

**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 -**

**Mise à jour : début 2009**

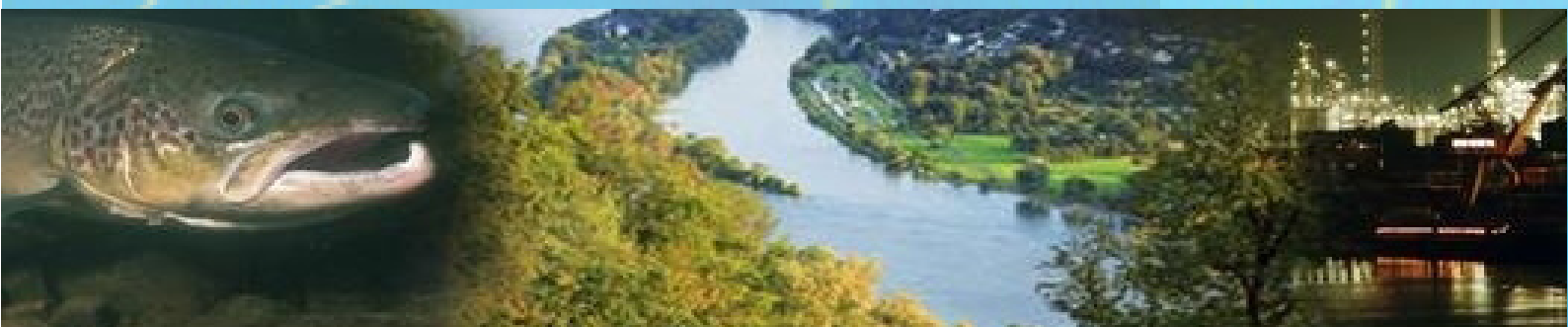


Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

*Rapport n° 174*



**Editeur:**

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

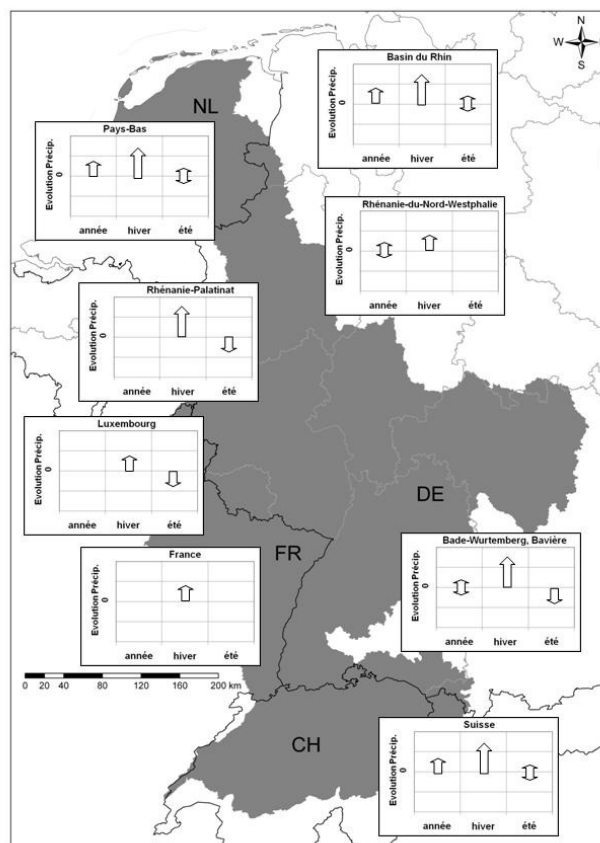
**Traduction:** Isabelle Traue, Dominique Falloux

ISBN 3-935324-74-X

© IKSР-CIPR-ICBR 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

## Mise à jour : début 2009



**Mandant :** Secrétariat de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin

**Rédaction :** Dr.-Ing. Kai Gerlinger

**Etat d'avancement du rapport :** Version finale du 30/04/2009

# 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 –

### Mise à jour : début 2009

## Sommaire

Résumé .....	1
1. Objet de l'étude et méthode suivie .....	10
2. Etudes générales sur le changement climatique dans le bassin du Rhin .....	12
3. Analyse synthétique du changement climatique survenu jusqu'à présent .....	15
3.1 Modifications des précipitations survenues jusqu'à présent .....	15
3.2 Modifications de la température de l'air survenues jusqu'à présent .....	18
3.3 Modifications de la neige et des glaciers survenues jusqu'à présent.....	19
4. Analyse synthétique des modifications du régime des eaux survenues jusqu'à présent.....	21
4.1 Modifications des débits survenues jusqu'à présent .....	21
4.2 Modifications des crues survenues jusqu'à présent.....	22
4.3 Modifications des étiages survenues jusqu'à présent .....	24
4.4 Modifications de la température de l'eau survenues jusqu'à présent .....	26
5. Estimation d'un éventuel changement climatique.....	28
5.1 Projections climatiques pour le bassin du Rhin.....	28
5.2 Modifications envisageables du régime des précipitations .....	31
5.3 Modifications envisageables de la température de l'air .....	33
5.4 Modifications envisageables de la neige et des glaciers .....	35
6. Estimation des impacts d'un éventuel changement climatique sur le régime hydrologique .....	36
6.1 Modèles de simulation des débits.....	36
6.2 Modèles de simulation de la température de l'eau .....	37

6.3 Modifications envisageables du régime hydrologique .....	38
6.4 Modifications envisageables des crues .....	40
6.5 Modifications envisageables des étiages.....	40
6.6 Modifications envisageables de la température de l'eau .....	41
7. Conclusions .....	42
8. Références bibliographiques.....	45

## Annexes

Figure A-1 : Evolution du total des précipitations régionales (SumhN) et des débits moyens (MQ) dans le bassin du Rhin (CHR 2007)

Figure A-2 : Evolution des NM7Q et NM21Q (moyenne arithmétique la plus faible du débit sur 7 ou 21 jours consécutifs) dans le bassin du Rhin (CHR 2007)

Figure A-3 : Evolution des débits les plus élevés (HQ) dans le bassin du Rhin (CHR 2007)

Tableau A-1 : Données climatiques modélisées en Europe centrale (Nilson 2008, cité dans Goergen 2008, modifiées)

Tableau A-2 : Projections hydrologiques pour le bassin du Rhin (Nilson 2008, cité dans Goergen 2008, modifiées)

Tableau A-3 : Vue d'ensemble sur l'application de modèles climatiques et de modèles hydrologiques aux Pays-Bas (Rhin et Meuse) (Wit 2008)

## Préambule

Les modifications des paramètres climatiques ayant un impact sur les processus hydrologiques et le régime des eaux, la CIPR a été chargée en Conférence ministérielle sur le Rhin 2007 d'élaborer une étude de scénarii sur le régime hydrologique du Rhin.

La CIPR a immédiatement engagé les travaux sur ce sujet en instaurant en 2008 un groupe d'experts KLIMA et en mandatant dans un premier temps une analyse bibliographique intitulée « Analyse des connaissances actuelles relatives aux modifications climatiques et aux impacts du changement climatique sur le régime hydrologique dans le bassin du Rhin ». Le présent document soumet les résultats de cette analyse et constitue un élément constitutif de premier plan pour la poursuite des travaux. Les autres travaux en cours se réfèrent aux activités d'assistance et de suivi du processus de mise au point d'une étude de scénarii fournissant des résultats fiables pour le régime hydrologique du Rhin. Une fois obtenus les résultats de ces activités, l'étape suivante consistera à élaborer au sein de la CIPR des stratégies d'adaptation.

## Résumé

### Objet de l'étude et méthode suivie

Le groupe d'experts KLIMA de la CIPR a chargé un bureau d'étude de synthétiser les études disponibles sur le changement climatique afin de pouvoir estimer les impacts régionaux du changement climatique dans le bassin du Rhin. La synthèse se décline en trois volets :

- Relevé des études actuelles et générales sur le changement climatique
- Synthèse des connaissances disponibles sur les modifications climatiques et hydrologiques survenues jusqu'à présent
- Estimation des futurs impacts d'un éventuel changement climatique sur le régime hydrologique.

Seuls sont considérés pour ce faire les précipitations et la température de l'air, c'est-à-dire les deux paramètres jugés particulièrement importants pour le régime hydrologique. Les évaluations du régime hydrologique se concentrent sur le débit (débit moyen, crues et étiages) et la température de l'eau.

Les connaissances ont été rassemblées sur la base des documents soumis par les délégations. 110 documents au total ont été mis à disposition et synthétisés. En regard des nombreuses sources bibliographiques entre-temps disponibles sur le changement climatique, cette synthèse n'a pas prétention d'être exhaustive.

Les études ne sont pas directement comparables, étant donné que les auteurs ont utilisé différentes méthodes d'évaluation et que les périodes d'analyse sont également différentes. Par ailleurs, les résultats sont reproduits globalement, ce qui exclut toute différenciation dans le temps et dans l'espace. Le présent rapport n'a pas pour objectif d'évaluer les études ou d'en tirer des conclusions.

### Analyses actuelles sur le changement climatique

Le relevé des analyses générales actuelles sur le changement climatique montre que les projets « RheinBlick2050 », KLIWAS et ACER notamment portent sur la mise au point de projections climatiques et hydrographiques pour le bassin du Rhin dans son ensemble.

En Suisse, des études sont réalisées entre autres sous le pilotage de l'Organe Consultatif sur les Changements Climatiques. Les Länder fédéraux de Bavière, Rhénanie-Palatinat et Bade-Wurtemberg coopèrent au sein du projet KLIWA relatif aux impacts du changement climatique sur la gestion des eaux. Le Bade-Wurtemberg et la Rhénanie-Palatinat analysent par ailleurs les impacts du changement climatique sur les débits du Rhin jusqu'à l'échelle de Worms. D'autres projets spécifiques sur le changement climatique sont réalisés en Hesse et en Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

Aux Pays-Bas, de nombreux projets sont réalisés sur les aspects du changement climatique (par ex. projet « Kennis voor Klimaat »), sachant que l'on considère également des stratégies d'adaptation (par ex. projet « Klimaat voor Ruimte » ou travaux actuels de la Commission Delta).

### Analyse des modifications climatiques survenues jusqu'à présent

Au niveau des précipitations, les données mesurées disponibles montrent que l'on peut s'attendre à une augmentation des précipitations totales en hiver dans toutes les régions du bassin du Rhin (figure 1). A l'opposé, on relève une baisse des précipitations totales en été dans de grandes parties du bassin du Rhin (en particulier dans le sud). Les baisses ne sont toutefois pas toujours importantes. En fonction de l'ordre de grandeur de la baisse des précipitations en été, le niveau des précipitations annuelles totales ne change pas (par ex. au Bade-Wurtemberg et en Bavière) ou augmente (par ex. en Suisse et aux Pays-Bas).

Ces augmentations des précipitations annuelles restent toutefois toujours inférieures aux augmentations des précipitations hivernales. Dans les zones du bassin au relief moins prononcé, situées en dehors des Alpes, la hausse des précipitations est due principalement à la fréquence croissante de situations météorologiques générales humides.

L'analyse des données mesurées sur la température de l'air permet de tirer des enseignements clairs pour toutes les régions du bassin du Rhin (figure 2). Au cours des 100 dernières années, les hausses de la température de l'air relevées en hiver sont particulièrement élevées (env. +1,0 °C à +1,6 °C). Par contre, les augmentations relevées en été sont plus faibles (env. +0,6 °C à 1,1 °C). Il en découle en moyenne annuelle une augmentation de la température dans le bassin du Rhin variant entre env. +0,5 °C et +1,2 °C. Celle-ci est légèrement supérieure à la moyenne globale de quelque +0,56 à +0,9°C/100 ans.

La hausse des températures se traduit par un recul des glaciers en Suisse. Par ailleurs, l'analyse des paramètres de neige, par ex. la hauteur moyenne de neige, fait ressortir une tendance négative. Cette tendance s'affaiblit toutefois avec l'altitude.

Les résultats d'analyses faites indépendamment les unes des autres montrent que le changement climatique dans le bassin du Rhin se traduit déjà dans les données mesurées de la température et des précipitations.

### Analyse des modifications hydrologiques survenues jusqu'à présent

Du fait de la hausse des températures et des précipitations ainsi que du plus faible emmagasinement d'eau sous forme de neige en hiver, les débits moyens mensuels relevés en période hydrologique hivernale dans le bassin du Rhin dans son ensemble sont plus élevés qu'auparavant. Ceci peut être mis en relation avec la « situation météorologique cyclonique occidentale » qui joue un rôle important dans la genèse des crues. Cette situation atmosphérique est nettement plus fréquente et plus longue en hiver.

En période hydrologique estivale par contre, les débits moyens baissent dans la partie méridionale du bassin du Rhin. Le décalage des débits de l'été hydrologique vers l'hiver hydrologique fait baisser la variabilité annuelle sur les cours d'eau à régime glacio-nival. Le débit annuel moyen reste donc à un niveau constant.

Vers l'aval, la baisse des débits moyens pendant l'été hydrologique est plus faible. Il en découle donc une augmentation du débit annuel moyen du fait de l'augmentation des débits pendant l'hiver hydrologique. Ces cours d'eau à régime pluvial présentent donc une augmentation de la variabilité des débits au cours de l'année du fait du changement climatique.



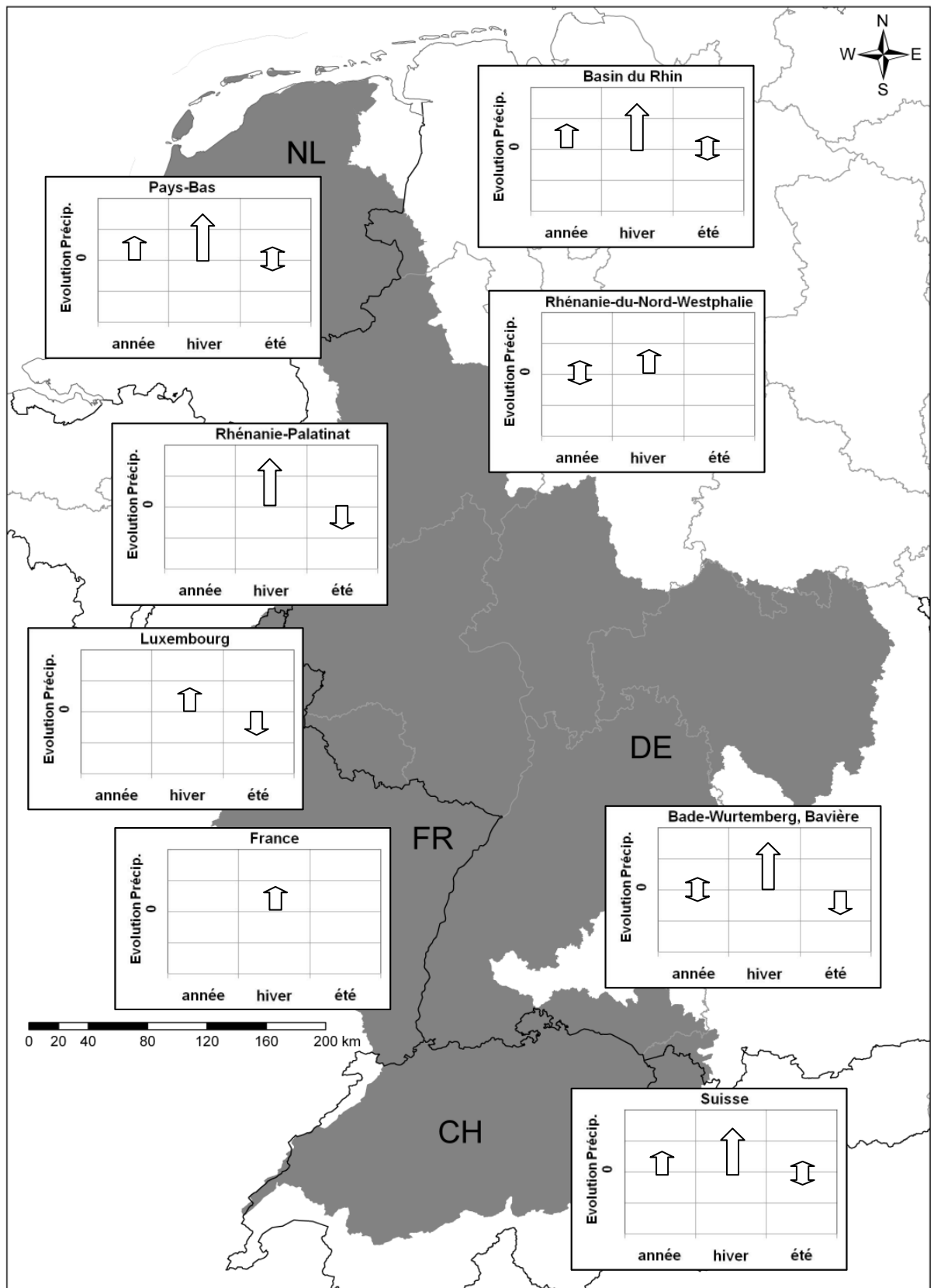


Figure 1 : Modifications des précipitations dans le bassin du Rhin au XXème siècle sur l'hiver et l'été hydrologiques ainsi que sur l'année (présentation schématique basée sur des données hétérogènes (Bader & Bantle 2004, Begert et al. 2005, KLIWA 2006c, KLIWA 2008a, KNMI 2008, LUWG 2007, LÖBF 2004, LÖBF 2006, Pfister et al. 2004))

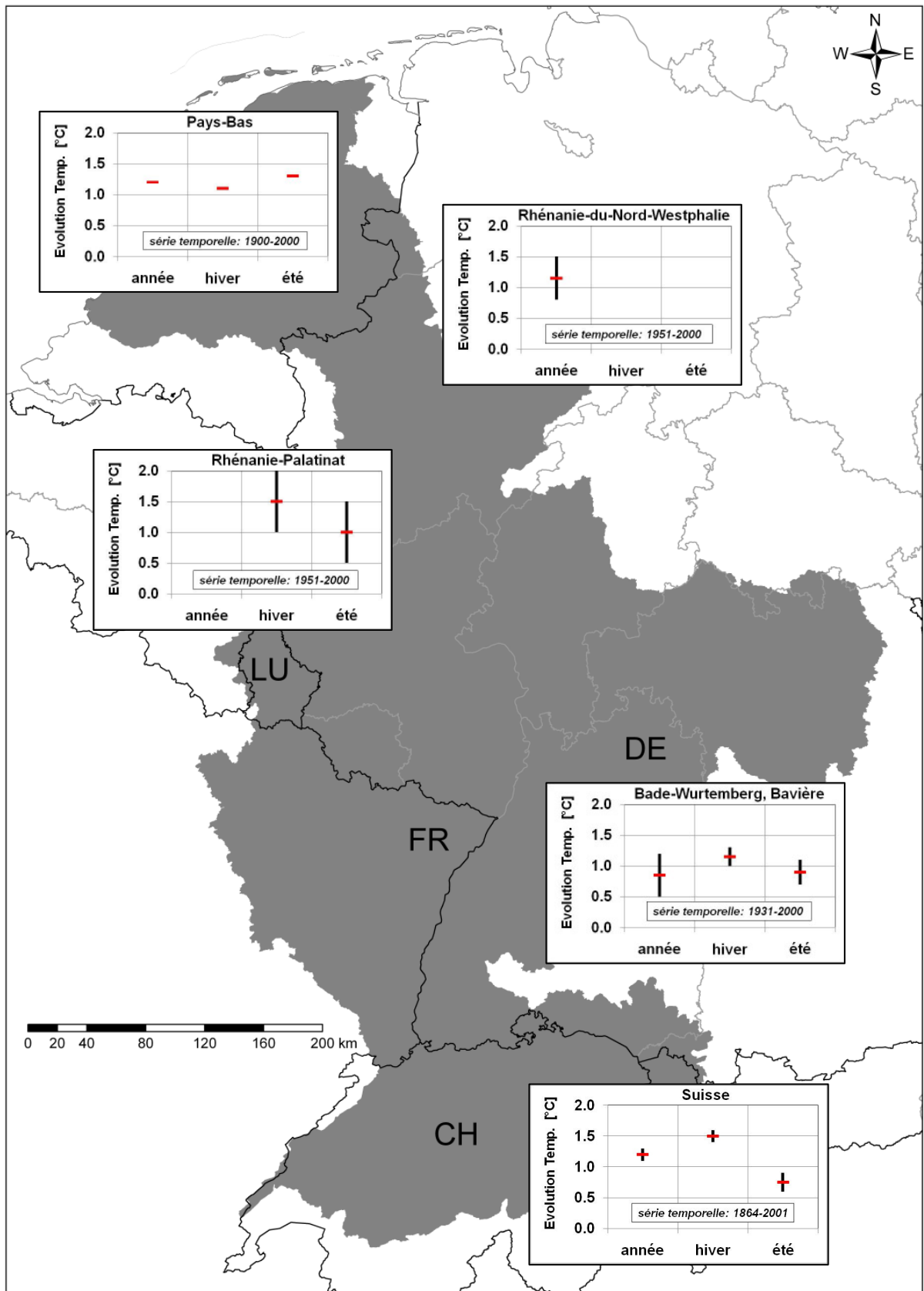


Figure 2 : Modifications de la température de l'air (moyenne, minimale et maximale) dans le bassin du Rhin au XXème siècle sur l'hiver et l'été météorologiques et sur l'année (basées sur des données hétérogènes (Bader & Bantle 2004, MeteoSchweiz 2008, KLIWA 2005a, KLIWA 2008a, KNMI 2008, LUWG 2007, LÖBF 2004))

Sur de nombreuses échelles du bassin du Rhin, les analyses font apparaître une hausse des débits de crue moyens en hiver. Par contre, la tendance est moins prononcée pour les débits annuels extrêmes (valeurs HQ). On ne relève sur les échelles en Rhénanie-Palatinat, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et au Bade-Wurtemberg par ex. aucune modification sensible et systématique des HQ.

L'analyse des crues est particulièrement compliquée du fait des impacts anthropiques (par ex. l'aménagement du Rhin) et par le caractère aléatoire des différentes crues.

Dans le cas de l'étiage également, les données sont difficiles à interpréter, par ex. à cause de la construction de bassins de rétention et de dérivations. On peut au moins constater que la hausse des précipitations hivernales totales et la réduction de l'emmagasinement d'eau sous forme de neige entraînent des débits moyens plus élevés en hiver qui se traduisent par une hausse significative des valeurs d'étiage aux échelles caractérisées par un régime glacio-nival. Sur les échelles caractérisées par un régime pluvial, on relève certes une tendance à la hausse, mais pas de hausse significative des valeurs d'étiage caractéristiques.

La température naturelle de l'eau dépend pour l'essentiel des mêmes facteurs que la température de l'air. Le changement climatique a donc également contribué à faire augmenter la température de l'eau. La hausse observée de la température de l'eau d'env. 1 °C à 3 °C est toutefois impactée en grande partie par des facteurs tels que les rejets d'eau de refroidissement et l'urbanisation.

#### Estimation des impacts d'un éventuel changement climatique

L'estimation du changement climatique se fonde sur des scénarios d'émissions qui permettent de définir les futures concentrations de gaz à effet de serre, le CO<sub>2</sub> par ex. De tels scénarios d'émissions ont été élaborés dans le cadre des travaux de l'IPCC.

Parallèlement aux scénarios d'émissions, on utilise des modèles de circulation générale (MCG) pour les calculs et projections climatiques prospectifs. Les MCG simulent les processus tridimensionnels complexes survenant dans l'atmosphère ; ils sont le plus souvent combinés à un modèle océanique (modèles atmosphériques/océaniques couplés).

Les MCG fournissent à leur tour les données d'entrée pour les modèles régionaux qui permettent de tirer des enseignements régionaux sur le changement climatique (par ex. modèles régionaux WETTREG, REMO, STAR).

Les projections climatiques disponibles dans le bassin du Rhin se réfèrent souvent au MCG ECHAM4 qui utilise le scénario d'émissions B2. Dans le projet PRUDENCE qui compare différents modèles régionaux et dans le cadre de la mise au point des quatre scénarios du KNMI aux Pays-Bas, on a utilisé le modèle ECHAM4 en plus d'autres MCG.

On dispose entre-temps des calculs du MCG ECHAM 5 (scénarios d'émissions A1B, A2 et B1) qui permettent d'impulser non seulement WETTREG, REMO et STAR mais aussi le modèle CLM comme modèle régional supplémentaire. En France, on utilise le MCG ARPEGE. On attend que des projections climatiques se dégagent du projet communautaire ENSEMBLES (« Prévisions sur le changement climatique et ses effets fondées sur ENSEMBLE »).

Les données de scénario pour les précipitations peuvent également être produites par un générateur de précipitations qui fournit de nouvelles séries temporelles à partir de séries temporelles historiques retriées.

Les projections climatiques actuelles font apparaître une hausse des précipitations totales en hiver dans les prochaines 50 à 100 années (figure 3). Par contre, les précipitations estivales totales baissent.

D'ici 2050, il en découle une hausse des précipitations hivernales totales d'env. +8% pour la Suisse (déterminée à partir de PRUDENCE), de +35% au plus pour le Bade-Wurtemberg (ECHAM4-WETTREG), de +20% pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (ECHAM4-STAR) et de +4% à +11% pour les Pays-Bas (dans les quatre scénarios de KNMI).

Si l'on utilise les mêmes modèles, la baisse des précipitations estivales totales jusqu'en 2050 est de -17% pour la Suisse, -4% pour le Bade-Wurtemberg, jusqu'à -20% en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et de -10% à -19% pour les Pays-Bas (scénarios G+ et W+ du KNMI).

Ces modifications déterminées sur la base de PRUDENCE et ECHAM4 s'appliquent au scénario d'émissions B2 qui est comparable au scénario G+ du KNMI. Les différences entre les scénarios d'émissions A1B, A2, B1 et B2 sont toutefois relativement faibles jusqu'en 2050. Des différences plus importantes n'apparaissent au niveau des précipitations qu'entre les scénarios KNMI.

Le modèle ECHAM5-WETTREG ne simule une hausse comparable des précipitations hivernales totales de +19% à +30% et une baisse des précipitations estivales totales de -17% à -22% pour l'Allemagne que pour la période s'étendant jusqu'en 2100.

Au niveau des températures de l'air, les tendances découlant de l'analyse des données mesurées se poursuivent également à l'avenir. On relève des hausses de température sensibles en hiver (figure 4). Contrairement à l'analyse des valeurs mesurées, la hausse future des températures de l'air en été dépasse même la hausse des températures en hiver dans quelques calculs modélisés.

D'ici 2050, la température de l'air en hiver augmente d'env. +1,8 °C en Suisse, d'env. +2 °C au Bade-Wurtemberg, de +2,4 °C en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et de +1,1 °C à +2,3 °C aux Pays-Bas. La température de l'air en été augmente d'ici 2050 de +2,7 °C en Suisse, d'env. +1,4 °C au Bade-Wurtemberg, de +1,8 °C en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et de +1,4 °C à +2,8 °C aux Pays-Bas. On a évalué pour ce faire les mêmes calculs modélisés que pour les précipitations.

La chaîne de modèles ECHAM5-WETTREG affiche une modification de la température de l'air comparable à celle que les autres modèles prévoient d'ici 2050 uniquement pour la période allant jusqu'en 2100 (hausse de la température annuelle de l'air de +1,8 °C à +2,3 °C).

### Estimation des impacts d'un éventuel changement climatique sur le régime hydrologique

On peut utiliser les résultats des modèles régionaux pour analyser les impacts du changement climatique sur le régime hydrologique à l'aide de modèles hydrologiques. Les modèles de simulation des débits utilisés dans le bassin du Rhin sont principalement Rhineflow, HBV (tous deux combinés au modèle hydrologique SOBEK), LARSIM et WaSIM ETH (ASGi). On utilise principalement les modèles SOBEK et LARSIM-WT pour simuler la température de l'eau.

Compte tenu des projections climatiques, les résultats des modèles hydrologiques font principalement apparaître d'ici 2050 une hausse sensible des débits moyens pendant l'hiver hydrologique et une baisse des débits moyens sur l'été hydrologique.

A l'échelle de Lobith, l'augmentation maximale du débit moyen en hiver est de +16% et la baisse en été de -42% (chaîne de modèles : KNMI 2006 (scénario W+) -> HBV et Rhine-flow ; jusqu'en 2050).

Il résulte également de la chaîne de modèles ECHAM4 (scénario d'émissions B2) -> WETTREG -> LARSIM (2021-2050) des hausses sensibles des débits moyens en hiver sur les échelles bade-wurtembergeoises. Selon ces résultats, les débits moyens de crue augmentent d'env. +40% au cours de l'hiver hydrologique à l'échelle de Rockenau/Neckar, alors que les débits moyens d'étiage restent inchangés au cours de l'été hydrologique.

Les résultats des simulations font toutefois apparaître de grandes disparités régionales. Ainsi, la baisse des débits moyens d'étiage sur l'été hydrologique s'élève à -16% à l'échelle de Schwaibach/Kinzig.

L'application du modèle régional CHRM (impulsion : HadAM3H, scénario d'émissions A2, période 2071-2100 par rapport à 1961-1990) avec le modèle WaSIM fait apparaître pour l'échelle de Cologne une baisse des débits moyens en été et en automne pouvant atteindre -42% alors que les débits moyens augmentent en hiver de +14%.

On obtient un résultat comparable pour les futures modifications de débit en utilisant le modèle Rhineflow (impulsion : HadCM3 (scénario d'émissions A2 ; 2070-2099) et HadRM3H) à l'échelle de Lobith avec une baisse des débits moyens de -40% en été et une augmentation des débits moyens de +30% en hiver. Il en découle une augmentation du débit de crue centennale  $HQ_{100}$  de +10% à +30%.

Sur la base des résultats modélisés d'ECHAM4 (scénario d'émissions B2) -> WETTREG -> LARSIM (2021-2050), on a également procédé à des analyses statistiques des valeurs extrêmes des modifications du débit pour le Bade-Wurtemberg. Il en découle pour la période allant jusqu'en 2050 une hausse du  $HQ_{100}$  de +15% à + 25% (selon les régions). Le débit d'étiage centennial  $NQ_{100}$  baisse sensiblement dans les affluents du lac de Constance et dans le bassin du haut Rhin alors que l'on relève également des hausses du  $NQ_{100}$  dans d'autres régions.

En regard des hypothèses à appliquer aux scénarios d'émissions et des incertitudes affectant la chaîne de modèles depuis le modèle global jusqu'au modèle hydrologique en passant par le modèle régional, il est certainement plus fiable de tirer des enseignements sur l'évolution future des débits moyens que sur les valeurs maximales et minimales, par ex. le HQ, et notamment sur les valeurs extrêmes telles que le  $HQ_{100}$ .

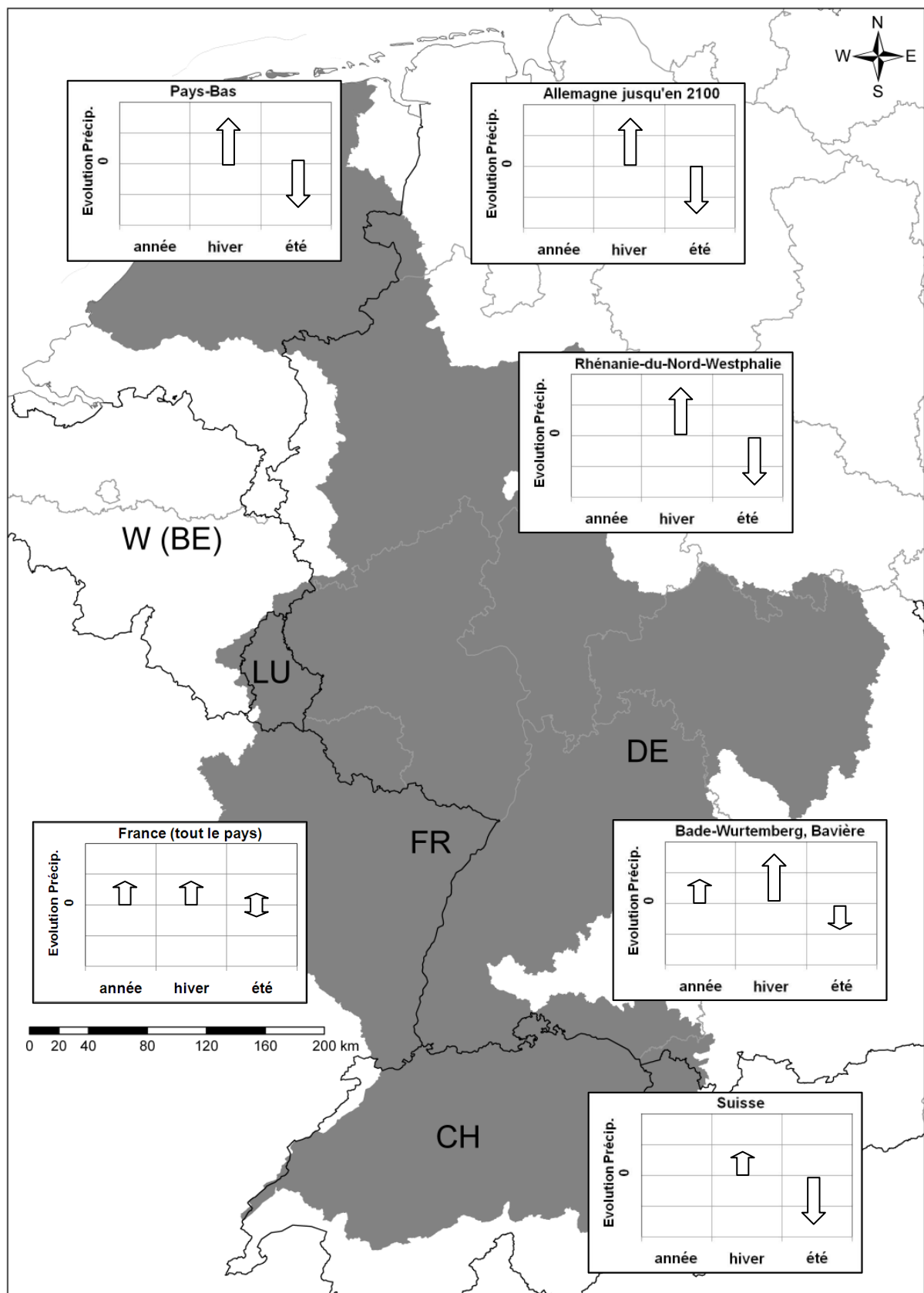


Figure 3 : Future modification envisageable des précipitations dans le bassin du Rhin jusqu'en 2050 sur l'hiver et l'été hydrologiques ainsi que sur l'année (présentation schématique basée sur des données hétérogènes (Frei 2004, KLIWA 2006c, KNMI 2006, LÖBF 2006, ONERC 2008b, ONERC 2008c, ONERC 2008d, UBA 2007a))

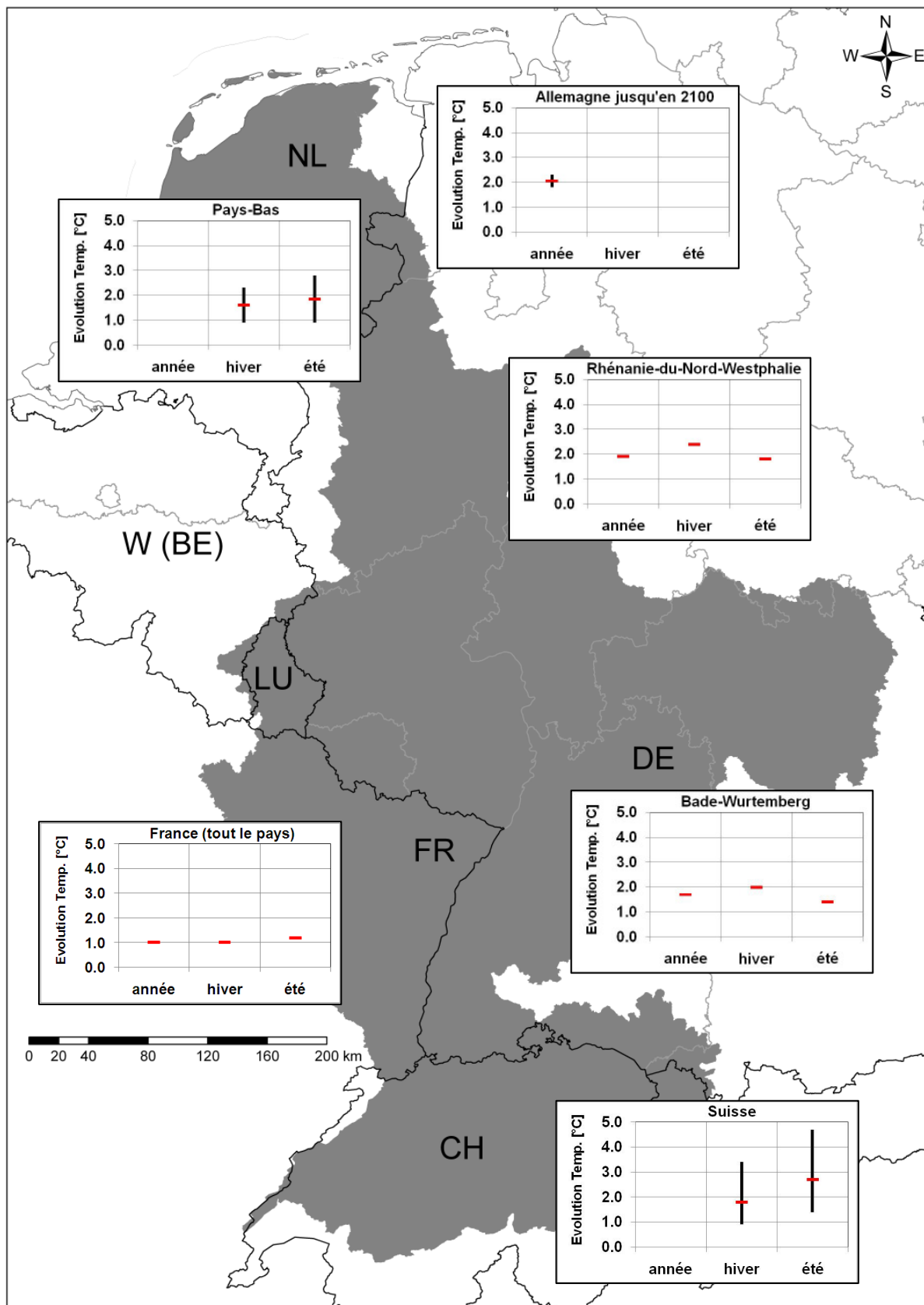


Figure 4 : Future modification envisageable de la température de l'air (valeurs minimales, moyennes et maximales) dans le bassin du Rhin jusqu'en 2050 sur l'hiver et l'été météorologiques ainsi que sur l'année (présentation schématique basée sur des données hétérogènes (Frei 2004, KLIWA 2006c, KNMI 2006, LÖBF 2006, ONERC 2008e, ONERC 2008f, ONERC 2008g, UBA 2007a))

## 1. Objet de l'étude et méthode suivie

En regard des modifications significatives observées dans les données mesurées, il est aujourd'hui reconnu que les températures augmentent globalement du fait des apports anthropiques de gaz à effet de serre. Les modifications ne se limitent pas à la température mais portent également sur d'autres paramètres climatiques, par ex. les précipitations. Le régime des eaux dans son ensemble est donc touché par les conséquences du changement climatique.

Les modifications des paramètres climatologiques dues au changement climatique varieront selon les régions. Pour cette raison, la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) a été chargée d'élaborer une étude de scénarii pour le régime hydrologique du Rhin pour que puissent être estimés les impacts régionaux du changement climatique dans le bassin du Rhin.

La CIPR a mis en place un groupe d'experts (GE) KLIMA chargé d'élaborer l'étude de scénarii. Les principales tâches du GE KLIMA ont été définies dans les termes suivants :

- Analyse synthétique du changement climatique et des modifications du régime hydrologique survenus jusqu'à présent
- Estimation des impacts d'éventuelles modifications climatiques sur le régime hydrologique aux fins d'évaluation de l'évolution future.

Les membres du groupe d'experts ont soumis des publications et documents relatifs aux connaissances actuelles sur les modifications du climat et du régime hydrologique et aux impacts du changement climatique sur le régime hydrologique dans le bassin du Rhin.

- Les informations mises à disposition par les participants sont sommairement décrites et classées en fonction de leur contenu et de l'espace géographique considéré : les informations sont classées en premier lieu selon les paramètres analysés. Dans le cadre de l'analyse du changement climatique, on examine pour l'essentiel les deux paramètres ayant un impact déterminant sur le régime hydrologique, à savoir la température de l'air et les précipitations. Pour estimer la modification du régime hydrologique, on évalue en première ligne l'hydrogramme des débits moyens (régime hydrologique) et les valeurs annuelles maximales et minimales du débit (valeurs HQ et NQ). On tient compte par ailleurs de la modification de la température de l'eau.
- Le deuxième critère consiste à classer les informations sous forme régionale. Les informations disponibles pour le bassin du Rhin dans son ensemble sont nommées en premier lieu dans la compilation. Elles sont suivies des informations régionales, en partant du cours supérieur du Rhin (Suisse) jusqu'à l'embouchure (Pays-Bas).

Le présent relevé a pour objectif de donner un aperçu des analyses actuellement disponibles dans le bassin du Rhin. Il n'est pas évalué la fiabilité de ces analyses ni tiré de conclusions de ces études. L'incertitude qui affecte notamment les résultats modélisés sur les éventuelles modifications climatiques n'est pas non plus analysée.

Les informations mises à disposition par les membres du GE KLIMA sont disponibles soit sous forme numérique soit sous forme imprimée. Certaines informations peuvent être téléchargées à partir d'internet. La délégation néerlandaise a eu l'amabilité de fournir dès à présent une compilation des informations disponibles aux Pays-Bas en anglais.



Les participants ont fourni au total 110 publications :

- Suisse : 23 publications (3 sous forme numérique, 11 sous forme imprimée, 9 sur internet)
- Bade-Wurtemberg: 16 publications (sous forme numérique)
- Rhénanie-Palatinat : 8 publications (tableau synoptique)
- Rhénanie-du-Nord-Westphalie : 6 publications (5 sous forme numérique, 1 sous forme imprimée)
- Bundesanstalt für Gewässerkunde : 8 publications (sous forme numérique)
- CIPR : 3 publications (sous forme numérique)
- Projet RheinBlick : 8 publications, 1 liste bibliographique
- France : 4 publications (1 sous forme numérique, 3 sur internet)
- Luxembourg : 4 publications (4 sous forme numérique), 1 liste bibliographique
- Pays-Bas : 30 publications (sous forme numérique), 1 synthèse.

Toutes les informations mises à disposition sont reproduites ci-dessous. Dans quelques cas, les documents mis à disposition ont été complétés par d'autres indications.

Cette compilation d'informations ne se veut pas exhaustive. Il est signalé par ailleurs que les différentes publications peuvent afficher de grandes disparités :

- Les méthodes d'évaluation appliquées pour analyser les données divergent (par ex. différentes méthodes d'analyse des tendances et de test de pertinence des modifications).
- Les périodes évaluées sont définies différemment (par ex. hiver : hiver météorologique (décembre à février) ou hiver hydrologique (Suisse : octobre à mars ; Allemagne : novembre à avril). On s'efforce dans le texte de faire au moins la différence entre hiver et été (3 mois) d'une part et hiver et été hydrologiques (6 mois) (pour autant que ceci ressorte clairement des publications).
- On note de grandes différences dans la résolution spatiale et temporelle des données (par ex. durée de la série temporelle analysée, nombre des stations de mesure).
- Il arrive fréquemment que les analyses ne se réfèrent pas au bassin du Rhin, mais à des Länder fédéraux ou d'autres unités régionales. La présente compilation s'efforce autant que possible d'affecter les résultats des différentes analyses au bassin du Rhin.
- Les résultats différenciés de différentes études parfois détaillées ne sont repris que sous une forme très abrégée.
- Les publications ont été mises au point à différentes dates. Les enseignements tirés à une date antérieure peuvent être modifiés par des connaissances plus récentes. L'actualité du document est reconnaissable à la date de la publication.
- On ne dispose d'aucune information sur la qualité des données évaluées. Ceci doit faire l'objet d'un examen critique, par ex. pour les valeurs extrêmes en situation d'étiage et de crue.

En regard de la base de données hétérogène, la comparaison des différents résultats publiés a pour principal objectif de donner une vue d'ensemble des études disponibles. Toutes les données chiffrées sont à considérer uniquement comme des valeurs indicatives.

## 2. Etudes générales sur le changement climatique dans le bassin du Rhin

### Bassin du Rhin :

- Le projet « RheinBlick2050 » de la CHR a pour objectif la mise au point de projections communes et cohérentes sur le climat et le débit pour le bassin international du Rhin, le but étant de recenser les futures modifications des paramètres hydrométéorologiques pertinents dans le bassin du Rhin. Par ailleurs, il convient de mieux comprendre les impacts sur les processus hydrologiques et hydrauliques. Le projet s'étend sur la période 2007 – 2009. Le projet est piloté par la CHR (<http://www.chr-khr.org>).
- Les impacts du changement climatique sur les voies navigables et les actions envisageables sont traités dans le projet KLIWAS (<http://kliwas.de>). On utilise des informations hydrométéorologiques tirées d'un « ensemble » de modèles climatiques pour en tirer des enseignements fiables sur l'éventail de modifications climatiques susceptibles de se produire. L'évaluation se fonde non seulement sur les modèles climatiques mais aussi sur différents produits basés sur des données d'observation. La durée du projet s'étend de 2007 à 2011. La zone couverte par le projet comprend tous les bassins internationaux s'étendant en partie sur le territoire allemand ; dans une première phase, les évaluations plus détaillées portent toutefois sur le Rhin. (BfG 2008a, BfG 2008b, Moser et al. 2008b).

L'impact du changement climatique sur la navigation est par ailleurs traité à l'exemple du Rhin dans le cadre d'un groupe de travail international (Moser et al. 2008a).

- Pour les projets KLIWAS et RheinBlick2050, des jeux de données hydrologiques pertinents sous forme de points de trame et de grille sont mis au point dans le projet partiel HYRAS pour le territoire fédéral et les parties internationales des bassins du Rhin, du Danube et de l'Elbe sur la base de données d'observation météorologiques dont la qualité a été évaluée. On obtient ainsi une base de données mesurées uniforme.
- Le projet HYMOG (« bases de modélisation hydrologiques dans le bassin du Rhin ») a pour objectif d'améliorer les bases de modélisation hydrologiques dans le bassin du Rhin (par ex. mise au point de séries de données cohérentes (valeurs horaires W et Q)) et d'ajuster les modèles hydrauliques.
- Le projet ACER (« Developing Adaptive Capacity to Extreme events in the Rhine basin ») analyse la manière dont les évolutions à long terme (changement climatique, développement socio-économique, aménagement du territoire et évolution politique) agiront sur la gestion des eaux dans le bassin du Rhin. L'objectif est de mettre au point un modèle Rhin qui permette de quantifier les futures modifications éventuelles en situation de crue et d'étiage (<http://ivm5.ivm.vu.nl/adaptation/project/acer/>).

### Suisse :

- Des groupes d'experts ont rassemblé les impacts attendus du changement climatique sur l'environnement, la société et l'économie sous la direction de « l'Organe Consultatif sur les Changements Climatiques » (OcCC) (<http://www.occc.ch>).

Le rapport de l'OcCC (2007) rassemble les connaissances dont dispose actuellement la Suisse sur le changement climatique. Ce rapport comporte également un chapitre relatif aux impacts sur la gestion des eaux.

- Sous l'angle de la Suisse, les principaux résultats du rapport de l'ONU sur le climat (IPCC 2007) sont résumés dans le document de l'OcCC (2008).
- Dans un rapport antérieur (OcCC 2003), on trouve, après une introduction à la thématique des épisodes extrêmes imputables au changement climatique (définitions et introduction aux méthodes scientifiques et bases), un relevé des connaissances sur les principales catégories d'épisodes extrêmes pour la Suisse (températures extrêmes, gel, sécheresse, incendies de forêts, fortes précipitations, grêle, crues, glissements de terrains, avalanches et tempêtes hivernales).
- Les relations et les liens entre changement climatique, environnement et société sont illustrés à l'aide d'exemples sélectionnés ; par ailleurs, il est montré dans le document de l'OFEV (2007a) comment les secteurs politique et économique réagissent à ces modifications.
- Les études sur les impacts du changement climatique sur l'économie suisse (influences nationales et internationales) montrent que les dommages économiques liés au changement climatique sont supportables (OFEV 2007b).

#### Alpes :

- Le projet achevé en 2008 « ClimChAlp » (Climate Change, impacts and adaptation strategies in the Alpine Space) avait pour objectif de renforcer la prise de conscience des populations à l'aide d'informations sur les impacts du changement climatique dans l'espace alpin. (<http://www.climchalp.org>).
- Le projet AdaptAlp (« Adaptation to Climate Change in the Alpine Space »), dont la réalisation s'étend jusqu'en 2013, vise quant à lui à recenser les impacts du changement climatique et les stratégies d'adaptation dans l'espace alpin (<http://www.adaptalp.org>).

#### Rhénanie-Palatinat, Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Les éventuelles conséquences d'un changement climatique sur le régime hydrologique dans les différents bassins fluviaux du Bade-Wurtemberg et de la Bavière sont évaluées dans le cadre du projet de coopération « KLIWA » (changement climatique et conséquences pour la gestion des eaux) des Länder fédéraux et du service météorologique allemand. Les analyses qui ont démarré en 1999 se concentrent sur les conditions climatiques actuelles et celles attendues à l'avenir. S'y rattachent les questions ayant trait à la gestion des eaux. La Rhénanie-Palatinat a rejoint le projet en 2007 (KLIWA 2006a, <http://www.kliwa.de/>).

#### Hesse :

- Les projets sur le changement climatique et ses conséquences sur la gestion des eaux en Hesse sont réalisés dans le cadre des programmes INKLIM (« programmes intégrés de protection climatique ») (Brahmer 2007, <http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/index.htm>).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Des informations sur le changement climatique et ses impacts sur la Rhénanie-du-Nord-Westphalie figurent sur le site suivant : [http://www.lanuv.nrw.de/klima/home\\_klima.htm](http://www.lanuv.nrw.de/klima/home_klima.htm).

### Allemagne :

- L'Office fédéral de l'Environnement (Umweltbundesamt – UBA) a fondé en son sein un centre de compétences KomPass (« conséquences climatiques et adaptations ») afin de mettre à disposition des informations sur la prévention du risque pour faire face au changement climatique (<http://osiris.uba.de/gisudienste/Kompass/index.htm>).

### France :

- Les ouvrages de Boé (2007) et de Terray & Braconnot (2007) donnent un aperçu des études récentes sur le changement climatique en France.
- L'ONERC (« Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique ») est représenté dans un groupe de travail interministériel chargé d'évaluer les impacts du changement climatique, les coûts liés aux dommages et les mesures d'adaptation (<http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>).

### Pays-Bas :

- Loon & Droogers (2007) donnent un aperçu de 134 projets de recherche néerlandais qui portent sur différents aspects du changement climatique et sur des stratégies d'adaptation.
- Des stratégies d'adaptation générales (également pour les crues en général) figurent sur le site internet <http://www.ruimtevoordevier.nl> ou VenW (2007a ; cité dans Wit 2008) et VenW (2007b).
- Des stratégies relatives à la gestion du risque d'inondation ont été mises au point dans le cadre du projet IRMA-SPONGE (Hooijer et al. 2001).
- Des informations sur un projet visant à mettre au point des stratégies d'adaptation au changement climatique se trouvent sur le site internet <http://www.kennisvoorklimaat.nl>, voir également Kabat et al. (2005).
- Le projet de recherche « Ruimte voor Klimaat » analyse les impacts du changement climatique et la manière de les maîtriser (<http://www.klimaatvooruimte.nl/>).
- La Commission Delta a élaboré des propositions sur les possibilités de mitiger les impacts du changement climatique sur les crues (<http://www.deltacommissie.com/>).
- MNP (2005) donne une synthèse des impacts du changement climatique sur différents aspects (également la qualité de l'eau).
- Des estimations générales des impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau figurent dans Schomaker (2007).

### Europe :

- Mise à disposition d'indices pour le suivi et l'analyse du changement climatique et mise à disposition des données journalières dans le cadre du projet ECA&D (« European Climate Assessment & Dataset ») sur le site internet : <http://eca.knmi.nl/>.

### 3. Analyse synthétique du changement climatique survenu jusqu'à présent

#### 3.1 Modifications des précipitations survenues jusqu'à présent

##### Bassin du Rhin :

- Si l'on considère le 20<sup>ème</sup> siècle, les précipitations moyennes dans le bassin du Rhin affichent des modifications dans les valeurs annuelles et, de manière encore plus prononcée, dans les valeurs semestrielles. Elles sont dues à des modifications des modèles de circulation atmosphérique. Sont particulièrement importantes dans ce contexte les situations météorologiques générales humides plus fréquentes dans les zones du bassin au relief moins prononcé situées en dehors des Alpes. Ces situations ont entraîné une hausse des précipitations annuelles totales.

Si l'on différencie les résultats par saison, on note une augmentation sensible des précipitations totales pendant l'hiver hydrologique et une légère hausse au cours de l'été hydrologique. Ces dernières se réduisent dans la partie méridionale du bassin du Rhin, car la fréquence des situations météorologiques générales plus humides n'a pas tendance à augmenter dans ces régions.

L'illustration A-1 en annexe reproduit les tendances de modification des précipitations annuelles dans différents sous-bassins du Rhin (Rhin alpin non compris) sur la série temporelle comprise entre 1901 et l'an 2000 (CHR 2007).

##### Suisse :

- Fortes tendances à la hausse du nombre de jours humides et des quantités de précipitations, notamment en hiver et au printemps (109 stations, valeurs journalières, série temporelle 1931-2000). Cette tendance ne se retrouve toutefois plus dans les périodes plus récentes 1971-2000 (Birsam et al. 2004, Birsam et al. 2005).
- Augmentation des précipitations annuelles totales au 20<sup>ème</sup> siècle de quelque 120 mm (8%), avec une augmentation très nette des précipitations totales en hiver dans la partie nord et ouest du bassin alpin (Schädler 2007a, Schädler & Weingartner 2007, Schädler 2008a).
- Hausse significative des précipitations totales (dans 4 des 9 stations, série temporelle 1865-2001) pendant l'hiver hydrologique, notamment hausse soudaine des précipitations à la fin des années 70. On n'observe aucune modification sensible des précipitations pendant l'été hydrologique ni dans les valeurs annuelles (série temporelle 1880-2001) (Bader & Bantle 2004, p. 2). On note une accumulation de fortes précipitations, notamment pendant l'été hydrologique, dans la 2<sup>ème</sup> moitié du 19<sup>ème</sup> siècle (Bader & Bantle 2004, p. 36).
- Augmentation des précipitations totales en hiver et parfois aussi des précipitations annuelles (augmentations annuelles : 7%-10%, augmentation en hiver : 16%-37%) (12 stations au nord de la crête principale des Alpes, série temporelle 1864-2000) (Begert et al. 2005).
- Augmentation des précipitations totale en hiver au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, notamment dans le nord et l'ouest de la Suisse. Pour les précipitations, les modifications à long terme ne se manifestent que lentement du fait de la grande variabilité naturelle. En Suisse, la quantité de précipitations enregistrée au cours des dernières années est identique à celle relevée sur la période 1961-1990 (Occc 2008, p. 16).

### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Dans plus de 80% des régions, on ne peut identifier aucune tendance dans l'évolution des précipitations annuelles totales (env. 2.000 stations, série temporelle 1931-1997). On observe par contre un recul des précipitations estivales totales (dû notamment à la moindre fréquence des jours caractérisés par de fortes précipitations (> 15 mm/d)) et une augmentation des précipitations hivernales totales (imputable à la hausse des précipitations journalières moyennes attendues et à une plus grande probabilité de jours caractérisés par des précipitations très élevées) (KLIWA 2005c).
- Entre 1931 et 2005, les précipitations annuelles moyennes n'augmentent que faiblement, mais on observe un net décalage de l'été hydrologique vers l'hiver hydrologique (augmentations jusqu'à 30% pendant l'hiver hydrologique, entre autres dans la vallée du Rhin) (KLIWA 2008a).
- Augmentations sensibles des niveaux des fortes précipitations (valeurs maximales des précipitations) pendant l'hiver hydrologique (415 stations, période 1931-2000). Pendant l'été hydrologique par contre, on ne relève pas de tendance uniforme. Augmentation des périodes extrêmement humides (notamment pendant l'hiver hydrologique), mais résultats moins significatifs que pour les fortes précipitations. L'augmentation des précipitations pendant l'hiver hydrologique est due à la plus grande fréquence de formes de circulation zonale et mixte (KLIWA 2006b).
- La prise en compte supplémentaire des années 2001-2005 n'a pas globalement fait apparaître de renforcement des tendances observées jusqu'à présent pour les niveaux des fortes précipitations (KLIWA 2008a).

### Rhénanie-Palatinat :

- Hausse des niveaux moyens de précipitations pendant l'hiver hydrologique (augmentation également de la fréquence des conditions de vent d'ouest dominant) (série temporelle 1954-2000). Augmentation des précipitations totales en hiver et réduction des précipitations totales en été dans la plupart des régions (LUWG 2007, p. 36-40).

### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Tendance positive des précipitations annuelles totales avec une augmentation de plus de 100 mm dans quelques régions ; pas de modifications dans d'autres régions (473 stations, série temporelle 1951-2000). Plus de précipitations en hiver. Augmentation du nombre de jours caractérisés par de fortes précipitations (> 10 mm) jusqu'à 8 jours par an et régression sensible du nombre de jours (jusqu'à 40) sans précipitation ou avec de faibles précipitations (LÖBF 2004).
- L'évolution du climat sera analysée séparément pour les grandes régions de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie et différenciée selon les saisons dans le cadre d'une étude consécutive. On ne peut identifier de tendance uniforme au niveau des précipitations annuelles du fait des disparités régionales (473 stations, série temporelle 1951-2000) (LÖBF 2006).

### Luxembourg :

- Hausse des précipitations totales (augmentation également de l'intensité et de la durée des précipitations) en hiver et baisse des précipitations totales en été (21 stations, série temporelle 1954-2000). L'augmentation des précipitations en hiver est notamment due à une plus grande fréquence de certaines conditions météorologiques venant de l'ouest (Pfister et al. 2004).

### Luxembourg, France :

- L'analyse des précipitations pendant l'hiver hydrologique en présence des situations météorologiques « cycloniques occidentales » fait apparaître une augmentation des précipitations totales, notamment à compter de 1979 (95 stations, série temporelle 1954-2000) (Droque et al. 2006).

### France :

- Augmentation des précipitations dans le Nord de la France et baisse dans le Sud en hiver (308 stations, comparaison des périodes 1900-2000 et 1950-2000) (Boé & Terray 2008).

### Pays-Bas :

- Hausse de 18% des précipitations annuelles moyennes au cours des 100 dernières années (KNMI 2008). La hausse des précipitations totales s'élève à 26% en hiver, 21% au printemps, 26% en automne et 3% en été (<http://www.knmi.nl>).
- Hausse du nombre de jours avec précipitations  $\geq 10$  mm et  $\geq 20$  mm (moyenne tirée sur 13 stations) (<http://www.knmi.nl>, cité dans Wit 2008).
- Depuis 1980, augmentation du nombre de jours avec précipitations  $\geq 10$  mm en hiver dans le bassin de la Meuse (Tu et al. 2005b).
- Tendance à la hausse des précipitations annuelles totales, notamment des précipitations totales pendant l'hiver hydrologique, pas de modifications sur l'été hydrologique. Augmentation du nombre de jours caractérisés par de fortes précipitations ( $> 15$  mm/jour) (Station De Bilt, série temporelle 1906-2003) (MNP 2005, p. 27).

### Europe :

- On relève une tendance positive au niveau du nombre de jours avec des précipitations  $\geq 20$  mm dans les stations météorologiques du bassin du Rhin (base de données : stations météorologiques européennes, série temporelle de 1946 à 2004) (<http://eca.knmi.nl/>, cité dans Wit 2008).

### 3.2 Modifications de la température de l'air survenues jusqu'à présent

#### Suisse :

- Nettes tendances positives en moyenne annuelle et sur les différentes saisons eu égard au nombre de jours avec  $t_{\min} > 0^{\circ}\text{C}$  (16 stations (série temporelle 1931-2000) et 46 stations (série temporelle 1971-2000), valeurs journalières) (Birsan et al. 2004, Birsan et al. 2005).
- Hausse de la température de  $1,3^{\circ}\text{C}$  au 20<sup>ème</sup> siècle en Suisse alémanique ( $1,6^{\circ}\text{C}$  Suisse occidentale) (moyenne globale :  $0,42^{\circ}\text{C}/100$  ans ; hémisphère nord :  $0,63^{\circ}\text{C}/100$  ans). Sautes de température au début et à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle (Schädler 2007a, Schädler & Weingartner 2007).
- Températures plus élevées pendant l'hiver hydrologique (dans 8 des 10 stations de mesure, série temporelle 1864-2001) (tendance allant de  $+1,4^{\circ}\text{C}$  à  $+1,6^{\circ}\text{C}/100$  ans), quelle que soit la hauteur de la station. Pendant l'été hydrologique, la tendance varie entre  $+0,6^{\circ}\text{C}$  et  $+0,9^{\circ}\text{C}/100$  ans. Hausse particulièrement rapide de la température à partir de 1980 (Bader & Bantle 2004, p. 18).
- Hausse de la température de l'air de  $+1,1^{\circ}\text{C}/100$  ans (série temporelle 1864-2005) ; la tendance linéaire entre 1971 et 2005 est de  $+0,49^{\circ}\text{C}/10$  ans (hémisphère nord :  $+0,32^{\circ}\text{C}/10$  ans) (MétéoSuisse 2008).
- Hausse des températures moyennes de l'air en Suisse de  $+1,5^{\circ}\text{C}$  depuis 1970 (OcCC 2008, p. 16).

#### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Hausse des températures moyennes de l'air entre  $+0,5^{\circ}\text{C}$  et  $+1,2^{\circ}\text{C}$  (354 stations, série temporelle 1931-2000), réchauffement le plus fort en décembre (augmentation variant entre  $+1,8^{\circ}\text{C}$  et  $+2,7^{\circ}\text{C}$ ). Hausse observée surtout à des altitudes jusqu'à environ 500 m au-dessus du niveau de la mer. Pendant l'hiver hydrologique, hausse de fréquence des conditions météorologiques d'ouest et de sud-ouest et baisse des conditions météorologiques hivernales froides de nord, nord-est, est et sud-est froides. Tendances uniformes moins prononcées sur l'été hydrologique (augmentations de température les plus fortes en août et octobre, comprises entre  $+0,8^{\circ}\text{C}$  et  $+1,7^{\circ}\text{C}$  dans certaines zones (KLIWA 2005a).
- Hausse sensible des températures moyennes de l'air (série temporelle 2001-2005). Renforcement des tendances positives observées dans les séries temporelles 1931-2000, notamment pendant l'été hydrologique. Sur cette longue période, la hausse des températures pendant l'hiver hydrologique (de  $+1,0^{\circ}\text{C}$  à  $+1,3^{\circ}\text{C}$ ) est supérieure à la hausse relevée au cours de l'été hydrologique (de  $+0,7^{\circ}\text{C}$  à  $+1,1^{\circ}\text{C}$ ). Augmentations observées surtout en janvier, août et décembre ; modifications peu importantes en avril, juin, septembre et novembre (KLIWA 2008a).
- La hausse de la température de l'air n'est pas due à une augmentation de la durée d'ensoleillement (26 stations, série temporelle 1931-2006). On relève dans la série temporelle 1931-2000 des tendances négatives marquantes sur la durée annuelle d'ensoleillement, ces tendances s'atténuant cependant entre 1951 et 2000 ainsi qu'en 2003 (KLIWA 2008b).



#### Rhénanie-Palatinat :

- Hausse des températures de +1°C à +2°C en hiver et de +0,5°C à +1,5°C en été et au printemps ; températures pratiquement inchangées en automne (série temporelle 1951-2000). Hausse de la température moyenne annuelle de +0,8°C (série temporelle 1901-2004) (LUWG 2007, p. 24 et suivantes).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Augmentation de la température annuelle moyenne de l'air dans certaines régions de +0,8°C à +1,5°C (217 stations, série temporelle 1951-2000). Baisse des jours de gel pouvant atteindre 20 jours/an ( la moyenne annuelle étant actuellement de 36 à 114 jours de gel). Augmentation des jours d'été pouvant atteindre 20 jours/an (la moyenne annuelle étant actuellement de 9 à 40 jours d'été en fonction de l'altitude)(LÖBF 2004).
- Augmentations peu marquantes des températures entre 1951 et 1990, mais réchauffement plus net au cours de la décennie 1991-2000 (LÖBF 2006).

#### Luxembourg :

- Augmentation du maximum journalier moyen par mois de +0,7°C sur l'année et de 1,4°C en été et en hiver. Faible hausse du minimum journalier moyen par mois (+0,3°C à +0,6°C sur l'année et env. +0,9°C en été et hiver) (5 stations, série temporelle 1949-1998) (Drogue et al. 2004).

#### Pays-Bas :

- Hausse de la température annuelle moyenne de l'air de 1,2°C ( + 1,3°C en été et +1,1°C en hiver) (série temporelle 1900-2000, station De Bilt). La tendance linéaire fait apparaître une hausse de +1,4°C/100 ans sur l'année (+1,1°C/100 ans en hiver, +1,6°C/100 ans en été) (série temporelle 1901-2007, Station De Bilt). La tendance est à peu près linéaire en été ; la tendance est en hausse sensible en hiver au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle et dépasse celle observée en été (Beersma 2008, [http://www.knmi.nl/klimaatverandering\\_en\\_broeikaseffect/klimaat\\_en\\_klimaatverandering/deel\\_4.html](http://www.knmi.nl/klimaatverandering_en_broeikaseffect/klimaat_en_klimaatverandering/deel_4.html)).
- Hausse de la température de l'air au 20<sup>ème</sup> siècle, baisse du nombre de jours froids, augmentation du nombre de jours chauds (station De Bilt) (MNP 2005, p. 25 et 26).

### **3.3 Modifications de la neige et des glaciers survenues jusqu'à présent**

#### Suisse :

- Baisse du bilan de masse, étant entendu que la situation varie fortement entre glaciers voisins (4 glaciers, série temporelle 1865-2006) (Huss et al. 2008).
- Augmentation jusqu'à env. 1980, suivie d'un recul significatif jusqu'à la fin du siècle, pour une hauteur de neige moyenne, une durée de l'enneigement et un nombre de jours avec chutes de neige (190 stations, entre 275 m et 2.540 m au-dessus du niveau de la mer, série temporelle 1931-1999). Aucune tendance pour les stations situées à une altitude supérieure à 1.300 m.

Après l'avancée maximale des glaciers en 1850 après le petit âge glaciaire, la superficie des glaciers a reculé de 40% et leur volume de quelque 50% (Schädler & Weingartner 2007, Schädler 2008a).

- Volume des glaciers passé à 45% jusqu'en 1974 et à 24% jusqu'en l'an 2000 de la valeur mesurée en 1850 dans le bassin couvert par l'échelle de Illanz (Rhin antérieur). En moyenne annuelle, le Rhin s'écoulant à hauteur de Illanz n'a cependant été alimenté en eau de fonte des glaciers que pour moins d'1% de son débit total pendant la période comprise entre 1850 et l'an 2000 (CHR 2007, Belz 2005). Globalement, les quantités d'eau emmagasinées dans les glaciers n'ont pas un poids important dans le régime hydrologique de la Suisse (Schädler 2008a).
- Baisse de l'enneigement moyen en Suisse de 50 pour cent au-dessus de 440 m et de 15 pour cent au-dessus de 2.200 m sur la période 1975 – 1999 (OcCC 2008, p. 27).
- Diminution de moitié de la superficie des glaciers et réduction des deux tiers du volume d'eau emmagasiné par les glaciers sur l'ensemble des zones alpines d'Europe (Schädler 2008a).

#### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Durée de l'enneigement, période d'enneigement, durée de la plus longue période d'enneigement, date d'apparition de la hauteur de neige maximale, persistance de l'enneigement, maintien de la couverture nivale, valeurs maximales de l'équivalent en eau : tendance négative pour tous les paramètres mentionnés à l'exception de la période d'enneigement (série temporelle 1951/52-1995/96). Affaiblissement partiel de la tendance négative à une altitude croissante (KLIWA 2005b).

## 4. Analyse synthétique des modifications du régime des eaux survenues jusqu'à présent

### 4.1 Modifications des débits survenues jusqu'à présent

#### Bassin du Rhin :

- Les débits mensuels moyens (MQ(m)) pendant l'hiver hydrologique sont en augmentation ; cette augmentation est particulièrement prononcée en février, en mars et en décembre (38 échelles, séries temporelles 1901-2000 et 1951-2000). On relève les augmentations de débit les plus nettes en février (notamment sur le Rhin moyen et le Rhin inférieur méridional). Hausses les moins prononcées : haut Rhin et cours aval du Rhin inférieur.

Baisses des MQ(m) pendant l'été hydrologique au mois d'août et de septembre au nord du Main. Les débits moyens mesurés y sont globalement plus élevés en moyenne annuelle. Nombre croissant de mois caractérisés par une réduction des débits et baisse plus prononcée des débits en été (notamment en juillet) au sud du Main. Dans cette zone, réduction de la variabilité dans une même année (décalage des débits des mois d'été vers les mois d'hiver) pour des débits annuels moyens pratiquement inchangés.

L'illustration A-1 en annexe reproduit les tendances de modification des valeurs MQ(j) aux échelles fluviales (Rhin alpin non compris) en relation avec l'évolution des précipitations annuelles dans les différents bassins sur la série temporelle comprise entre 1901 et l'an 2000 (CHR 2007).

- Le régime hydrologique mesuré à l'échelle de Bâle devient plus régulier au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Le débit minimal apparaît à présent en novembre (période 1975-2000) plutôt qu'en février (période 1900-1925). Cette baisse des débits moyens pendant l'été hydrologique et augmentation pendant l'hiver hydrologique est également manifeste à l'échelle de Cologne. Les hausses hivernales de débit imputables aux précipitations se traduisent par un élargissement de l'amplitude de variation de la courbe du régime hydrologique à hauteur des échelles situées au nord du Main (Belz 2005, Belz 2007).

#### Suisse :

- Hausse du débit annuel moyen MQ(j) depuis 1961 imputable à l'augmentation des débits en hiver et au printemps ; hausse prononcée des débits maximaux en hiver (dans environ 60-70% des stations de mesure considérées) et des débits modérés ou plus faibles au printemps (49 échelles). Lien très étroit entre les tendances observées pour les débits et l'altitude moyenne des bassins, la glaciation et le taux de couverture rocheuse (positif) de même que la profondeur moyenne des sols dans le bassin (négatif). Il en résulte une modification particulièrement prononcée du régime des bassins versants alpins (Birsan et al. 2004, Birsan et al. 2005).

#### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- On observe sur les mois d'hiver suivant 1974 une hausse des débits mensuels moyens de crue MHQ par rapport aux années précédentes (série temporelle démarrant en partie à partir de 1929) alors que la situation est pratiquement inchangée pendant les autres mois (52 échelles) (KLIWA 2002).

#### Lac de Constance :

- Baisse de la composante saisonnière (fluctuations entre les crues régulières en été et le niveau d'étiage en hiver) sur le lac de Constance depuis environ 1940. Les fluctuations annuelles ont baissé en moyenne de quelque 20% (Ostendorp et al. 2007).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- En moyenne annuelle, le débit évolue peu mais on note toutefois une tendance à la hausse pendant l'hiver hydrologique (de 5 à 10% env.) et une baisse sur l'été hydrologique (31 échelles, série temporelle démarrant en 1951). Pas de modifications des débits moyens d'étiage et de crue (MNQ, MHQ) (MUNLV 2007b, p. 27).

#### Luxembourg :

- Baisse sensible du nombre de jours caractérisés par un niveau d'étiage en raison de la hausse du débit de base consécutive à l'augmentation des précipitations hivernales (9 échelles, série temporelle 1954-2000) (Pfister et al. 2004).

#### Pays-Bas :

- L'analyse des débits (MQ(m)) à l'échelle de Lobith fait apparaître, par comparaison entre les débits mesurés entre 1911 et 1950 et ceux de la période 1951-2000, une légère augmentation de débit en hiver et au printemps (Wit et al. 2007a, p. 8).
- Si l'on considère les valeurs MQ(m), les débits en hiver ont augmenté et ceux d'été baissé sur la période 1975-2000 par rapport aux débits de périodes antérieures du 20<sup>ème</sup> siècle à l'échelle de Lobith (Rhin) (MNP 2005, p. 40).

## **4.2 Modifications des crues survenues jusqu'à présent**

#### Bassin du Rhin :

- Les hausses des valeurs annuelles maximales du débit (HQ) sont imputables à des précipitations surfaciques plus élevées pendant l'hiver hydrologique et aux fortes précipitations plus fréquentes du moins dans la partie sud du bassin (38 échelles, séries temporelles 1901-2000 et 1951-2000). D'autres processus jouent également un rôle, par ex. la modification de la durée d'écoulement des pointes de crue sur l'ensemble du réseau hydrographique de même que les impacts anthropogéniques. L'illustration A-2 en annexe reproduit les tendances de modification des valeurs HQ (Rhin alpin non compris) sur la série temporelle comprise entre 1901 et l'an 2000 (CHR 2007).
- Les résultats des statistiques des valeurs extrêmes relevées aux échelles de Maxau et de Worms, qu'à publiés le groupe de travail 'Manœuvres' de la Commission Permanente en 2001, ne sont pas différents de ceux de la Commission d'Etudes des Crues datant de 1978 (HSK 1978). Les analyses ont souligné, entre autres conclusions, que les modifications des débits HQ<sub>100</sub> et HQ<sub>200</sub> aux échelles de Maxau et de Worms (séries temporelles 1901 à 1999) n'avaient pas de cause climatologique mais étaient dues à l'aménagement du Rhin.

### Suisse :

- Dans le cadre des débats sur le changement climatique, la variabilité de la fréquence des crues remet en cause l'hypothèse d'une tendance continue (Naef 2007).
- Depuis 1500, on a identifié plus de 50 crues sur le Rhin (échelle de Bâle), mais il est difficile d'en dégager une tendance du fait de la correction des lacs subalpins, de la construction de centrales et des reboisements (Pfister 2006).

### Bade-Wurtemberg:

- Presque toutes les grandes crues relevées sur 5 échelles analysées sont déclenchées par des phases prolongées (de 6 à 23 jours) d'une situation météorologique générale de type « cyclonique occidentale » en hiver (décembre-février). Cette situation météorologique fait apparaître en hiver de nettes tendances à la hausse, autant en terme de fréquence que de durée maximale de périodes contiguës (série temporelle 1881-2005) (Caspary 2004, LUBW 2006a).

### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Pas de modification significative et systématique des débits annuels maximaux (HQ) et des débits moyens sur de longues séries temporelles. Au cours des 30 à 40 dernières années, les crues ont cependant tendance à se produire plus fréquemment ; on note également une tendance à la hausse des débits de crue et des débits moyens dans différentes régions (160 échelles, série temporelle 1932-1998) (KLIWA 2002, KLIWA 2003).
- Dans 80% des 90 échelles considérées, les HQ ont tendance à augmenter (notamment pendant l'hiver hydrologique), mais la tendance n'est significative que pour env. 40% des échelles ; par ailleurs, la variabilité spatiale est importante (série temporelle 1932-2005). Au cours de l'été hydrologique, on relève toujours pour la plupart des échelles une tendance à la baisse des valeurs HQ (29% des échelles). Par rapport à la série temporelle 1932-1998, le nombre d'échelles a baissé, de même que la netteté de cette tendance (KLIWA 2008a).

### Rhénanie-Palatinat :

- L'analyse des HQ depuis 1978 ne fait ressortir aucune tendance claire (39 échelles, série temporelle 1978-2003), ce qui explique pourquoi les cours d'eau réagissent peu aux modifications des précipitations. Toutefois, la fréquence de toutes les crues supérieures à MHQ a augmenté d'env. 25% par rapport à la série temporelle 1953-1977 et celle des débits de crue moyens de 20% (plus grande fréquence de conditions météorologiques cycloniques venant de l'ouest) (LUWG 2005, LUWG 2007 (p. 60)). Une analyse statistique sur 25 échelles a été réalisée dans le prolongement de cette étude (rapport interne (KLIWA 2007b).

### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Aucune modification significative des HQ démontrée (31 échelles, série temporelle démarrant à partir de 1951). Pour la majorité des échelles, les débits annuels maximaux observés sur les semestres affichent certes une légère tendance à la hausse pendant l'hiver hydrologique, ceci ne concerne toutefois, dans quelques rares cas, que les pointes de crue proches du débit centennal  $HQ_{100}$ , voire supérieur.

Les modifications démontrées au niveau des paramètres MHQ et HQx sur le Rhin sont dues à d'autres interventions humaines : aménagement du Rhin supérieur jusqu'en 1977 et construction d'espaces de rétention sur le Rhin supérieur et le Rhin inférieur (MUNLV 2007a).

#### Luxembourg :

- Augmentation sensible des niveaux d'eau annuels maximaux pendant l'hiver hydrologique sur la plupart des échelles (9 échelles, série temporelle 1954-2000) (Pfister et al. 2004).

#### Pays-Bas :

- Analyse de la fréquence des crues sur le Rhin (échelle de Lobith ; 1901-2003) et sur la Meuse (échelle de Borgharen ; 1911-2003) (Diermanse 2004a et 2004b, cité dans Wit 2008).
- L'analyse des jours où le débit dépasse un seuil donné dans le Rhin (échelle de Lobith) et la Meuse (échelle de Borgharen) entre 1911 et 2003 ne fait pas ressortir de tendance marquante (Liefveld & Postma 2007, p. 60).
- Les données sur les débits de la Meuse (échelle de Borgharen) entre 1911 et 2000 peuvent être simulées par modèle sans prise en compte du changement climatique (Ashagrie et al. 2006).
- Augmentation des débits annuels maximaux dans le bassin de la Meuse (plusieurs échelles) depuis 1980 à la suite de la hausse des précipitations dans le bassin (Tu et al. 2005a).

### **4.3 Modifications des étiages survenues jusqu'à présent**

#### Bassin du Rhin :

- L'augmentation des précipitations hivernales a entraîné une réduction des périodes d'étiage extrêmes, notamment là où les étiages se produisent en hiver (bassin méridional du Rhin caractérisé par un régime nival) (38 échelles, séries temporelles 1901 et 1951-2000). Pas de modifications significatives dans les massifs moyens et plaines caractérisés par un régime pluvial. L'illustration A-3 reproduit les tendances de modification des valeurs NM7Q et NM21Q (moyenne arithmétique la plus basse du débit de 7 jours ou de 21 jours consécutifs dans une période donnée) pour la série temporelle comprise entre 1901 et l'an 2000. On ne relève une augmentation significative des valeurs NMQ7 qu'aux échelles de Bâle et de Maxau (régime nival).

L'augmentation des précipitations annuelles pendant la période 1901-2000 est principalement due aux précipitations plus abondantes au cours de l'hiver hydrologique, ce qui fait plus nettement ressortir l'augmentation des valeurs d'étiage à l'échelle de Bâle. L'analyse des tendances marquant les débits d'étiage est plus impactée par des facteurs anthropogéniques dans des bassins rhénans de plus petite taille (par ex. celui de la Lippe). On note en Suisse également l'apparition d'effets saisonniers de redistribution des débits stockés (stockage d'eau en été, distribution en hiver) (volume de retenue des barrages de vallée jusqu'à Bâle : 1,9 milliard de m<sup>3</sup>).

En regard de la faible part détenue par l'ablation des glaciers dans le débit total (échelle de Bâle : 1,2% du MQ(m) en août), le « recul des glaciers » n'est pas responsable des étiages extrêmes ni des modifications des débits moyens dans le Rhin (sauf pour de petits cours à proximité immédiate des glaciers) (Belz 2005, Belz 2007, CHR 2007).

#### Suisse :

- L'étude sur la fréquence de périodes d'étiage extrêmes depuis 1540 montre que les étiages extrêmes lors de l'hiver 2005/2006 ne sont pas la conséquence du changement climatique. Au contraire, le signal climatique général est masqué par de fortes variations.

Le changement climatique et l'augmentation des températures et des précipitations qui l'accompagne font que les situations d'étiage prononcé sont plus rares au 20<sup>ème</sup> siècle. Les facteurs d'influence anthropogéniques peuvent expliquer en partie la hausse des valeurs NMQ7 à l'échelle de Bâle (série temporelle 1870 à 2006), mais la contribution estimée des centrales hydroélectriques n'est que de 14%. L'hiver 2005/2006 constitue donc une « anomalie » dans la tendance générale de débits d'étiages plus élevés imputables au changement climatique (Pfister 2006, Pfister et al. 2006, Weingartner 2007, Weingartner & Pfister 2007).

- Conséquence de la canicule de l'été 2003, la fonte des glaciers a fait gonfler les rivières alpines, alors que dans le Jura et le Mittelland les faibles débits et les températures élevées de l'eau ont mis en péril la faune piscicole (OFEV 2004).

#### Bade-Wurtemberg:

- L'évaluation de périodes sèches et de situations météorologiques générales montre que la présence de conditions de type « pont anticyclonique d'Europe centrale » pendant des périodes prolongées et successives a joué un rôle déterminant dans la formation de toutes les périodes sèches survenues en été et en phase de végétation (avril-septembre). Ces situations météorologiques générales ainsi que d'autres types « critiques » déclenchant des périodes de sécheresse présentent de fortes tendances à la hausse en termes de fréquence et de durée maximale (LUBW 2007).

#### Rhénanie-Palatinat, Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Analyse du comportement à long terme des paramètres niveau des eaux souterraines, débit de source et débit (en cours d'élaboration).

#### Pays-Bas :

- L'analyse des précipitations, températures et débits dans le bassin de la Meuse visant à déterminer les conditions à l'origine de périodes d'étiage dans la Meuse ne fait pas apparaître de fréquence plus élevée des périodes d'étiage (série temporelle 1911-2003) (Wit et al. 2007b).

#### 4.4 Modifications de la température de l'eau survenues jusqu'à présent

##### Bassin du Rhin :

- Il ressort de la comparaison des rejets thermiques 1989 et 2004 dans le Rhin que les apports thermiques anthropogéniques ont globalement diminué d'env. 7% (sans prise en compte des rejets des stations d'épuration). Si l'on ne considère que les rejets supérieurs à 200 MW dans le cours principal du Rhin, on obtient une baisse de l'ordre de 13% (CIPR 2006a).
- En raison des températures maximales d'eau > 28°C mesurées dans le Rhin lors de l'été 2003, les Etats riverains du Rhin ont pris des mesures de réduction des rejets thermiques en situation critique (CIPR 2006b).
- Du fait des rejets d'eau de refroidissement, les eaux du Rhin subissent à certains endroits des sautes de température dépassant +1,5°C. En se fondant sur des calculs de scénarios, on estime la hausse des températures de l'eau due aux rejets d'eaux de refroidissement à un ordre de grandeur compris entre +1,3 et +2,4°C à Karlsruhe. A Mayence, en aval des grands points de rejet d'eaux de refroidissement, les valeurs oscillent entre +3,7 et +6,2°C.

La marge de variation est plus étroite à Lobith avec des valeurs comprises entre +2,4 et 3,5°C. Il s'agit ici toutefois de valeurs maximales qui ne sont concevables qu'en l'absence de restrictions juridiques correspondantes.

Les restrictions de rejet se traduisent par un net recul des températures des eaux du Rhin. Par rapport au scénario de non restriction des rejets, on relève la baisse de température la plus marquante à hauteur de Mayence (-1,8°C), mais l'impact est également net à Coblenche (< -1°C) et à Lobith (<-0,9°C).

En aval de Worms, la température de l'eau baisse sous l'effet de conditions météorologiques plus favorables et d'une augmentation importante de débit apporté par les affluents (CIPR 2006c).

- On ne dispose des moyens techniques (enregistreur automatique) permettant de mesurer en continu la température de l'eau à grande échelle que depuis quelques décennies. L'évaluation de l'impact du changement climatique est un exercice complexe du fait des rejets d'eaux de refroidissement, de l'urbanisation (stations d'épuration) et de l'aménagement de barrages et de dispositifs de rétention des eaux (Webb et al. 2008).

##### Suisse :

- Au cours des décennies passées (série temporelle 1954-2006), la température de l'eau a augmenté de jusqu'à +2°C dans 7 rivières (évolution plus prononcée dans le Mittelland que dans les régions alpines), ces rivières étant également soumises à des pressions anthropiques (Schädler 2008b).
- L'analyse des températures de l'eau de 25 rivières alpines met en évidence un réchauffement substantiel entre 1978 et 2002 compris entre +0,4°C et +1,6°C. Quelques tronçons de ces cours d'eau ont ainsi évolué vers des marges de température atteignant la limite supérieure de la zone à truites (15°C). En revanche, le réchauffement permet de créer de nouveaux habitats dans des milieux aquatiques trop froids jusqu'alors.



Les températures de l'eau et de l'air présentent un modèle de variation identique et une évolution (tendancielle) à la hausse parallèle. A l'opposé, on ne note aucune tendance au cours de la même période pour les débits, ce qui amène à conclure que le réchauffement climatique contribue pour une part essentielle à l'augmentation de la température de l'eau (Hari 2004, Hari & Güttinger 2004, OcCC 2007 (p. 58)).

- On observe depuis env. 1950 dans le lac de Zurich un réchauffement des couches d'eau superficielles de +0,24°C en moyenne et des couches d'eau profondes de +0,13°C en moyenne par décennie. La phase de stabilisation de la stratification thermique est 2 à 3 semaines plus longues (OcCC 2007, p. 58).

#### Lac de Constance :

- On observe de plus en plus fréquemment dans le lac de Constance des années avec un mélange vertical des eaux particulièrement mauvais. Au printemps, la stratification thermique semble entre-temps intervenir nettement plus tôt. Les niveaux d'eau annuels moyens du lac de Constance ne font pas apparaître de modifications imputables au climat (KLIWA 2007a).
- Les températures épilimniques des eaux du lac de Constance font apparaître une hausse sensible en moyenne annuelle, notamment au cours des dernières 20 années, alors que l'on n'observe aucune tendance dans les années 1960-1970 caractérisées par de fortes fluctuations interannuelles (Ostendorp et al. 2007).

#### Rhénanie-Palatinat :

- L'analyse des températures minimales de l'eau entre 1976 et 2008 (1976-1992 : valeurs minimales sur 2 semaines, valeurs journalières minimales entre 1993-2008) dans le Rhin à hauteur de Mayence fait apparaître une augmentation de quelque +1,5°C (LUWG 2008).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Augmentation de la température de l'eau du Rhin de +1,2°C (décennie 1978/1988 par rapport à la décennie 1995/2005, station de Clèves-Kelle) (MUNLV 2007a). Tendence globale à une hausse des températures moyennes et maximales de l'eau (MUNLV 2007b).

#### Pays-Bas :

- Hausse de la température de l'eau dans le Rhin (échelle de Lobith) et la Meuse (échelle d'Eijsden) de plus de +3°C entre 1908 et 2000. Cette tendance est en partie due à des rejets (Liefveld & Postma 2007).
- Hausse de +3°C de la température de l'eau dans le Rhin (échelle de Lobith) depuis 1900, avec +2°C à mettre sur le compte du rejet d'eaux de refroidissement et +1°C sur celui du changement climatique. Tendence à une augmentation du nombre de jours où la température de l'eau dépasse 20°C et 25°C (Van der Grinten et al. 2007, cité dans Peñailillo et al. 2008).

## 5. Estimation d'un éventuel changement climatique

### 5.1 Projections climatiques pour le bassin du Rhin

Le changement climatique tient son origine de la hausse des émissions anthropogènes de gaz à effet de serre. Si l'on souhaite évaluer l'éventuel futur changement climatique, il est donc nécessaire de dresser des hypothèses sur les évolutions futures des émissions, par ex. sur la concentration de CO<sub>2</sub>. Ces hypothèses dépendent cependant d'évolutions économiques, sociales et politiques qu'il est fondamentalement impossible de prévoir.

Différents scénarios d'émissions (scénarios SRES (IPCC 2001) ont donc été définis pour prendre en compte les évolutions concevables au 21<sup>ème</sup> siècle. Ces scénarios sont subdivisés en quatre groupes principaux : A1, A2, B1 et B2.

Parallèlement aux scénarios d'émissions, on utilise des modèles de circulation générale (MCG) pour les calculs et projections climatiques prospectifs. Les MCG simulent les processus tridimensionnels complexes survenant dans l'atmosphère ; ils sont le plus souvent combinés à un modèle océanique (modèles atmosphériques/océaniques couplés (AOGCM)).

On citera comme exemples de modèles couplés de ce type le modèle ECHAM4 avec le modèle océanique OPY3 ou le modèle MCG ECHAM5 avec le modèle océanique OM. De plus, d'autres modèles sont fréquemment raccordés au modèle de circulation générale (par exemple des outils de modélisation de la neige, de la glace ou de la végétation). Pour une meilleure lisibilité, le modèle océanique raccordé à un MCG donné ne sera pas explicitement indiqué quand sera mentionné ce MCG.

Les MCG fournissent à leur tour les données d'entrée pour les modèles régionaux qui permettent de tirer des enseignements régionaux sur le changement climatique (par ex. modèles régionaux WETTREG, REMO, STAR). Fowler et al. (2007) présentent une synthèse de l'état actuel de la désagrégation des résultats du MCG fondés sur des modèles régionaux de modélisation hydrologique.

Dans une chaîne de modélisation, les résultats des MCG combinés aux résultats des modèles consécutifs sont appelés « projections climatiques », conformément à l'IPCC DDC (2007). Il en découle qu'une « projection climatique » est une estimation climatique prospective déterminée à partir de modèles climatiques. Un « scénario climatique » est défini dans un sens plus large, car il est compris, au sens de l'IPCC DDC (2007), comme une description cohérente, homogène et plausible de l'état futur d'un système. La projection climatique est ainsi une partie intégrante du scénario climatique. Après évaluation et analyse, les projections climatiques s'intègrent dans la définition d'un scénario climatique (Moser et al. 2008b).

Les paragraphes suivants présentent les évaluations publiées de projections climatiques effectuées dans le bassin du Rhin ainsi qu'un éventail partiel de travaux en cours de réalisation.

Le tableau A-1 en annexe donne un aperçu des données modélisées tirées de projections climatiques de modèles climatiques régionaux (MCR) et de modèles climatiques globaux (MGC) ainsi que des données mesurées et des données de ré-analyse portant sur l'Europe Centrale.

### Suisse :

- Une projection climatique régionale a été déterminée (Frei 2004) à partir des résultats d'un grand nombre de calculs de modélisation climatique régionale effectués dans le cadre du projet communautaire PRUDENCE et du projet central de recherche NCCR Climate.

### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Mise au point de projections climatiques régionales pour l'Allemagne du Sud à l'aide de trois différentes méthodes (REMO, Meteo-Research (WETTREG), STAR) et en utilisant le modèle climatique global ECHAM 4, le scénario d'émissions B2 et une phase de scénario s'étendant jusqu'en 2050. Il ressort de la comparaison et de l'évaluation des trois modèles régionaux que les résultats de la méthode de Meteo-Research (WETTREG) ont été retenus en premier lieu comme base des évaluations consécutives (KLIWA 2006c).

### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Mise au point d'une projection climatique régionale et comparaison des modifications apparaissant de 2046 à 2055 par rapport aux conditions moyennes en présence dans la période d'observation 1951-2000. Les modélisations reposent sur le modèle climatique régional statistique STAR appliquant la modélisation ECHAM4 et le scénario d'émissions B2 (LÖBF 2004).
- Une étude consécutive a complété et élargi les résultats de 2004. Ici aussi, il a été fait appel au modèle climatique statistique régional STAR (LÖBF 2006).

### Allemagne :

- Sur mandat de l'Office fédéral allemand de l'environnement (Umweltbundesamt), des projections climatiques régionales ont été mises au point avec WETTREG et REMO et à l'aide du modèle climatique global ECHAM5, des scénarios d'émissions A1B, A2 et B1 et d'une phase de scénario s'étendant jusqu'en 2100 (UBA 2007a, UBA 2007b). On dispose également entre-temps de résultats du modèle CLM (<http://www.clm-community.eu>). Le tableau 1 donne un aperçu de la méthode de régionalisation.

Tableau 1 : Aperçu des méthodes courantes de régionalisation dans les recherches climatologiques allemandes (Moser et al. 2008b)

Méthode/ modèle	Impulsion (AOGCM)	Approche	Appliqué par	Sur mandat de	Année
REMO	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	dynamique	Institut Max-Planck de météorologie, Hambourg	Office fédéral allemand de l'environnement, Dessau	2006
CLM	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1, 2, 3)	dynamique	Institut Max-Planck de météorologie, Hambourg	Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche	2007
WETTREG	MPI-ECHAM5-MPI-OM (run 1)	statistique	MeteoResearch et CEC Potsdam	Office fédéral allemand de l'environnement, Dessau	2006
STAR	(MPI-ECHAM5-MPI-OM)	statistique	Institut de Postdam sur la recherche des effets du climat	Institut de Postdam sur la recherche des effets du climat	2006

## France :

- Régionalisation des résultats du modèle climatique global ARPEGE à l'aide d'une approche statistique et d'une approche dynamique. Les valeurs régionalisées sont les paramètres d'entrée pour le modèle hydrométéorologique ISBA-MODCOU. Les deux méthodes ont pu reproduire les débits observés à hauteur de 49 échelles (dont une échelle sur la Meuse et une échelle sur la Moselle) avec les données NCEP et le modèle ISBA-MODCOU (Boé 2007)
- Le projet VulNaR analyse l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines dans le fossé du Rhin supérieur. Météo-France met ici à disposition des données de scénarios sur les précipitations, la température etc. avec une trame de 8 x 8 km<sup>2</sup>. Ces données sont également utilisées comme données d'entrée dans les modèles hydrométéorologiques ISBA-MODCOU (VulNaR 2008).
- Météo-France met à disposition sur internet un simulateur climatique interactif. Il est ainsi possible de représenter pour des régions de France, entre autres, l'évolution de la température atmosphérique (minimale et maximale) ainsi que des précipitations pour la période 2050-2100 par rapport aux valeurs moyennes de la période 1960-1990 (modèle global ARPEGE, scénarios d'émissions A2 et B2). ([http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/simulateur](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/simulateur)).
- Sous l'égide des CIPMS, le projet INTERREG-IVA intitulé FLOW MS est lancé dans le bassin de la Moselle en 2009. Ce projet vise à améliorer la prévention des inondations, notamment en renforçant l'information préventive des particuliers, en réduisant les dommages potentiels et en créant un système de gestion des étiages. L'évolution de ces phénomènes va être analysée à l'aide de différentes projections climatiques.

## Pays-Bas :

- L'Institut météorologique royal des Pays-Bas (KNMI) a publié en l'an 2000 les « Waterbeheer 21<sup>st</sup> eeuw scenarios ». Le KNMI a présenté en 2006 quatre nouveaux scénarios climatiques pour les Pays-Bas mettant en évidence les changements relatifs aux températures, aux précipitations, au vent et au niveau de la mer pour la période 2036-2065 comparée à l'état réel 1976-2005.

Les scénarios ont été établis par combinaison de modèles climatiques globaux et régionaux (parmi eux le modèle régional RACMO2 mis au point à l'institut KNMI) ainsi que de séries de mesure. Les quatre scénarios climatiques sont désignés par les lettres G, G+ (modéré : hausse de 1°C de la température globale), W et W+ (chaud : hausse de 2°C de la température globale). Le signe « + » indique un changement significatif des modèles de circulation. Les scénarios climatiques G et G+ du KNMI sont comparables aux scénarios B1 et B2 du SRES alors que les scénarios W et W+ du KNMI sont plus conformes à A1 et A2 (Hurk et al. 2006, Lenderink et al. 2007; <http://www.knmi.nl/climatescenarios/index.html>).

- La référence bibliographique Kwalid et al. (2007) fournit une estimation générale des impacts du scénario KNMI06 sur la gestion des eaux.
- Des scénarios (scénarios GRADE) sont également mis à disposition grâce au générateur de précipitations stochastique mis au point par le KNMI. Les données d'entrée dans le générateur de précipitations sont la série temporelle historique (1961-1995) ou les données d'un modèle climatique régional.

Une série temporelle simulée est mise au point par resampling, des jours historiques étant utilisés plusieurs fois. Le nouvel ordre d'agencement des données permet d'obtenir également des valeurs maximales plus élevées (par ex. des sommes maximales de 4 jours). On dispose alors d'une série temporelle des précipitations et des températures étendue sur plus d'un millénaire (Wit & Buishand 2007).

#### Europe :

- On dispose de projections climatiques pour l'Europe tirés du projet PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>). On a utilisé ici une chaîne de modèles constituée des deux modèles climatiques globaux HadCM3 et ECHAM4 ainsi que de 8 modèles climatiques régionaux différents (entre autres REMO) (Christensen & Christensen 2007, Déqué et al. 2007, Jacob et al. 2007). Les scénarios A2 et B2 du SRES ont été introduits comme scénarios d'émissions. Il est apparu dans le cadre de l'utilisation des résultats des différents modèles régionaux de modélisation du débit que la sélection du modèle global moteur avait une influence plus importante que le choix du scénario d'émissions ou du modèle régional (Graham et al. 2007).
- On attend que des projections climatiques actuelles se dégagent du projet ENSEMBLES (« Prévisions sur le changement climatique et ses effets fondées sur ENSEMBLE ») (cf. également tableau A-1 dans les annexes ([www.ensembles-eu.org](http://www.ensembles-eu.org))). Dans le cadre de ce projet, des applications parallèles de modèles climatiques européens (différents modèles globaux et régionaux) sont effectuées à l'aide de données d'entrée uniformes et/ou comparables (Haylock et al. 2008). On ajoute en outre d'autres conditions générales variables (par ex. différents scénarios d'émissions). Il est possible, grâce à cet ensemble de modèles, d'affecter des marges d'incertitude et des plages de probabilité aux changements climatiques modélisés et à leurs répercussions. Le projet se fonde sur les projets communautaires antérieurs tels que PRUDENCE, MICE et STARDEX.
- Les données des modèles globaux utilisés pour le rapport du GIEC sont disponibles à l'adresse internet <http://www.ipcc-data.org>.

## 5.2 Modifications envisageables du régime des précipitations

#### Suisse :

- Les précipitations totales augmenteront d'ici 2050 dans tout le pays en hiver et diminueront en été. Sur le versant nord des Alpes, les précipitations augmenteront d'env. +8% (plage de variation comprise entre -1% et +21%) en hiver et diminueront de -17% (plage de variation comprise entre -7% et -31%) en été (Frei 2004, OcCC 2008 (p.18)).
- Les précipitations totales moyennes estivales pourraient baisser de -30% d'ici 2100 (OcCC 2008, p. 18).

#### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- En se fondant sur le modèle climatique régional WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2) pour la période comprise entre 2021 et 2050, on estime que l'augmentation des précipitations moyennes annuelles sera de l'ordre de +8% avec une plage de variation comprise entre +4% et env. +17%. Diminution du total des précipitations étendues de l'ordre de -4% au cours de l'été hydrologique en Allemagne du Sud. Augmentation des précipitations au cours de l'hiver hydrologique (jusqu'à +35%) (KLIWA 2006c).

#### Rhénanie-Palatinat :

- L'évaluation des précipitations par les projections climatiques WETTREG (impulsion ECHAM5; scénarios d'émissions A1B, B1 et A2 ; période 2071-2100) met en relief un renforcement de la hausse des niveaux de précipitations au cours de l'hiver hydrologique sur les zones situées rive gauche du Rhin, phénomène déjà observé depuis le début des années 70. Vers le milieu du siècle en outre, les niveaux de précipitations baisseront en tendance sur l'ensemble de la partie sud de la Rhénanie-Palatinat, de même que sur les zones situées rive droite du Rhin. Les différences entre les trois scénarios d'émissions sont faibles. On note pour la Rhénanie-Palatinat dans son ensemble vers la fin du siècle une légère hausse des précipitations annuelles accompagnée d'un net décalage des apports pluviaux vers l'hiver hydrologique (LUWG 2007, p. 41ff).

#### Rhénanie-Palatinat, Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Evaluation des précipitations dans les projections climatiques REMO et WETTREG (impulsion : ECHAM5) pour 11 régions KLIWA (scénarios d'émissions A1B, B1 et A2 ; périodes : 2021-2050 et 2071-2100) (en cours de réalisation).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- L'augmentation du total des précipitations observée entre 1951 et l'an 2000 se poursuit jusque vers le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle, même si cette tendance s'affaiblit quelque peu (modèle régional STAR, impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2046-2055). On note une faible régression dans un nombre restreint de régions. La modification du nombre de jours de fortes précipitations (>10 mm) est proportionnelle à celle du volume des précipitations. En revanche, le nombre de jours de faibles précipitations ou sans pluie est inversement proportionnel à l'évolution du volume des précipitations (LÖBF 2004).
- Baisse du volume des précipitations de -20% en été (de -10% à -35% selon les régions), augmentation de l'ordre de +20% en hiver et au printemps (de +0% à +35% selon les régions) (modèle régional STAR, impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2046-2055)(LÖBF 2006).

#### Allemagne :

- A partir des scénarios d'émissions B1, A1B et A2, le modèle régional WETTREG (impulsion: ECHAM5) fait ressortir des baisses du total des précipitations en été (de -17% à -22%) et des hausses en hiver (de +19% à +30%, notamment dans les régions montagneuses) (UBA 2007a, UBA 2007b).

- A partir des scénarios d'émissions B1, A1B et A2, le modèle régional REMO (impulsion : ECHAM5) fait ressortir jusqu'en 2100 des baisses du total des précipitations en été (jusqu'à -30% en Allemagne du sud, du sud-ouest et du nord-est). Les hivers sont plus humides en revanche (MUNLV 2007b, p. 15).

#### France :

- Modification des précipitations par rapport à la période 1980-1999 en France (sur tout le territoire) (ARPEGE, scénario d'émissions B2) : autour de +4% (an), de +6% (hiver hydrologique) et de +0% (été hydrologique) pour la période 2040-2059. Pour la période 2080-2099 : modification de -4% (an), +4% (semestre d'hiver) et -17% (semestre d'été) (ONERC 2008a, ONERC 2008b, ONERC 2008c, ONERC 2008d).

#### Pays-Bas :

- Augmentation des précipitations hivernales totales jusqu'en 2100 de +6% à +25% (MNP 2005, p. 32).
- Selon les scénarios du KNMI, on obtient en hiver (de décembre à février) une augmentation des précipitations totales de +4% à +11% jusqu'en 2050 et de +7% à +24% d'ici 2100 (dans les quatre scénarios du KNMI). En été (de juin à août), les scénarios G et W se traduisent par des augmentations de précipitations (de +3% à +6% jusqu'en 2050, de +6% à +12% jusqu'en 2100). Les scénarios G+ et W+ débouchent en revanche sur des baisses des précipitations estivales (de -10% à -19% jusqu'en 2050, de -19% à -38% jusqu'en 2100) (KNMI 2006).

### **5.3 Modifications envisageables de la température de l'air**

#### Suisse :

- Il fera plus chaud dans toutes les régions de la Suisse et en toutes saisons d'ici 2050. On s'attend à un réchauffement de +1,8°C en hiver au nord des Alpes (plage de variation comprise entre +0,9 et +3,4°C) et à un réchauffement de +2,7°C en été (plage de variation comprise entre +1,4°C et +4,7°C) (Frei 2004).
- On s'attend d'ici 2050 en Suisse à un réchauffement d'env. +2°C en hiver et d'env. +2,5°C en été. Il est également probable que les températures estivales augmentent de +3,5°C à +7°C par rapport à la moyenne de 1980-1999 (OcCC 2008, p. 18).

#### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Augmentation de la température de l'air d'env. +1,7°C en moyenne annuelle avec env. +2°C en hiver et env. +1,4°C en été (modèle régional WETTREG, impulsion : ECHAM4, scénario B2, période 2021-2050). Augmentation du nombre de jours d'été (jours avec une  $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) et des jours chauds (jours avec une  $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) (deux fois plus de jours par an dans un grand nombre de stations). Augmentation de la durée maximale de périodes avec jours d'été pour la plupart des stations climatiques. Diminution du nombre de jours de gelée (jours avec des  $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ ) (à l'avenir, 30 jours de moins par an) et du nombre de jours glacés (jours avec des  $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ ) (moins de la moitié à l'avenir). Diminution de la durée maximale de périodes avec jours glacés (KLIWA 2006c).

#### Rhénanie-Palatinat, Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Evaluation de la température de l'air dans les projections climatiques REMO et WETTREG (impulsion : ECHAM5) pour 11 régions KLIWA (scénarios d'émissions A1B, B1 et A2 ; périodes : 2021-2050 et 2071-2100) (en cours de réalisation).

#### Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

- Augmentation de la température atmosphérique atteignant jusqu'à +1,9°C (modèle régional STAR, impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2046-2055). Cette hausse ne fait pas apparaître de variations régionales (LÖBF 2004, LÖBF 2006).
- La température augmente de +2,4°C en hiver et de +1,8°C en été. Les jours de glace et des jours de gelée sont moins fréquents alors que les jours d'été, les jours chauds et les nuits tropicales augmentent (modèle régional STAR, impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2046-2055) (LÖBF 2006).

#### Allemagne :

- Hausse de température de +1,8°C à +2,3°C en Allemagne de 2071 à 2100 (modèle régional WETTREG, impulsion : ECHAM5, scénarios d'émissions B1, A1B et A2) (UBA 2007a, UBA 2007b).
- Hausse de température de +2,5°C à +3,5°C en Allemagne jusqu'en 2100 (modèle régional WETTREG, impulsion : ECHAM5, scénarios d'émissions B1, A1B et A2). Réchauffement particulièrement accentué en hiver dans le sud et le sud-est de l'Allemagne (jusqu'à +4°C) (MNULV 2007b).

#### France :

- Hausse de la température de l'air par rapport à la période 1980-1999 en France (sur tout le territoire) (ARPEGE, scénario d'émission B2) : d'env. +1°C (sur l'année et en hiver), et de +1,2°C (été hydrologique) pour la période 2040-2059. Pour la période 2080-2099 : augmentation de +2,2°C (sur l'année), de +1,9°C (en hiver) et de +2,9°C (en été). Baisse des jours de gelée (qui passent sur l'année de 44 jours (1980-1990) à 33 jours (2040-2059) et 22 jours (2080-2099) (ONERC 2008a, ONERC 2008d, ONERC 2008e, ONERC 2008f).

#### Pays-Bas :

- Augmentation de la température atmosphérique aux Pays-Bas jusqu'en 2100 de +1°C à +6°C (MNP 2005, p. 32).
- Selon les scénarios du KNMI, on obtient en hiver (de décembre à février) une hausse des températures de +0,9°C à +2,3°C jusqu'en 2050 et de +1,8°C à +5,8°C jusqu'en 2100. Des hausses de température similaires apparaissent en été (de juin à août) (de 0,9°C à +2,8°C jusqu'en 2050, +1,7°C à +5,6°C jusqu'en 2100). Ces valeurs portent sur le changement de la température moyenne. La température minimale en hiver et maximale en été augmentent plus nettement que les températures moyennes ([http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvatting/index.html#Inhoud\\_2](http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvatting/index.html#Inhoud_2)).



## 5.4 Eventuelles modifications de la neige et des glaciers

### Suisse :

- Des calculs de modélisation montrent qu'une grande partie de la surface des glaciers alpins (env. 75%) pourrait disparaître d'ici le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle. Même en partant de scénarios optimistes, il ne restera pratiquement plus que la moitié à peine des surfaces glaciaires existantes (OcCC 2008, p. 24).
- Le volume de la couverture nivale des bassins fluviaux alpins peut baisser de 60% (modèle régional CHRM (impulsion : HadAM3H, scénario d'émissions A2, période 2071-2100 par rapport à 1961-1990) avec le modèle de bilan hydrique WaSim).

La baisse du nombre annuel de jours d'enneigement (par ex. de 50 jours à 7 jours à 1.000 m au-dessus du niveau de la mer) correspond à un décalage vertical des conditions d'enneigement d'env. 500 m. Le débit maximal des eaux de fonte de neige survient plus tôt dans l'année. La durée d'enneigement baisse d'env. 3 semaines par degré de réchauffement (Graham et al. 2007).

### Bade-Wurtemberg:

- Des calculs des hauteurs de neige effectués pour les deux stations situées dans le bassin du Rhin à l'aide des résultats du modèle régional WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2021-2050) et du modèle LARSIM font apparaître une nette baisse de la durée d'enneigement et des autres paramètres nivaux (période d'enneigement, maintien et persistance de la couverture nivale) à l'avenir (LUBW 2006b).

## 6. Estimation des impacts d'un éventuel changement climatique sur le régime hydrologique

### 6.1 Modèles de simulation des débits

On trouvera dans les annexes (tableau A-2) les modèles hydrologiques à l'aide desquels des calculs ont déjà été réalisés pour le bassin du Rhin et/ou pour des parties de ce bassin avec utilisation de données modélisées tirées de projections climatiques.

Le tableau A-3 en annexe présente à part pour les Pays-Bas les modèles hydrologiques appliqués avec utilisation de résultats de modélisations climatiques. Dans ce contexte, les trois méthodes de transposition des résultats du modèle climatique global au niveau régional (*approche directe, approche delta et désagrégation*) sont brièvement exposées.

#### Bassin du Rhin (étude suisse) :

- Sur la base de WaSiM-ETH (trame de 1 x 1 km<sup>2</sup>), des calculs ont été réalisés jusqu'à l'échelle de Cologne à l'aide de données de ré-analyse du CEPMMT ainsi que du modèle global HadAM3H (scénario d'émissions A2) et du modèle régional CHRM (Kleinn et al. 2005, Graham et al. 2007).

#### Bassin du Rhin (étude réalisée en Allemagne) :

- On a utilisé le modèle de bilan hydrique LARSIM (trame de 18 x 18 km<sup>2</sup>) et le modèle de transformation pluie-débit HBV pour les calculs de simulation (Moser et al. 2008a, Schwandt 2003, Ebel et al. 2000, Bronstert et al. 2003, Kempe & Krahe 2005).

#### Bassin du Rhin (études réalisées aux Pays-Bas) :

- La plupart des simulations hydrologiques intégrant des projections climatiques ont été réalisées aux Pays-Bas au moyen de modèles hydrologiques :
  - Rhineflow/Meuseflow (par ex. Kwadijk & Rotmanns 1995, van Deursen 1999 (cité dans Wit 2008), Deursen (2006), Middelkoop et al. (2001), Shabalova et al. (2003), Buishand & Lenderink 2004). Rhineflow est également utilisé dans la référence CHR (1997) mais d'autres modèles ont également été appliqués dans des plus petits sous-bassins du Rhin, étant donné que Rhineflow n'a une résolution très élevée ni dans le temps (valeurs mensuelles ou sur 10 jours) ni dans l'espace (trame de 3 x 3 km<sup>2</sup>).
  - Modèle HBV (cf. : <http://www.smhi.se>) (par ex. Booji (2005), Leander & Buishand 2007, Te Linde 2007).

Les projections climatiques ont principalement été générées à partir des résultats de modélisation du UK Hadley Centre (modèles HADCMx).

- Une comparaison effectuée à l'aide de calculs de modélisation pour le bassin du Rhin a montré que le modèle VIC calculait des résultats plus précis que le modèle STREAM (Hurkmans et al. 2008).

- Te Linde et al. (2008) donne la préférence au modèle HBV par rapport au modèle VIC pour l'application de projections climatiques. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ACER (source : <http://ivm5.ivm.vu.nl/adaptation/project/acer/>). Au sein du projet ACER, les études portent sur les modifications de fréquence et de niveau des crues et des étiages dans le bassin du Rhin. Sont utilisés ici le modèle hydrodynamique SOBEK, les modèles hydrologiques HBV et VIC et le modèle atmosphérique RAMS.
- Les scénarios GRADE sont transformés en hydrogrammes à l'aide du modèle de transformation pluie-débit HBV et du modèle de propagation des crues SOBEK (Wit & Buishand 2007, Lammersen & Kroekenstoel 2005, GT 'Inondations' D-NL 2004), (D-NL-WG Hoogwater 2004). GRADE a également été appliqué pour la simulation de crues dans le bassin de la Meuse (Leander et al. 2008).

#### Rhénanie-Palatinat, Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Pour les calculs de simulation, on a appliqué le modèle LARSIM comme modèle avec trame de 1 x 1 km<sup>2</sup> et comme modèle de sous-bassin (affluents du Rhin (par ex. Neckar, Nahe) et bassin du Rhin jusqu'à l'échelle de Worms. Dans le bassin bavarois du Main, on a utilisé le modèle ASGi, qui est une ancienne version du modèle WaSIM (Gerlinger 2004, KLIWA 2006c).

## **6.2 Modèles de simulation de la température de l'eau**

#### Bassin du Rhin (études réalisées aux Pays-Bas) :

- Il est possible de calculer la température de l'eau sur des segments fluviaux, comme par ex. le Rhin, à l'aide des deux modules TEMPER et HEATBAL ancrés sur le modèle hydraulique SOBEK (Peñailillo et al. 2008).

#### Suisse :

- Mise au point et intégration dans le programme AQUASIM d'un modèle de régime thermique des eaux pour les torrents (<http://www.aquasim.eawag.ch>) (Meier 2002, Meier et al. 2003).

#### Bade-Wurtemberg:

- Le modèle LARSIM-WT, né du raccordement au modèle de bilan hydrique LARSIM d'un module de calcul du bilan thermique, prend intégralement en compte le bilan énergétique (approche totalement déterministe) en intégrant de manière explicite les sources de chaleur. Le modèle est utilisé pour les prévisions opérationnelles de la température de l'eau dans le bassin du Neckar et intègre des modèles de centrales électriques et des données météorologiques mesurées et pronostiquées (Haag & Luce 2008).

### 6.3 Modifications envisageables du régime hydrologique

#### Bassin du Rhin (étude réalisée en Allemagne) :

- En utilisant HBV et LARSIM (trame de modélisation de 18 x 18 km<sup>2</sup>) avec REMO (ECHAM4, scénario d'émissions B2, période : 2021-2050), on constate une nette augmentation du débit moyen (d'env. 10% à 20%) pendant l'hiver hydrologique (échelles de Rheinfelden, Würzburg, Cochem, Cologne). Aucune tendance manifeste n'est constatée pendant l'été hydrologique (Moser et al. 2008a).

#### Bassin du Rhin (études réalisées aux Pays-Bas) :

- Aux échelles de Lobith (Rhin) et de Liège (Meuse), le débit moyen (valeurs MQ(m)) augmente pendant l'hiver hydrologique jusqu'en 2100 par rapport à l'état actuel, alors que les débits moyens de l'été hydrologique baissent à l'échelle de Lobith. A l'opposé, les modifications sont estimées plus faibles pour les valeurs MQ(m) à l'échelle de Liège pendant l'été hydrologique d'ici 2100 (MNP 2005, p. 41). On s'attend globalement à une augmentation des crues d'amplitude moyenne, les modifications de débits d'étiage étant considérées quant à elles plutôt faibles (MNP 2005, p. 45 et 46).
- L'utilisation de l'approche delta et de l'approche directe avec le modèle Rhineflow (impulsion : modèle global HadCM3 (scénario d'émissions A2 ; 2070-2099) et HadRM3H) donne un résultat comparable sur les futures modifications des débits du Rhin avec une augmentation des débits moyens de 30% pendant l'hiver hydrologique et une baisse des débits moyens de 40% pendant l'été hydrologique (Lenderink et al. 2007a).
- En appliquant le scénario W+ de KMNI'06 et le modèle HBV, on obtient à l'échelle de Lobith (Rhin) une augmentation maximale du débit hivernal moyen de 16%, alors que la baisse maximale de débit en été représente 42%. Les simulations effectuées avec le modèle Rhinflow à l'échelle de Lobith débouchent sur des valeurs comparables (Te Linde 2007, Wit et al. 2007a).
- Les scénarios KMNI'06 sont évalués dans le cadre de l'étude néerlandaise sur les étiages (cf. <http://www.droogtestudie.nl>) sous l'angle des conséquences attendues en période de basses eaux (par ex. pour la navigation) (Haas & Niemeijer 2007).

#### Bassin du Rhin (jusqu'à l'échelle de Worms) :

- Calcul et évaluation de projections climatiques WETTREG (impulsion : ECHAM5, scénario d'émissions A1B, périodes : 2021-2050 et 2036-2065) à l'aide du modèle de bilan hydrique LARSIM (trame de 1 x 1 km<sup>2</sup>) (en cours de réalisation).

#### Bassin du Rhin (jusqu'à l'échelle de Cologne) :

- L'application du modèle régional CHRM (impulsion : HadAM3H, scénario d'émissions A2, période 2071-2100 par rapport à 1961-1990) avec le modèle de bilan hydrique WaSIM fait apparaître pour l'échelle de Cologne une baisse des valeurs MQ(m) en été et en automne pouvant atteindre -42% alors que les MQ(m) peuvent augmenter en hiver de +14% (Graham et al. 2007).

### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Les calculs de débit effectués à l'aide des résultats du modèle régional WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période : 2021-2050) et du modèle LARSIM font ressortir une hausse des débits d'étiage mensuels moyens MNQ(m) (augmentation de la recharge d'eaux souterraines survenant pendant l'hiver hydrologique). On note dans le même temps une baisse sensible et régionalement variable des MNQ(m) au cours de l'été hydrologique (par ex. une baisse des MNQ(m) d'env. -16% à l'échelle de Schwaibach/Kinzig). Augmentation des débits moyens de crue (MHQ(m)), notamment au cours de l'hiver hydrologique, à hauteur de presque toutes les échelles (par ex. augmentation des MHQ(m) à l'échelle de Rockenau/Neckar d'env. +40%) (KLIWA 2006c).

### Bade-Wurtemberg:

- Les évaluations des débits d'étiage mensuels moyens MNQ(m) tirées des résultats du modèle régional WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période : 2021-2050) et du modèle LARSIM font ressortir une situation différente selon les régions pour 75 échelles du Bade-Wurtemberg. On constate en moyenne au Bade-Wurtemberg une baisse sensible du débit d'étiage mensuel moyen MNQ(m) de -14% de juillet à septembre. Les reculs les plus importants sont relevés dans le bassin du Rhin entre la Wutach (haut Rhin) et la Murg (Rhin supérieur) avec env. -30%. En dehors des mois de juillet à septembre, les baisses de MNQ(m) régressent très rapidement. Il est à prévoir que les débits d'étiage augmenteront à grande échelle au cours de l'hiver hydrologique du fait des précipitations plus abondantes attendues pendant cette période (Hennegriff et al. 2008).
- Lorsqu'on compare les tests de contrôle HadAM3P et 4 scénarios HadAM3P d'avenir (scénarios d'émissions A2 et B2), on ne constate pas d'augmentation des fréquences et des durées maximales des modèles critiques de circulation qui débouchent souvent sur des crues, de sorte qu'il n'est pas attendu de phénomène de zonage accru pendant l'hiver (LUBW 2006a).

### Rhénanie-Palatinat :

- Calcul et évaluation de projections climatiques WETTREG (impulsion : ECHAM5, scénario d'émissions A1B et A2, périodes : 2021-2050 et 2071-2100) à l'aide du modèle de bilan hydrique LARSIM dans le bassin de la Nahe (en cours de réalisation).

### Luxembourg :

- Calculs de débits au moyen de l'« Hydrological recursive Model » et en utilisant les résultats des changements des précipitations, de la température et de l'évaporation jusqu'en 2050 tels que définis dans les scénarios KNMI et UKHI (hausse du total des précipitations de +6% à +12,6% en hiver, de +15% à -1,9% en été, hausse de température de +2,4°C en hiver et de +1,9°C en été. Les débits mensuels moyens de l'hiver hydrologique augmentent de +8% à +30%, et peuvent parfois même atteindre jusqu'à +40% à hauteur de quelques échelles. Pendant l'été hydrologique, on constate des baisses d'env. -8% en moyenne. On note également de grandes différences entre les résultats des différents scénarios KNMI et UKHI (Droge et al. 2004b).

## 6.4 Modifications envisageables du régime des crues

### Bade-Wurtemberg et Bavière :

- Les hausses de débit consécutives au changement climatique amènent, après évaluation d'analyses statistiques de valeurs extrêmes, à définir pour des récurrences données des débits rehaussés par un « facteur de changement climatique ». Au Bade-Wurtemberg, on a fixé les facteurs de changement climatique de manière variable selon les régions en fonction des périodes de récurrence et en utilisant les résultats du modèle régional WETTREG (impulsion : ECHAM4 ; période : 2021 à 2050) et du modèle LARSIM.

On s'attend en particulier à une hausse sensible des crues de faible ou de moyenne amplitude. Le débit de crues centennales ( $HQ_{100}$ ) se voit attribuer un supplément de +15% à +25%. On a d'abord introduit en Bavière un facteur forfaitaire de correction de +15% pour les débits de crues de récurrences allant jusqu'à  $HQ_{100}$ , ce facteur pouvant être modifié, à l'échelle régionale également, dans des cas justifiés (LfU Baden-Württemberg 2005a, KLIWA 2006c).

### Pays-Bas :

- D'ici 2050, le débit d'une crue de récurrence de 1.250 ans augmente sur le Rhin de +3% à +10% et sur la Meuse de +5% à +20% (MNP 2005, p. 42 et 43).
- En appliquant l'approche delta et l'approche directe, on note pour le Rhin (échelle de Lobith) une augmentation du débit centennal de +10% (approche directe) ou de +30% (approche delta) (Lenderink et al. 2007a).
- Si l'on se fonde sur les scénarios climatiques KNMI06, on note que le débit attendu pour une crue de récurrence de 1.250 ans augmente de +4% à +10% à l'échelle de Lobith (Rhin) d'ici 2050 et de +8% à 22% d'ici 2100 (Wit 2007a) par rapport aux valeurs actuelles.
- A la demande de la Commission Delta, il a été déterminé que dans le cas de figure le plus « défavorable » du changement climatique, les débits extrêmes ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) attendus augmenteront de +3% à +19% d'ici 2050 et de +6% à +38% d'ici 2100 (Commission Delta 2008 (Annexe 3)).

## 6.5 Modifications envisageables des étiages

### Bade-Wurtemberg:

- Les calculs de débit effectués à l'aide des résultats du modèle régional WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période : 2021-2050) et du modèle LARSIM pour 75 échelles montrent que le débit d'étiage annuel ( $NQ(a)$ ) devrait survenir env. un mois plus tôt qu'aujourd'hui sous l'effet du changement climatique. En l'état actuel, le débit minimal annuel  $NQ$  survient dans 55% des échelles en octobre ; dans l'état futur, il devrait déjà survenir en septembre dans 65% des échelles.

On relève dans le bassin bade-wurtembergeois du Rhin une forte baisse des débits d'étiage centennaux  $NQ_{100}$  pour les affluents du lac de Constance et une nette baisse de ces débits pour le haut Rhin.

En revanche, les  $NQ_{100}$  des affluents du Rhin supérieur méridional augmentent faiblement et ceux des affluents du Rhin supérieur septentrional augmentent fortement (à partir de la Murg) (hausse des  $NQ_{100}$  de l'été hydrologique  $> +20\%$ ).

On constate également une tendance uniforme à la hausse dans les évolutions futures de la durée des périodes d'étiage (Hennegriff et al. 2008).

- Augmentation, dans le bassin du Rhin, de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse localisée dans les zones des bassins du haut Rhin et du Rhin supérieur (HadCM3, modèle hydrologique WaterGAP, scénario d'émissions IS92a, période allant jusqu'en 2070) (Lehner et al. 2001).

## 6.6 Modifications envisageables de la température de l'eau

### Suisse :

- En se fondant sur les hypothèses de trois scénarios de hausse de la température atmosphérique jusqu'en 2050 (env.  $+1^{\circ}\text{C}$ , env.  $+2,5^{\circ}\text{C}$  et env.  $+5,5^{\circ}\text{C}$ ), il a été procédé à une estimation des températures moyennes de l'eau en juillet à l'aide d'un modèle de régression simple. Il découlerait de la hausse calculée de la température de l'eau une réduction de la superficie des habitats des truites fario en Suisse de 6% à 44% d'ici 2050. Dans le cas de figure le moins avantageux, la truite fario disparaîtrait du Mittelland (Plateau suisse) (Notter 2009).
- En Suisse, les températures des eaux fluviales et des eaux superficielles des lacs du Mittelland augmenteront d'ici 2050 d'env.  $+2^{\circ}\text{C}$  par rapport à 1990 (Occc 2007 (p. 58)).

### Bade-Wurtemberg:

- Il a été effectué des premiers calculs sur l'impact du changement climatique sur la température de l'eau du Neckar à l'aide du modèle LARSIM-WT (Haag & Luce 2008) et de la projection climatique WETTREG (impulsion : ECHAM4, scénario d'émissions B2, période 2021-2050) (LfU Baden-Württemberg 2005b). Comparées à la période comprise entre 1971 et 2000, les hausses de température d'eau calculées s'élèvent en moyenne à  $+1,8^{\circ}\text{C}$ .

Les résultats obtenus pour le cours moyen du Neckar sont globalement similaires à ceux des études réalisées pour d'autres bassins (Haag 2009a, Haag 2009b). Il ressort clairement de ces travaux que des températures dépassant les  $25^{\circ}\text{C}$  seront plus fréquentes à l'avenir et qu'elles seront plus précoces dans l'année. En plus de la hausse des températures atmosphériques, on peut également supposer, à la lumière des résultats, que les modifications des conditions de rayonnement auront un impact notable sur les futures températures d'eau attendues (Haag 2009a, Haag 2009b).

- Les impacts sur les écosystèmes des hausses de température de l'eau du lac de Constance attendues sous l'effet de l'augmentation des températures de l'air sont décrits dans la référence Ostendorp et al. (2007).

## 7. Conclusions

Les documents établis indépendamment dans les différentes régions du bassin du Rhin montrent qu'un changement climatique démontré ressort nettement de l'analyse des données mesurées. Malgré le caractère hétérogène des données, qui limite une comparaison directe des résultats, des tendances concordantes d'augmentation de la température de l'air et de la température de l'eau sont reconnaissables. On constate également des évolutions au niveau des précipitations et du débit moyen qui s'expriment le plus souvent par une augmentation des précipitations et une hausse du débit moyen en hiver.

A côté de ces tendances fondamentalement similaires reproduites dans les données, on relève des différences régionales au niveau des impacts du changement climatique. Les bases de données, entre autres, sont trop hétérogènes pour autoriser une différenciation spatiale précise.

Les régions qui composent le bassin du Rhin sont plus ou moins bien prospectées par des analyses sur le changement climatique (tableau 2). Ceci s'explique en partie par la composition du groupe d'experts KLIMA. Etant donné qu'aucun représentant du Land de Hesse n'est par ex. présent dans cet organe, il n'a pas été repris d'étude venant de ce Land dans le tableau synoptique.

Tableau 2 : Aperçu synoptique des documents mis à disposition dans les différentes régions du bassin du Rhin (x = au moins une publication disponible ; - = aucune publication mise à disposition)

	Bassin du Rhin	Suisse	Bade-Wurtemberg	Rhénanie-Palatinat	France	Rhénanie-du-Nord-Westphalie	Pays-Bas
<b>Analyse des évolutions constatées jusqu'à présent</b>							
Précipitations	x	x	x	x	x	x	x
Température de l'air	-	x	x	x	-	x	x
Neige et glaciers	-	x	x	-	-	-	-
Régime hydrologique	x	x	x	-	-	-	x
Débit de crue	x	x	x	x	-	x	x
Etiage	x	x	x	-	-	x	x
Température de l'eau	x	x	-	-	-	x	x
<b>Analyse des évolutions futures</b>							
Précipitations	-	x	x	x	x	x	x
Température de l'air	-	x	x	x	x	x	x
Neige et glaciers	-	x	x	-	-	-	-
Régime hydrologique	x	x	x	x	-	-	x
Débit de crue	-	x	x	-	-	-	x
Etiage	-	-	x	-	-	-	-
Température de l'eau	-	X	x	-	-	-	-



En outre, certaines régions sont moins systématiquement analysées que d'autres. Par exemple, il n'a pas été mis à disposition de résultats sur les évolutions climatiques déjà survenues dans la partie française du bassin de la Moselle.

En revanche, les impacts du changement climatique sont très bien analysés en Suisse et aux Pays-Bas, comme l'étaient les données mesurées. En Allemagne, il convient de souligner tout particulièrement les analyses de grande ampleur réalisées dans le cadre du projet KLIWA pour déterminer les modifications de différents paramètres climatologiques. Ces analyses vont également se poursuivre sous la forme d'un suivi devant permettre de mieux appréhender la dynamique du changement climatique.

Au sein du projet KLIWA, l'accent est mis à la fois sur les évolutions climatiques passées et sur le futur changement climatique. Cette particularité constitue une exception, car la plupart des études se concentrent soit sur le passé, soit sur l'avenir. Grâce à cette observation à double orientation, il est plus aisé de vérifier si les projections climatiques reproduisent correctement l'état actuel et se raccordent de manière plausible aux tendances évolutives des données de mesure dans le scénario prospectif.

Si l'on fait exception du projet de la CHR sur les modifications du régime hydrologique du Rhin, il n'existe pas d'études coordonnées transfrontalières sur le changement climatique dans le bassin du Rhin. Avec KLIWAS et RheinBlick2050, des projets sont désormais engagés pour obtenir une vue d'ensemble du changement climatique dans le bassin du Rhin. En effet, l'accord convenu sur l'application de méthodes d'évaluation semblables et l'utilisation de séries temporelles identiques sont les conditions fondamentales requises pour que l'on puisse comparer les résultats de différents pays.

Cette remarque s'applique autant à l'analyse, à l'aide des valeurs mesurées, des évolutions climatiques passées qu'à l'évaluation du changement climatique attendu. En regard des incertitudes importantes que renferme encore la chaîne de modélisation reliant modèle global, modèle régional et modèle hydrologique, on ne peut comparer entre eux les différents résultats de modélisation que dans une mesure limitée. C'est sur cet aspect que la documentation évaluée fait apparaître les principales différences au niveau des méthodes et des résultats.

Il est donc très important qu'un accord soit trouvé sur un catalogue commun de critères d'évaluation des données mesurées (par ex. sur le type d'analyse de tendance et de tests statistiques) ainsi que de critères d'estimation de la qualité des projections climatiques et des modèles hydrologiques. Le document KLIMA(2)08-04-02 établi dans le cadre du GE KLIMA rassemble les tâches découlant de cette nécessité.

La mise au point d'études de modélisation comparatives suppose cependant une somme de travail très importante. Des avancées notables ont déjà été faites avec des projets tels que HYRAS (sur la création de données d'entrée comparables pour l'état actuel) ou PRUDENCE et ENSEMBLES (pour la comparaison des modèles globaux et régionaux).

La résolution spatiale pouvant être obtenue dans les résultats de modélisation doit être analysée. Des éventuelles imprécisions spatiales de l'ordre de 2 à 3 cases de la trame peuvent par ex. être d'un poids déterminant dans le cadre de l'analyse hydrologique de bassins fluviaux à l'aide de modèles régionaux dynamiques. Il convient de tenir compte de cet aspect dans les déclarations découlant d'études régionales, comme par ex. celles réalisées dans différents Länder fédéraux allemands, sur les futurs impacts du changement climatique dans les bassins de petite taille.

Tout comme la précision spatiale, la précision des valeurs extrêmes modélisées doit être considérée sous un angle critique. Les projections climatiques se fondent sur le développement de résultats moyens et à examiner statistiquement dans leur globalité.

Ce constat va à l'encontre du souhait d'obtenir des informations fiables sur la fréquence et l'amplitude d'événements extrêmes et rares pour en tirer des enseignements sur les questions de vulnérabilité et de stratégies d'adaptation. En regard des hypothèses à appliquer aux scénarios d'émissions et des incertitudes affectant la chaîne de modèles depuis le modèle global jusqu'au modèle hydrologique en passant par le modèle régional, il est certainement plus fiable de tirer des enseignements sur l'évolution future des débits moyens que sur les valeurs maximales et minimales, par ex. le HQ, et notamment sur les valeurs extrêmes telles que le HQ<sub>100</sub>.

Les problèmes ne se limitent pas à la modélisation de futures valeurs extrêmes mais se posent déjà au stade de leur analyse à partir des données de mesure. Les imprécisions de mesure imposent également de considérer d'un œil critique la qualité des valeurs maximales et minimales mesurées, par ex. des étiages et des crues. C'est vraisemblablement une des raisons pour lesquelles les études disponibles sont moins précises dans l'évaluation des évolutions passées et futures des valeurs maximales et minimales.

Aux problèmes de précision de mesure s'ajoute le fait que les valeurs maximales et minimales de débit sont aussi fortement modifiées par des impacts anthropiques. Au fil du temps, les débits d'étiage sont influencés par ex. par les aménagements de barrages et d'ouvrages de stockage des eaux ou par des équipements de dérivation. Dans le cas des débits de crue, il convient de citer comme facteurs d'influence l'aménagement des voies navigables et les mesures de rétention.

Il est difficile de quantifier ces impacts dans le cadre de l'évaluation des effets du changement climatique survenus jusqu'à présent. Il est nécessaire de disposer de séries temporelles épurées des impacts anthropiques pour être en mesure d'identifier le seul impact du changement climatique.

Cette remarque s'applique au débit et tout particulièrement aussi à l'évolution des températures de l'eau. Les rejets d'eaux de refroidissement, l'urbanisation (stations d'épuration) et l'aménagement de barrages et d'ouvrages de stockage des eaux font que les séries de mesure ne se prêtent à l'analyse du changement climatique que si peut être pris en compte le pourcentage imputable au réchauffement d'origine anthropique. Des modèles sont généralement requis à cette fin. De telles évaluations existent pour le Rhin mais font défaut pour ses affluents.

On a très peu utilisé jusqu'à présent des modèles de calcul de températures de l'eau dans la mise au point de scénarios prospectifs. C'est ce qui explique pourquoi aucune publication n'est disponible sur les répercussions futures du changement climatique sur la température des eaux dans le bassin du Rhin. Comme le montre le tableau 2, le nombre d'études mises à disposition sur la température de l'eau reste globalement limité.

## 8. Références bibliographiques

- Ashagrie A.G., de Laat P.J.M., de Wit M.J.M., Tu M. & Uhlenbrook S. (2006): Detecting the influence of land use changes on floods in the Meuse river basin. The predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation. - *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, p. 691-701.
- Bader S. & Bantle H. (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. - Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, p. 45. (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaentwicklung/tt\\_rr\\_1864.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaentwicklung/tt_rr_1864.html))
- Begert S., Schlegel T. & Kirchhofer W. (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. - (Synthèse disponible à l'adresse : <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109865269/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>)
- Belz J.U. (2005): Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen. - In: BfG-Veranstaltungen 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“, Koblenz, Dezember 2005, p. 113-129.
- Belz J. U. (2007): Low Flow Conditions in the Rhine Basin – Developments in the 20th Century. – In: KHR/CHR-Workshop and Expert Consultation "Low Flows and Droughts", Book of abstracts, p. 27-34. Würzburg.
- Beersma J. (2008): courriel à Herrn Buiteveld (Rijkswaterstaat) du 18.11.2008
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P. & Pfandner M. (2004): Trends in schweizerischen Abflussreihen. - *Wasser Energie Luft*, 96. Jahrgang, Heft 1/2, p. 29-38.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P. & Pfandner M. (2005): Streamflow trends in Switzerland. - *Journal of Hydrology* 314, p. 312-329.
- BfG (2008a): Das Projekt KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen, Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. - Dépliant.
- BfG (2008b): The KLIWAS project - Consequences of climate change for waterways, Options for the economy and inland navigation. - Dépliant.
- Boé J. (2007): Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. - Thèse, Université de Toulouse. (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.cerfacs.fr/globc/publication/thesis/2007/these\\_boe.pdf](http://www.cerfacs.fr/globc/publication/thesis/2007/these_boe.pdf))
- Boé J. & Terray L. (2008): A weather type approach to analysing winter precipitation in France: twentieth century trends and role of anthropogenic forcing. - *Journal of Climate* 21 (13), p. 3118ff.
- Booij M.J. (2005): Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. - *Journal of Hydrology* 303, p. 176-198.
- Brahmer H. (2007): Klimawandel und seine Konsequenzen in Hessen. - In: AK KLIWA (Hrsg): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 10, p. 211-222. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)

- Bronstert A., Bardossy A., Bismuth C., Buiteveld H., Busch N., Disse M., Engel H., Fritsch U., Hundecha Y., Lammersen R., Niehoff D. & Ritter N. (2003): LAHoR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. – Reports of the Commission for Hydrology of the River Rhine (CHR/KHR), Series II, No. 18.
- Bronstert A., Kolokotronis V., Schwandt D. & Straub H. (2007): Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis. - Int. J. Climatol., 27, p. 1579-1594.
- Buishand T.A. & Lenderink G. (2004): Estimation of future discharges of the river Rhine in the SWURVE project. - Technical Report TR -273, p. 1-43.
- Caspary H. (2004): Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. - In: AK KLIWA (Hrgs): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, p. 135-152. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- CHR (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. - CHR report Report no I-16 of the CHR, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad.
- CHR (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert 2007. - CHR Bericht Nr. I-22, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Lelystad.
- CIPR (2006a) : Comparaison des rejets thermiques de 1989 et de 2004 le long du Rhin. - Rapport CIPR n° 151.
- CIPR (2006b) : Mesures relatives aux pressions thermiques sur le Rhin en période de canicule et de sécheresse. - Rapport CIPR n° 152.
- CIPR (2006c) : Impact des rejets thermiques sur la température des eaux du Rhin. Rapport de la délégation néerlandaise. - Rapport CIPR S78-06.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. - Climatic Change, 81, p. 7-30.
- Deltacommissie (2008): Samenwerken met water. Een land dat leeft, werkt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie 2008. (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.deltacommissie.com/doc/advies\\_samenvatting\\_en\\_aanbevelingen.pdf](http://www.deltacommissie.com/doc/advies_samenvatting_en_aanbevelingen.pdf))
- Déqué M., Rowell D.P., Luethi D., Giorgi F., Christensen J.H., Rockel B., Jacob D., Kjellstroem E., Castro M. de & van den Hurk B.J.J.M. (2007): An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. - Climatic Change, 81, p. 53-70.
- Deursen W. van (1999): Rapportage Meuseflow 2.0. Rapportage aan Rijkswaterstaat RIZA (cité dans Wit 2008).
- Deursen W. van (2006): Rapportage Rhineflow / Meuseflow. Nieuwe KNMI scenario's mei 2006. - Carthago Consultancy, Rotterdam, The Netherlands.
- Diermanse F.L.M. (2004a): HR2006-herberekening werklijn Rijn. Rapportage project Q3623 aan RIZA, WL|Delft Hydraulics, Delft (cité dans Wit 2008).

- Diermanse F.L.M. (2004b): HR2006-herberekening werkklijn Maas. Rapportage project Q3623 aan RIZA, WL|Delft Hydraulics, Delft (cité dans Wit 2008).
- D-NL-AG Hochwasser (2004): Grenz berschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein. - Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Provincie Gelderland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Arnhem.
- D-NL-WG Hoogwater (2004): Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein. - Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Provincie Gelderland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat Arnhem.
- Droque G., Hoffmann L., Iffly J.F. & Pfister L. (2004a): Recent warming in a small region with semi-oceanic climate, 1949-1998: what is the ground truth? - *Theoretical and Applied Climatology*, 81, p. 1-10.
- Droque G., Pfister L., Leviandier L., El Idrissi A., Iffly J.-F., Humbert J. & Hoffmann L. (2004b): Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin. - *Journal of Hydrology*, 293, p. 255-269.
- Droque G., Wagner C., Mahr N., Hoffmann L. & Pfister L. (2006): Topography and recent winter rainfall regime change in temperate western european areas: a case study in the Rhine-Meuse basin. - *International Journal of Climatology*, 26, p. 785-796.
- Ebel M., Ludwig K. & Richter K.G. (2000): Mesoskalige Modellierung des Wasserhaushaltes im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM. - *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 6 (44), p. 308-312.
- Fowler H.J., Blenkinsop S. & Tebaldi C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. - *International Journal of Climatology* 27, p. 1547-1578.
- Frei C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – eine probabilistische Projektion. - (Téléchargeable   l'adresse : [http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050\\_scenario\\_d.html](http://www.occc.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html))
- Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. - Dans: AK KLIWA (Ed.): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, p. 87-102. (Téléchargeable   l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- Goergen K. (2008): Compilation by the CHR RheinBlick2050 project of the state of the art of past and future climate change and its hydrological impacts in the Rhine basin as a contribution to the IKS / EG Klima mandate.
- Graham L.P., Hagemann S., Jaun S. & Beniston M. (2007) : On interpreting hydrological change from regional climate models. - *Climatic Change*, 81, p. 97-122.
- Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H., Menzel L. & Schulla J. (1997): Auswirkungen von klimatischen Variationen von Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. - In NRP 31: Climate Change and Natural Disasters. ETH Zürich.
- Haag (2009a): Die m gliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fliessgew ssern. – WWF Deutschland (Hrsg.).

- Haag (2009b): The potential impact of climate change on stream water temperatures. – WWF Deutschland (Ed.).
- Haag I. & Luce A. (2008): The integrated water-balance and heat-temperature model LARSIM-WT. - Hydrological Processes, 22, p. 1046-1056.
- Haas S.A. de & Niemeijer A.H. (2007): Investeringsruimte voor toekomstige droogte. Verkenning van de hydrologische effecten en economische schade in de KNMI'06 klimaatscenarios. - Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Royal Haskoning, The Netherlands.
- Hagemann S. & Jacob D. (2007): Gradient in the climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. - Climatic Change, 81, p. 309-327
- Hari R. (2004): Temperaturparameter von 25 Flüssen in den 2 Perioden 1978-1987 und 1988-2002 und der Vergleich mit dem optimalen Temperaturband für Bachforellen.
- Hari R. & Güttinger H. (2004): Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978-2002 Auswertungen und grafische Darstellungen fischrelevanter Parameter. - EAWAG, Teilprojekt-Nr. 01/08.
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D. & New M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950-2006. - J. Geophys. Res. (en cours d'impression).
- Hennegriff W., Ihringer J. & Kolokotronis V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2008 (1), Nr. 6, p. 309-314.
- Hooijer A., Klijn F., Kwadijk J. & Pedroli B. (2001): Towards Sustainable Flood Risk Management in the Rhine and Meuse River Basins, Main results of the IRMA SPONGE research program. - WL|Delft Hydraulics, Delft. (Voir également <http://www.irma-sponge.org>).
- Hurkmans R. T. W., De Moel H., Aerts J. C. J. H. & Troch P. A. (2008): Water balance model versus land surface scheme to model river Rhine discharges. - Water Resour. Res., Vol. 44, doi:10.1029/2007WR006168.
- Hurk B.J.J.M. van den, Klein Tank A.M.G., Lenderink G. , Ulden A.P. van, Oldenborgh G.J. van, Katsman C.A., Brink H.W. van den, Keller F., Bessembinder J.J.F., Burgers G., Komen G.J., Hazeleger W. & Drijfhout S.S. (2006): KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. - KNMI-Publicatie: WR-2006-01, 30/5/2006, pp 82.
- Huss M., Bauder A., Funk M. & Hock R. (2008): Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. - Journal of Geophysical Research, Vol. 113, p. 1-11.
- HSK (1978): Hochwasser-Studienkommission für den Rhein - Schlussbericht.
- IPCC (2001): Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), Cambridge.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)).
- IPCC DDC (2007): Definition of Terms Used Within the Data Distribution Centre (DDC) Pages. (Disponible à l'adresse [http://www.ipcc-data.org/ddc\\_definitions.html](http://www.ipcc-data.org/ddc_definitions.html)).

- Jacob D., Barring L., Christensen O. B., Christensen J. H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Lenderink G., Rockel B., Sanchez E., Schär C.; Seneviratne S. I., Somot S., Ulden A. van & Hurk B. van den (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. - *Climatic change*, 81, p. 31-52.
- Kabat P., Vellinga P., Aerts J., Veraart J. & van Viersen W. (2005): Climate Proofing The Netherlands. – *Nature*, 438, pp 283-284 ISI 32.2.
- Kempe S. & Krahe P. (2005): Water and Biogeochemical Fluxes in the River Rhine catchment. - *Erdkunde*, Band 59, p. 216-250.
- Kleinn J., Frei C., Gurtz J., Lüthi D., Vidale P. L. & Schär C. (2005): Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. - *J. Geophys. Res.*, 110, D04102, doi:10.1029/2004JD005143
- KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 2, 98 p., Karlsruhe. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2003): Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 3, 93 p., Karlsruhe. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005a): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 5, 76 p., München. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005b): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 6, 88 p. München. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2005c): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 7, 160 p., München. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2006a): Fachlicher Rahmen für die Zusammenarbeit der Länder Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes im Vorhaben KLIWA. (Téléchargeable à l'adresse : [www.kliwa.de//index.php?pos=waswg/vorgehenskonzept](http://www.kliwa.de//index.php?pos=waswg/vorgehenskonzept))
- KLIWA (2006b): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 8, 93 p., Offenbach. (Download möglich unter <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2006c): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. - KLIWA-Heft 9. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2007a): Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. - KLIWA-Heft 11. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KLIWA (2007b): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse und mittleren Abflüsse an ausgewählten Pegeln in Rheinland-Pfalz - (Rapport interne).
- KLIWA (2008a): Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA - Monitoringbericht 2008.
- KLIWA (2008b): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. - KLIWA-Heft 12, 147 p., Offenbach. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>)
- KNMI (2006): KNMI Klimaatscenario's: Samenvatting. – (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvatting/index.html#Inhoud\\_2](http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvatting/index.html#Inhoud_2)).

- KNMI (2008): Wat weten we over het klimaat in het verleden. – (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.knmi.nl/klimaatverandering\\_en\\_broeikaseffect/klimaat\\_en\\_klimaatverandering/deel\\_4.html](http://www.knmi.nl/klimaatverandering_en_broeikaseffect/klimaat_en_klimaatverandering/deel_4.html)).
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. – Wasser Energie Luft 1, p. 55-57.
- Kwadijk J. & Rotmans J. (1995): The impact of climate change on the river Rhine: a scenario study. - Climatic Change, 30, p. 397-426.
- Kwadijk J., van Vuren S., Wierenga K. & Dijkhuis L.J. (2007): Een afwegingskader voor de keuze van klimaatscenario's in het waterbeheer. H2O 22, p. 32-35.
- Lammersen R. & Kroekenstoel D. (2005): Transboundary effects of floods along the Rhine in Northrhine-Westfalia (Germany) and Gelderland (The Netherlands). - Dans: Proceedings International Conference on Floods, from Defence to Management (J. van Alphen, E. van Beek & M. Taal, Eds.): p. 531-536. Taylor and Francis Group, London, UK.
- Leander R. & Buishand T.A. (2007): Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. - Journal of Hydrology 332, p. 487-496.
- Leander R., Buishand T.A., van den Hurk B. & De Wit M.J.M. (2008): Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. - Journal of Hydrology, 351, p. 331-343.
- Lehner B., Henrichs T., Döll P. & Alcamo J. (2001): EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. - Kassel World Water Series 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.usf.uni-kassel.de/usf/archiv/dokumente/kwws/kwws.5.en.htm>)
- Lenderink G., Buishand T.A. & van Deursen W.P.A. (2007a): Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. - Hydrology and Earth System Sciences 11, p. 1145-1159.
- Lenderink G., Ulden A. van, Hurk B. van den & Keller, F. (2007b): A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands. - Clim. Dyn., 29, p. 157-176.
- LfU Baden-Württemberg (2005a): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. - Leitfaden. 91 Seiten; Karlsruhe. (Téléchargeable à l'adresse : [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14024/?highlight=bemessung](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14024/?highlight=bemessung))
- LfU Baden-Württemberg (2005b): Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen im Mittleren Neckar. - Untersuchung des Ing.-Büros Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (rapport interne).
- Liefveld W.M. & Postma R. (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. - Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.
- LÖBF (2004): Erstellung regionaler Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen. - Bericht zum Werkvertrag der Firma BRUECKE-Potsdam und dem Landesamt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen.



- LÖBF (2006): Fortschreibung der Klimaszenarien für Nordrhein-Westfalen. - Bericht zum Werkvertrag der Firma CEC Potsdam und dem Landesamt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen.
- Loon van A.F. & Droogers P. (2007): Klimaatverandering en adaptatie. Inventarisatie onderzoeksprojecten ten behoeve van ARK. - Rapportage Future Water in opdracht van ARK en Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- LUBW (2006a): Analyse "kritischer" Wetterlagen für die Hochwasserbildung in Südwestdeutschland auf der Basis von NCEP-Reanalysen und HadAM3P-Klimamodell-daten. - Untersuchung von Prof. H. Caspary im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (rapport interne).
- LUBW (2006b): Veränderung des Abflussverhaltens in Baden-Württemberg in Folge der Klimaänderung. - Untersuchung des Ing.-Büros Dr. Ludwig im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (rapport interne).
- LUBW (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende "kritische" Wetterlagen- - Untersuchung von Prof. H. Caspary im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (rapport interne).
- LUWG (2005): Analyse der langjährigen Abflussverhältnisse im Hochwasserbereich vor dem Hintergrund eines Klimawandels. - LUWG RLP-Bericht 07/2005. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.luwg.rlp.de>)
- LUWG (2007): Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007. - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.mufv.rlp.de/fileadmin/img/inhalte/klima/KlimaberichtRLP2007.pdf>)
- LUWG 2008: Zusammenstellung der Minima der Wassertemperatur des Rheins bei Mainz. (Interner Bericht)Meier W.K. (2002): Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. - Diss. ETH Nr. 14'526. Ökostrom Publikationen Band 11.
- Meier W.K., Bonjour C., Wüest A. & Reichert P. (2003): Modeling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams. - Journal of Environmental Engineering, Vol. 129, No. 8, p. 755-764.
- MeteoSchweiz (2008): Trend der Temperatur in der Schweiz. - (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaaenderung/temperaturtrend\\_schweiz.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klimaaenderung/temperaturtrend_schweiz.html))
- Middelkoop H., Daamen K., Gellens D., Grabs W., Kwadijk J., Lang H., Parmet B., Schädler B., Schulla J. & Wilke K. (2001): Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine basin. - Climate Change 49, p. 105-128.
- MNP (2005): The effect of climate change in the Netherlands. - Netherlands Environmental Assessment Agency. Report nr. 773001037. Bilthoven, The Netherlands.
- Moser H., Hawkes P., Arntsen O., Gaufres P., Mai S. & White K. (2008a): Impacts of Climate Change on Navigation. - Paper Task group 3 of PIANC - ENVICOM (non publié).
- Moser H., Krahe P., Maurer T., Nilson E., Rothstein B. & Scholten A. (2008b): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. - Schriftenreihe „Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“, DWA, Heft 24/08, p. 137-155.

- MUNLV (2007a): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie. - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MUNLV (2007b): Hintergrundpapier für eine Klimafolgenstrategie für den Geschäftsbereich des MUNLV. - Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Moser H., Hawkes P., Arntsen O., Gaufres P., Mai S. & White K. (2008a): Impacts of Climate Change on Navigation.
- Moser H., Krahe P., Maurer T., Nilson E., Rothstein B. & Scholten A. (2008b): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. - DWA.
- Naef F. (2007): Extreme Hochwasser verstehen – Beispiel aus der Schweiz. - Wiener Mitteilungen Band 206, p. 59-68.
- Nilson B. (2008): Regionale Klimaprojektionen. – Zusammenstellung im Rahmen des KLIWAS-Projekt (non publié)
- Notter B. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050 - Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. - Gas Wasser Abwasser 01/2009, p. 39-44
- OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. - (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.occc.ch/reports/Extremereignisse03/Extrem03\\_Bericht.html](http://www.occc.ch/reports/Extremereignisse03/Extrem03_Bericht.html))
- OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 - Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. - (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.proclim.ch/products/ch2050/CH2050-bericht\\_d.html](http://www.proclim.ch/products/ch2050/CH2050-bericht_d.html))
- OcCC (2008): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. - (Téléchargeable à l'adresse : <http://proclimweb.scnat.ch/Products/OcCC-IPCC/OcCC-IPCC-lowres.pdf>)
- OFEV (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. - Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=1111>)
- OFEV (2007a): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. - (Téléchargeable à l'adresse : [http://www.bafu.admin.ch/publikationen/index.html?action=show\\_thema&lang=de&id\\_thema=1](http://www.bafu.admin.ch/publikationen/index.html?action=show_thema&lang=de&id_thema=1))
- OFEV (2007b): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale und internationale Einflüsse). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/00501/index.html?lang=de>)
- ONERC (2008a): Description des expériences. - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/PdE.pdf>)
- ONERC (2008b): Indices de précipitations (année). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/AnP.pdf>)
- ONERC (2008c): Indices de précipitations (saison chaude (du 1 avril au 30 septembre)). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/SCP.pdf>)

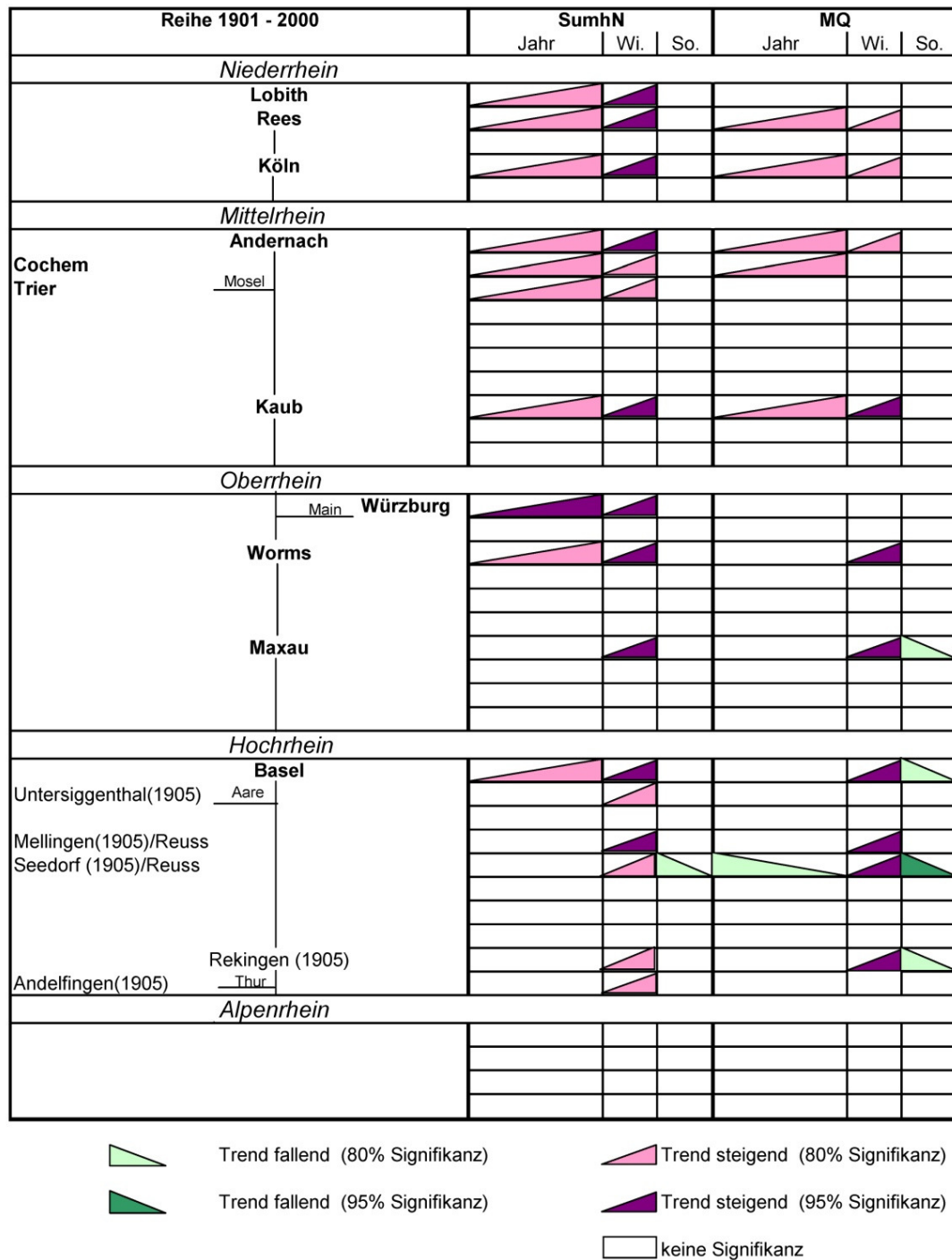
- ONERC (2008d): Indices de précipitations (saison froide (du 1 octobre au 31 mars)). – (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/SCF.pdf>)
- ONERC (2008e): Indices de température (année). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/AnT.pdf>)
- ONERC (2008f): Indices de température (été). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/ET.pdf>)
- ONERC (2008g): Indices de température (hiver). - (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/HT.pdf>)
- Ostendorp W., Brem H., Dienst M., Jöhnk K., Mainberger M., Peintinger M., Rey P., Rosknecht H., Schlichtherle H., Straile D. & Strang I. (2007): Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Bodensee. - Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, 125, p. 199-244.
- Peñailillo R., Icke J. & Jeuken A. (2008): Effects of the meteorological conditions and cooling water discharges on the water temperature of Rhine River. - 12th International Conference on Integrated Diffuse Pollution Management, Khon Kaen University, Thailand; 25-29 August 2008.
- Pfister C. (2006): Überschwemmungen und Niedrigwasser im Einzugsgebiet des Rheins 1500-2000. - Der Rhein – Lebensader einer Region, p. 265-273.
- Pfister C., Weingartner R. & Luterbacher J. (2006): Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin: a methodological approach. - Hydrol. Sciences, 51(5), p. 966-985.
- Pfister L., Drogue G., El Idrissi A., Iffly J.-F., Poirier C. & Hoffmann L. (2004): Spatial variability of trends in the rainfall-runoff relationship: A mesoscale study in the Mosel basin. - Climatic Change, 66, p. 66-87
- Schädler B. (2007a): Klimaänderung und Wasser in der Schweiz – Erwartete Auswirkungen für die Wasserwirtschaft bis 2050. – Gas Wasser Abwasser 9, p. 663-669.
- Schädler B. (2007b): Die Schweiz im Jahre 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft und auf andere wichtige Bereiche. In: AK KLIWA (Hrsg): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 10, p. 229-240. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>).
- Schädler B. & Weingartner R. (2007): Impact of 20th Century Climate Change on Water Resources in Mountainous Regions of Switzerland. - Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water, Helsinki, Finland, 3-6 September 2007, p. 411-416.
- Schädler B. (2008a): Klimawandel – geht uns das Wasser aus? – Gas Wasser Abwasser 10, p. 763-769.
- Schädler M. (2008b): Die Temperatur schweizerischer Fließgewässer – ein Überblick über die natürlichen und beeinflussten Temperaturverhältnisse in schweizerischen Fließgewässern. – OFEV (non publié)
- Schomaker A.H.H.M. (2007): Klimaatverandering en kwaliteit van oppervlaktewater. Een nationale verkenning. - Rapportage in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. Royal Haskoning, 's-Hertogenbosch, The Netherlands.

- Schulla J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. - Zürcher Geographische Schriften Heft 69.
- Schwandt D. (2003): Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rhein-Einzugsgebiets - Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien. – Dissertation Universität Potsdam.
- Shabalova M.V., van Deursen W.P.A., Buishand T.A. (2003): Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. - *Climate Research* 23, p. 233-246.
- Te Linde A.H. (2007): Effect of climate change on the discharge of the rivers Rhine and Meuse. Applying the KNMI 2006 scenarios using the HBV model. - *WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands Q4286*, p. 1-30.
- Te Linde A.H., Aerts J.C.J.H., Hurkmans R.T.W.L. & Eberle M. (2008): Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets. - *Hydrol. Earth Syst. Sci. (en cours d'impression)*.
- Terray L. & Braconnot P. (Ed.) (2007): *Livre Blanc Escime – étude des scénarios climatiques*.
- Tu M., Hall M.J., de Laat P.J.M. & de Wit M.J.M. (2005a): Extreme floods in the Meuse river over the past century: aggravated by land-use changes? - *Physics and Chemistry of the Earth*, 30 4-5, p. 267-276.
- Tu M., de Laat P.J.M., Hall M.J. & de Wit M.J.M. (2005b): Precipitation variability in the Meuse basin in relation to atmospheric circulation. - *Water Science and Technology*, 51-5, p. 5-14.
- UBA (2007a): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf>)
- UBA (2007b): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf>)
- Van der Grinten, E., van Herpen F.C.J., van Wijnen H.J., Evers C.H.M., Wuijts S. & Verweij W. (2007): Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM Rapport 607800003/2007 (cité dans Peñailillo et al. 2008).
- VenW (2007a): Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied. - Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, The Netherlands (cité dans Wit 2008).
- VenW (2007b): Safeguarding our future. The government's vision of national water policy. - Ministry of Transport, Public Works and Watermanagement, The Netherlands.
- VulNaR (2008): Vulnérabilité de l'Aquifère du Rhin Supérieur au changement climatique. (non publié).
- Webb B.W., Hannah D.M., Moore R.D., Brown L.E. & Nobilis F. (2008): Recent advances in stream and river temperature research. - *Hydrol. Process.*, 22, p. 902-918.

- Weingartner R. (2007): Der trockene Winter vor einem Jahr – atypisch für ein warmes Klima. - Neue Zürcher Zeitung online, 31.01.2007.
- Weingartner R. & Pfister C. (2007): Wie außerordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/2006 – eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51, Heft 1, P. 22-26.
- Wit M.J.M. de (2008): Climate change Rhine – overview of dutch studies and policy documents, prepared for the International Rhine Commission (non publié).
- Wit M.J.M. de, Buiteveld H. & van Deursen W. (2007a): Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas. - Arnhem: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA). RIZA memo: WRR/2007-006.
- Wit M.J.M. de, van den Hurk B., Warmerdam P.M.M., Torfs P.J.J.F., Roulin E. & van Deursen W.P.A. (2007b): Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. - Climatic Change, 82 (3), p. 351-372.
- Wit M.J.M. de & Buishand T.A. (2007): Generator of Rainfall And Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. - RIZA report 2007.027/ KNMI publication 218. Rijkswaterstaat RIZA, Lelystad.

## Annexes

Figure A-1: Evolution du total des précipitations régionales (SumhN) et des débits moyens (MQ) dans le bassin du Rhin (CHR 2007)

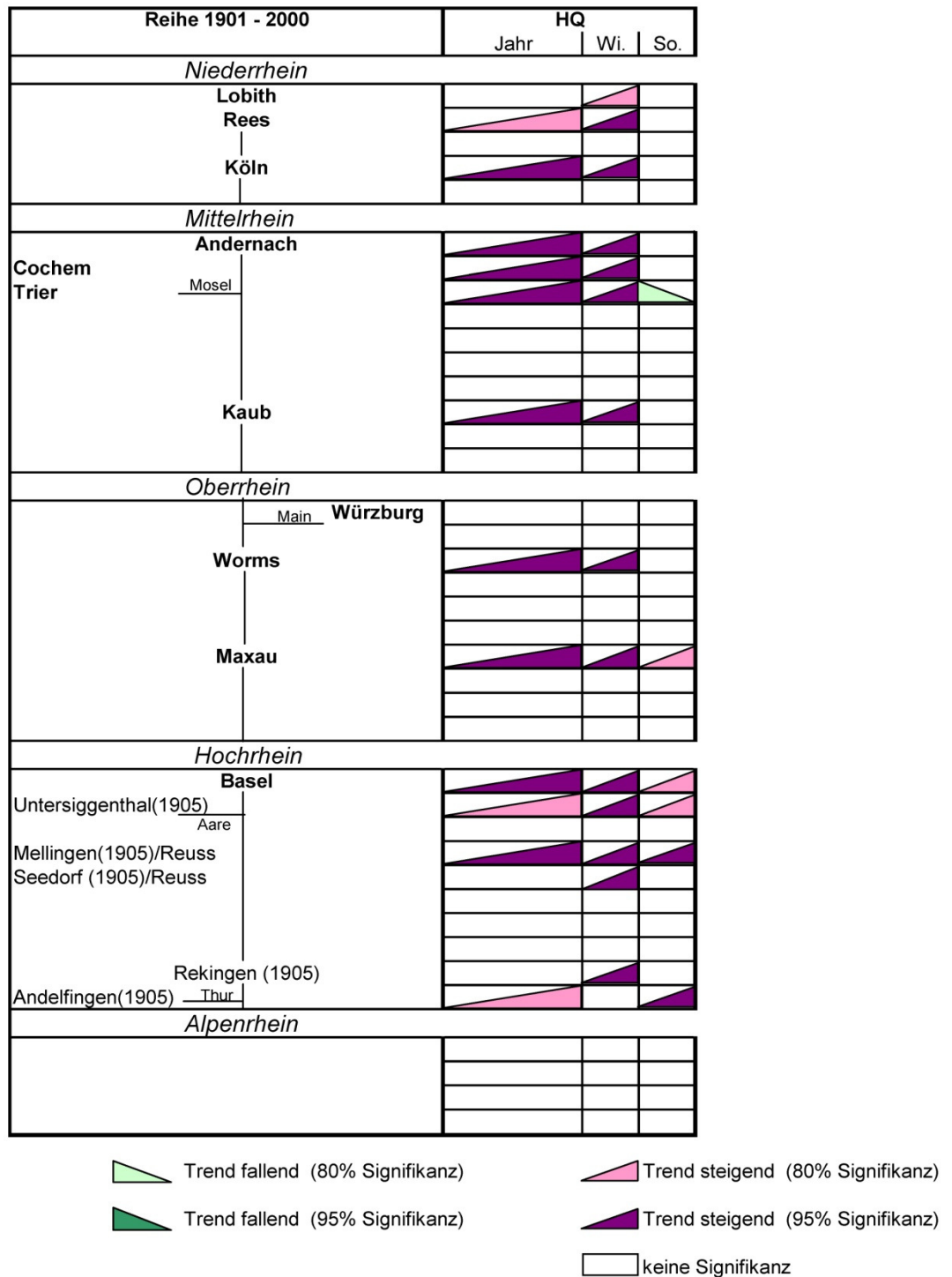


Pictogramme synoptique de l'évolution des précipitations totales (SumhN) et des débits moyens (MQ) dans le bassin du Rhin sur la période 1901-2000 (les exceptions portant sur la période d'analyse 1905-2000 sont indiquées spécifiquement)





Figure A-3 : Evolution des débits les plus élevés (HQ) dans le bassin du Rhin (CHR 2007)



Pictogramme synoptique de l'évolution des débits les plus élevés dans le bassin du Rhin, période 1901-2000 (les exceptions portant sur la période d'analyse 1905-2000 sont indiquées spécifiquement)

**Tableau A-1 : Données climatiques modélisées en Europe centrale (Nilson 2008, cité dans Goergen 2008, modifiées)**

Type	Désignation (version)	Scénarios d'impulsion Modèle (pays)	Résolution hor.	Résolution	Résolution max. dans le temps	Période max.	Constructeur du MCR (pays) Banque de données
			max.	km			
Désagrégation dynamique	CLM (2.4.11)	scénarios 20C, A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM (D) run 1, 2 et 3	0.165	18	H	1960-2100	CLM-Community (D) CERA
Modèle climatique régional (MCR)	REMO (UBA)	scénarios 20C, A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM run 1 (D)	0.088	10	H	1950-2100	MPI-M (D) CERA
Désagrégation dynamique	REMO (BFG)	scénarios 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM run 2 (D)	0.088	10	H	1950-2100	BfG, MPI-M (D)
Désagrégation statistique	STAR (2.0)	Szenario A1B (MPI-ECHAM5-MPI-OM (D))	Stations	Stations	D	2001-2055	PIK (D)
Désagrégation statistique	WETTREG (UBA)	scénarios A1B, B1, A2 MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	Stations	Stations	D	1961-2100	Meteo Research (D) CERA
Désagrégation dynamique	HIRHAM	ERA40, scénarios 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D) CNRM-CM3 (F)	0.22	25	H	1950-2100	DMI (DK) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	RCA	ERA40, scénarios 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB) NERSC-BCCR_BCM2 (US)	0.22	25	H	1950-2050	SMHI (S) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	RACMO	ERA40, scénarios 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2050	KNMI (NL) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	RegCM	ERA40, scénarios 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2050	ICTP (I) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	HadRM	ERA40, scénarios 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB) MPI-ECHAM5-MPI-OM (D)	0.22	25	H	1950-2100	METO-HC (GB) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	ARPEGE	ERA40, scénarios 20C, A1B CNRM-CM3 (F)	0.22	25	H	1950-2050	CNRM (F) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	REMO	ERA40, scénarios 20C, A1B MPI-ECHAM5-MPI-OM run 3 (D) IPSL-CM4 (CH)	0.22	25	H	1950-2100	MPI-M (D) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	PROMES	ERA40, scénarios 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB)	0.22	25	H	1950-2050	UCLM (E) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	CHRM	ERA40, scénarios 20C, A1B HADGEM1 (GB) HADCM3 (GB)	0.22	25	H	1950-2050	ETH (CH) ENSEMBLES
Désagrégation dynamique	CLM	ERA40, scénarios 20C, A1B ???	0.22	25	H	1950-2100	ETHZ, GKSS ENSEMBLES

Liste incomplète (mise à jour : été 2008). Informations sur les données actuellement disponibles : cf. <http://ensembles-eu.metoffice.com/> (banque de données ENSEMBLES) et <http://cera-www.dkrz.de/> (banque de données CERA).

**Tableau A-2 : Projections hydrologiques dans le bassin du Rhin (Nilson 2008, cité dans Goergen 2008, modifiées)**

Type	Désignation (version)	Scénarios d'impulsion Modèle climatique	Période max. (résolution)	Génération IPCC	Zone modélisée	Projet, constructeur	Bibliographie
BH	RhineFlow	UKHI (UK), XCCCC (CA) MCG interpolés à 0.5°	2050 et 2100 (M)	SAR	Rhin	Projet communautaire « Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources in the European Community » CHR	CHR (1997), Schulla (1997), Gurtz et al. (1997), Middelkoop et al. (2001)
PD	HBV (D)	ECHAM4/OPYC3_GHG, HADCM3_GGa1 désagrégation avec « méthode EDS »	2100	TAR	Moselle, Sieg, Main	Projet partiel « modélisation hydrologique » du réseau allemand de recherche sur les catastrophes naturelles (BMBF)	Schwandt (2003)
PD BH	HBV (IWS) WASiM-ETH,	ECHAM4/OPYC3 Désagrégation avec « méthode EDS » Bürger (1996)	1970-1997, 2070-2097	TAR	Rhin	Projet IRMA « Quantification de l'impact de la superficie des sols et des mesures d'aménagement du milieu aquatique sur les conditions de crue dans le bassin du Rhin (LAHoR) »	Bronstert et al. (2003)
PD BH	HBV (SMHI), LARSIM (18km)	Scenarios KLIWA, REMO	1961-2050	TAR	Rhin	RhineLUCIFS, KLIWA	Kempe & Krahe (2005)
NA	HD-Model (0.5°, 1/6°)	PRUDENCE	1961-1990, 2071-2100	TAR	Europe	EU-Projekt PRUDENCE	Hagemann & Jacob (2007)
BH	LARSIM (1 km)	ECHAM4 B2 STAR, WETTREG, REMO	1971-2000 2021-2050	TAR	Länder BW, BY, RP	AG KLIWA, BW, BY, RP, DWD (D)	Bronstert et al. (2007) Gerlinger (2004) KLIWA (2006c)
BH	LARSIM (18 km)	REMO	1961-2100	TAR	Rhin	Projet BMBF « Modèle climatique régional de prévision météorologique et hydrologique d'événements extrêmes à l'exemple du bassin du Rhin »	Ebel et al. (2000)
BH	LARSIM (1 km)	ECHAM4 B2 WETTREG, REMO	1971-2000 2021-2050	TAR	Land de Hesse	IMKLIM 2012 (HLUG)	Brahmer (2007)
BH	RhineFlow	HADRM2, HADRM3H	1950-2000, 2070-2100 (10D)	TAR		Projet SURWE « Estimation of future discharge of the river Rhine »	Buishand & Lenderink (2004)
Modèle de ressources en eau	WaterGAP (2.1), 0.5°	HADCM3	2070	TAR	Europe	Projet EUROWASSER du BMBF	Lehner et al. (2001)
...	...	PRUDENCE	1900-2070	TAR	Suisse	OcCC (entre autres BafU)	Schädler (2007b)
PD BH	HBV, RhineFlow3  WASiM-ETH	Scénarios WB21 Scénarios KNMI G, G+, W, W+	1000 - 2050	AR4	Rhin	RIZA	Te Linde (2007) Deursen (2006)

Liste incomplète (mise à jour : été 2008)

Abréviations (NdT) :

PD = modèle de transformation pluie-débit

BH = modèle de bilan hydrique

**Tableau A-3 : Vue d'ensemble sur l'application de modèles climatiques et de modèles hydrologiques aux Pays-Bas (Rhin et Meuse) (Wit 2008)**

	Etude <sup>1</sup>	Modèle climatique/scénario utilisé	Application des données de sortie du modèle climatique <sup>2</sup>	Modèle hydrologique
Rhin	Kwadijk & Rotmans (1995)	ESCAPE (combinaison de 7 MCG)	approche delta	Rhineflow
	Middelkoop et al. (2001)	UKHI & XCCC	approche delta	Rhineflow
	Shabalova et al. (2003)	HADRM2	approche delta	Rhineflow
	Lenderink et al. (2007a)	HADRM3H	approche delta et directe	Rhineflow
	Te Linde (2007)	scénarios KNMI'06	approche delta	HBV et Rhineflow
Meuse	Wit (2001)	HadCM2Gsa1	approche delta	Meuseflow et Scheme
	Booij (2005)	CGCM1, HadCM3, CSIRO9, HadRM2, HIRHAM4	désagrégation	HBV
	Wit (2007)	7 MCR fondés sur HadRM3H 2 MCR fondés sur ECHAM4	approche directe	HBV
	Leander & Buishand (2007)	RACMO-HadAM3H	approche directe	HBV
	Te Linde (2007)	scénarios KNMI'06	approche delta	HBV et Meuseflow
	Leander et al. (2008)	RACMO-HadAM3H, RAO-HadAM3H, RAO-ECHAM4	approche directe	HBV

<sup>1</sup> Voir sources bibliographiques au chapitre 8.

<sup>2</sup> approche delta : les modifications attendues des paramètres climatiques pertinents, comme par ex. la température de l'air, sont placés sur les données historiques mesurées (par ex. augmentation de la température de l'air d'une valeur donnée). Les séries temporelles ainsi modifiées sont ensuite utilisées comme paramètres d'entrée dans les modèles hydrologiques.

désagrégation : régionalisation dans l'espace et/ou dans le temps des résultats du modèle climatique à l'échelle requise pour les études hydrologiques. Cette régionalisation peut se faire à l'aide de différentes méthodes (statistiques).

approche directe : les résultats d'un modèle climatique global ou régional sont utilisés sans modification comme paramètres d'entrée dans un modèle hydrologique.