., BECKER, A., KIRCHESCH, V., NILSON, E. & H. FISCHER (2017): Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change*, 17, 299-308.
- HARI, R. E., LIVINGSTONE, D. M., SIBER, R., BURKHARDT-HOLM, P. & H. GÜTTINGER (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12(1). 10-26.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2013): Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer.
- LIEFVELD, W. M. & R. POSTMA (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. – Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.
- MANNFELD, M. & H. FISCHER (2020): Wassertemperaturen, Sauerstoff & Chlorophyll-a: Rhein, Elbe. In: NILSON, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. 195 S.
- MUNLV (2009): Anpassung an den Klimawandel – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
<http://www.umwelt.nrw.de/klima/klimawandel/anpassungspolitik/anpassungsstrategie/index.php>.

- SCHWANDT, D., HÜBNER, G., ZAVARSKY, A. & K. FRICKE (2019): Projektbericht. VINNÅ et al. (2023): Swiss-wide future river temperature under climate change "SwissFuRiTe". Basel. No. BGA-CH-78.
- VINNÅ et al. (2023): Swiss-wide future river temperature under climate change "SwissFuRiTe". Basel. No. BGA-CH-78.
- WEBB, B. W. & Y. ZHANG (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological processes*. 11(1). 79-101.
- WETZEL, R. G. (2001): *Limnology: lake and river ecosystems*. Vol. 1. Academic Press.
- WUNDT, W. (1940): Beiträge zur Temperatur fließender Gewässer. *Peterm. Mitt.* Heft 12. 399-406.
- WUNDT, W. (1967): Der Temperaturgang an mitteleuropäischen Flüssen. *Peterm. Mitt.* Heft 2. 81-88.
- ZAVARSKY, A. & L. DÜSTER (2020): Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(10). 5027-5041.

Annexe : Vue générale des jours de dépassement à la hausse et à la baisse

Tableau A.1 : Vue générale du nombre de jours de températures d'eau supérieures aux seuils de 21,5 °C, 23 °C, 25 °C, 28 °C et 30 °C et des jours de températures d'eau inférieures aux seuils de 3 °C et de 10 °C.

On trouvera une description détaillée au chapitre 2.3.2.

La vue générale est disponible sur demande auprès du secrétariat.