



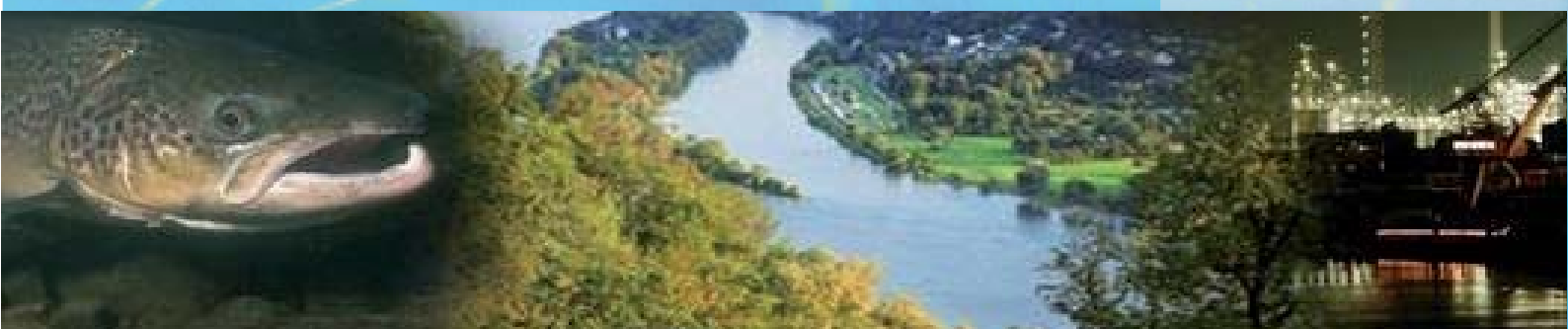
# Présentation de l'évolution des températures de l'eau du Rhin sur la base de températures mesurées et validées de 1978 à 2011

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

*Rapport n° 209*



**Editeur:**

Comission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)  
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, 56068 Coblenze, Allemagne  
Postfach 20 02 53, 56002 Coblenze, Allemagne  
Téléphone +49-(0)261-94252-0, téléfax +49-(0)261-94252-52  
Courrier électronique: sekretariat@iksr.de  
[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

ISBN 978-3-941994-35-5

© IKSr-CIPR-ICBR 2013

## **Présentation de l'évolution des températures de l'eau du Rhin sur la base de températures mesurées et validées de 1978 à 2011**

### **Synthèse**

Les analyses réalisées jusqu'à présent sur l'évolution dans le long terme des températures de l'eau du Rhin montrent que les températures de l'eau sont en nette corrélation avec l'évolution des températures de l'air dans le bassin du Rhin. Les phénomènes climatiques particuliers tels ceux survenus durant l'hiver 1988/89, les étés 2003 et 2006 ou en avril 2007 se reflètent également de manière prononcée dans les températures de l'eau.

L'évaluation des chroniques 1978-2011 met en relief une augmentation des températures de l'ordre de 1,7 °C pour Rekingen (haut Rhin), de 1,3 °C pour Mayence (Rhin supérieur) et de 1,2 °C pour Coblenze (Rhin moyen) sur cette période. Les valeurs dépassent toutes sensiblement 2 °C pendant les mois d'été. Cette tendance n'est cependant pas linéaire sur toute la période (1978-2011), mais résulte pour l'essentiel d'une augmentation dans les années 1987-1989.

Au niveau régional, les rejets thermiques contribuent au rehaussement de la température de l'eau. Environ 60% des grands rejets thermiques autorisés dans le Rhin ont eu lieu jusqu'en 2010 sur un tronçon restreint du Rhin supérieur situé entre Karlsruhe et Worms (rapport CIPR n° 151). Si tous les rejeteurs utilisaient simultanément et intégralement les capacités autorisées, ces rejets, rapportés au débit moyen à hauteur de Worms et après mélange intégral, peuvent contribuer à une augmentation théorique de la température de 2,6 °C maximum. En revanche, la hausse de température moyenne pouvant réellement être mesurée à hauteur de Mayence est de l'ordre de 1,4 °C (rapportée au débit moyen pluriannuel MQ) et baisse ensuite pour atteindre environ 1 °C à Coblenze. La hausse de la température jusqu'à Mayence est principalement due aux rejets thermiques dans l'agglomération de Mannheim/Ludwigshafen et de Worms et, pour une faible partie, au réchauffement naturel sur le linéaire.

Les grands affluents que sont le Neckar, le Main et la Moselle contribuent peu aujourd'hui à abaisser les températures de l'eau du Rhin. Rapportée aux débits moyens et à l'année dans son ensemble, cette réduction varie entre 0,1 °C pour le Neckar et 0,2 °C pour la Moselle. La réduction se manifeste toutefois principalement durant les mois d'hiver et d'automne ; en été, aucune réduction due aux affluents n'est mesurable.

L'analyse de fréquence de dépassement de seuils de température donnés, par ex. 22 °C ou 25 °C, fait apparaître une hausse sensible du nombre de jours par an au cours de la dernière décennie par rapport aux deux décennies précédentes. La rapidité d'évolution des processus biochimiques étant fonction de la température de l'eau, les valeurs extrêmes prolongées ont un impact sur les processus vitaux de tous les organismes aquatiques.

L'arrêt de quatre tranches nucléaires à hauteur du Rhin supérieur en mars 2011 semble avoir réduit de moitié environ les rejets thermiques dans le Rhin entre Karlsruhe et Worms. A la station d'analyse de Mayence, il a été constaté au cours du 2ème semestre 2011 une baisse de la moitié environ de la hausse moyenne de la température (par rapport à Karlsruhe).

## 1. Introduction

De nouvelles températures maximales de l'eau sont mesurées dans le Rhin entre 2003 et 2006, avec des moyennes journalières variant entre 28 °C et 29 °C dans le Rhin moyen et le Rhin inférieur. En regard de l'actualité croissante de la question du changement climatique, les ministres compétents pour la protection du Rhin chargent la CIPR en octobre 2007 d'examiner plus en détail les impacts du changement climatique sur le bassin du Rhin. En conséquence, la CIPR présente en 2009 un rapport sur les connaissances disponibles (analyse bibliographique) [CIPR 2009]. Par ailleurs, la CIPR met au point une étude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin [CIPR 2011]. Le premier rapport souligne également les lacunes de connaissances sur l'évolution actuelle et la prévision des températures de l'eau dans le bassin du Rhin. Le présent rapport comble ces lacunes en décrivant de longues séries chronologiques sur les températures du Rhin.

Le présent rapport se fonde entre autres sur les données de température tirées d'un mandat du comité permanent de la Commission allemande pour la Protection du Rhin (aujourd'hui : Communauté de bassin Rhin) en 2010 visant à mettre au point une banque de données de température de l'eau commune et plausibilisée. Ces données ont été regroupées par un groupe de travail ad hoc.

Le rapport décrit dans un premier temps les analyses disponibles de la température de l'eau dans le bassin du Rhin. Il y est ensuite fait référence à la base de données et en particulier à la qualité des chroniques de température. Suit un aperçu de l'évolution des températures de l'eau sur le profil longitudinal du Rhin et des informations statistiques telles que l'analyse de fréquence de valeurs extrêmes et des analyses tendanciennes pluriannuelles et saisonnières. Enfin, le rapport présente l'impact des affluents et des grands rejeteurs thermiques sur la température de l'eau du Rhin et tout particulièrement sur l'évolution actuelle en 2011 après l'arrêt de quelques tranches nucléaires dans le bassin du Rhin.

Le présent rapport décrit uniquement les évolutions de la température des eaux du Rhin au cours des 30 dernières années. Des températures d'eau élevées (supérieures à 25 °C) ou basses (par ex. celles s'étant maintenues au-dessous de 2°C pendant une période prolongée au cours de l'hiver dernier) peuvent avoir un impact sur les organismes et provoquer un déplacement d'espèces dans les cours d'eau. La référence bibliographique [CIPR 2013] décrit les impacts que les changements de température de l'eau sont susceptibles de provoquer sur la biocénose aquatique.

## 2. Etudes réalisées jusqu'à présent sur la température de l'eau du Rhin

Les premières analyses systématiques de la température de l'eau du Rhin sont disponibles pour le Rhin à hauteur de Kehl. Pour la période 1850-1859, on dispose des moyennes mensuelles sur 10 ans obtenues à partir de trois mesures par jour. La moyenne décennale déterminée est de 10,9 °Re (échelle Réaumur, soit 13,6 °C). D'autres résultats existent pour le Rhin à hauteur de Fribourg et de Spire pour la période 1889-1892 [Forstner 1984] avec une moyenne sur 4 ans de 10,8 et 10,2 °Re (soit 13,5 et 12,8 °C). A l'époque déjà, des hydrogrammes journaliers et annuels sont établis, interprétés et comparés pour déterminer l'influence de la température de l'air sur la température de l'eau.

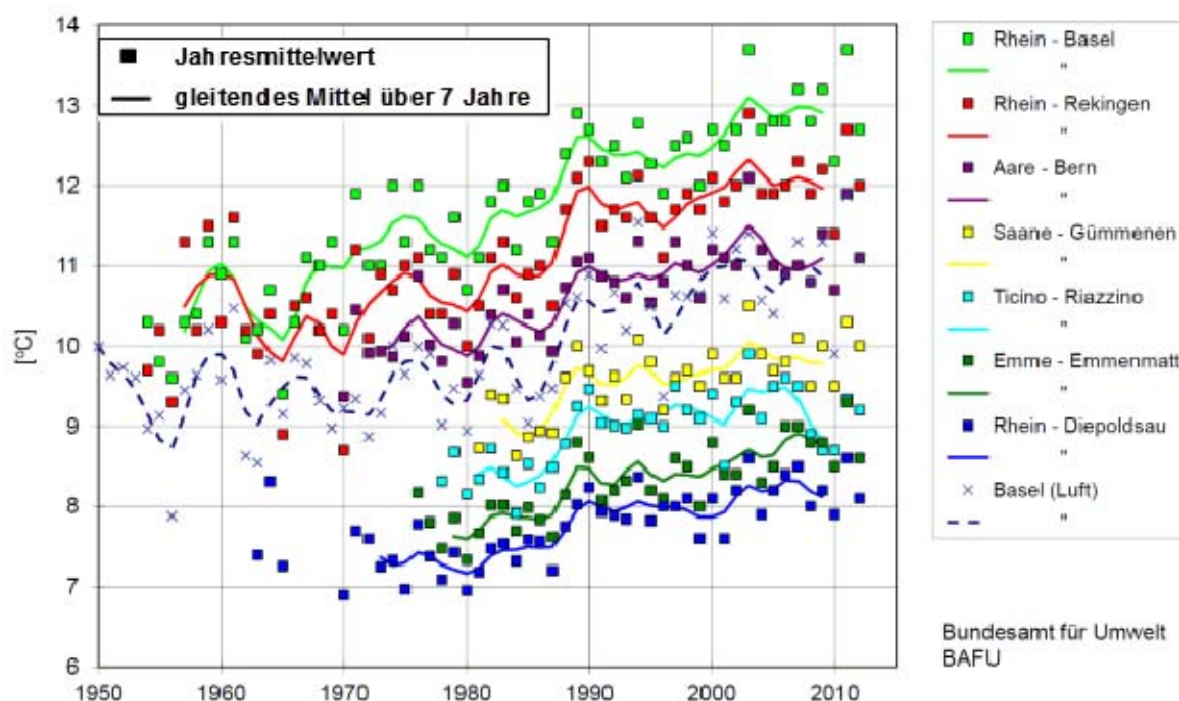
Des rapports synthétiques sur les températures des cours d'eau en Europe centrale sont publiés par Wundt en 1940 et 1967. Sept stations d'analyse du Rhin et 14 sur les affluents sont intégrées dans ce dernier rapport. Les températures moyennes de l'eau sont par ex. de 11,8 °C dans le Rhin à Maxau (chronique 1951/60), de 11,1 °C à Kaub (chronique 1946/60) et de 11,2 °C à Rees (chronique 1951/60). Ces valeurs proviennent de mesures individuelles journalières effectuées à 13h00. L'expérience montrant que la

moyenne journalière est atteinte vers 11h00, il est appliqué à ces valeurs un facteur de correction de  $-0,5^{\circ}$ . Par ailleurs, ce rapport analyse plus en détail la différence entre la température de l'eau et celle de l'air ainsi que les amplitudes des moyennes mensuelles. [Wundt 1940, 1967]

Après la Seconde Guerre Mondiale, les données relatives à la température de l'eau sont de plus en plus souvent recensées au droit des échelles et inscrites dans les annuaires hydrologiques. Dans le programme d'analyse international 'Rhin' de la CIPR, qui débute en 1953, les températures de l'eau sont recensées dans un premier temps toutes les deux semaines, puis présentées sous forme de moyenne sur 14 jours obtenue à partir d'analyses en continu (tableaux numériques annuels des analyses physico-chimiques de la CIPR).

Webb [Webb 1996] présente des analyses fondamentales sur l'affectation de la température de l'eau aux processus hydrologiques et, comme résultat, une hausse des températures des rivières en Europe d'environ  $1^{\circ}\text{C}$  au 20ème siècle. L'évaluation de l'impact du changement climatique est fortement compliquée par les rejets thermiques, l'urbanisation (stations d'épuration) et l'aménagement de barrages [Webb 2008].

A côté des publications traitant des valeurs maximales de température de l'eau au cours des années 2003 et 2006 déjà mentionnées, on trouve jusqu'à aujourd'hui de nombreuses analyses de l'évolution de la température portant en partie sur le bassin du Rhin. Il est ainsi constaté dans un rapport suisse une hausse de la température de l'eau de  $2^{\circ}\text{C}$  dans le Rhin à hauteur de Bâle sur les 50 dernières années [OFPEP 2004]. La fig. 2-1 présente en outre l'évolution des moyennes annuelles jusqu'en 2012 dans plusieurs stations d'analyse du bassin suisse du Rhin.



**Fig. 2-1** : Modification de la température de l'eau (carrés = moyennes annuelles ; lignes = moyenne mobile sur 7 ans) dans des stations d'analyse sélectionnées de l'OFEG de 1954 à 2012. L'évolution de la température de l'air à Bâle y est également présentée (lignes en pointillés). Source : OFEV, division Hydrologie, 05.03.2013

On relève dans le Rhin inférieur à hauteur de Clèves-Bimmen une hausse de la température moyenne de l'eau du Rhin supérieure à  $1^{\circ}\text{C}$  depuis 1977 et une augmentation du nombre d'années affichant des températures maximales de l'eau supérieures à  $25^{\circ}\text{C}$ . Il est très probable que la hausse de température soit due au

changement climatique, le nombre de rejets thermiques autorisés dans le Rhin ayant baissé dans le même temps [MUNLV 2009].

Sur la base des données de la station d'analyse de Lobith, on suppose que la température de l'eau du Rhin à Lobith a augmenté de plus de 3 °C sur la période 1908-2000 [Liefveld & Postma 2007].

D'autres études peuvent également être mentionnées :

- A la demande de Rijkswaterstaat Waterdienst aux Pays-Bas, Deltares a élaboré récemment une étude sur l'évolution de la température de l'eau dans le bassin néerlandais de la Meuse sous l'aspect des impacts anthropiques et du changement climatique [Deltares 2012]. Ce bassin étant très proche de celui du Rhin inférieur, il est possible de transposer en partie les résultats obtenus au bassin du Rhin inférieur.
- Une étude de Haag expose les impacts éventuels du changement climatique sur les températures des rivières et compile les résultats scientifiques obtenus jusqu'à présent sur l'impact du changement climatique sur les températures de l'eau [Haag 2009]. Les analyses sur l'évolution historique et les prévisions sur l'évolution future y sont présentées.
- Une étude du BUND sur la charge thermique du Rhin paraît également en 2009 [Lange 2009]. Elle englobe des recherches détaillées sur les rejets thermiques et sur les projets de planification d'usines électriques sur le Rhin. Cette étude doit permettre de s'informer de manière compétente sur les répercussions attendues des usines planifiées dans le contexte des plans de gestion établis au titre de la directive cadre sur l'eau et compte tenu du changement climatique.

Les analyses les plus détaillées sur les chroniques de température de l'eau dans le long terme ont été réalisées ces dernières années par Greis et Strauch [Greis 2007], [Strauch 2011], [Greis et al 2011]. De grandes parties du bassin du Rhin sont également prises en compte dans ces études. Pour quelques stations d'analyse, les données de base sont identiques à celles sur lesquelles se fonde le présent rapport. Des tendances significatives des températures de l'eau y sont présentées pour différents fleuves sélectionnés en Allemagne et il est discuté de l'impact des évolutions du régime hydrologique [Rothstein et al 2008].

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

Dans la première moitié du 20ème siècle, seules les mesures individuelles journalières (le plus souvent la valeur observée à 12h00) sont inscrites dans les annuaires hydrologiques pour le Rhin.

La mesure en continu de la température de l'eau à l'aide d'une sonde (par ex. capteurs Pt100) et l'enregistrement du signal sur des bandes de mesure démarrent il y a environ 50 ans. Depuis une vingtaine d'années, les signaux sont directement recensés et enregistrés sous forme numérique. Pour quelques stations, les bandes de mesure ont été numérisées a posteriori et après contrôle de plausibilité, de sorte que l'on dispose de moyennes journalières de la température de l'eau sur une période de 30 à 35 ans.

Les paragraphes ci-dessous traitent de la technique de mesure de la température, de la manière de gérer les lacunes et de la période couverte par les données disponibles. Dans le présent rapport, les différences de température sont fondamentalement indiquées en °C et non pas, comme ceci est normalement le cas dans les sources bibliographiques, en kelvins.

### 3.1 Technique de mesure

La sonde de température, l'appareil de mesure, la transmission des données et le contrôle font partie de la technique de mesure. La technique de mesure se réfère également à la disposition des appareils d'analyse dans la rivière et/ou dans la station d'analyse.

Les stations d'analyse utilisent depuis de nombreuses années les sondes Pt100 ou NTC. Leur précision (pour des plages de température usuelles) varie entre 0,1 et 0,25 °C. Il est indiqué pour l'ensemble de la chaîne de mesure (appareil de mesure et transmission des données) une précision de 0,1 °C. Il est déterminant de veiller à ce que l'entretien et le recalibrage soient réalisés régulièrement (par ex. tous les mois). La précision de la mesure de température varie ainsi entre 0,1 °C et 0,3 °C. Des écarts de 0,5 °C maximum peuvent apparaître lorsque les intervalles de calibrage ne sont pas respectés.

Si le point de mesure est placé dans la station d'analyse, il faut connaître l'influence de la tuyauterie pour garantir la qualité des données.

### 3.2 Gestion des lacunes de données et homogénéisation des chroniques

Pour réaliser des analyses tendanciennes dans le long terme, il est indispensable de disposer de chroniques équidistantes sans lacunes de données (moyennes journalières). Ceci peut se faire par interpolation linéaire (en cas de petites lacunes sur 1-2 jours) ou, mieux encore, par comparaison graphique avec les stations voisines. Les données manquantes peuvent également être calculées approximativement à l'aide d'un modèle déjà validé.

S'il manque par exemple 3% (11 valeurs) des moyennes journalières dans l'année dans deux stations voisines et si les valeurs font défaut en été dans l'une des stations et en hiver dans l'autre, les moyennes journalières peuvent différer de 0,5 à 0,7 °C, bien que la moyenne annuelle soit la même pour les deux stations. L'écart peut s'élever à 0,3-0,4 °C par station.

On entend par homogénéisation des chroniques le fait de contrôler les erreurs systématiques, par ex. en modifiant la technique de mesure, en déplaçant le point de mesure ou en modifiant les conditions environnantes. Ces erreurs peuvent se traduire par un décalage ou une tendance auxquels se superpose cependant la variabilité naturelle et la tendance observée pour la température de l'eau. La méthode statistique, notamment celle du test d'homogénéité relative à l'aide de chroniques de référence obtenues en faisant la moyenne de chroniques comparatives voisines, est décrite dans Strauch [Strauch 2011] et a été appliquée à des séries de mesure sur le Rhin, le Neckar et le Main. Les présents travaux ont uniquement consisté à procéder à des contrôles visuels et des analyses de plausibilité entre les chroniques de stations voisines.

### 3.3 Période couverte par la banque de données

Aux fins de vérification des tendances de température, les exploitants des stations d'analyse ont fourni des séries de mesure pluriannuelles sur la base de moyennes journalières (et parfois aussi sur base horaire). Le présent rapport se fonde sur les séries de mesure suivantes :

**Tab. 3.3-1** : Relevé des chroniques de TE (moyenne journalière obtenue à partir des mesures en continu)

Station d'analyse TE	Rivière (PK)	Chronique TE	Source
Rekingen *	Rhin, PK 90,7	1997-2011	OFEV
Weil a. Rh.*	Rhin, PK 174,0	1997-2011	OFEV
Karlsruhe*	Rhin, PK 359,2	1988-2011	LUBW
BASF WW Sud	Rhin, PK 426	1991-2011	BASF
Mannheim	Neckar, PK 3,0	2000-2010	LUBW
Worms	Rhin, PK 443,3	1996-2009	LUWG
Bischofsheim	Main, PK 4,0	2000-2010	HLUG
Mayence	Rhin, PK 498,5	1980-2011	LUWG
Coblence/Rh.*	Rhin, PK 590,3	1978-2011	BfG
Coblence/Moselle*	Moselle, PK 2,0	1978-2011	BfG
Bad Honnef	Rhin, PK 640,0	2004-2010	LANUV
Düsseld.-Flehe	Rhin, PK 732,2	2004-2010	LANUV
Clèves-Bimmen*	Rhin, PK 865,0	1995-2009	LANUV
Lobith*	Rhin, PK 862,3	2000-2010	RWS

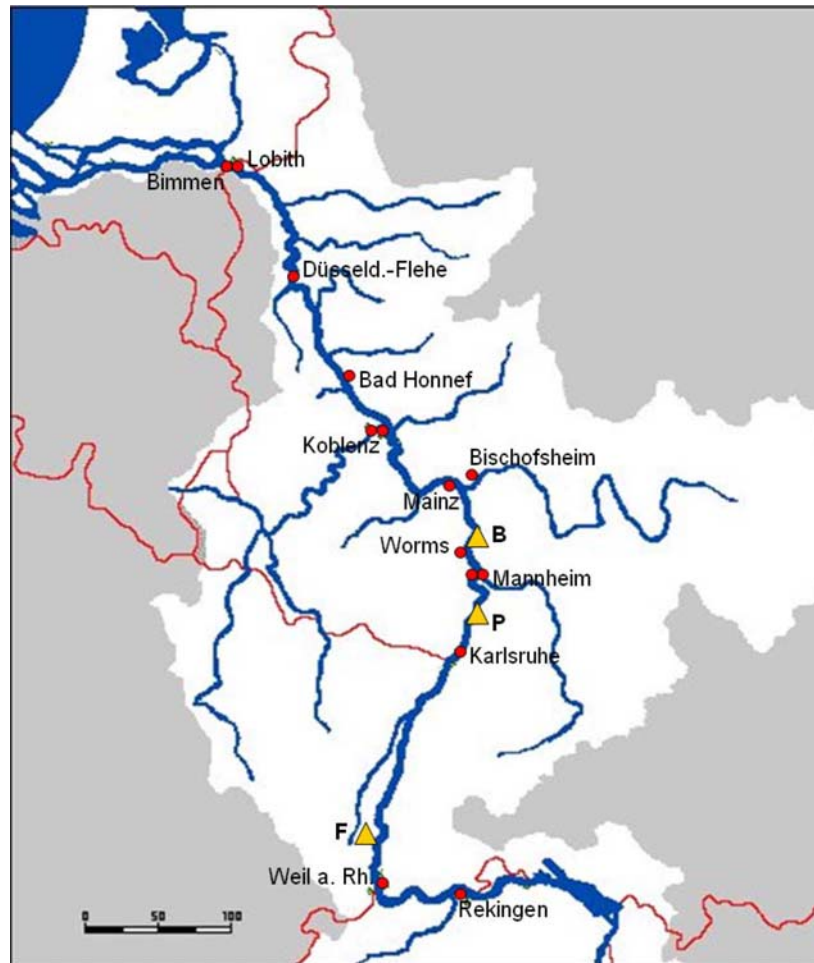
\* Stations internationales d'analyse du programme de la CIPR

Pour plausibiliser les données et combler les lacunes, nous avons également utilisé les données TE mesurées en continu dans les stations liminimétriques de Coblence, Cologne et Rees ainsi que les données des stations d'analyse de Fankel/Moselle et de Lahnstein/Lahn.

Par ailleurs, l'entreprise BASF a fourni les températures à l'entrée de l'usine d'eau « Wasserwerk Süd » (PK 426 du Rhin) sur base horaire pour la période 2000-2011, sous forme de moyennes journalières sur la période 1991-1999 et de moyennes mensuelles entre 1952 et 1990. Ces jeux de données se prêtent à l'analyse des tendances dans le long terme.

La figure 3.3-1 ci-dessous présente la localisation des stations d'analyse listées dans le tableau 3.3-1 le long du Rhin.





3.3-1 : Localisation des stations d'analyse disposant de données de température de l'eau (points rouges) comme base de données du rapport. (sites nucléaires (triangles jaunes) : F = Fessenheim, P = Philippsburg, B = Biblis)

#### 4. Analyses de représentativité des données de températures des stations d'analyse

Afin de pouvoir évaluer avec la fiabilité requise l'évolution de la température sur le linéaire du Rhin, nous devons garantir que les températures de l'eau déterminées dans les stations d'analyse soient également représentatives de la masse d'eau sur le profil transversal du cours d'eau. Pour cette raison, les analyses se font en plusieurs points du profil transversal (au droit des piliers du pont) dans les stations d'analyse de Weil a.Rhein.

Pour la station d'analyse de Worms, il s'est avéré que la différence de température entre la rive gauche et la rive droite était de l'ordre de 1-2 °C sur environ un tiers de l'année, ce qui s'explique par la présence de grands rejeteurs thermiques en amont de la station et du débouché du Neckar.

La représentativité des données est garantie par des mesures comparatives sur le profil transversal ou par la comparaison des résultats avec les stations d'analyse voisines.

Les mesures du profil transversal réalisées durant de nombreuses années par le bateau-laboratoire BURGUND sur neuf profils entre le PK 355 du Rhin (Neuburg) et le PK 638 (Oberwinter) ont permis d'examiner si les données de température étaient représentatives des stations sélectionnées.

Les résultats sont présentés ci-dessous à l'exemple de la station d'analyse de Karlsruhe (PK 359,2, rive droite). Ici, les résultats des 4 analyses du profil transversal réalisées par an sur la période 2003-2008 par le bateau BURGUND au PK 355,4 du Rhin sont comparés aux moyennes horaires mesurées dans la station à cette date (un trajet sur le profil transversal dure environ 8 à 12 minutes). Les résultats moyens obtenus à partir de 21 analyses, tels qu'ils figurent dans le tab. 4-1, montrent :

- a) que la répartition de la température dans ce tronçon du Rhin est très homogène sur le profil transversal et que la station d'analyse de Karlsruhe fournit donc des données représentatives ;
- b) que les écarts entre les deux analyses effectuées indépendamment se situent dans l'ordre de grandeur de la précision de mesure, c'est-à-dire débouchent sur la même valeur (correcte).

**Tab. 4-1** : TE du Rhin en cinq points d'analyse ; analyse effectuée par le bateau BURGUND sur la rive gauche, au milieu du fleuve et sur la rive droite, et comparaison avec les moyennes horaires déterminées dans la station d'analyse (par ex. PK 359,2 rive droite)

N correspond au nombre de profils transversaux réalisés

TE en °C	N	rive gauche	milieu	rive droite
Oberwinter, PK 638				
Moyenne 2003-2007	15	13,66	13,71	13,74
Station de Bad Honnef, PK 640				13,67
Lahnstein, PK 585				
Moyenne 2004-2008	20	14,18	14,21	14,20
Station de Coblenz/Rhin, PK 590,3		14,24		
Mayence-Weisenau, PK 496				
Moyenne 2004-2008	19	14,62	14,76	14,82
Station de Mayence, PK 498,5		14,68		
Ludwigshafen, PK 424,6				
Moyenne 2004-2008	20	13,33	13,55	13,96
BASF WW Süd, PK 426			13,58	
Neuburg, PK 355,4				
Moyenne 2003-2008	21	13,73	13,69	13,68
Station de Karlsruhe, PK 359,2				13,80

Au droit des quatre autres points d'analyse selon le tableau 4.1, les résultats obtenus par le bateau concordent très bien avec ceux obtenus dans la station d'analyse sur la rive respective.

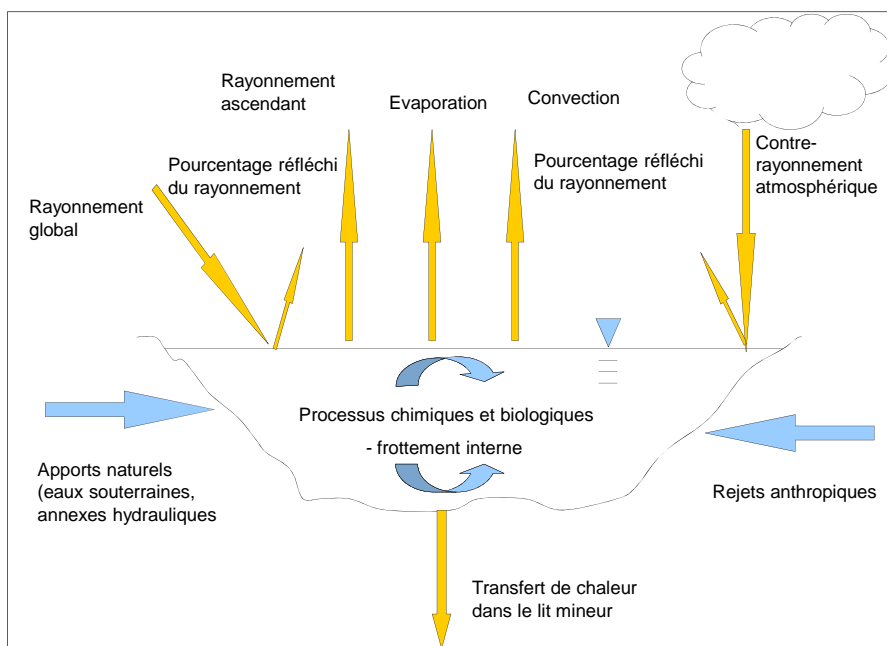
On dispose donc également de températures de l'eau homogènes sur le profil transversal pour les stations d'analyse de Bad Honnef et Coblenz. L'analyse du profil transversal à hauteur de Mayence a été faite juste en amont du débouché du Main. La station d'analyse de Mayence est à 2,5 km en aval du débouché du Main et recense la température de l'eau en quatre points sur le profil transversal au droit des piliers du pont. Pour le présent rapport, seules sont utilisées les moyennes journalières des points d'analyse 1 et 2 plus proches de la rive gauche, car elles seules reproduisent la température de l'eau du Rhin sans l'impact du Main (voir chap. 5.6). Il ressort des données que les points d'analyse sur le profil transversal à hauteur de Ludwigshafen sont impactées sur la rive droite par des rejets thermiques de centrales (voir également chap. 5.7).

## 5. Analyse des chroniques de température de l'eau

### 5.1 Paramètres de la température des cours d'eau

Les éléments physiques fondamentaux du régime thermique sont décrits en détail dans [Haag 2009] et [LAWA 2012]. Nous nous concentrons ici brièvement sur les facteurs pertinents à l'aide de la fig. 5.1-1.

La température naturelle de l'eau est déterminée en grande partie par des facteurs météorologiques tels que l'échange thermique entre la rivière et l'environnement, et par le débit.



**Fig. 5.1-1** : Schéma des principaux processus d'échange thermique dans les rivières (selon LAWA 2012)

Le bilan du rayonnement solaire (ondes courtes) résulte du rayonnement global entrant (rayonnement solaire direct et diffus) et du pourcentage réfléchi à la surface de l'eau (albédo). Le bilan du rayonnement thermique (ondes longues) résulte du rayonnement thermique de l'atmosphère et du rayonnement de la rivière du fait de sa température propre.

L'évaporation est le principal élément du bilan thermique pour le refroidissement du cours d'eau. Si la pression de vapeur à la surface de l'eau est inférieure à celle de la couche atmosphérique se trouvant au-dessus, il y a condensation.

On entend par convection le transfert direct de chaleur entre la surface du cours d'eau et l'air. L'ampleur dépend du gradient de température entre la surface de l'eau et l'air environnant. L'évaporation et la convection sont fortement influencées par la vitesse du vent.

Au niveau des sources, les températures de l'eau correspondent à celles de l'eau souterraine. La température moyenne annuelle de l'eau et les amplitudes annuelles et journalières de la température augmentent généralement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source [LAWA 2012, p. 47]. Le haut Rhin est particulier en cela que son débit est d'origine lacustre. Pendant les hivers froids, les eaux sortant du lac de

Constance sont légèrement inférieures à 4 °C alors que la température de surface des eaux du lac de Constance est déterminante pendant les mois chauds de l'été.

## 5.2 Evolution de la température sur le profil longitudinal du Rhin

La fig. 5.2-1 donne un premier aperçu des moyennes annuelles des températures de l'eau du Rhin entre 2000 et 2010 depuis la station CIPR de Rekingen (en amont du débouché de l'Aar sur le haut Rhin) jusqu'à celle de Lobith (à la frontière germano-néerlandaise). Rapportée à cette période et au tronçon indiqué, la température de l'eau du Rhin augmente en moyenne de 2 °C entre ces deux stations ; la hausse varie selon les années entre 1,5 °C (en 2003) et 2,3 °C (en 2008). Entre les stations de Rekingen et Karlsruhe ainsi qu'entre Karlsruhe et Mayence, la température augmente en moyenne d'environ 1,3 °C (voire de 1,5 °C entre Karlsruhe et Mayence en moyenne des 20 dernières années). Cette différence de température peut s'expliquer en partie par les grands rejets d'eau de refroidissement sur le tronçon allant de Karlsruhe à Worms et par le réchauffement naturel sur ce tronçon (voir ci-dessous). Selon l'inventaire des rejets thermiques de la CIPR, environ 60% des rejets thermiques dans le Rhin ont lieu sur ce tronçon [CIPR 2006].

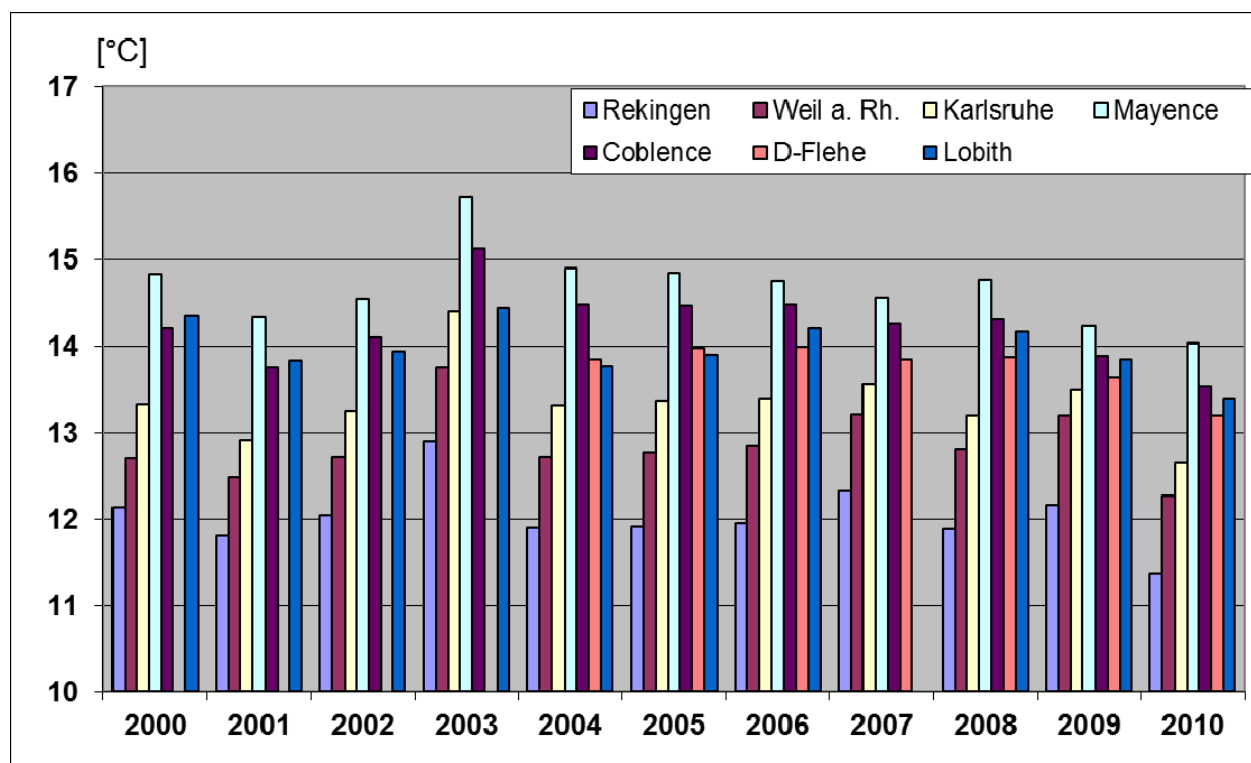
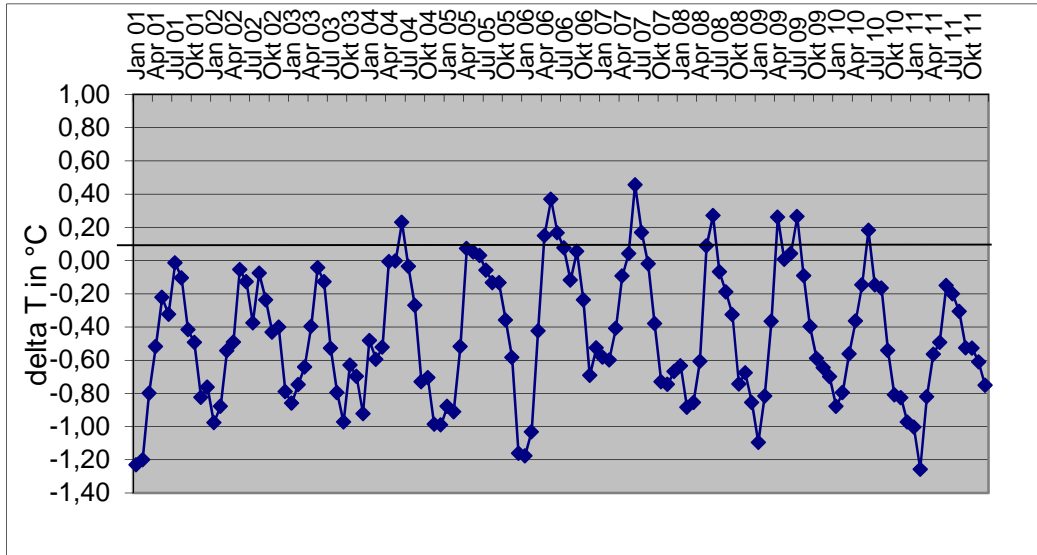


Fig. 5.2-1 : Moyennes annuelles de la température de l'eau du Rhin dans les stations d'analyse le long du Rhin

A hauteur de Coblenz, la valeur baisse en moyenne de 0,4 °C suite aux processus de refroidissement et d'adaptation à la température de l'air. Plus en aval et jusqu'à Bad Honnef, la température de l'eau baisse encore d'environ 0,3 à 0,4 °C. Le refroidissement est également dû à l'apport de la Moselle et d'autres petites rivières des hautes terres centrales. Ces affluents affichent par ex. en hiver une température de l'eau inférieure de 4 °C maximum à celle du Rhin. Les températures mesurées à Bad Honnef, Cologne, Düsseldorf-Flehe et Lobith sont presque toutes au même niveau, ce qui fait que les apports thermiques et les processus de refroidissement s'équilibrent sur ce tronçon du Rhin.

La fig. 5.2-2 présente en détail l'évolution de la température avec la différence de température sous forme de moyennes mensuelles entre Mayence et Coblenz sur la

période 2011-2011. La fig. 5.2-2 présente en détail l'évolution de la température avec la différence de température sous forme de moyennes mensuelles entre Mayence et Coblenz sur la période 2011-2011. Dans le courant d'une année, le refroidissement de l'eau du Rhin entre Mayence et Coblenz est très variable ; on enregistre même un réchauffement sur ce tronçon pendant quelques mois au printemps et en été. On y voit également l'influence dominante des éléments du rayonnement dans le bilan thermique.

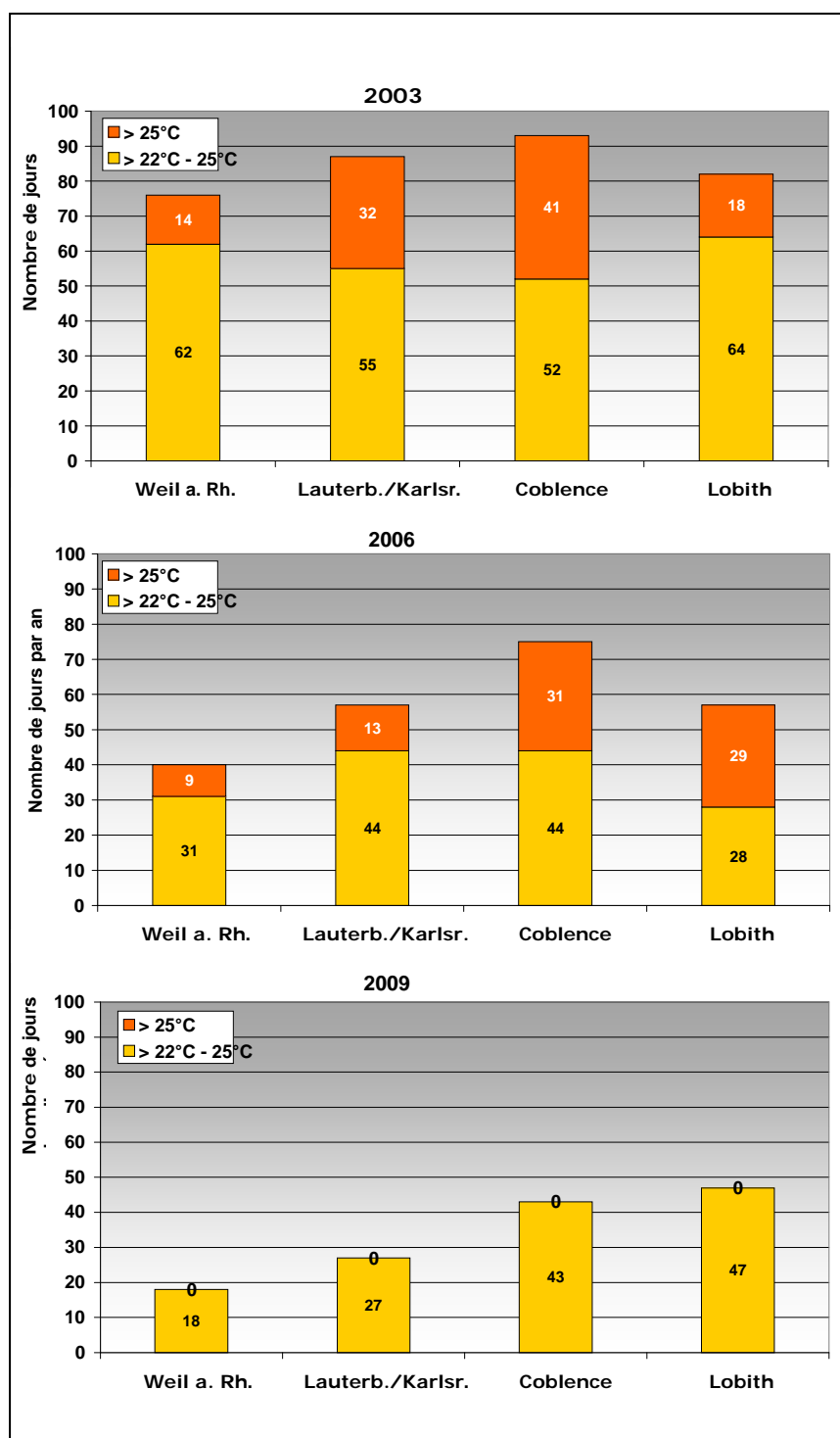


**Fig. 5.2-2 :** Evolution de la différence de température sous forme de moyennes mensuelles entre Mayence et Coblenz sur la période 2001-2011 (delta T : T(KO) - T(MZ)).

Dans le tronçon du Rhin entre Bâle et Karlsruhe, le Rhin traverse une zone affichant les températures moyennes de l'air les plus élevées de son bassin. Les nombreuses retenues se trouvant sur ce tronçon du Rhin accélèrent plus encore l'échange de température avec les couches atmosphériques. De ce fait, la hausse de température jusqu'à Karlsruhe n'est due que dans une très faible mesure aux rejets thermiques directs et s'explique probablement en grande partie par des processus naturels, renforcés à leur tour par des impacts anthropiques (voir aussi chap. 5.7).

### 5.3 Analyse de fréquence (valeurs extrêmes)

Une première évaluation fiable des chroniques de température se fait à l'aide du processus de comptage (« dénombrement »). Ce processus permet de déterminer sur une période de plusieurs années le nombre de jours au cours desquels la valeur passe au-dessus ou au-dessous d'une valeur extrême ou d'une valeur seuil donnée. A l'exemple de la fig. 5.3-1, on relève lors des deux années 2003 et 2005 une hausse sensible du nombre de jours affichant des températures de l'eau supérieures à 22 °C et également supérieures à 25 °C le long du Rhin jusqu'à Coblenz. En revanche, aucune température moyenne journalière ne dépasse les 25 °C sur l'ensemble du bassin du Rhin en 2009.



**Fig. 5.3-1** : Nombre de jours au cours desquels l'eau du Rhin dépasse les 22 °C en 2003, 2006 et 2009.

Alors que des températures de l'eau supérieures à 22 °C étaient fréquentes au cours des dernières décennies (fig. 5.3-2), des températures supérieures à 25 °C sont observées sur 7 des 12 dernières années (rapporté à Coblenze - fig. 5.3-3), mais seulement sur une année pendant la période 1978-1989. Sur les périodes 1978-1987 et 1978-1996, il n'est

pas possible de donner d'informations pour la station d'analyse de Karlsruhe et celle de Weil am Rhein par manque de données (voir fig. 5.3-2 et 5.3-3)

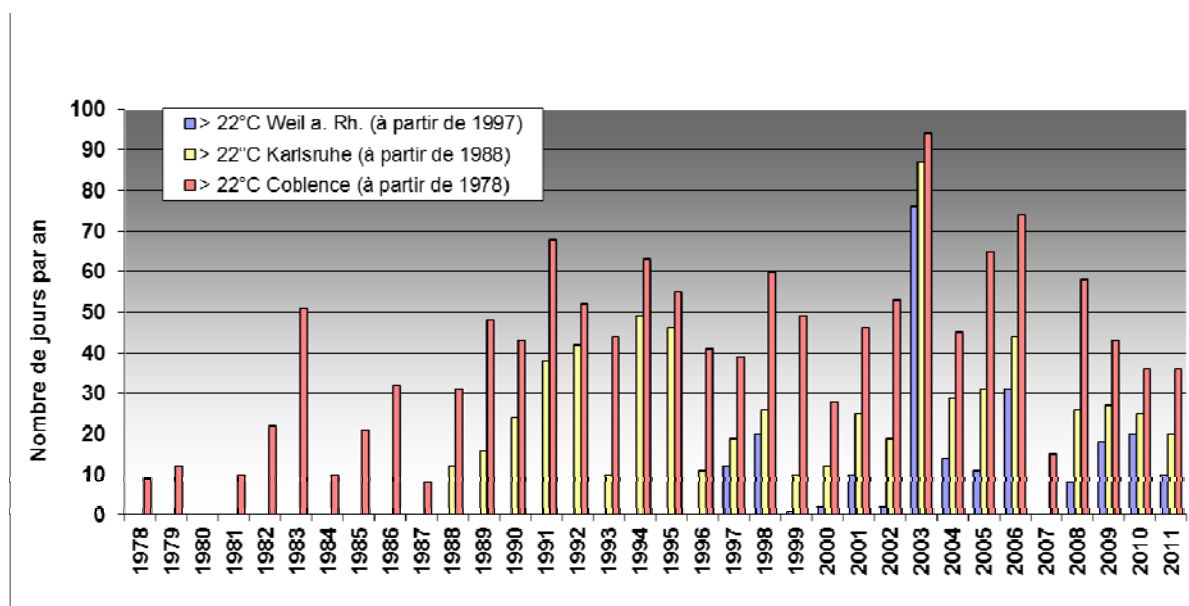


Fig. 5.3-2 : Temps de dépassement de la TE Rhin de 22°C au cours des trois dernières décennies

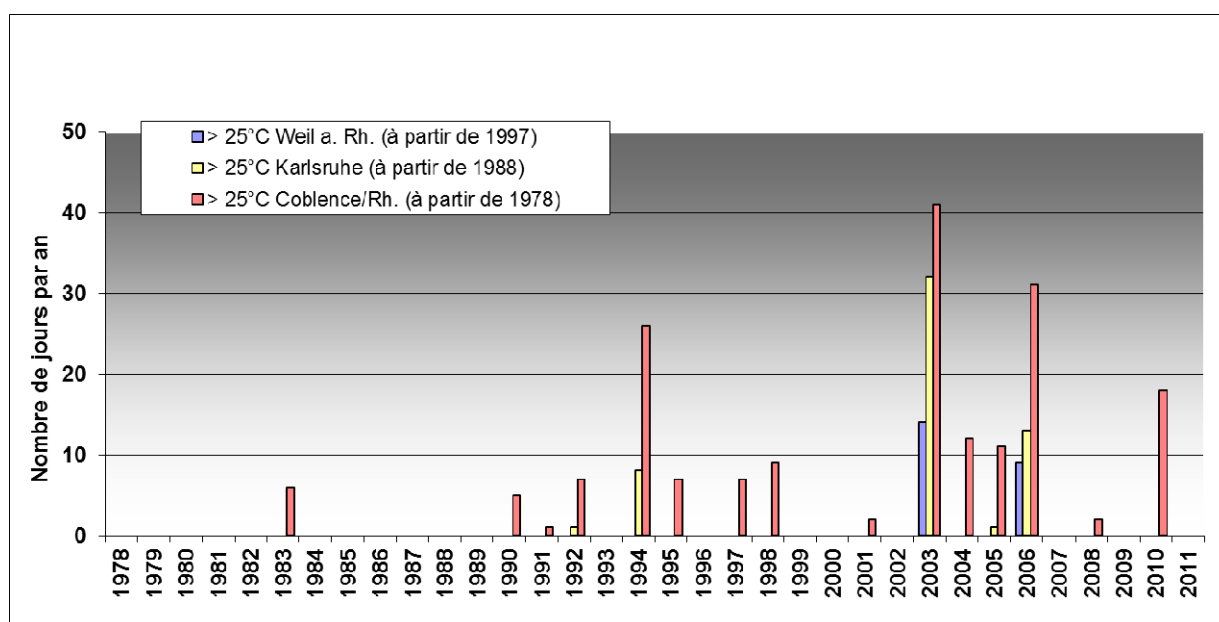


Fig. 5.3-3 : Temps de dépassement de la TE Rhin de 25 °C au cours des trois dernières décennies

Des températures d'eau élevées (parfois supérieures à 20 °C) ont également été mesurées à Coblenz en avril 2007 pendant environ 3 semaines. Ceci représente un dépassement de 5 °C de la moyenne pluriannuelle de cette période, ce dépassement étant comparable aux valeurs extrêmes correspondantes constatées au cours des étés 2003 et 2006.

La figure 5.3-4 montre pour Coblenz et sur la période comprise entre 1978 et 2011 le nombre de jours où la température est inférieure à certains seuils pendant les mois d'hiver. On relève en particulier une température d'eau inférieure à 2 °C pendant 11 jours au cours de l'hiver 2011/2012. Cette phase est la plus longue constatée au cours

des 34 années observées. La baisse des apports thermiques en 2011 (voir chapitre 6) entre Karlsruhe et Worms pourrait avoir contribué à influencer le résultat. Pour clarifier ce point, les données 2012 de température d'eau d'autres stations doivent encore être intégrées à l'évaluation.

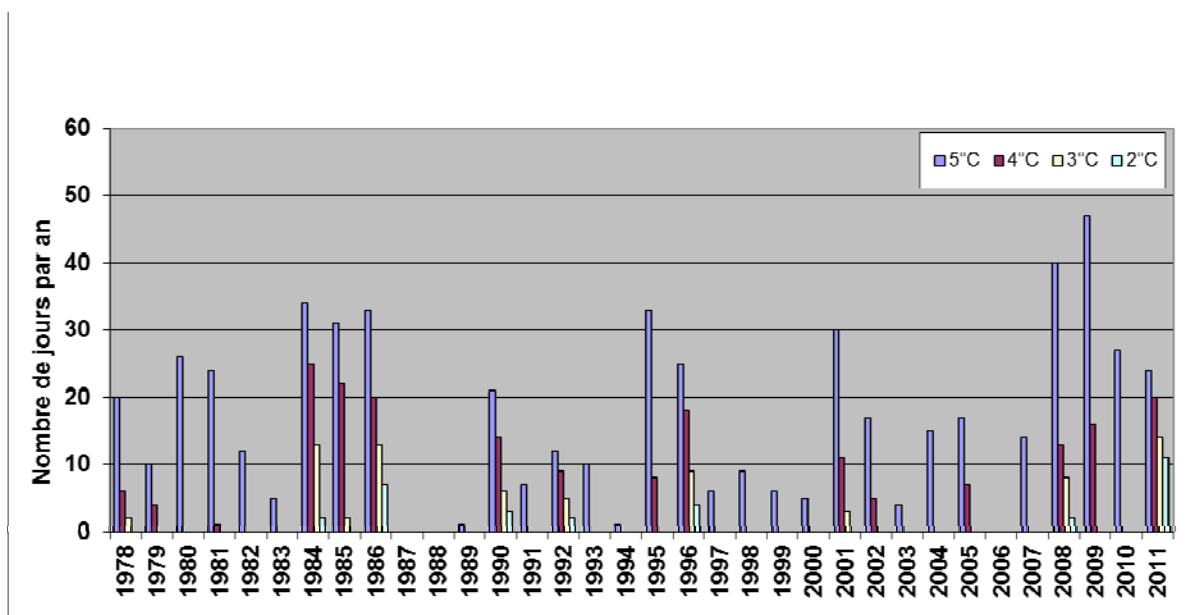


Fig. 5.3-4 : nombre de jours où la TE Rhin à Coblenz est inférieure à x °C de 1978 à 2011

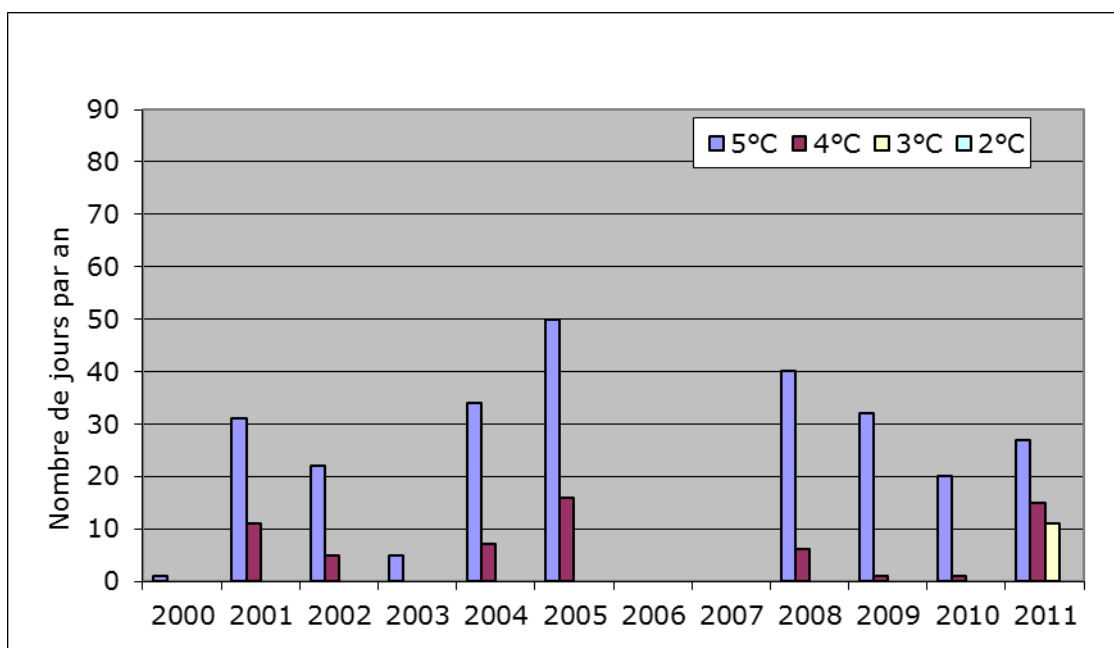
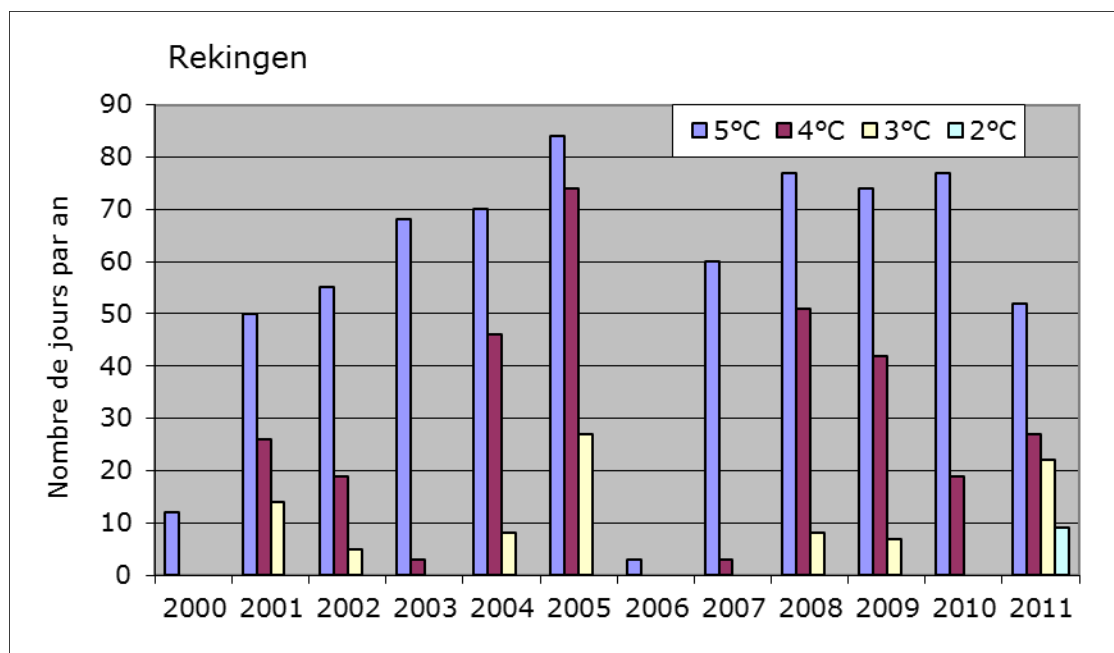


Fig. 5.3-5 : Nombre de jours où la température de l'eau à Weil a. Rhein est inférieure à x °C de 2000 à 2011





**Fig. 5.3-6** : Nombre de jours où la température de l'eau à Rekingen est inférieure à x °C de 2000 à 2011

En comparant les évaluations des stations de Weil a. Rhein et de Rekingen, on relève notamment les hivers doux 2006/2007 et 2000/2001, au cours desquels la TE Rhin est pratiquement toujours restée supérieure à 5 °C. Cependant, des températures inférieures à 2 °C ont également été atteintes au cours de l'hiver 2011/2012.

#### 5.4 Analyse de tendances

On a analysé des chroniques de TE sélectionnées pour tenter de reconnaître des tendances et de déterminer l'évolution de la température de l'eau du Rhin au cours des décennies passées. Le test de tendance de Mann-Kendall a été appliqué. Ce test ne pose pas de répartition normale ou de linéarité comme condition préalable. Les calculs ont porté sur l'orientation de la tendance, sur son importance et sur son ordre de grandeur. Le tableau 5.4-1 présente les tendances au droit de stations d'analyse disposant de longues chroniques, les chiffres se référant aux moyennes annuelles et aux saisons.

**Tab. 5.4-1** : évaluation de tendance réalisée à l'aide du test de tendance Mann-Kendall pour des chroniques sélectionnées

Station d'analyse	Chronique	Tendance significative (%)	Augmentation/baisse de TE en °C	Valeurs moyennes (temps de référence)
Rekingen	1978-2011	99,9	1,7	Moyenne annuelle
BASF WW Sud	1978-2011	99,9	2,2	Moyenne annuelle
Mayence	1980-2011	99	1,3	Moyenne annuelle
Coblence/Rh.	1978-2011	99,9	1,2	Moyenne annuelle
Rekingen	1989-2011	-	0,5	Moyenne annuelle
BASF WW Sud	1989-2011	95	0,9	Moyenne annuelle
Mayence	1989-2011	-	-0,2	Moyenne annuelle

Station d'analyse	Chronique	Tendance significative (%)	Augmentation/baisse de TE en °C	Valeurs moyennes (temps de référence)
Coblence/Rh.	1989-2011	-	0,01	Moyenne annuelle
Coblence/Rh.	1978-2011	99	1,7	Printemps
Coblence/Rh.	1978-2011	99,9	2,3	Eté
Coblence/Rh.	1978-2011	-	0,6	Automne
Coblence/Rh.	1978-2011	-	-0,3	Hiver
BASF WW Sud	1978-2011	99,9	2,7	Printemps
BASF WW Sud	1978-2011	99,9	2,6	Eté
BASF WW Sud	1978-2011	95	1,1	Automne
BASF WW Sud	1978-2011	95	1,4	Hiver
Coblence/Rh.	1989-2011	-	-0,2	Printemps
Coblence/Rh.	1989-2011	-	-0,2	Eté
Coblence/Rh.	1989-2011	-	0,5	Automne
Coblence/Rh.	1989-2011	-	-0,9	Hiver
BASF WW Sud	1989-2011	-	0,6	Printemps
BASF WW Sud	1989-2011	-	0,6	Eté
BASF WW Sud	1989-2011	-	0,4	Automne
BASF WW Sud	1989-2011	-	0,1	Hiver

L'évaluation des chroniques 1978-2011 met en relief une augmentation des températures de l'ordre de 1,7 °C pour Rekingen (haut Rhin), de 1,3 °C pour Mayence (Rhin supérieur) et de 1,2 °C pour Coblence (Rhin moyen) sur cette période. Les valeurs dépassent sensiblement 2 °C pendant les mois d'été. La tendance à la hausse de ces températures n'est cependant pas linéaire sur toute la période (1978-2011) mais résulte pour l'essentiel d'une augmentation survenue dans les années 1987-1989. Sur la base des chroniques 1989-2011, on constate que la tendance à une augmentation des températures est plus nette alors qu'elle est très faible voire nulle de 1989 à 2011 ou sur des chroniques plus courtes.

Même sur la base de la chronique des moyennes journalières, disponible pour Rekingen sur le haut Rhin (1997-2010), aucune tendance significative n'a pu être déterminée ni sur les moyennes annuelles ni sur les saisons (tableau 5.4-2). On relève même une baisse de température sur les mois d'hiver, là encore toutefois sans qu'il s'agisse d'une tendance significative.

**Tab. 5.4-2** : Evaluation de tendance réalisée à l'aide du test de tendance Mann-Kendall pour des chroniques sélectionnées Station d'analyse

Station d'analyse	Chronique	Tendance significative (%)	Augmentation/baisse de TE en °C	Valeurs moyennes (temps de référence)
Rekingen	1997-2010	-	0.30,3	Moyenne annuelle
BASF WW Sud	1997-2010	-	0,4	Moyenne annuelle
Coblence/Rh.	1997-2010	-	-0,3	Moyenne annuelle

Station d'analyse	Chronique	Tendance significative (%)	Augmentation/ baisse de TE en °C	Valeurs moyennes (temps de référence)
Rekingen	1997-2010	-	-0,4	Printemps
Rekingen	1997-2010	-	0,7	Eté
Rekingen	1997-2010	-	0,6	Automne
Rekingen	1997-2010	-	-0,9	Hiver
BASF WW Sud	1997-2010	-	0,00	Printemps
BASF WW Sud	1997-2010	-	1,1	Eté
BASF WW Sud	1997-2010	-	0,00	Automne
BASF WW Sud	1997-2010	-	-0,3	Hiver
Coblence/Rh.	1997-2010	-	-0,8	Printemps
Coblence/Rh.	1997-2010	-	0,7	Eté
Coblence/Rh.	1997-2010	-	0,1	Automne
Coblence/Rh.	1997-2010	-	-1,1	Hiver

L'évaluation de tendance montre que des résultats totalement différents peuvent être générés selon les chroniques prises à la base.

Il a donc été procédé en plus à une représentation graphique de l'évolution de la moyenne annuelle au droit de cinq stations le long du Rhin (sur la période comprise entre 1978 et 2011), comme le montre la figure 5.4-1.

L'impact le plus sensible sur la température de l'eau est celui de la température atmosphérique (cf. chapitre 5.5), comme on le voit aisément à l'évolution similaire des valeurs le long du Rhin. On reconnaît aussi nettement les grands rejets d'eaux de refroidissement sur le tronçon compris entre Karlsruhe et Mayence (cf. chapitre 5.7). La tendance nette d'augmentation des températures de l'eau par rapport à la moyenne annuelle sur la période 1987-1989 est renforcée par la forte régression des débits annuels sur ces trois années.

Cette montée abrupte de température est également visible dans d'autres stations d'analyse du Rhin et des affluents au cours de cette période et doit donc être vue comme un phénomène climatique. Hari [Hari et al 2006] a déjà fait mention de cet effet climatique dans les évaluations de longues séries de données sur les fleuves suisses alpins. Il s'explique par un phénomène appelé oscillation nord-atlantique particulièrement prononcé sur cette période et désignant l'afflux renforcé d'air marin chaud vers l'Europe de l'ouest notamment en hiver, provoqué par des différences importantes de pressions atmosphériques dans l'Atlantique Nord. Le fait que les températures de l'eau et de l'air soient restées à un niveau relativement élevées bien que le phénomène d'oscillation nord-atlantique ait été moins prononcé au cours des années suivantes reste inexplicable (voir fig. 5.5-1).

Selon qu'une chronique intègre ou non la période 1987-1989, les calculs statistiques génèrent en partie des tendances très significatives.

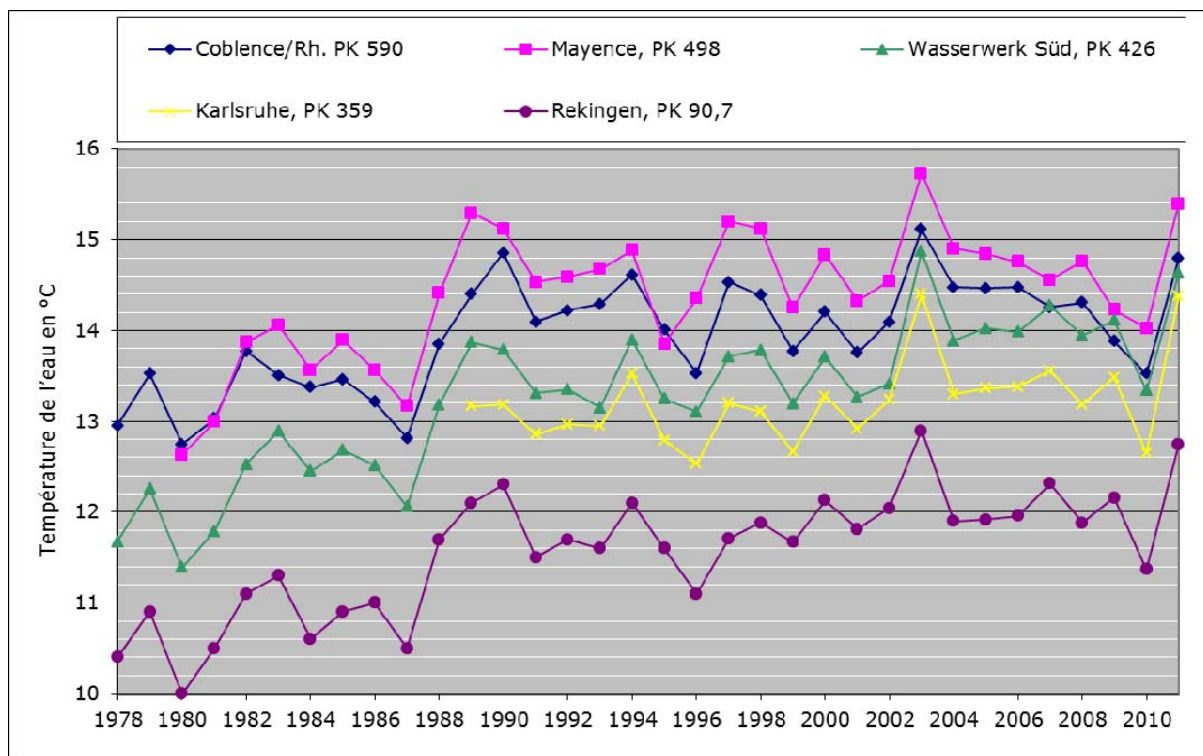
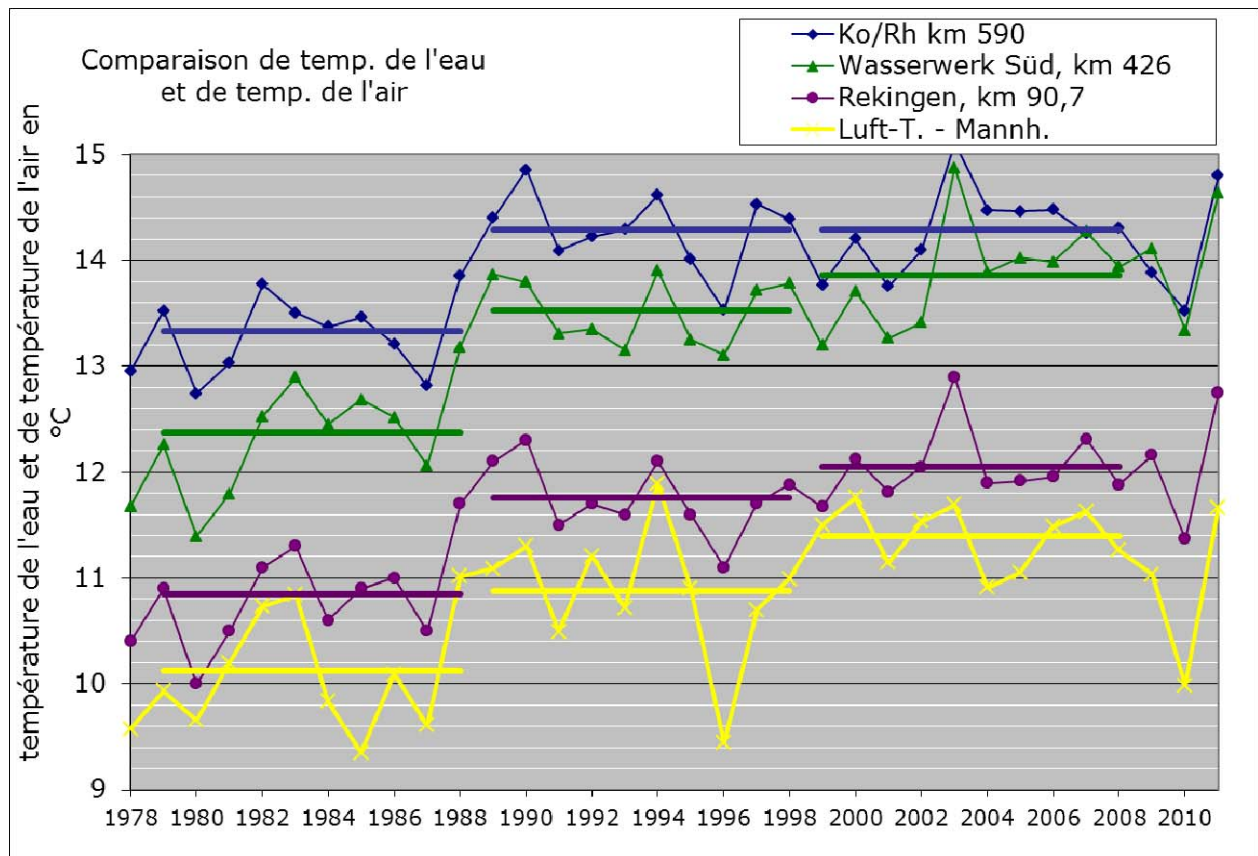


Fig. 5.4-1 : moyenne annuelle des températures de l'eau du Rhin de 1978 à 2011 au droit de cinq stations d'analyse du haut Rhin, du Rhin supérieur et du Rhin moyen

## 5.5 Analyse de corrélation

Selon [Haag, 2009], les températures de l'air et des eaux courantes sont en grande partie régies par les mêmes facteurs climatiques. Une tendance similaire devrait donc se reproduire dans les températures des fleuves. Comme les chroniques de mesure de températures de l'eau sont généralement sensiblement plus courtes que celles des températures de l'air, on trouve encore relativement peu d'analyses traitant de l'évolution historique des températures de l'eau [Webb, 1996].

On a comparé les moyennes annuelles de température de l'eau des stations d'analyse de Coblenze/Rhin, de la WW (usine d'eau) Sud de BASF et de Rekingen avec les températures de l'air mesurées à Mannheim, où figurent également les moyennes des décades à partir de 1979-1988 – voir figure 5.5-1. Entre la première décade (1979-1988) et la seconde (1989-1998), la saute de température de l'eau est de 0,9 °C à Rekingen, de 1,0 °C à Coblenze et de 1,1 °C à la WW Sud de BASF, alors que la hausse de température de l'air s'élève à 0,75 °C.



**Fig. 5.5-1:** comparaison entre les moyennes annuelles et les moyennes de décades de température de l'eau et de température de l'air en (moyenne de décade démarrant avec la décade 1979-1988. traits horizontaux en couleur)

Une comparaison directe entre la température de l'eau à la WW Sud et les données de la station thermométrique du DWD située à proximité montre que la température moyenne annuelle de l'eau est - dans le long terme - de 2 à 2,3 °C supérieure à la température de l'air. Ces indications concordent avec les évaluations tirées des sources bibliographiques.

Greis [Greis 2007] a examiné à partir de différentes stations du bassin du Rhin comment se présentait la corrélation entre températures de l'air et de l'eau dans des sites peu distants. Des coefficients de corrélation de 0,898 et 0,900 ont ainsi été déterminés pour les stations de mesure de la température de l'eau de Coblenze et de Karlsruhe. Ceci signifie qu'il existe dans ces cas une très bonne corrélation entre températures de l'air et de l'eau.

**Tab. 5.5-1 :** Coefficients de corrélation entre les données des stations de mesure des températures de l'eau et des températures de l'air (Source : Greis 2007)

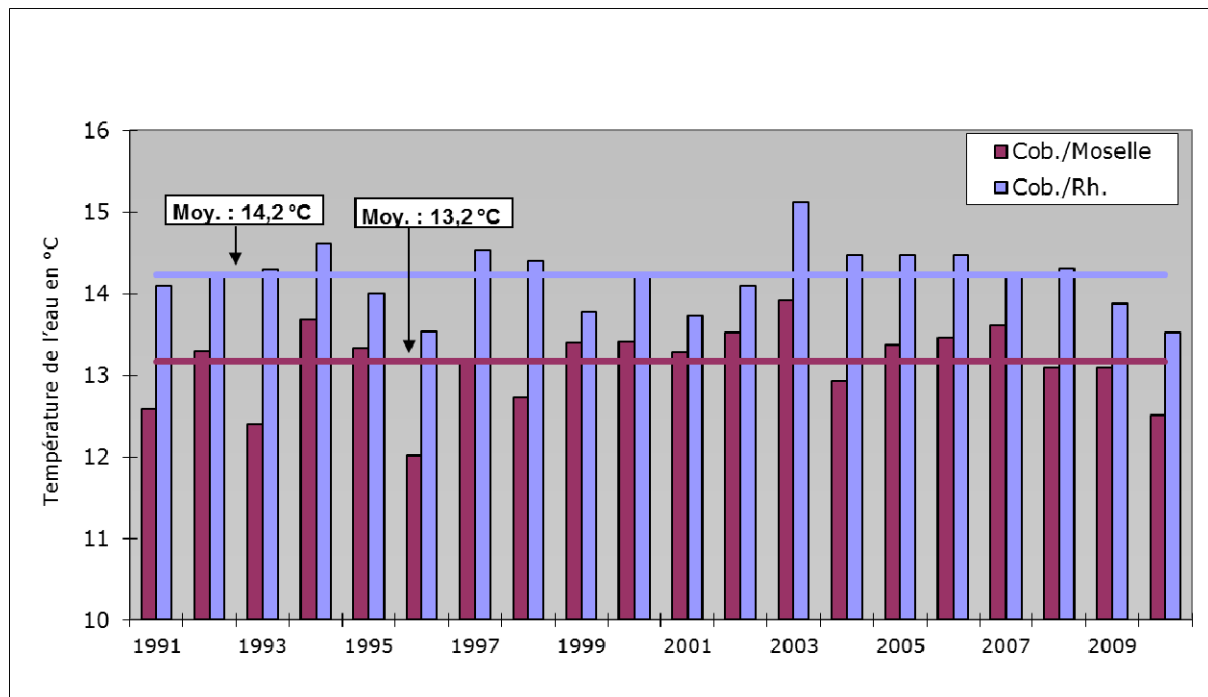
Station de mesure de la température de l'eau	Station de mesure de la température de l'air	Période d'analyse	Coefficient de corrélation
Coblenze	Coblenze-Horchheim	1978 - 2007	0,898
Karlsruhe	Karlsruhe	1988 - 2007	0,900

La corrélation croisée effectuée par ailleurs a mis en évidence que la corrélation maximale de la température de l'air avec celle de l'eau était atteinte dans les différentes stations avec un décalage de un à trois jours.

On a constaté des coefficients de corrélation maximaux sur le Rhin et le Neckar avec un décalage de deux jours (dans les stations de Coblenze/Rhin, de Besigheim/Neckar et de Poppenweiler/Neckar) et de trois jours (dans les stations de Rockenau/Neckar et de Karlsruhe/Rhin).

### 5.6 Impact des grands affluents sur la température du Rhin

En comparant la moyenne saisonnière des températures d'eau du Rhin et de la Moselle à hauteur de Coblenze sur les vingt dernières années, on note que les différences sont respectivement en moyenne de l'ordre de 1,7 °C et de 1,8 °C en automne et en hiver alors que les températures moyenne du Rhin et de la Moselle sont les mêmes en été. En moyenne, la température de la Moselle est 1 °C plus froide que celle du Rhin sur la période considérée. D'un point de vue purement arithmétique et en appliquant le ratio moyen de débit de 1:5 par rapport au Rhin à Coblenze, ceci signifie que la Moselle refroidit le Rhin de 0,2 °C après mélange des eaux (figure 5.6-1).



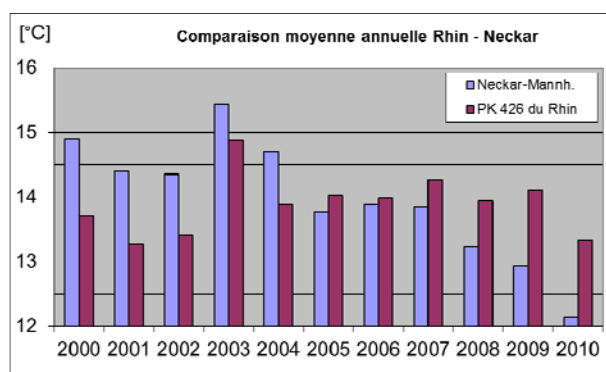
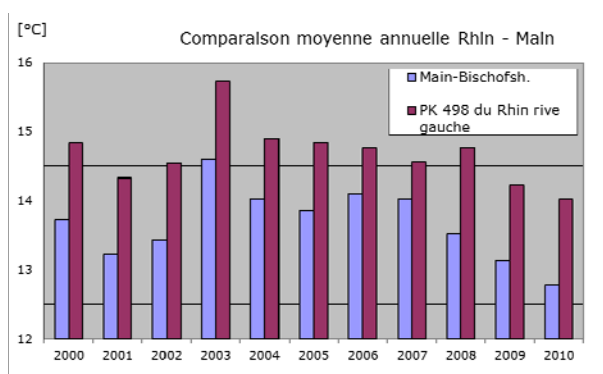
**Fig. 5.6-1** : Comparaison des moyennes de température de l'eau du Rhin et de la Moselle à Coblenze de 1991 à 2010

De manière analogue, on a comparé les températures de l'eau du Rhin à hauteur de Mayence (rive gauche) à celles du Main à Bischofsheim (figure 5.6-2a). Il en ressort également une différence de température de 1 °C nettement visible en automne et en hiver mais absente en revanche en été.

En comparant les températures du Rhin et du Neckar à Mannheim, une baisse des moyennes annuelles du Neckar le fait passer sous celles du Rhin (figure 5.6-2b). La raison en est la mise à l'arrêt de la centrale nucléaire d'Obrigheim en mai 2005, ce qui fait que le Neckar a faiblement contribué au rafraîchissement du Rhin sur la période 2006-2010 (d'env. 0,1 °C rapporté au débit moyen à Worms).

TE en °C Moyenne 2000-2010	Main Bischofsh eim	PK du Rhin 498 rive gauche	Delta T
Moyenne annuelle	13,7	14,7	-1,0
Printemps	12,4	13,1	-0,7
Eté	22,4	22,2	0,2
Automne	14,7	16,0	-1,3
Hiver	5,0	7,4	-2,3

TE en °C	Mannheim Neckar	PK du Rhin 426	Delta T
Moyenne 2000- 2004	14,8	13,8	0,93
Moyenne 2006-2010	13,2	13,9	-0,72



**Fig. 5.6-2a/b** : Comparaison des moyennes annuelles de la température de l'eau du Rhin et du Main d'une part et du Rhin et du Neckar d'autre part de 2000 à 2010, y compris évaluation synoptique

A l'opposé du Rhin même, les affluents du Rhin supérieur et du Rhin moyen atteignent fréquemment des températures proches de 0 °C en hiver et l'on observe parfois la formation d'une couche épaisse de glace. Comme il est expliqué dans le chapitre 5.3, des températures inférieures à 2 °C n'ont été mesurées dans le Rhin à Coblenz que dans le cadre de sept années (en moyenne journalière) sur toute la période comprise entre 1978 et 2011.

## 5.7 Impact des grands rejeteurs thermiques sur la température du Rhin

Dans le contexte des rejets thermiques des centrales existantes ou planifiées, la CIPR a déjà traité de la question des pressions thermiques dans le courant des années 70. A la suite de la phase de chaleur extrême survenue à l'été 2003, la CIPR a mis à jour, comme indiqué plus haut, l'inventaire des rejets thermiques de 1989 pour qu'il corresponde à la situation en 2004 [CIPR 2006]. Tenant compte de la hausse de température de l'eau (d'env. 1 à 2 °C) déjà provoquée par le changement climatique, le tableau 5.7.1 dresse une comparaison intégrant la hausse théorique possible de température imputable aux rejets thermiques rapportée ici au débit moyen de Worms (1400 m<sup>3</sup>/s). Environ 60% des grands rejets thermiques dans le Rhin ont eu lieu jusqu'en 2010 sur un tronçon restreint du Rhin supérieur situé entre Karlsruhe et Worms. Si tous les rejeteurs utilisaient simultanément et intégralement les capacités autorisées, ces rejets, rapportés au débit moyen à hauteur de Worms et après mélange intégral, sans prise en compte de processus naturels, peuvent contribuer à une augmentation théorique de la température de 2,6 °C maximum. En revanche, la hausse de température moyenne pouvant

réellement être mesurée à hauteur de Mayence est de l'ordre de 1,4 °C (rapportée au MQ) et baisse ensuite pour atteindre environ 1 °C à Coblenze. La faible différence constatée s'explique essentiellement par le fait que les quantités de rejet autorisées ne sont pas totalement exploitées et qu'il se produit un échange thermique (évaporation et convection) avec l'atmosphère sur le tronçon compris entre Mayence et Coblenze. On suppose que la hausse de la température jusqu'à Mayence est globalement à mettre sur le compte des rejets thermiques effectués dans l'agglomération de Mannheim/Ludwigshafen et à hauteur de la centrale nucléaire de Biblis et, dans une moindre part, du réchauffement naturel sur le linéaire d'environ 50-60 km. En revanche, l'impact du rejet thermique de la centrale nucléaire de Philippsburg, nettement plus éloigné et plus faible, ne devrait guère être mesurable dans un ordre de grandeur significatif à Mayence. La modélisation des températures de l'eau de ce tronçon du Rhin devrait fournir des informations plus précises à ce sujet.

On note qu'une réduction des débits d'étiage estivaux peut chuter à la moitié du MQ, voire moins encore, comme par ex. à l'été 2003, et déboucher sur une situation critique, les faibles débits et les capacités de refroidissement restreintes qui en résultent entraînant une hausse des températures de l'eau à rejets thermiques constants (Webb 2006).

En fonction du site d'implantation des centrales et du type de rivière en présence, il existe donc en Allemagne des valeurs limites de prélèvement et de rejet d'eaux de refroidissement fixées au titre de la législation de l'eau. Ces valeurs limites s'ancrent sur les recommandations de la Commission de travail des Länder allemands dans le domaine de l'eau (LAWA). Si ces valeurs limites sont atteintes, la puissance de la centrale doit être abaissée pour réduire les apports thermiques dans le milieu récepteur [UBA 2010. P. 141].

Les autres Etats riverains du Rhin ont pris des mesures similaires.

**Tab. 5.7-1** : Relevé des grands rejets thermiques autorisés entre Karlsruhe et Mayence, du débit moyen à hauteur de Worms et de la hausse théorique de température de l'eau du Rhin en résultant

Rejeteur thermique	MW*	MQ [m <sup>3</sup> /s]	Hausse théorique de temp. [°C]
CN de Philippsburg	4265	1400	0,7
CN de Biblis	4940	1400	0,8
Total : Karlsruhe-Worms	15000	1400	2,6
Delta T : Mayence-Karlsruhe 2010			1,4

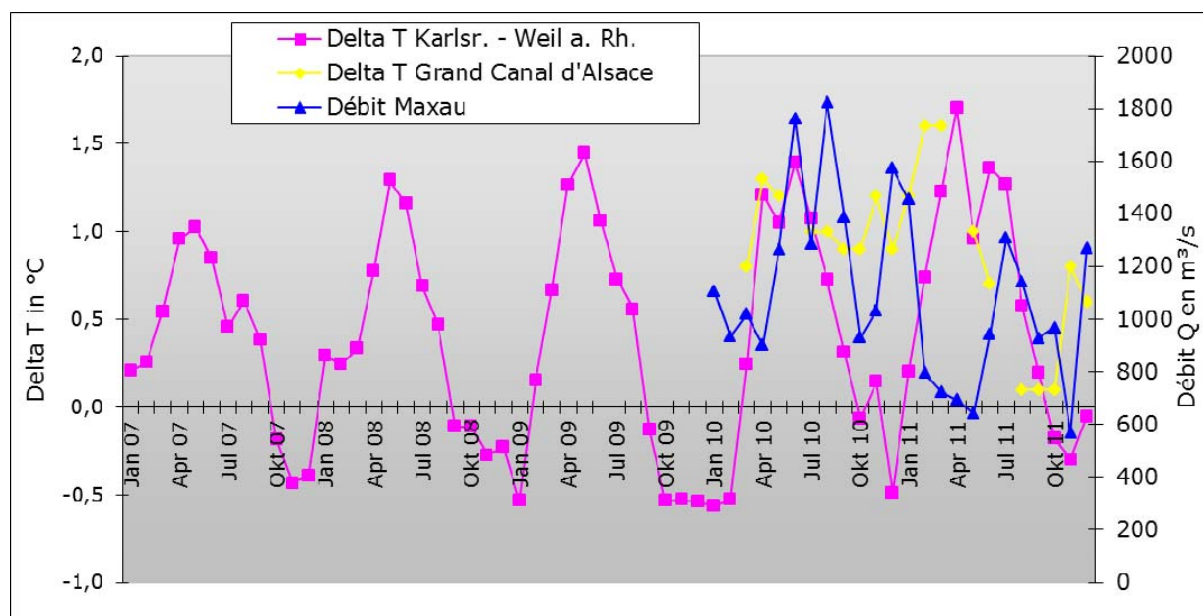
\* Rejets thermiques autorisés conformément à l'inventaire des rejets thermiques 2004 figurant dans le rapport CIPR n° 151[CIPR 2006])

Par ailleurs, il est tenu compte de l'impact éventuel du rejet thermique ponctuel de la centrale nucléaire de Fessenheim en Alsace, le plus grand rejeteur thermique anthropique depuis 1977 (avec un rejet thermique autorisé de 3520 MW [CIPR 2006] sur le tronçon allant de Bâle à Karlsruhe, sur les températures de l'eau mesurées à Karlsruhe, soit à plus de 130 km en aval. A cette fin, on a évalué les moyennes mensuelles publiées [Umwelt & Strahlenschutz] de la hausse de température à proximité immédiate du Grand Canal d'Alsace de mars 2010 à mars 2012. La hausse mensuelle de température était comprise entre 0 °C (pendant les phases de révision de la centrale) et 2,3 °C (avril 2010). Sur cette période, la hausse moyenne de la température du Grand Canal d'Alsace était de 0,9 °C. Aux termes d'une convention franco-allemande, le régime hydraulique est réglementé par le Grand Canal d'Alsace dans toutes les situations de débit. Elle prévoit jusqu'à un débit de 1500 m<sup>3</sup>/s que la plus grande partie du débit



transite par le canal latéral et que seul un faible pourcentage de débit reste dans le Vieux Rhin. Ceci signifie que le réchauffement du Grand Canal d'Alsace correspond pratiquement sur la majeure partie de l'année au réchauffement anthropique des eaux du Rhin dans leur ensemble sur le profil transversal.

Il ressort à présent de la présentation en figure 5.7-1 des moyennes mensuelles de différence de température entre Karlsruhe et Weil am Rhein que la température de l'eau augmente pendant la plupart des mois et qu'elle ne baisse éventuellement de 0,5 °C au maximum que pendant les mois d'automne et d'hiver. Sur le tronçon régulé de plus de 130 km jusqu'à la station d'analyse de Karlsruhe, on retrouve pour l'essentiel le niveau de l'échange thermique naturel eau-atmosphère. Comme il est expliqué dans le chapitre 4, il n'est constaté aucun gradient de température sur le profil transversal au droit de la station d'analyse de Karlsruhe. Les rejets thermiques représentés (moyennes mensuelles 2010-2011) dans le Grand Canal d'Alsace à hauteur de Fessenheim ne peuvent cependant pas être mis en corrélation avec l'évolution de la température. L'impact de ces rejets thermiques est manifestement recouvert par des processus naturel (réchauffement et refroidissement) et n'est plus détectable. Sur le tronçon régulé de plus de 130 km jusqu'à la station d'analyse de Karlsruhe, on retrouve pour l'essentiel le niveau de l'échange thermique naturel eau-atmosphère. Ici aussi, la modélisation de la température de l'eau permettra de tirer des enseignements plus précis.



**Fig. 5.7-1 :** moyennes mensuelles de la différence de température entre Karlsruhe et Weil am Rhein 2007-2011, moyennes mensuelles de débit à Karlsruhe-Maxau et hausse de température dans le Grand Canal d'Alsace à hauteur de Fessenheim de 2010 à 2011

On constate fondamentalement, au vu des résultats présentés dans la fig. 5.7-2 et des analyses de Glaser [Glaser 1975], que, pour le même débit, un tel rejet thermique se traduit par une perte de chaleur par évaporation ou convection deux fois plus élevée selon que la température de l'eau soit de 20 °C ou de 5 °C.

Perte de chaleur en relation avec la température de surface de 10 °C

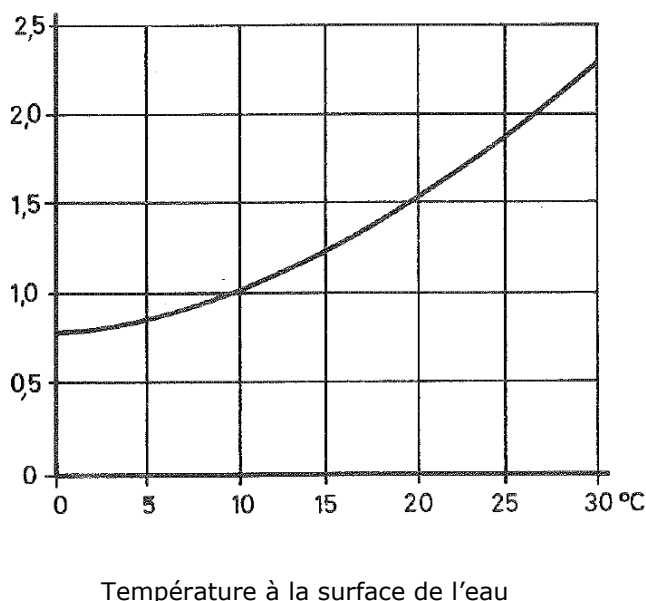
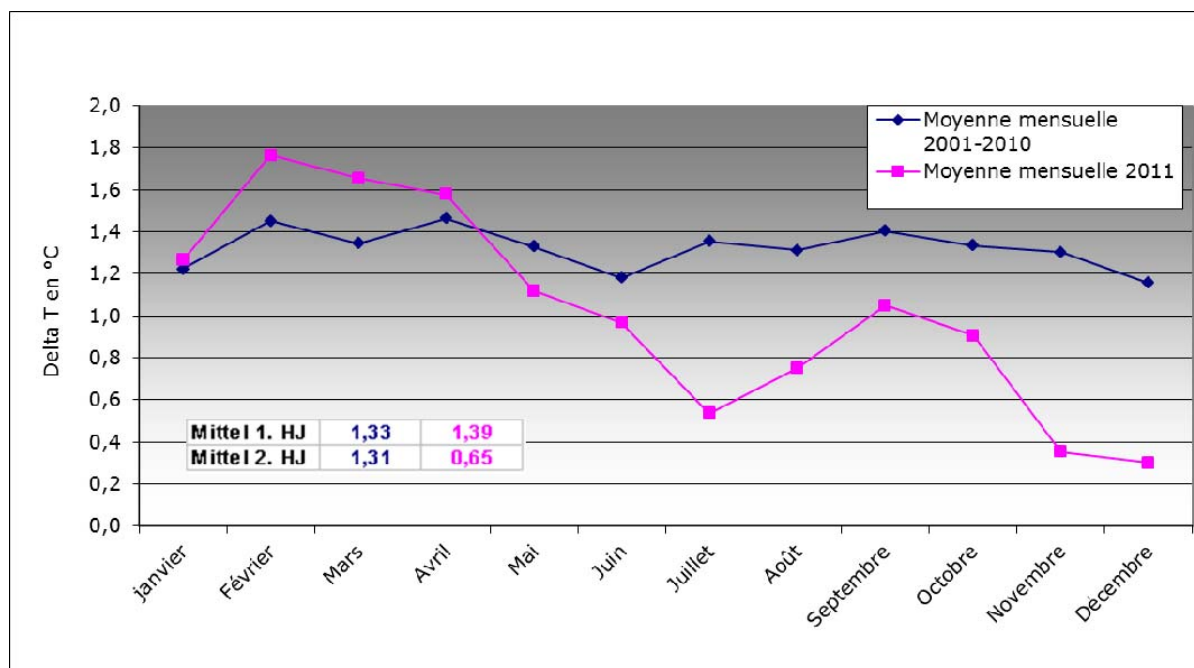


Fig. 5.7-2 : Perte de chaleur en relation avec la température à la surface de l'eau (source : Glaser 1975)

## 6. Evolution de la température de l'eau du Rhin depuis mars 2011

A la suite des accidents survenus dans les réacteurs nucléaires de Fukushima au Japon, le gouvernement fédéral allemand a décidé en mars 2011 de décréter un moratorium de trois mois pour huit sites de production d'énergie nucléaire entrés en exploitation avant 1981. Avec l'entrée en vigueur du 13ème amendement de la loi sur l'énergie nucléaire en août 2011, l'exploitation de ces installations a été durablement stoppée. Pour le bassin du Rhin entre Karlsruhe et Mayence, cet arrêt a concerné les blocs nucléaires Biblis I et Biblis II ainsi que Philippsburg I. Il en a été de même pour Neckarwestheim I sur le Neckar. Ces installations représentent la moitié des rejets thermiques recensés dans ce tronçon du Rhin (conformément au rapport CIPR n° 151). Par conséquent, il devrait en résulter une baisse significative de la différence de température entre les stations d'analyse de Mayence et de Karlsruhe, qui est en moyenne annuelle de l'ordre de 1,5 °C sur la chronique 1989-2010. Les moyennes mensuelles 2011 de la différence de température par rapport aux moyennes annuelles des années 2001 à 2010 sont représentées dans la figure 6-1. L'arrêt de l'exploitation des réacteurs à partir de la mi-mars 2011 semble se traduire par une baisse de moitié de la différence de température sur le second semestre par rapport au 2er semestre et par rapport à la moyenne pluriannuelle. Le modèle déterministe physique allemand actuellement mis au point sur le Rhin devrait pouvoir confirmer cet ordre de grandeur. On veillera à suivre cette évolution et à en vérifier la fiabilité statistique dans le courant des prochaines années. La méthode purement statistique peut préciser la réduction si les rejets thermiques des autres centrales du Rhin ou de ses affluents n'augmentent pas dans le même temps.

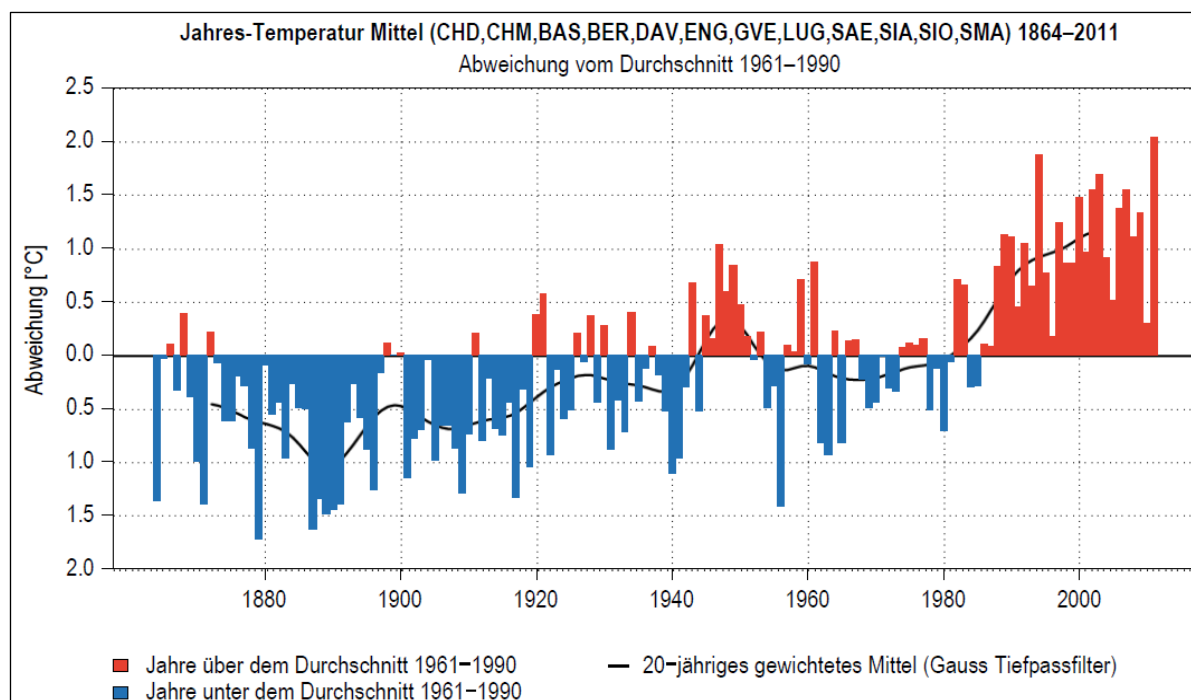


**Fig. 6-1 :** différence de température entre les stations d'analyse de Karlsruhe et de Mayence ; comparaison de l'évolution des moyennes mensuelles 2011 avec les moyennes mensuelles des années 2001-2010

## 7. Perspectives

Les résultats présentés ici confirment les sources bibliographique faisant état d'une augmentation d'env. 1 °C de la température de l'eau dans quelques régions du bassin du Rhin au cours des 3 dernières décennies sous l'effet du changement climatique. Il est clair également que cette hausse de température n'a pas été continue mais qu'elle résulte essentiellement d'un impact climatique survenu vers la fin des années 80 du siècle dernier. On ne relève de tendance significative d'augmentation de la température de l'eau au cours des deux dernière décennies ni sur le haut Rhin ni sur le Rhin supérieur ou moyen. Cette remarque est notamment valable en période estivale, pour laquelle les experts climatiques prévoient des températures de l'air croissantes.

Selon un rapport suisse [OFEV 2012], la moyenne annuelle de la température de l'air a augmenté de plus de 1,5 °C pendant la période 1912-2011, avec une accélération de ce réchauffement constatée au cours des 30 dernières années (figure 7-1).



**Fig. 7-1 :** écart entre la température annuelle moyenne de l'air et la moyenne des années 1961-1990 (Source : OFEV 2012, moyenne pour la Suisse).

La température moyenne de l'air a augmenté d'à peu près 0,9 °C en Allemagne entre 1901 et 2006, cette hausse atteignant même 1,2 °C dans la partie sud-ouest du pays [DAS 2008]. Selon des résultats récents communiqués dans le projet KLIWA (sur le changement climatique et les conséquences en découlant pour la gestion des eaux), on relève des tendances positives significatives dans les moyennes annuelles de la température de l'air sur la période 1941-2010 de l'ordre de 1,0 °C dans le bassin du haut Rhin et du Rhin supérieur, de 1,1 °C dans la région de la Nahe et du Rhin moyen et de 1,2 °C dans le bassin du Neckar [KLIWA 2012]. La tendance au réchauffement est plus marquée sur les 10 dernières années que sur la chronique 1931-2000.

Si cette tendance vient à se confirmer, elle aura un certain impact sur les températures de l'eau. Cette remarque vaut plus encore si le régime hydrologique du Rhin connaît à l'avenir des périodes d'étiage de plus en plus fréquentes, surtout en été [Belz 2010]. Une étude sur l'évolution des températures des eaux du Rhin au cours des prochaines décennies est en cours de réalisation au sein de la CIPR.

D'autres recherches effectuées dans le cadre du projet KLIWA montrent que le changement climatique a un impact sur les conditions physico-chimiques du milieu fluvial et sur la composition des biocénoses aquatiques [UBA 2010]. Elles soulignent l'impact négatif sensible que peut avoir une hausse de température sur les processus autoépuratoires du milieu naturel.

Le démarrage du 'tournant énergétique' en Allemagne en 2011 s'est déjà traduit par une atténuation mesurable à Mayence de la pression thermique sur les températures de l'eau du Rhin supérieur septentrional (fig. 6-1). Il reste maintenant à voir si cette évolution s'imprimera durablement dans les températures de l'eau du Rhin. L'étude en cours susmentionnée sur l'évolution future de la température de l'eau prévoit donc de ne pas se limiter à des scénarios climatiques sélectionnés mais de prendre également en compte des variantes de « scénarios de rejets thermiques ».

## Sources bibliographiques

- Belz, J. U. (2010): Das Abflussregime des Rheins im 20. Jahrhundert. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HyWa 54, H.1, S. 4-17.
- CIPR (2006) : Comparaison des rejets thermiques de 1989 et de 2004 le long du Rhin rapport CIPR n° 151. 4 p.
- CIPR (2009) : Analyse des connaissances actuelles relatives aux modifications climatiques et aux impacts du changement climatique sur le régime hydrologique dans le bassin du Rhin - Analyse bibliographique. Rapport CIPR n° 174. 67 pages
- CIPR (2011) : Etude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin. Rapport CIPR n° 188. 28 pages
- CIPR (2013) : Etat 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 Rapport CIPR n° 204, 37 pages
- DAS (2008): Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, beschlossen am 17.12.2008,  
[http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf)
- Deltares 2012: Water temperature in the River Meuse - Exploring temperature-related issues in the Dutch part of the river basin. Project 1205262-000. Deltares, August 2012.
- Forstner, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. - Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, S. 1-95. Universität Wien.
- Glaser, H. (1975): Zusätzliche Wärmeabgabe eines Fließgewässers nach einer Fremdwärmeeinleitung (nicht veröffentlichter Bericht an das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, Stuttgart 1975).
- Greis, S. (2007): Gewässertemperaturentwicklung und industrieller Kühlwasserbedarf. Eine statistische Analyse der Wassertemperaturentwicklung ausgewählter deutscher Flüsse im Zuge rezenter Klimatrends und deren Bedeutung für den industriellen Kühlwasserbedarf. - Diplomarbeit, Universität Würzburg, 146 S. (unveröffentlicht).
- Greis, S., U. Strauch und B. Rothstein (2011): Untersuchungen zur Gewässertemperaturentwicklung ausgewählter Flüsse mit thermischen Kraftwerksstandorten in Deutschland. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2011 (4) Nr. 1, S. 35-40.
- Haag, I. (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. - Herausgeber: WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- Hari, R. E., D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm und H. Güttinger (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. - Global Change Biology 12(1), S. 10-26.
- Jakob, A., Binderheim E.; Pfammatter, F. und Schädler, M. (2010): Temperaturen in Schweizer Fließgewässern - Langzeitbeobachtung. Gas-Wasser-Abwasser, 3/2010, S. 221-231
- Jakob, A., Pfammatter, F. und Schädler, M. (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fließgewässern 1976-2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.7. BAFU, Bern.
- KLIWA 2012: Klimawandel in Süddeutschland. Monitoringbericht 2011. Hrsg. Arbeitskreis KLIWA, April 2012. <http://www.kliwa.de>
- Lange, J. (2009): Studie Wärmelast Rhein. - Herausgeber: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, BUND 2009.
- LAWA (2012): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Entwurf, Stand August 2012 -Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 119 S.

Liefveld W.M. & Postma R. (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. – Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.

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>

OFEFP, OFEG, MétéoSuisse, 2004 : Canicule de 2003 : conséquences pour les eaux (rapport en allemand, résumé en français). Série Environnement N° 369. Berne : Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 174 pages

OFEV (2012) : Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). Office fédéral de l'environnement OFEV (éd.), Berne, 2012. Connaissance de l'environnement n° 1217 : 76 pages – Internet :

[http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01670/index.html?lang=de&show\\_kat=/publikationen/00014](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01670/index.html?lang=de&show_kat=/publikationen/00014)

Rothstein, B., U. Müller, S. Greis, J. Schulz, A. Scholten und E. Nilson (2008): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2008 (1) Nr. 10, S. 555-561

Strauch, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. – Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 106, 223 S. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

UBA-Texte 47/2010: WASKlim - Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2010.

<http://www.uba.de/uba-info-medien/4019.html>

Umwelt & Strahlenschutz – monatliche Information aus dem Kernkraftwerk Fessenheim: <http://fessenheim-de.edf.com>

Webb, B.W. (1996): Trends in stream and river temperature. - Hydrological Processes 10, S. 205-226.

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 22, S. 902-918.

Wundt, W. (1940): Beiträge zur Temperatur fließender Gewässer. Peterm. Mitt. 1940, H. 12, S. 399-406.

Wundt, W (1967): Der Temperaturgang an mitteleuropäischen Flüssen. Peterm. Mitt. 1967, H. 2, S. 81-88.

**Liste des abréviations**

<b>BfG</b>	<b>Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)</b>
<b>CIPR</b>	<b>Commission Internationale pour la Protection du Rhin</b>
<b>CN</b>	<b>Centrale nucléaire</b>
<b>DWD</b>	<b>Deutscher Wetterdienst</b>
<b>HLUG</b>	<b>Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie</b>
<b>KLIWA</b>	<b>Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und des DWD</b>
<b>LANUV</b>	<b>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW,</b>
<b>LUBW</b>	<b>Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg</b>
<b>LUWG</b>	<b>Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz</b>
<b>MétéoSuisse</b>	<b>Office fédéral de la météorologie et de la climatologie (CH)</b>
<b>OFEG</b>	<b>Office fédéral de l'eau et de la géologie (CH)</b>
<b>OFEV</b>	<b>Office fédéral de l'environnement (CH)</b>
<b>OFEFP</b>	<b>Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (CH)</b>
<b>TE</b>	<b>Température de l'eau</b>
<b>WW</b>	<b>Wasserwerk (Usine d'eau)</b>