



# Etude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin

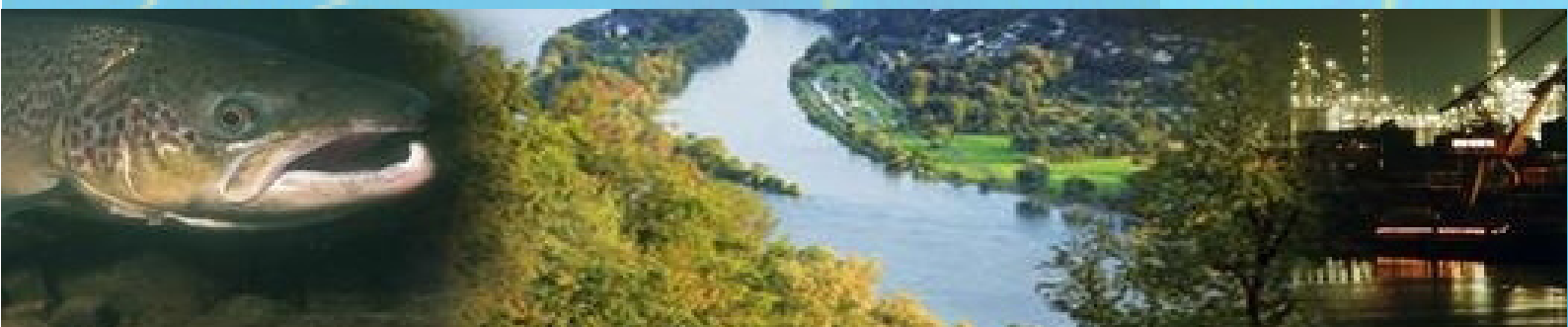
Mise à jour d'avril 2011

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

Rapport n° 188



**Editeur:**

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)

Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Coblenz

Postfach 20 02 53, D 56002 Coblenz

Téléphone +49-(0)261-94252-0, télécopieur +49-(0)261-94252-52

Courriel électronique: sekretariat@iksr.de

[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

ISBN 3-935324-57-X

© IKS-R-CIPR-ICBR 2011

*Membres du GE KLIMA*

<b>Nom</b>	<b>Institution</b>
Dr. Hugo Aschwanden	Office fédéral de l'Environnement, Suisse
Anne Brune	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Lorraine, France
Hendrik Buiteveld	Rijkswaterstaat Waterdienst, Pays-Bas
Florent Fever	Service de la Navigation de Strasbourg, France
Dr. Klaus Görden	Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann, Luxembourg
Christine Hilbert-Bastian	Administration de la Gestion de l'Eau, Division de l'hydrologie, Luxembourg
Vassilios Kolokotronis	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Allemagne
Peter Krahe	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne
Bernd Mehlig	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Rhénanie-du-Nord-Westphalie, Allemagne
Prof. Dr. Hans Moser	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne, <i>président du GE KLIMA</i>
Laurent Philippoteaux	Service de la Navigation de Strasbourg, France
Ines Polenz	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, Rhénanie-Palatinat, Allemagne
Amélie Renaud	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Lorraine, France
Anne Schulte-Wülwer-Leidig Adrian Schmid-Breton	Commission Internationale pour la Protection du Rhin
Reinhard Vogt	Stadtentwässerungsbetriebe Köln, Allemagne

*Rédacteurs du rapport du GE KLIMA*

<b>Nom</b>	<b>Institution</b>
Peter Krahe	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne
Dr. Enno Nilson	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne
Dr. Kai Gerlinger	HYDRON GmbH, Allemagne ( <i>Rédacteur de l'étude bibliographique</i> )

*Sommaire*

<b>1. Mandat</b>	<b>2</b>
<b>2. Caractérisation du régime hydrologique</b>	<b>2</b>
<b>3. Relevé synoptique des sources bibliographiques et des données portant sur le 'bassin du Rhin'</b>	<b>3</b>
3.1 Remarques préliminaires	3
3.2 Sources bibliographiques	4
3.2.1 Principales publications – au niveau mondial et européen	4
3.2.2 Connaissances sur le Rhin	4
3.3 Evaluation de la situation actuelle	8
<b>4. Synthèse des résultats</b>	<b>11</b>
4.1 Modifications observées au 20 <sup>ème</sup> siècle	12
4.1.1 Bases de données et représentation	12
4.1.2 Présentation synoptique des résultats	13
4.2 Modifications modélisées au 21 <sup>ème</sup> siècle	15
4.2.1 Bases de données et représentation	15
4.2.2 Présentation synoptique des résultats	18
<b>5. Conclusions</b>	<b>22</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>23</b>

*Annexes*

<b>Annexe</b>	<b>Sommaire</b>
A	Modifications survenues au 20 <sup>ème</sup> siècle (état des faits en 2009)
B	Modifications au milieu du 21 <sup>ème</sup> siècle (état des faits en 2009)
C	Carte synoptique des zones d'évaluation et des échelles mentionnées dans le texte

*Abréviations*

<b>Abréviation</b>	<b>Explications</b>
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVBS (ministère fédéral allemand des Transports)	Ministère fédéral des Transports, de la Construction et de l'Urbanisme
CHR	Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin
CIPMS	Commissions Internationales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre
CIPR	Commission Internationale pour la Protection du Rhin
DWD	Service météorologique allemand
GE KLIMA	Groupe d'experts « KLIMA » de la CIPR
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GT H, GT B, GT S	Groupe de travail (H = inondations, B = écologie, S = protection des eaux/émissions)
HQ <sub>T</sub>	Débit de crue (ici : valeur journalière la plus élevée) déterminé sur une période composé de T années consécutives.
HYRAS	Projet BfG/DWD sur les « Données hydrométéorologiques de référence pour l'Europe Centrale »
KNMI	Institut météorologique néerlandais
LANUV-NRW	Office de la nature, de l'environnement et de la protection des consommateurs du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie
MHQ	Moyenne arithmétique des débits journaliers les plus élevés d'intervalles similaires (par ex. semestres hydrologiques) de la période considérée (par ex. période 2021-2050).
MQ	Moyenne arithmétique de tous les débits journaliers d'intervalles similaires (par ex. semestres hydrologiques, mois) de la période considérée (par ex. période 2021-2050)
NM7Q	Moyenne arithmétique la plus faible du débit de 7 jours sur des intervalles similaires (par ex. semestres hydrologiques) de la période considérée (par ex. période 2021-2050).
NRW	Rhénanie-du-Nord-Westphalie
OcCC	Organe consultatif sur les changements climatiques
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
SumhN	Somme des précipitations sur un bassin (moyenne superficielle) sur des segments similaires (par ex. saisons météorologiques) de la période considérée (par ex. période 2021-2050)
UBA	Office fédéral allemand de l'environnement

*Projets*

(pour autant qu'ils soient mentionnés dans le texte ; ordre alphabétique selon l'acronyme, le cas échéant selon le titre)

<b>Titre</b>	<b>Acronyme</b>	<b>Site internet</b>
Developing adaptive capacity to extreme events in the Rhine basin	ACER	<a href="http://www.climateresearchnetherlands.nl">http://www.climateresearchnetherlands.nl</a>
Changement climatique et hydrologie en Suisse	CCHydro	<a href="http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=fr">http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=fr</a>
Coupled Model Intercomparison Project	CMIP	<a href="http://cmip-pcmdi.llnl.gov/">http://cmip-pcmdi.llnl.gov/</a>
A coordinated regional climate downscaling experiment	CORDEX	<a href="http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RCD_CORDEX.html">http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/RCD_CORDEX.html</a>
Deutsche Anpassungsstrategie	DAS	<a href="http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php">http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php</a>
Deltaprogramm	-	<a href="http://www.deltacommissaris.nl/english/">http://www.deltacommissaris.nl/english/</a>
ENSEMBLES – Climate change and its impacts	ENSEMBLES	<a href="http://ensembles-eu.metoffice.com">http://ensembles-eu.metoffice.com</a>
Extremwertuntersuchung Starkregen in Nordrhein-Westfalen	ExUS	<a href="http://www.klimawandel.nrw.de">http://www.klimawandel.nrw.de</a>
Flood, low water, Moselle and Saar	FLOW MS	<a href="http://www.flow-ms.eu">http://www.flow-ms.eu</a>
Interdisziplinäre Forschung zu Klimawandel, Folgen und Anpassung in Hessen	INKLIM-A, INKLIM2012	<a href="http://klimawandel.hlug.de/forschungsprojekte/inklim-a-und-weitere-projekte.html">http://klimawandel.hlug.de/forschungsprojekte/inklim-a-und-weitere-projekte.html</a>
Kennis voor Klimaat	-	<a href="http://www.climateresearchnetherlands.nl">http://www.climateresearchnetherlands.nl</a>
Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern und Einzugsgebieten Nordrhein-Westfalens	KLAVE	<a href="http://www.klimawandel.nrw.de">http://www.klimawandel.nrw.de</a>
Stratégie suisse d'adaptation au changement climatique	-	<a href="http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/06573/index.html?lang=fr">http://www.bafu.admin.ch/klima/00493/06573/index.html?lang=fr</a>
Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Kurzfassung	-	<a href="http://publikationen.lebensministerium.at/publication/publication/view/3414/28637">http://publikationen.lebensministerium.at/publication/publication/view/3414/28637</a>
Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz sowie Deutscher Wetterdienst)	KLIWA	<a href="http://www.kliwa.de">http://www.kliwa.de</a>

Titre	Acronyme	Site internet
Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen	KLIWAS	<a href="http://www.kliwas.de">http://www.kliwas.de</a>
Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau »	NFP 61	<a href="http://www.nfp61.ch/F/Pages/home.aspx">http://www.nfp61.ch/F/Pages/home.aspx</a>
Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects	PRUDENCE	<a href="http://prudence.dmi.dk/">http://prudence.dmi.dk/</a>
Impact of regional climate change on discharge in the Rhine River basin	RheinBlick2050	<a href="http://www.chr-khr.org/de/node/266">http://www.chr-khr.org/de/node/266</a>
Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions	STARDEX	<a href="http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/">http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/</a>
World Climate Research Programme	WCRP	<a href="http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/wcrp-index.html">http://www.wmo.int/pages/prog/wcrp/wcrp-index.html</a>

## 1. Mandat

Les modifications de paramètres climatiques ont une influence sur les processus hydrologiques et, par là même, sur le régime hydrologique des sous-bassins et de l'hydrosystème dans son ensemble et sur le régime thermique des eaux. Pour cette raison, la Conférence ministérielle sur le Rhin du 18 octobre 2007 a chargé la CIPR de mettre au point une étude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin (communiqué de la Conférence ministérielle sur le Rhin, 2007 – [www.iksr.org](http://www.iksr.org)).

Les changements climatiques ont des impacts sur des secteurs importants de la gestion des eaux, par ex. sur la prévention des crues, l'alimentation en eau, la protection des eaux, les aspects écologiques, l'hydromorphologie fluviale et différents usages des cours d'eau (hydroélectricité, voies navigables, eau de refroidissement, eau potable et agriculture). En regard des évolutions projetées pour l'avenir, il sera nécessaire, le cas échéant, de développer des stratégies d'adaptation spécifiques. Celles-ci ne permettront cependant d'atteindre le but visé que si elles se fondent sur des connaissances aussi détaillées et concrètes que possible sur les modifications affectant les différents secteurs de la gestion des eaux, tels que mentionnés ci-dessus.

Pour accomplir son mandat, la CIPR adopte une procédure à trois niveaux :

- (a) Analyse et présentation synthétique des modifications observées jusqu'à présent et des éventuelles futures modifications du climat, du régime hydrologique et des températures de l'eau sur la période allant jusqu'à 2050, pertinente pour la planification (analyses de scénarios climatiques jusqu'en 2100) ;
- (b) Identification des éventuels dangers et risques (GT H, GT B et GT S) ;
- (c) Mise au point d'approches de prévention/stratégies d'adaptation prospectives et durables de gestion des eaux

Pour accomplir les tâches mentionnées au point (a), la CIPR a instauré en 2008 un groupe d'experts 'KLIMA' (GE KLIMA) subordonné au GT 'Inondations' (GT H). Il est prévu d'échanger rapidement les connaissances acquises avec les groupes de travail 'Inondations' (GT H), 'Ecologie' (GT B) et 'Substances' (GT S) afin de préparer la mise au point de stratégies d'adaptation prospectives et durables de gestion des eaux.

Le présent rapport rassemble les résultats obtenus par le GE KLIMA sur les tâches mentionnées au point (a).

## 2. Caractérisation du régime hydrologique

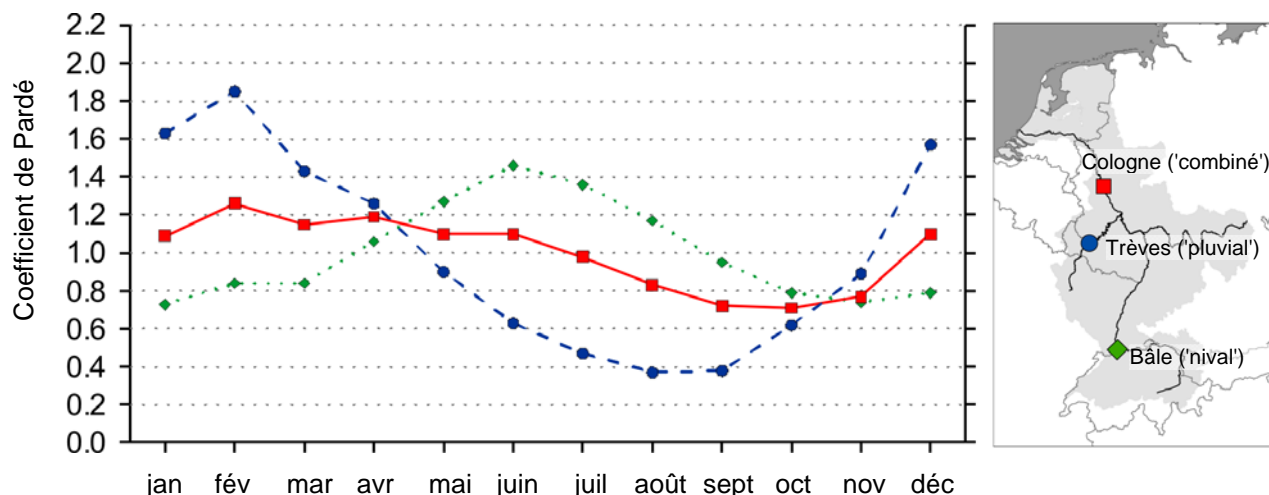
Le régime hydrologique désigne l'ensemble des variations de débit d'un cours d'eau rapportées à une moyenne interannuelle ainsi que les évolutions caractéristiques des crues et des étiages extrêmes (Belz et al., 2007). Différents régimes hydrologiques se superposent dans le bassin du Rhin (figure 1).

Le tronçon méridional, proche des Alpes (échelle de Bale) est influencé par l'alternance d'une rétention d'eau par formation d'un revêtement neigeux en hiver et d'une fonte de neige et des précipitations relativement abondantes en été (« régime nival »). Il en résulte l'apparition de situations d'étiage principalement en hiver et de crues principalement en été.

Un « régime pluvial » caractérise en revanche les rivières drainant les eaux des zones de hautes terres (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Moselle etc. ; échelle de Trèves). Ici, les crues dominent en hiver et les étiages en été.

La superposition de ces deux régimes régularise progressivement dans la partie plus en aval du Rhin la répartition du débit sur l'année (« régime combiné » ; échelle de Cologne).





**Figure 1 : régime hydrologique typique du bassin du Rhin selon Pardé<sup>1</sup> ; période de référence 1961-1990.**

Les évolutions des conditions climatiques générales se répercutent sur le régime hydrologique. Sur l'ensemble du 20<sup>ème</sup> siècle, on relève en tendance des précipitations plus abondantes (« pluvialisation ») se traduisant par une augmentation des débits hivernaux (Belz et al, 2007). Il en résulte pour la répartition saisonnière des débits que ceux-ci tendent à être plus monotonisés dans la partie sud et plus contrastés dans la partie nord du bassin. Ces tendances se poursuivent au cours du 21<sup>ème</sup> siècle et pourraient même s'accroître en raison de la baisse des débits en été (cf. paragraphes 4.1 et 4.2).

### 3. Relevé synoptique des sources bibliographiques et des données portant sur le 'bassin du Rhin'

#### 3.1 Remarques préliminaires

Dans son 4<sup>ème</sup> rapport de situation (IPCC, 2007 : p. 72), le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) des Nations Unies indique dans ses « conclusions robustes » que le réchauffement du système climatique observé à partir des températures de l'air et de l'eau des mers, de la fonte de la neige et des masses de glace et de l'élévation du niveau de la mer est « sans équivoque », ce qui est principalement attribuable à l'augmentation de concentration des gaz à effet de serre anthropiques sur les 50 dernières années.<sup>2</sup> Il est probable que le réchauffement anthropique survenu depuis trente ans a joué un rôle notable à l'échelle du globe dans l'évolution observée de nombreux systèmes physiques et biologiques.

Les analyses sur les éventuelles conséquences du changement climatique dans le futur impliquent l'utilisation de modèles comportant des incertitudes (voir paragraphe 3.3, figure 2). Les enseignements tirés par le GE KLIMA sur les conséquences du changement climatique sur le Rhin doivent donc être interprétés en connaissance de ces incertitudes, bien qu'ils se basent sur les connaissances les plus récentes. En pratique, ces incertitudes se traduisent par l'obtention d'une fourchette d'informations et non pas d'une seule conclusion à validité générale. En regard du grand nombre de sources d'incertitude, cette remarque s'applique en particulier aux évolutions futures et aux conséquences du

<sup>1</sup> Coefficient de Pardé = rapport du débit mensuel moyen au débit interannuel moyen.

<sup>2</sup> « Changement climatique anthropique » (abrégé ci-dessous : changement climatique)

changement climatique qui doivent généralement être estimées à l'aide de chaînes complexes de modèles.

Au cours des 10 dernières années, de nombreuses publications scientifiques et résultats de projets ont nettement amélioré les connaissances et les bases bibliographiques sur les éventuelles conséquences du changement climatique dans le 'bassin du Rhin'.

Ces informations aident à vérifier la fiabilité de certaines déclarations. En outre, les résultats des modèles indiquent des fourchettes de valeurs à utiliser comme telles et non comme valeurs individuelles.

## **3.2 Sources bibliographiques**

### **3.2.1 Principales publications – au niveau mondial et européen**

Au cours des cinq dernières années, les publications

- (a) du quatrième rapport de situation du GIEC (IPCC, 2007) qui se fonde en grande partie sur la phase 3 du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP, 2009) du World Climate Research Program (WCRP) et
- (b) des rapports de résultats des projets communautaires PRUDENCE (UE-FP5 ; PRUDENCE Partner, 2007), STARDEX (UE-FP5 ; STARDEX Partner 2005) et ENSEMBLES (UE-FP6 ; ENSEMBLES Partner, 2009)

ont permis d'améliorer sensiblement la qualité et la diversité des bases de données et des méthodes sur le changement climatique global et régional en Europe. Sur cette base, d'éventuelles approches visant à définir le cadre général des actions à engager dans le domaine de la gestion des eaux ont été et sont élaborées dans le cadre de nombreux projets et groupes de travail.

### **3.2.2 Connaissances sur le Rhin**

On dispose déjà d'amples connaissances sur le changement climatique et son impact sur les eaux dans le bassin du Rhin. Celles-ci ne portent cependant que sur des sous-bassins ou se fondent sur des méthodes et des données différentes. Cette hétérogénéité rend plus complexe la détermination de données concrètes pour les échelles du Rhin, applicables dans le domaine de la gestion de l'eau.

Comme indiqué ci-dessous, le GE KLIMA a synthétisé les connaissances rassemblées jusqu'en 2009. Par ailleurs, il a établi un dialogue entre des institutions scientifiques et les administrations chargées de la gestion de l'eau qui définiront ou ont déjà défini en 2010/2011 un nouvel état de connaissances. Enfin, il met en avant les progrès attendus, tels qu'ils se dessinent pour l'horizon 2013+.

#### Situation 2009 :

Le GE KLIMA a mandaté une étude bibliographique (CIPR, 2009) pour rassembler toutes les informations disponibles jusque début 2009 sur cette question. Les résultats de recherche de différentes institutions dans les Etats et Länder riverains du Rhin, élaborés entre 1997 et 2009 et publiés dans 110 contributions scientifiques, ont été intégrés dans cette étude. On y trouve les résultats de l'OCCC (Suisse), de l'ONERC (France), du projet de coopération KLIWA (Länder fédéraux de Bavière, du Bade-Wurtemberg, de Rhénanie-Palatinat et le service météorologique DWD), du projet INKLIM2010 (Land fédéral de Hesse), du Land fédéral de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (KLAVE, ExUS), de la BfG (Allemagne), de l'UBA (Allemagne), du KNMI (Pays-Bas), de la Commission Delta (Pays-Bas) ainsi que de différents projets et rapports de la CHR et de la CIPR.

La liste des sources bibliographiques évaluées (voir CIPR, 2009 : 44 et suivantes) ne se veut en aucun cas exhaustive. Les données de base et méthodes utilisées ainsi que les zones d'étude varient fortement. Les principaux résultats sont présentés dans les tableaux de l'annexe A et de l'annexe B.

#### Situation 2010 :

De nombreux autres travaux, qui étayaient les connaissances sur les impacts du changement climatique sur le Rhin, sont venus s'ajouter à l'étude bibliographique (CIPR, 2009). D'autres travaux importants, cités à titre d'exemples, ont été réalisés dans le cadre du « projet de coopération KLIWA » (KLIWA, 2009a et b), du projet néerlandais « ACER » (Hurkmans, 2009 ; Te Linde et al., 2010a et b), des projets KLAVE (Richter et al., 2009) et ExUS de NRW (LANUV-NRW, 2010), du projet « RheinBlick2050 » de la CHR (Görgen et al., 2010) ainsi que du projet « KLIWAS » du BMVBS (Nilson et al., 2010 ; Krahe et al., 2009).

Le projet KLIWA (2009a) a donné des résultats sur les températures de l'eau du lac de Constance dans les conditions climatiques observées sur la période 1960-2007 et sur la réaction complexe du lac aux conditions modifiées (température de l'air, champ de vent).

Il a également été procédé dans le cadre de KLIWA (2009b) à une analyse des niveaux d'étiage dans les affluents du Rhin au Bade-Wurtemberg, en Bavière et en Rhénanie-Palatinat. L'étude fournit de nouvelles preuves quantitatives et différenciées (au niveau régional) venant étayer les enseignements généraux tirés de l'étude bibliographique, à savoir une hausse future des débits d'étiage pendant les mois d'hiver et une réduction sur les mois d'été entre la période de référence (1971-2000) et l'avenir (ici : 2021-2050).

Le projet ACER s'est donné pour objectif de simuler entre autres des débits sur l'ensemble du Rhin jusqu'en 2100. Contrairement aux résultats de l'étude bibliographique, ce projet fait apparaître pour la première moitié du 21<sup>ème</sup> siècle (ici : 2002-2050) des augmentations du débit moyen (MQ mensuel) de +5% à +20% sur tous les mois par rapport à la période de référence (ici : 1952-1998), et ce pour différentes échelles. Les modifications au niveau des crues (HQ<sub>50</sub>) entraînent pour Lobith une hausse de +7,5% à +21%, ce qui concorde bien avec des résultats obtenus à une date antérieure (Hurkmans, 2009)<sup>3</sup>. Au niveau des étiages<sup>4</sup>, l'intensité semble être moins forte que sur la période de référence pour les périodes de retour courtes. On a cependant aussi simulé quelques situations d'étiage plus extrêmes.

Le projet KLAVE a permis de simuler jusqu'en 2100 des débits à hauteur de différentes échelles situées sur des affluents en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. On ne relève aucune modification ou uniquement de faibles modifications des débits d'étiage, moyens et de crue (modifications le plus souvent < 10%)<sup>5</sup> sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1971-2000. Le projet « Analyse des valeurs extrêmes en cas de fortes précipitations en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (ExUS) » examine entre autres si les données mesurées par les stations pluviométriques en Rhénanie-du-Nord-Westphalie permettent de supposer une modification du régime de fortes précipitations. Les résultats montrent entre autres que le nombre de jours aux précipitations élevées a augmenté au cours des 59 dernières années (1950-2008), notamment pendant les mois d'hiver. Les intensités mesurées lors de fortes précipitations ne font pas apparaître de hausse.

Les études mentionnées jusqu'à présent et intégrées dans l'étude bibliographique se fondent sur des chaînes de modèles (voir paragraphe 3,3) combinant à chaque fois un

---

<sup>3</sup> Les crues extrêmes (HQ<sub>100</sub> ; figure 4.12 dans Hurkmans, 2009) ont uniquement été extrapolées par le biais d'une répartition généralisée des valeurs extrêmes. Les séries synthétiques qu'il est conseillé d'utiliser pour l'analyse de crues extrêmement rares n'ont pas été utilisées par Hurkmans (2009) (voir Görgen et al., 2010).

<sup>4</sup> Somme des durées de dépassement du FDC\_Q75 sur la période de référence 1952-1998.

<sup>5</sup> Ont été évalués le MNQ, le MQ et le MHQ pour les saisons météorologiques.

modèle global et un modèle régional<sup>6</sup>. Le projet communautaire ENSEMBLES, qui est venu à terme à l'automne 2009, a fourni de nombreuses autres chaînes de modèles climatiques globaux et régionaux qui représentent les travaux de modélisation climatique au niveau européen.

Dans le cadre du projet RheinBlick2050 de la CHR, ainsi que des projets annexes, on a élaboré sur cette base, pour la première fois, des projections hydrologiques pour des échelles représentatives du Rhin et les a évaluées selon une méthode ajustée entre les partenaires de part et d'autre de la frontière. Le projet RheinBlick2050 a joué un rôle de coordination et a intégré les résultats de différentes institutions hydrologiques dans le bassin du Rhin. On citera en particulier les résultats du projet KLIWAS du BMVBS qui a contribué pour une part essentielle au projet RheinBlick2050. Les résultats du projet RheinBlick2050 sont présentés dans le chapitre 4.2.

Le ministère autrichien de la vie (Lebensministerium) avait mandaté une étude sur les « Stratégies d'adaptation de la gestion des eaux autrichienne au changement climatique » pour présenter sur de solides bases scientifiques les impacts du changement climatique sur la gestion des eaux en Autriche. Cette étude a été menée à terme en décembre 2010. Les principaux enseignements sur le changement climatique jusqu'en 2050 ont été regroupés dans 10 thèses (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2010).

#### Situation 2011 :

La recherche sur les impacts du changement climatique dans le bassin du Rhin se poursuit.

On attend pour le Rhin en aval de Bâle de meilleures données de base pour l'analyse des modifications de la température de l'eau. Ainsi, la Commission allemande pour la Protection du Rhin a mis en place un groupe de travail ad hoc chargé de créer une base de données homogène pour la modélisation des températures de l'eau (communication personnelle de Martin Keller, BfG<sup>7</sup>). Le Rijkswaterstaat a chargé Deltares de mettre au point un modèle de température de l'eau pour le Rhin qui permettra de représenter les impacts de rejets thermiques et ceux du changement climatique. Dans ce cadre, Deltares coopèrera étroitement avec la BfG.

De nouveaux résultats sont également annoncés pour début 2011 dans le cadre du projet de coopération KLIWA. Les nouvelles études se basent sur de nouvelles projections climatiques et portent à la fois sur des affluents du Rhin dans les Länder du sud de l'Allemagne et des échelles sur le cours principal du Rhin (Rhin supérieur).

La Hesse réalise actuellement plusieurs projets sur les conséquences du changement climatique et les possibilités d'adaptation sous l'acronyme INKLIM-A. Ces projets améliorent et utilisent des projections climatiques régionales. Les valeurs extrêmes du 20<sup>ème</sup> et du 21<sup>ème</sup> siècle sont analysées.

Le projet FLOWS MS, qui s'inscrit dans le programme INTERREG IV A, est en cours de réalisation sur la Moselle sous l'égide des CIPMS et avec la participation de la Rhénanie-Palatinat, de la Sarre, du Luxembourg et de la France. Il a entre autres pour objectif d'estimer les impacts éventuels du changement climatique sur les crues et les étiages dans le bassin de la Moselle et de la Sarre et de mettre au point des stratégies d'adaptation.

Le Land de NRW a financé et continue à financer 40 projets sur le changement climatique. Ici aussi, on en attend de nombreuses nouveautés sur la modélisation climatique régionale, l'analyse des impacts sur le régime hydrologique, les extrêmes hydrologiques et les mesures d'adaptation.

---

<sup>6</sup> On utilise le plus souvent des données du MCG ECHAM5 (calcul modélisé 1) qui a été régionalisé avec WETTREG2006 ou REMO\_UBA.

<sup>7</sup> Mandat confié le 27.04.2010. Les 'Landesämter' du Bade-Wurtemberg, de la Rhénanie-Palatinat, de la Hesse et de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie ainsi que la BfG sont associés à ces travaux.

Le projet KLIWAS va également poursuivre ses travaux. Les modèles et méthodes seront améliorés sur la base des expériences disponibles, les données et les analyses complétées afin d'obtenir plus d'éclaircissements sur les aspects hydrologiques, hydrauliques et morphologiques du changement climatique sur le Rhin et d'autres fleuves.

Un programme de recherche intitulé 'Kennis voor Klimaat' (connaissance du climat) est en cours aux Pays-Bas. Il comporte différents projets en relation avec le Rhin. Il s'agit d'un projet commun entre des centres de recherche et des universités. Ils analysent les effets du changement climatiques sur la société néerlandaise en les combinant à des stratégies d'adaptation.

Le programme Delta est un programme néerlandais. Les autorités nationales, les provinces, les communes et les syndicats des eaux travaillent dans ce cadre avec le soutien d'organisations sociales diverses. L'objectif est de protéger la population des Pays-Bas ainsi que les générations futures contre les inondations et d'assurer un approvisionnement suffisant en eau douce.

#### Perspectives 2012+ :

Aucune des études mentionnées ne peut prétendre être complète. Les études et le présent rapport final englobent donc un chapitre sur les futurs besoins de recherche et de développement. On peut ainsi s'attendre à ce que les connaissances actuelles soient remises à jour et améliorées régulièrement au cours des prochaines années.

Ainsi, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat prépare son cinquième rapport de situation dont la publication est prévue pour 2013/2014. Les calculs impliquant une nouvelle génération de modèles climatiques globaux et de méthodes de régionalisation sont réalisés dans le cadre des projets CMIP5 et CORDEX. Les simulations du régime hydrologique dans le bassin du Rhin seront révisées en conséquence, par ex. dans le cadre de KLIWAS.

Selon toute attente, le KNMI devrait également pouvoir présenter des scénarios climatiques actualisés en 2013.

Enfin, des progrès sont également attendus au niveau des données d'observation, de la compréhension du système hydrologique et de la modélisation hydrologique. Ainsi, de nouveaux projets de la CHR porteront sur la plausibilisation de données de débits et sur l'impact de la fonte des neiges et des glaciers sur le débit du Rhin<sup>8</sup>.

Une nouvelle base de données météorologiques transfrontalières, intitulée « HYRAS », est élaborée par la BfG et le service météorologique allemand DWD et constituera un nouveau référentiel. Une base de données homogène permettra de rendre les études effectuées dans différentes régions du bassin du Rhin plus comparables que ce n'est le cas aujourd'hui.

On attend en 2012 le rapport final du projet global suisse CCHydro (pilote : OFEV). Les scénarios climatiques existant en Suisse sont mis à jour et leurs impacts sur le régime hydrologique, les étiages, les crues et (la fonte) des glaciers sont estimés (Volken, 2010). Enfin, une étude pilote est réalisée sur les 'températures de l'eau'.

Le Programme National de Recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61) a démarré le 01.01.10 en Suisse. Il s'étend jusqu'en 2013 et élabore des bases et méthodes scientifiques pour une gestion durable des ressources hydrologiques soumises à une pression croissante. Le « PNR 61 » analyse les effets des changements climatiques et sociaux sur cette ressource et identifie les risques et futurs conflits liés à son utilisation (par ex. Leibundgut, 2010). Il met au point des stratégies pour une gestion durable et intégrée des ressources hydrologiques. Un an auparavant, le Gouvernement suisse avait

---

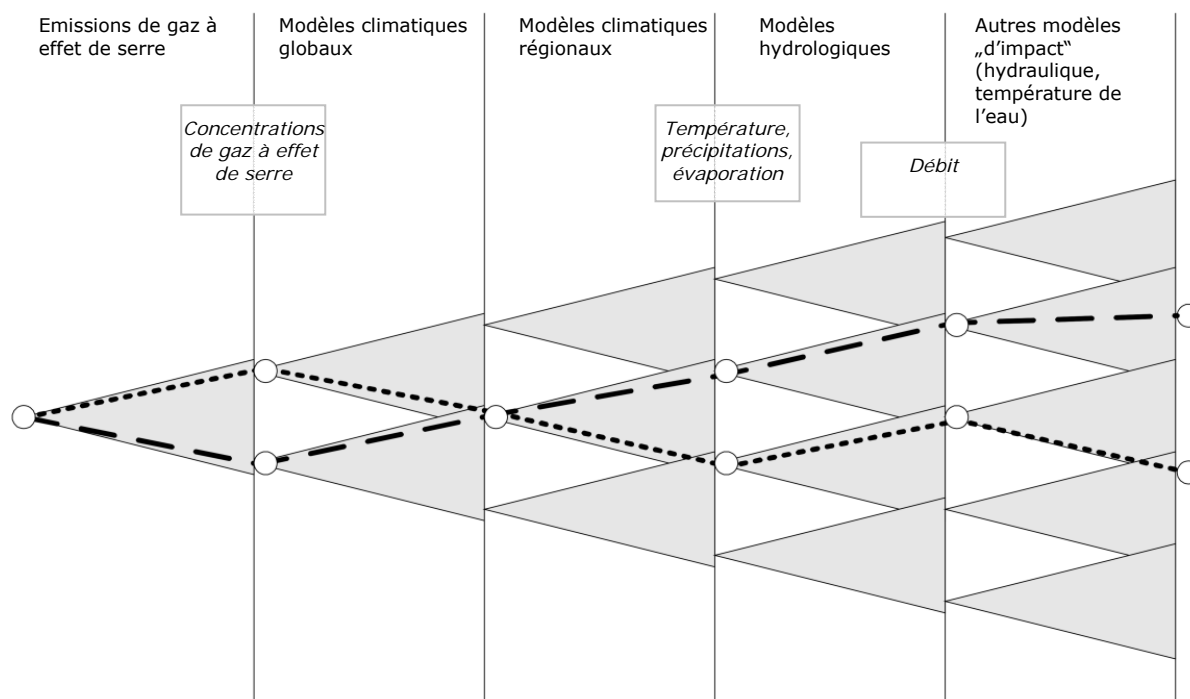
<sup>8</sup> Projets CHR « HYMOG » (Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet) et « Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels »

chargé l'administration d'élaborer d'ici fin 2011 une stratégie nationale d'adaptation au climat. Des stratégies sectorielles, entre autres pour la gestion des eaux et les aléas naturels, sont disponibles depuis fin 2010 au stade de projets, la stratégie globale ajustée le sera un an plus tard. Par ailleurs, une initiative parlementaire demande d'ici 2012 la mise au point d'une stratégie nationale de l'eau dépassant le cadre du changement climatique. Dans ce cadre, il est prévu de contrôler les bases réglementaires afin de garantir la mise en œuvre concrète de cette stratégie.

### 3.3 Evaluation de la situation actuelle

Parmi la multitude de données sur le changement climatique et ses conséquences, l'état des sources bibliographiques et des connaissances, dont doivent être tirées les informations pertinentes pour la prise de décisions, est hétérogène. Cette remarque s'applique à la période pour laquelle on dispose de données de mesure (1901-2010) et encore plus à la période de projection (2001-2100). Les études divergent au niveau des zones étudiées, des périodes considérées, des données de base, des méthodes. Enfin, l'objectif et, par là même, les évaluations et l'interprétation des résultats diffèrent également.

Malgré l'hétérogénéité des études, on observe également des tendances et des évolutions homogènes (voir annexe A). En regard de la diversité des méthodes, il n'est cependant pas possible de faire des comparaisons quantitatives détaillées ni des différenciations régionales des modifications.



**Figure 2 : Schéma d'une chaîne de modèles pour l'analyse des conséquences du changement climatique avec « cascade d'incertitudes » résultant de la transposition des incertitudes dans chaque maillon de la chaîne (selon Viner, 2002).**

*La ligne discontinue et la ligne pointillée montrent que le choix de « voies » spécifiques à travers la cascade d'incertitudes débouche sur des résultats différents.*

L'élément commun des études qui regroupent les déclarations sur les éventuelles évolutions futures est une chaîne de modèles. A partir d'émissions (ou de concentrations) de gaz à effet de serre, des projections sont réalisées à l'aide de modèles globaux et

régionaux pour les principaux paramètres d'entrée pour les modèles de bassin du Rhin (ou de sous-bassins). Ces paramètres permettent ensuite de simuler les débits (figure 2) ; d'autres modèles « d'impact » peuvent éventuellement être couplés à la chaîne.

Le cadre méthodologique appliqué aux analyses des conséquences du changement climatique est donc comparable d'un projet à l'autre. Tous les projets utilisent également en principe des données récentes et des méthodes contemporaines. Celles-ci affichent cependant des disparités et des déficits spécifiques et diffèrent donc sensiblement. La décision de choisir certaines données et méthodes a une influence sur le résultat.

Il convient de tenir compte de ce fait dans l'évaluation des résultats. Il est expliqué ci-dessous à l'aide de la chaîne de modèles.

### Scénarios d'émission

Une des principales incertitudes dans l'analyse de l'évolution du climat réside dans les scénarios d'émission des gaz ayant un impact sur le climat. On ne sait pas quelle sera l'évolution de l'économie mondiale, de la population et, par là même, des émissions. Les scénarios utilisés représentent des hypothèses sur d'éventuelles évolutions qui semblent actuellement plausibles. Le choix du scénario d'émission a une influence sur le résultat modélisé, notamment pour la période après 2050. On ne peut cependant déterminer son occurrence avec précision. Il convient donc de tenir compte du plus grand nombre possible de scénarios d'émission pour la seconde moitié du 21<sup>ème</sup> siècle.

### Suivi et modélisation du climat

Des incertitudes importantes subsistent également au niveau du suivi et de la modélisation du climat. Les lacunes dans les réseaux d'analyse et les erreurs de mesure touchent autant les données d'observation que les modèles construits sur cette base. Viennent s'y ajouter dans la modélisation des incertitudes imputables d'une part à notre manque de compréhension du système, aux simplifications nécessaires et aux erreurs inhérentes aux modèles et d'autre part au comportement chaotique du système climatique (voir Krahe et al., 2009). Nous ne pourrons jamais éliminer complètement les incertitudes inhérentes au système, mais saurons mieux les estimer lorsque nous disposerons d'un nombre croissant de simulations climatiques.

Les incertitudes inhérentes au modèle déterminent entre autres la taille des « biais » des modèles climatiques, c'est-à-dire de l'écart plus ou moins systématique entre les paramètres simulés et observés sur une même période. Elles font l'objet d'activités de recherche actuelles et futures. Au stade actuel, elles sont le principal facteur de différence entre les différentes simulations climatiques. Le choix du modèle climatique a une influence sur les caractéristiques du résultat (options humide/sèche, chaude/fraîche).

La manière de prendre en compte les incertitudes dans les résultats est un critère essentiel de différenciation des approches visant à définir des scénarios climatiques pour le bassin du Rhin. Trois approches ont été soumises au GE KLIMA :

1. La délégation néerlandaise a fait part des expériences tirées de la mise au point des « scénarios KNMIO6 » (KNMI, 2006).

Les scénarios climatiques KNMIO6 réduisent le nombre total de scénarios/projections climatiques, qui découlerait de la multitude de combinaisons de scénarios d'émissions et de modèles globaux, à quatre scénarios. Les incertitudes portent sur deux paramètres atmosphériques : une évolution différente de la température (+1° ou +2°) et une modification variable de la circulation atmosphérique (forte ou faible).

Cette méthode est fondamentalement pragmatique et positive car l'évaluation porte sur un grand nombre de modèles climatiques globaux (une vingtaine) et le choix des modèles est transparent. En principe, l'éventail des scénarios du KNMI doit être régulièrement contrôlé à l'aide des résultats des projections climatiques les plus récentes. Les scénarios généraux publiés en 2006 par le KNMI pour faire face aux

futures évolutions climatiques aux Pays-Bas ne sont pas périmés par les nouvelles avancées scientifiques. Selon les avis actuels, il ressort également que les 4 scénarios KNMI de 2006 englobent ensemble les changements jugés les plus probables aux Pays-Bas, compte tenu des incertitudes inhérentes à ce type d'exercice. C'est ce qui résulte d'une analyse, réalisée ces dernières années, sur la compréhension du changement climatique dans notre environnement (Klein Tank en Lenderink, 2009).

2. Les Länder fédéraux riverains du Rhin se concentrent sur la « plausibilité hydrologique » de différents calculs modélisés et en font le critère déterminant pour le choix des modèles et la prise en compte dans la modélisation de bilan hydrologique. Sont jugés plausibles les calculs modélisés qui reproduisent de manière satisfaisante (a) le climat actuel dans l'espace et dans le temps, (b) l'ordre de grandeur des paramètres climatiques.

Parmi les calculs modélisés examinés jusqu'à présent, la méthode de régionalisation statistique WETTREG2003 et WETTREG2006 ainsi que la méthode de régionalisation dynamique à haute résolution spatiale CCLM4.2 ont satisfait aux critères (a) et (b). Les évaluations du CCLM4.8 ne sont pas encore disponibles.

La procédure présentée est transparente et comprend une validation détaillée des modèles régionaux. On recherche le « meilleur » modèle selon des critères définis. Il convient cependant de préciser qu'il n'a été tenu compte jusqu'à présent que de régionalisations basées sur un modèle climatique global (ECHAM, versions 4 et 5) qui donne aux résultats ses caractéristiques individuelles.

3. Les partenaires impliqués dans les projets RheinBlick2050 et KLIWAS ont mis au point des modules d'analyse intégrant les différentes approches de production de scénarios climatiques et hydrologiques. Cette méthode est axée sur une approche multimodèle appliquée systématiquement, c'est-à-dire sur l'évaluation de tous les scénarios d'émission et des modèles climatiques globaux et régionaux disponibles. Quelques simulations non plausibles ou non disponibles pour l'ensemble du Rhin ont été retirées dans le cadre d'une évaluation. Les biais présents dans les simulations climatiques restantes ont été corrigés (les simulations sont ainsi plus proches des données d'observation). Les simulations sont à la base de la modélisation hydrologique<sup>9</sup>.

L'avantage de cette approche « multimodèle » réside dans le fait qu'il est tenu compte de presque toutes les connaissances acquises dans le cadre de la recherche sur les impacts régionaux du changement climatique et que celles-ci sont disponibles pour estimer les impacts hydrologiques du changement climatique. Il faut toutefois mentionner que des corrections de biais parfois importantes sont nécessaires pour pouvoir utiliser les résultats des modèles climatiques dans la modélisation d'un bassin fluvial. Les corrections des biais n'ont cependant pas pour effet d'améliorer les modèles. L'analyse de tous les effets de ces corrections des biais fait encore défaut.

### Données et modèles hydrologiques

Il existe également des incertitudes au niveau des données et des modèles hydrologiques. Ainsi, les conséquences liées à l'utilisation de différents modèles pour les résultats des simulations aux échelles du Rhin et dans les grands affluents doivent encore être examinées.

On sait par ailleurs que l'activité humaine<sup>10</sup> a un impact sur les débits. Cet impact a augmenté au fil du temps et on ne connaît pas son évolution future du fait du manque de connaissances sur l'évolution des facteurs socio-économiques. Alors que les effets observés par le passé peuvent être pris en compte, du moins en partie, on doit le plus souvent se baser sur le « statu quo » de l'impact humain pour les simulations de l'avenir.

<sup>9</sup> Au cours de l'été 2010, 37 simulations climatiques ont été évaluées et 20 peuvent être utilisées pour la simulation hydrologique dans le bassin rhénan.

<sup>10</sup> Génie hydraulique, gestion des eaux, occupation des sols, etc.



Il n'est pas encore tenu compte des impacts d'éventuelles nouvelles mesures d'adaptation. Les éventuels futurs débits présentés dans le rapport ne sont donc exacts que si l'on prend comme hypothèse le scénario « statu quo ».

La modélisation des débits de crue extrêmes est considérée à part dans le paragraphe suivant.

#### Débits de crue extrêmes (valeurs $HQ_T$ , indices de crue)

Les déclarations sur la future évolution de débits extrêmes sont moins fiables que celles exprimées sur les débits moyens.

Dans le cadre de la détermination des débits de crue extrêmes (valeurs  $HQ_T$ ), il convient de tenir compte d'un grand nombre d'aspects hydrodynamiques dans les modèles de déroulement de l'onde (par ex. submersions et ruptures de digues, rétention des eaux dans le lit majeur, mesures de rétention des hautes eaux, etc.). Cette remarque s'applique de la même manière aux valeurs simulées pour le passé et aux projections futures.

Ces aspects hydrodynamiques n'ont pas été pris en compte dans l'analyse des enseignements tirés d'éventuelles évolutions futures, tels que présentés dans le chapitre 3. En regard de cette situation, seuls les signaux de modification entre la simulation du présent et la simulation de l'avenir peuvent être interprétés comme des indicateurs d'évolutions futures concevables. Ceux-ci sont cohérents au sein des différents modèles utilisés, bien que les valeurs absolues puissent s'écarter de la réalité. Les débits de crues extrêmes notamment peuvent être surestimés, car n'est pas tenu compte de l'effet atténuateur de la submersion de digues.

Il est tenu compte de la différence entre modèle et réalité dans la présentation (chapitre 3) : en effet, les paramètres de crue ne sont pas indiqués sous forme de valeurs  $HQ_T$ , mais d'indices de crues « fréquentes », « moyennes » et « extrêmement rares ».

#### Températures de l'eau

La modélisation de la température de l'eau pour l'ensemble du Rhin n'est engagée que depuis peu. Les premières données figurent dans l'analyse bibliographique (CIPR, 2009). Selon ces données, la température de l'eau du Rhin a augmenté d'env. 1°C à 2,5°C sur certains tronçons au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (voir annexe A). La densité et la quantité de données sont cependant loin d'être suffisantes pour permettre l'élaboration de modèles à l'échelle du Rhin.

## **4. Synthèse des résultats**

Il est rare de trouver des études intégrées donnant des informations cohérentes sur le changement climatique et ses impacts au niveau du Rhin tout en différenciant au niveau régional.

Les valeurs chiffrées indiquées ci-dessous se basent sur l'étude CHR de Belz et al. (2007) pour les modifications survenues au 20<sup>ème</sup> siècle et sur l'étude CHR de Görden et al. (2010) pour celles du 21<sup>ème</sup> siècle. Les auteurs se réfèrent uniquement au bassin du Rhin jusqu'à l'échelle de Lobith, le Rhin se subdivisant ensuite en plusieurs bras sur le territoire néerlandais. Les méthodes et résultats appliqués ont été ajustés entre plusieurs instituts hydrologiques et groupes de projet des Etats riverains du Rhin.

L'analyse prospective vise à exploiter le plus grand nombre possible d'informations tirées de la chaîne de modélisation, même s'il faut pour ce faire procéder à des corrections parfois importantes. Il est ainsi possible d'évaluer et d'utiliser un grand nombre de projections climatiques actuelles qui reflètent les connaissances actuelles, même si celles-ci ne sont pas encore satisfaisantes dans tous les domaines. Cette approche

multimodèle est également recommandée comme « bonne pratique » par le GIEC (2007), le guide communautaire 24 (European Communities, 2009) et la DAS (cabinet fédéral, 2008).

Les résultats d'études antérieures, relatifs à des sous-bassins ou différentes échelles (CIPR, 2009), peuvent également être pris en compte à titre comparatif.

## 4.1 Modifications observées au 20<sup>ème</sup> siècle

### 4.1.1 Bases de données et représentation

La synthèse ci-dessous se fonde sur les données de base jointes sous forme de banque de données au rapport de Belz et al. (2007). Les données de débit ont été vérifiées, mais aucune correction n'a été apportée aux impacts anthropiques dans le bassin fluvial (manœuvre des lacs, etc.).

Les données du tableau 2 représentent des valeurs moyennes sur des périodes de 30 ans au début et à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle ainsi que les signaux de modification émis entre ces périodes.<sup>11</sup> La période de 30 ans a été retenue en conformité avec les conventions de l'OMM.

Ont été évaluées les modifications des précipitations par bassin (SomhN), du débit moyen (MQ), du plus faible débit moyen sur 7 jours (NM7Q) par semestre et du débit journalier moyen le plus élevé sur l'année (MHQ). Les modifications de température atmosphérique ne sont pas représentées dans le tableau 2 mais signalées dans la synopsis (paragraphe 4.1.2). Le MQ et le NM7Q se réfèrent à des semestres hydrologiques (de nov. à avril et de mai à oct.), le MHQ se réfère quant à lui à des années hydrologiques (de nov. à oct.). Les précipitations par bassin se réfèrent à l'été et à l'hiver météorologiques (juin, juillet, août et décembre, janvier, février).

L'évaluation des précipitations porte sur les sous-bassins situés en amont des échelles indiquées dans le tableau 2 (voir carte de l'annexe C). Elles sont choisies de manière à ce que l'on puisse analyser séparément les effets du bassin alpin (zone située en amont des échelles de Bâle et Maxau), des hautes terres (Neckar, Main, Moselle) et de l'ensemble du Rhin (en amont de Lobith).

Les échelles choisies pour l'analyse des débits se trouvent également pour l'essentiel sur le cours principal. Les échelles de Rockenau (Neckar), Würzburg (Main) et Trèves (Moselle) permettent également de saisir les principales spécificités des hautes terres (carte en annexe C).

Le code des couleurs indique la tendance des modifications. Le bleu est synonyme de hausse et l'orange de baisse du paramètre respectif (tableau 1).

**Tableau 1 : Code des couleurs utilisé pour les signaux de modification au 20<sup>ème</sup> siècle (voir tableau 2).**

Code des couleurs	Signification	Explications
Orange	Tendance à la baisse	Valeurs $\leq -5$ %
Gris	Aucune tendance	Valeurs comprises entre $-4,9$ % et $+4,9$ %
Bleu	Tendance à la hausse	Valeurs $\geq +5$ %
Blanc	Aucune indication possible	Aucune valeur

<sup>11</sup> Signal de modification = différence entre la valeur finale et la valeur initiale (c'est-à-dire la valeur moyenne sur la période 1971-2000 par rapport à la période 1901-1930), exprimée en pourcentage de la valeur initiale.

#### 4.1.2 Présentation synoptique des résultats

**Tableau 2 : Valeurs moyennes des précipitations par bassin sur de nombreuses années (SomhN), du débit d'étiage (NM7Q) et de crue (MHQ) au début (1901-1930) et à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle (1971-2000) et modifications (exprimées en pourcentage) entre ces périodes.** Pour la situation des échelles et des bassins fluviaux : voir annexe C. Pour le code de couleurs, se reporter au tableau 1 (base de données : Belz et al., 2007).

Paramètre	Echelle	1901-1930	1971-2000	Modification [%]
SomhN [mm] Été météorologique (JJA)	Bassin jusqu'à Bâle	378	397	+5,1
	Bassin jusqu'à Maxau	406	396	-2,4
	<i>Bassin du Neckar (Rockenau)</i>	262	259	-1,2
	<i>Bassin du Main (Würzburg)</i>	227	227	+0,2
	<i>Bassin de la Moselle (Cochem)</i>	231	216	-6,5
	Bassin jusqu'à Lobith	287	278	-3,1
SomhN [mm] Hiver météorologique (DJF)	Bassin jusqu'à Bâle	301	321	+6,8
	Bassin jusqu'à Maxau	248	280	+13,1
	<i>Bassin du Neckar (Rockenau)</i>	176	211	+19,9
	<i>Bassin du Main (Würzburg)</i>	161	185	+16,2
	<i>Bassin de la Moselle (Cochem)</i>	224	249	+11,2
	Bassin jusqu'à Lobith	210	236	+12,7

Table 2 (Fortsetzung)

Paramètre	Echelle	1901-1930	1971-2000	Modification [%]
MQ [m <sup>3</sup> /s] Été hydrologique (mai-oct.)	Bâle	1312	1218	-7,2
	Maxau	1460	1349	-7,6
	Worms	1559	1466	-6,0
	Kaub	1678	1642	-2,1
	Cologne	1900	1887	-0,7
	Lobith	2009	1963	-2,3
	Würzburg (Main)	72.1	76.5	+6,2
	Trèves (Moselle)	161	151	-6,1
MQ [m <sup>3</sup> /s] Hiver hydrologique (nov.-avril)	Bâle	797	910	+14,1
	Maxau	1036	1170	+12,9
	Worms	1225	1386	+13,1
	Kaub	1531	1738	+13,5
	Cologne	2149	2401	+11,7
	Lobith	2406	2580	+7,2
	Würzburg (Main)	143	150	+4,8
	Trèves (Moselle)	402	418	+4,0
NM7Q [m <sup>3</sup> /s] Été hydrologique (mai-oct.)	Bâle	688	648	-5,8
	Maxau	802	747	-6,9
	Worms	870	811	-6,7
	Kaub	965	929	-3,7
	Cologne	1112	1071	-3,7
	Lobith	1253	1151	-8,1
	Würzburg (Main)	40.4	43.3	+7,4
	Trèves (Moselle)	72.1	57.8	-19,9
NM7Q [m <sup>3</sup> /s] Hiver hydrologique (nov.-avril)	Bâle	451	542	+20,4
	Maxau	576	688	+19,4
	Worms	676	775	+14,6
	Kaub	798	934	+17,1
	Cologne	991	1156	+16,6
	Lobith	1168	1252	+7,2
	Würzburg (Main)	55.0	59.2	+7,8
	Trèves (Moselle)	121	113	-6,7
MHQ [m <sup>3</sup> /s] Année hydrologique (nov.-oct.)	Bâle	2492	2734	+9,7
	Maxau	2861	3168	+10,7
	Worms	3155	3568	+13,1
	Kaub	3916	4344	+10,9
	Cologne	5924	6538	+10,4
	Lobith	6454	6642	+2,9
	Würzburg (Main)	631	583	-7,6
	Trèves (Moselle)	1683	2010	+19,4

### Evolution au cours du 20<sup>ème</sup> siècle

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les changements de température constatés dans le bassin du Rhin varient de région à région mais sont légèrement supérieurs (+0,5°C à +1,2°C) à la moyenne globale comprise entre +0,6 et +0,9°C. Le réchauffement est plus important en hiver qu'en été et plus marqué dans les zones de faible altitude (< 500 m) que dans les zones plus élevées (KLIWA, 2005 ; CIPR, 2009).

Les précipitations accusent une hausse en hiver sur l'ensemble du bassin du Rhin (de +10 à +20%). Cette augmentation est un peu plus faible dans les Alpes. Les précipitations estivales évoluent peu (de -5 à +5%).

Les paramètres de débit (MQ, NM7Q) font logiquement apparaître des tendances à la hausse en hiver aux échelles situées sur le cours principal (le plus souvent +10 à +15% pour MQ ; +15 à +20% pour NM7Q). On note en été des baisses de MQ et NM7Q pouvant atteindre 8%. Ce phénomène résulte essentiellement de l'impact de températures en hausse (évaporation accrue) en combinaison avec une stagnation des précipitations et une baisse simultanée des volumes des neiges dans les Alpes.

Le débit de crue (MHQ), qui a été évalué sur l'année hydrologique dans son ensemble (de nov. à oct.), met en évidence une hausse de l'ordre de +10%. Une analyse détaillée des données montre que ceci n'est pas dû à une augmentation des débits de pointe extrêmes<sup>12</sup> mais dans une beaucoup plus grande mesure à la fréquence rapprochée de crues de moyenne et de grande amplitude.

Les échelles de Würzburg et de Trèves montrent une évolution différente et en partie même opposée pour quelques paramètres, qu'il est impossible de mettre directement en cohérence avec les modifications des conditions hydrométéorologiques générales et avec l'évolution des débits sur d'autres échelles. Cette remarque s'applique également à certains paramètres non cohérents des échelles de Cologne et de Lobith sur le Rhin. Ce comportement doit encore être analysé plus en détail.

## **4.2 Modifications modélisées au 21<sup>ème</sup> siècle**

### **4.2.1 Bases de données et représentation**

La synthèse ci-dessous se fonde sur les résultats du projet RheinBlick2050 de la CHR (Görgen et al. 2010). Les données ont été mises au point à l'aide de nombreuses chaînes de modélisation (figure 3). Elles reposent sur toutes les simulations climatiques réalisées dans le cadre de différents projets de recherche climatique européens et nationaux disponibles fin 2009. Après contrôle de plausibilité fondamentale et correction des biais, les champs de simulation de la température atmosphérique, des précipitations et du rayonnement global<sup>13</sup> ont été contrôlés, sélectionnés, corrigés (biais) puis utilisés comme données d'entrée du modèle hydrologique HBV (Eberle et al., 2005). A l'aide de ce modèle, des séries journalières de débit ont été générées pour différentes échelles du bassin du Rhin.

Le tableau 4 présente les modifications des précipitations par bassin (SomhN), du débit moyen (MQ) et du débit moyen le plus faible sur 7 jours (NM7Q) sur une période semestrielle. Les modifications de la température atmosphérique ne sont pas représentées mais signalées dans la synopsis (paragraphe 4.2.2).

Les paramètres de crue (MHQ et les valeurs journalières moyennes les plus élevées pour différentes récurrences) présentées dans Görgen et al. (2010) se fondent une sélection restreinte de projections climatiques combinée à d'autres méthodes (correction non-linéaire des biais et générateur météorologique), en raison des exigences particulières de statistiques des valeurs extrêmes. Les évaluations se fondent ici sur 7 simulations

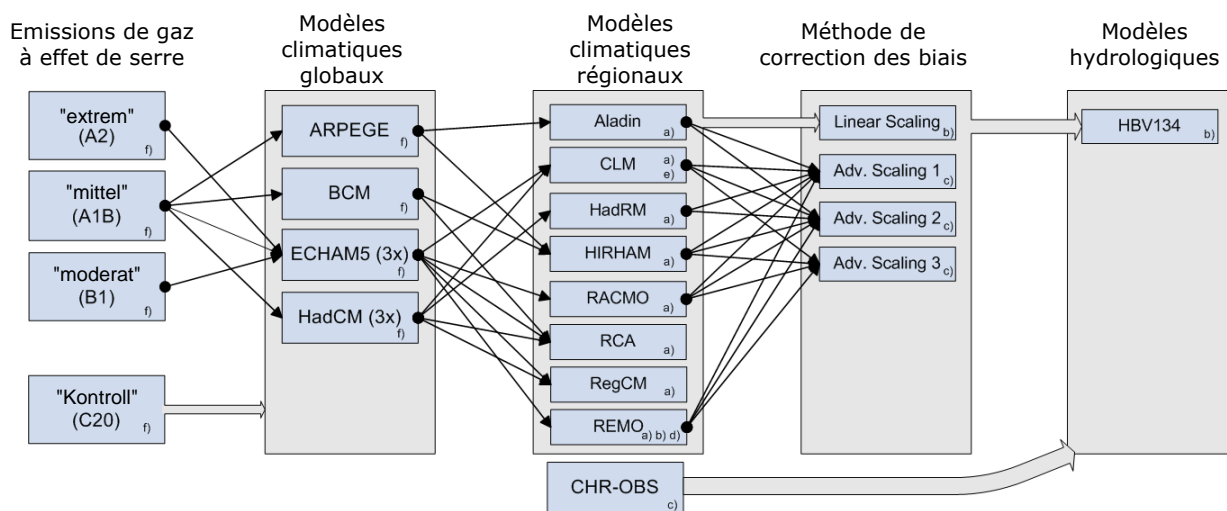
<sup>12</sup> ici : les débits journaliers moyens les plus élevés

<sup>13</sup> durée d'ensoleillement dans certains cas également

climatiques, alors que 20 simulations ont été utilisées dans la plupart des cas pour les autres paramètres<sup>14</sup>.

Les résultats de l'analyse des valeurs extrêmes de crue sont donc présentés séparément (tableau 5). Il convient également de considérer, comme indiqué au paragraphe 3.3, les limites des modèles hydrologiques dans la simulation de crues extrêmement rares. Les valeurs indiquées dans le tableau 5 représentent des indices du risque d'inondation émanant de crues « fréquentes », « moyennes » et « extrêmement rares ».

Les méthodes utilisées sont estimées applicables aux échelles caractérisées par des crues d'hiver à partir de la région des massifs moyens (en aval de Kaub), mais pas sur les tronçons du Rhin caractérisés par des crues d'été (de Bâle à Worms). Aucun enseignement n'est donc tiré pour ces dernières échelles (symboles blancs dans le tableau 5). Dans ce contexte, on attend en 2011 de nouveaux résultats dans le cadre des activités de recherche et des projets en cours ; par ex. CCHydro, KLIWA, KLIWAS.



**Figure 3 : vue générale des couplages de modèles à la base de l'analyse (cf. représentation schématique de la figure 2).**

Les cases grises regroupent les modèles traités de manière analogue dans la suite du processus. Les données CHR-OBS sont des données d'observation hydrométéorologique utilisées pour valiser le modèle hydrologique HBV134. Les lettres identifient les sources de données : (a) EU-ENSEMBLES, (b) BMVBS-KLIWAS, (c) CHR, (d) MPI-M-UBA, (e) BMBF-CLM, (f) CMIP3/IPCC\_AR4. Source : Nilson et al. (2010, révisé).

Les indications dans les tableaux 4 et 5 représentent ici des signaux de modification<sup>15</sup> entre la période de trente ans du présent simulé (1961-1990, « test de contrôle »), celle du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2021-2050, projection du « futur proche ») et celle de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (projection du « futur éloigné »). Pour la période 2071-2100, les incertitudes et les variations entre les différents scénarios d'émission indiquées dans le paragraphe 3.3 sont particulièrement pertinentes. Aucune indication ne peut être donnée sur la probabilité d'occurrence de ces scénarios d'émission. Les évaluations signalent uniquement, en l'état des connaissances actuelles, la sensibilité du climat régional et des débits du Rhin par rapport à une poursuite de la hausse des concentrations dans l'atmosphère des gaz à effet de serre.

<sup>14</sup> On dispose de 17 projections pour l'analyse du futur « éloigné » (2071-2100). Pour les précipitations par bassin, on a utilisé une projection de moins pour l'avenir proche et pour l'avenir éloigné.

<sup>15</sup> Signal de modification = différence entre la valeur de contrôle et la valeur de projection (c'est-à-dire la valeur moyenne sur la période 1961-1990 par rapport à la période 2021-2050 ou 2071-2100), exprimée en pourcentage de la valeur de contrôle.

Les précipitations par bassin se réfèrent à l'été et à l'hiver météorologiques (juin, juillet août et décembre, janvier, février). Les autres indications sont rapportées aux semestres (mai-oct. et nov.-avril pour le MQ et le NM7Q) ou années (nov.-oct. pour tous les paramètres de crue) hydrologiques. Dans le cadre de l'analyse des précipitations, les références aux bassins s'écartent en partie de ceux indiqués au paragraphe 4 (carte de l'annexe C)<sup>16</sup>. Pour ce qui est des échelles, celle de Würzburg est remplacée par l'échelle de Raunheim, plus en aval, qui n'était pas disponible pour l'analyse historique (paragraphe 4.1).

Les plages de valeurs ne couvrent pas l'étendue complète de « l'ensemble de modèles » évalués mais, pour chaque échelle et paramètre, uniquement les parties (appelées corridors de scénarios, plages « internes » ou encore zones de compression) fréquemment soumises à simulation à l'aide de différentes chaînes de modèles. La méthode de définition de ces « parties » est exposée dans Görden et al. (2010, p. 46 et suivantes). Les valeurs hors marge de variation ne sont pas prises en compte.

La méthode d'évaluation des crues (tableau 5) diverge également sur ce point. En raison du nombre sensiblement moins important des tests de simulation (7 au lieu de 20), on s'en tient ici à une représentation de la fourchette complète (maximum et minimum) sous forme de corridor de scénarios.

Les limites des corridors de scénarios sont arrondies à 5 %. Les fourchettes  $\geq 50\%$  sont accompagnées du symbole « Aucune indication ». Cette méthode s'applique également aux paramètres de crue des échelles de Bâle, Maxau et Worms (voir légende du tableau 3).

Un code de couleurs (voir tableau 3) autorise une interprétation supplémentaire des résultats selon des tendances similaires de futures évolutions. La méthode d'évaluation des crues s'écarte ici à nouveau de celle des autres paramètres.

**Tableau 3 : code des couleurs utilisé pour les signaux de modification au 21<sup>ème</sup> siècle (voir tableau 4 et tableau 5).** En raison de bases de données et de méthodes différentes, le code d'évaluation des crues (tableau 5) s'écarte de celui des autres paramètres (tableau 4).

Code des couleurs	Signification	Explications
Orange	Tendance à la baisse	Au tableau 4: la majorité (~80%) des projections affiche une tendance à la baisse.  <i>Au tableau 5: la moyenne des projections affiche une tendance &lt; -5%.</i>
Gris	Aucune tendance nette	Le nombre de projections à la hausse est à peu près égal à celui des projections à la baisse.  <i>Au tableau 5 : la moyenne des projections affiche une tendance comprise entre -5% et + 5%.</i>
Bleu	Tendance à la hausse	Au tableau 4: la grande majorité (~80%) des projections affiche une tendance à la hausse.  <i>Au tableau 5: la moyenne des projections affiche une tendance &gt; +5%.</i>
Blanc	Aucune indication possible	Fourchette de valeurs $\geq 50\%$ ou lacunes méthodologiques

<sup>16</sup> Le bassin « Rhin moyen » ne couvre pas la définition usuelle (cf. carte en annexe C).

## 4.2.2 Présentation synoptique des résultats

**Tableau 4 : Modifications (exprimées en pourcentage) des précipitations par bassin (SomhN), du débit moyen (MQ) et du débit d'étiage (NM7Q) entre la période de trente ans du présent simulé (1961-1990) et celle du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2021-2050) ou celle de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100).**

Les valeurs de la dernière période (mentionnées en italiques) montrent la sensibilité relative des précipitations et des débits dans le bassin du Rhin par rapport à une poursuite de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre. Les incertitudes importantes des scénarios d'émission sont à prendre en compte dans l'interprétation des résultats (paragraphe 2.3). Le tableau indique les corridors de scénarios d'un ensemble de 20 projections hydrologiques (17 projections pour « l'avenir éloigné »). Pour la situation des échelles, des bassins fluviaux et des sous-bassins : voir annexe C. Pour le code de couleurs : voir tableau 3 (base de données : Gørgen et al., 2010)

Paramètre	Echelle	Corridors de scénarios	
		Modification en % Futur proche	Modification en % Futur éloigné
SomhN Été météorologique (JJA)	Bassin jusqu'à Bâle	de -10% à +5%	<i>de -30% à -10%</i>
	Sous-bassin Rhin supérieur méridional	de -10% à +5%	<i>de -30% à -15%</i>
	Sous-bassin Rhin moyen / Rhin supérieur septentrional	de -10% à +10%	<i>de -30% à -10%</i>
	Sous-bassin Rhin inférieur	de -10% à +10%	<i>de -30% à -10%</i>
	<i>Bassin du Neckar</i>	de -10% à +10%	<i>de -30% à -10%</i>
	<i>Bassin du Main</i>	de -10% à +10%	<i>de -30% à -5%</i>
	<i>Bassin de la Moselle</i>	de -15% à +5%	<i>de -30% à -15%</i>
	Bassin jusqu'à Lobith	de -10% à +5%	<i>de -25% à -10%</i>
SomhN Hiver météorologique (DJF)	Bassin jusqu'à Bâle	de 0% à +10%	<i>de 0% à +20%</i>
	Sous-bassin Rhin supérieur méridional	de 0% à +15%	<i>de +5% à +25%</i>
	Sous-bassin Rhin moyen / Rhin supérieur septentrional	de 0% à +10%	<i>de +10% à +20%</i>
	Sous-bassin Rhin inférieur	de 0% à +15%	<i>de +5% à +20%</i>
	<i>Bassin du Neckar</i>	de 0% à +10%	<i>de +5% à +20%</i>
	<i>Bassin du Main</i>	de 0% à +15%	<i>de +10% à +20%</i>
	<i>Bassin de la Moselle</i>	de 0% à +10%	<i>de +5% à +20%</i>
	Bassin jusqu'à Lobith	de 0% à +15%	<i>de +5% à +20%</i>



## Poursuite du tableau 4

Paramètre	Echelle	Corridors de scénarios	
		Modification en % Futur proche	Modification en % Futur éloigné
MQ Eté hydrologique (mai-oct.)	Bâle	de -10% à +5%	de -25% à -10%
	Maxau	de -10% à +5%	de -25% à -10%
	Worms	de -10% à +5%	de -25% à -10%
	Kaub	de -10% à +10%	de -10% à +5%
	Cologne	de -10% à +10%	de -25% à -10%
	Lobith	de -10% à +10%	de -25% à -10%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de 0% à +25%	de -20% à +10%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -5% à +10%	de -25% à -5%
MQ Hiver hydrologique (nov.-avril)	Bâle	de 0% à +20%	de +5% à +25%
	Maxau	de 0% à +20%	de +5% à +25%
	Worms	de 0% à +20%	de +5% à +25%
	Kaub	de 0% à +20%	de +5% à +25%
	Cologne	de 0% à +15%	de +5% à +25%
	Lobith	de 0% à +15%	de +5% à +25%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de 0% à +25%	de +15% à +40%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de 0% à +20%	de +10% à +30%
NM7Q Eté hydrologique (mai-oct.)	Bâle	de -10% à +10%	de -20% à -10%
	Maxau	de -10% à +10%	de -20% à -10%
	Worms	de -10% à +10%	de -25% à -10%
	Kaub	de -10% à +10%	de -25% à -10%
	Cologne	de -10% à +10%	de -30% à -10%
	Lobith	de -10% à +10%	de -30% à -10%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de 0% à +20%	de -20% à 0%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -20% à +20%	de -50% à -20%
NM7Q Hiver hydrologique (nov.-avril)	Bâle	de +5% à +15%	de 0% à +15%
	Maxau	de 0% à +10%	de -5% à +15%
	Worms	de +5% à +15%	de -5% à +15%
	Kaub	de 0% à +15%	de -5% à +15%
	Cologne	de 0% à +15%	de 0% à +20%
	Lobith	de 0% à +15%	de -5% à +15%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de +5% à +15%	de 0% à +20%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -15% à +15%	de 0% à +20%

**Tableau 5 : Modifications (exprimées en pourcentage) du débit moyen de crue (MHQ) et du débit en situation de crue « fréquente », « moyenne » et « extrêmement rare » (dans un ordre de grandeur de périodes de retour de 10, 100 et 1000 ans) entre les période de trente ans du présent simulé (1961-1990), du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2021-2050) et de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100).**

Les valeurs de la dernière période (mentionnées en italiques) montrent la sensibilité relative des débits dans le bassin du Rhin par rapport à une poursuite de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre. Les incertitudes importantes des scénarios d'émission (ici : scénario A1B) sont à prendre en compte dans l'interprétation des résultats (paragraphe 2.3). Le tableau indique la plage de l'ensemble de 7 projections (6 pour « l'avenir éloigné »). Pour le code des couleurs, se reporter au tableau 3. (Base de données : Gørgen et al., 2010).

Indice	Echelle	Corridors de scénarios	
		Futur proche	Futur éloigné
MHQ Année hydrologique (nov.-oct.)	Bâle	de -5% à +10%	de -25% à +15%
	Maxau	de -5% à +15%	de -20% à +15%
	Worms	de -10% à +20%	de -15% à +15%
	Kaub	de -5% à +25%	de -10% à +20%
	Cologne	de 0% à +20%	de -5% à +20%
	Lobith	de 0% à +20%	de -5% à +20%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de 0% à +35%	de 0% à +35%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -10% à +15%	de -10% à +20%
Débit en situation de crue « fréquente »	Bâle	de -10% à +10%	de -20% à +20%
	Maxau	de -15% à +20%	de -15% à +25%
	Worms	de -15% à +15%	de -10% à +35%
	Kaub	de -15% à +15%	de -5% à +40%
	Cologne	de -5% à +15%	de 0% à +40%
	Lobith	de -5% à +15%	de 0% à +35%
	<i>Raunheim (Main)</i>	0% à +30%	de 5% à +40%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -5% à +15%	de 0% à +25%
Débit en situation de crue « moyenne »	Bâle	de -20% à +10%	de -30% à +25%
	Maxau	de -10% à +15%	de -25% à +30%
	Worms	de -5% à +20%	de -25% à +35%
	Kaub	de -5% à +20%	de -10% à +25%
	Cologne	de 0% à +20%	de 0% à +25%
	Lobith	de 0% à +20%	de 0% à +25%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de 0% à +20%	de 0% à +35%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -5% à +30%	de -5% à +25%
Débit en situation de crue « extrêmement rare »	Bâle	de -20% à +35%	de -10% à +50%
	Maxau	de -20% à +35%	de -20% à +65%
	Worms	de -15% à +30%	de -20% à +45%
	Kaub	de -5% à +25%	de -10% à +30%
	Cologne	de -5% à +25%	de 0% à +30%
	Lobith	de -5% à +20%	de -5% à +30%
	<i>Raunheim (Main)</i>	de -5% à +40%	de 0% à +45%
	<i>Trèves (Moselle)</i>	de -35% à +20%	de -20% à +45%

### Evolution jusqu'en 2050

Selon les projections disponibles, l'évolution jusqu'en 2050 se caractérise par une poursuite de la hausse de température comprise entre +1 et + 2 °C en moyenne sur l'ensemble du bassin du Rhin pour la période comprise entre 2021 à 2050 par rapport à l'état actuel (1961-1990). Elle est plus prononcée en tendance dans le sud (Alpes) que dans le nord.

On ne relève pas de changement notable dans le régime des précipitations en été. Les projections font état d'augmentations restant modérées en hiver et comprises entre 0% et +15% sur l'ensemble du Rhin. Il apparaît donc que les tendances identifiées pour le 20<sup>ème</sup> siècle au niveau des modifications des précipitations se maintiennent.

Ces évolutions se traduisent par des modifications globalement modérées du régime d'écoulement. Ainsi, les plages de débit moyen et de débit d'étiage (MQ et MN7Q) restent pratiquement inchangées en été par rapport à celles que l'on connaît actuellement. Les précipitations plus abondantes en hiver, qui tombent dans une mesure croissante sous forme liquide en raison de la hausse des températures, entraînent une augmentation des débits moyens et d'étiage avoisinant les +10% au niveau de la médiane des plages (de 0 à +20% pour MQ et de 0 à +15% pour NM7Q). Dans la plupart des cas, on relève pour les débits de crue en aval de l'échelle de Kaub des fourchettes d'évolution comprises entre -5% et +15% pour les crues « fréquentes », 0% et +20% pour les crues « moyennes » et -5% et +25% pour les crues « extrêmement rares ». Pour Bâle, Maxau et Worms, les déficits qu'accusent les méthodes font qu'il est impossible d'exprimer une quelconque évolution (cf. paragraphe 3.3).

Les résultats sont en partie légèrement différents pour les affluents analysés (Main, Moselle). Sur la Moselle, on note en tendance une baisse des précipitations en été ; sur le Main, de nombreuses projections font apparaître des hausses des débits moyens et d'étiage en été.

### Analyse de sensibilité jusqu'en 2100

Partant de l'hypothèse de concentrations de gaz à effet de serre continuant à augmenter dans l'atmosphère d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, on obtient des modifications significatives par rapport à la période actuelle (1961-1990).

Les projections des hausses de température sont de l'ordre de + 2°C à +4° (d'ici 2100). Les tendances spécifiques à chaque région – réchauffement plus marqué au sud qu'au nord - restent inchangées par rapport au futur « proche » et la hausse de température est plus prononcée en été qu'en hiver. A l'inverse des changements constatés sur le régime des précipitations jusqu'en 2050, on relève des baisses prononcées dans le bassin du Rhin au cours des mois d'été (généralement entre -10% et -30%). A partir de ces indications de base, les simulations débouchent sur des baisses comparables des débits moyens et d'étiage en été.

La projection de l'augmentation des précipitations au cours des mois d'hiver d'ici 2100 est généralement de l'ordre de +5% à +20% sur l'ensemble du Rhin. Cette augmentation est supérieure à celle déclarée pour l'avenir proche (de 0% à +15%). L'augmentation du débit moyen et du débit d'étiage en hiver correspond à celle des précipitations par bassin.

En ce qui concerne les paramètres de crue, de nombreuses projections font apparaître une augmentation aux échelles en aval de Kaub (jusqu'à +30%). En revanche, quelques projections annoncent une évolution opposée, si bien que les variations de l'Ensemble sont parfois importantes (Trèves : de -20% à +45%). Pour Bâle, Maxau, Worms, il n'est pas tiré d'enseignement pour les raisons mentionnées au paragraphe 3.3.

## 5. Conclusions

Le présent rapport rassemble les résultats récents obtenus sur les conséquences possibles du changement climatique sur le Rhin. Dans le cadre d'activités de recherche et de projets associant de nombreuses institutions (KLIWA, KLIWAS, projets de la CHR « Régime hydrologique » et « RheinBlick2050 »), des jeux de données étendus ont été traités à l'aide de méthodes ajustées à l'échelle transfrontalière pour différents paramètres hydrologiques du bassin du Rhin, dans le but d'obtenir une vue intégrale des connaissances actuelles. Il ne permet pas d'obtenir des prédictions précises et « véridiques » sur l'avenir. Les résultats évoluent plutôt dans des marges de variation très larges.

Ceci est notamment le cas pour les débits extrêmes simulés. On constate des déficits méthodologiques au niveau du traitement des crues de périodes de retour élevées. Celles-ci apparaissent notamment sur le Rhin supérieur. Certains aspects hydrodynamiques comme l'effet de rétention dû à la submersion et aux ruptures de digues, l'effet de rétention du lit majeur, les mesures de rétention des hautes eaux, etc. ne sont pas non plus pris en compte actuellement.

La plage de modifications présentée pour le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2021-2050) comprend les valeurs publiées jusqu'à présent dans plusieurs cas (voir annexe B ; CIPR, 2009 ; KLIWA, 2006). Les marges de variation présentées rendent transparentes les incertitudes liées aux simulations effectuées avec les modèles actuels. Il convient de tenir compte du fait que malgré la haute complexité des modèles et leur nombre élevé, il est concevable que le « véritable » futur soit en dehors de cette marge de variation. En effet, les actuels modèles ne tiennent pas encore compte de tous les éléments du système climatique et du régime des eaux ; les modèles climatiques globaux ne sont par ex. toujours pas couplés à un cycle du carbone. La situation changera avec le prochain rapport de situation IPCC (d'ici 2013/2014).

En moyenne de l'ensemble de projections (médiane, estimation centrale), les résultats relevés sont généralement plus modérés que les valeurs publiées jusqu'à présent. Cette remarque ne doit toutefois pas être comprise comme une « levée d'alerte ». Les calculs les plus récents font ressortir des pourcentages d'un ordre de grandeur décimal qui, s'ils venaient à être confirmés, contraindraient l'hydrosystème du Rhin à faire preuve d'une capacité d'adaptation élevée (« adaptive capacity ») en plus de celle déjà exigée pour réagir aux modifications du 20<sup>ème</sup> siècle. En outre, comme le montrent les analyses de sensibilité présentées, des modifications sensiblement plus fortes se manifesteraient d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle dans l'hypothèse d'une poursuite de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre.

Dans le présent rapport, on s'est délibérément abstenu de former une moyenne à partir de l'ensemble des projections. Dans le cas de la médiane, elle ne représente que le point central d'une plage de simulations à considérer toutes comme également vraisemblables<sup>17</sup>. Son choix ne peut être justifié objectivement. Réduire les discussions sur les stratégies d'adaptation à une seule « valeur climatique » peut donner une impression erronée des connaissances réelles sur les conséquences éventuelles du changement climatique.

La prise de décision en vue d'une stratégie d'adaptation doit tenir compte des incertitudes liées aux futures projections. Il relève de la responsabilité du décideur de dimensionner une mesure d'adaptation selon la valeur supérieure ou inférieure, ou encore selon l'estimation centrale de l'ensemble des projections.

---

<sup>17</sup> En règle fondamentale, il n'y a pas lieu de mentionner des probabilités objectives dans les analyses basées sur des scénarios. Les « probabilités » sont toujours conditionnées dans ce contexte aux hypothèses et aux modèles choisis de manière subjective.

## Bibliographie

(accès à toutes les références internet au 12.04.2011)

Belz, J.U., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister L. & W. Van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Schriften Bd. I-22, Koblenz und Lelystad: 377 S.

URL: <http://www.chr-khr.org/files/RapportI-22.pdf>

Bundeskabinett (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

URL: [www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php](http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php)

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Studie der ZAMG und der TU Wien im Auftrag von Bund und Ländern, Kurzfassung, Wien, 21 S.

URL: <http://wasser.lebensministerium.at/filemanager/download/69493/>

CIPR (2007) : Mandat du GE KLIMA subordonné au GT H, conformément au § 26 du Communiqué ministériel sur le Rhin. Etude de scénarii sur le régime hydrologique du Rhin. H(2)10-07f. Non publié.

CIPR (2009) : Analyse des connaissances actuelles relatives aux modifications climatiques et aux impacts du changement climatique sur le régime hydrologique dans le bassin du Rhin - Analyse bibliographique. Rapport CIPR n° 174. 67 p. URL :

[http://www.iksr.org/uploads/media/Bericht\\_174\\_f\\_01.pdf](http://www.iksr.org/uploads/media/Bericht_174_f_01.pdf)

CMIP (2009): Coupled Model Intercomparison Project.

URL: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>

Conférence ministérielle sur le Rhin (2007) : Le Rhin et son bassin : une ambition commune pour un fleuve qui vit et nous relie. Communiqué de la Conférence ministérielle sur le Rhin du 18 octobre 2007 à Bonn. 10 p.

URL : [http://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/Dokumente\\_fr/MIN07-02f.pdf](http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_fr/MIN07-02f.pdf)

Eberle, M., Buiteveld, H., Wilke K. & P. Krahe (2005): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part III – Daily HBV Model for the Rhine Basin. – Bericht BfG-1451, Koblenz.

ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. Abschlussbericht ENSEMBLES. 164 S.

URL: [http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf)

European Communities (2009): Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 24. River basin management in a changing climate. Technical Report - 2009 - 040. 132 S. URL:

[http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework\\_directive/guidance\\_documents/management\\_finalpdf/EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/guidance_documents/management_finalpdf/EN_1.0_&a=d)

Görgen, K., Beersma J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Perrin, C., Lammersen, R. & D. Volken (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project. KHR-Schriften Bd. I-23, Koblenz und Lelystad: 211 S.

URL: [http://www.chr-khr.org/files/CHR\\_I-23.pdf](http://www.chr-khr.org/files/CHR_I-23.pdf).

Hurkmans, R.T.W.L. (2009): Effects of climate variability and land use change on the water budget of large river basins. Dissertation Univ. Wageningen. 174 S.

INKLIM-A (2009): Interdisziplinäre Forschung zu Klimawandel, Folgen und Anpassung in Hessen.

URL: <http://klimawandel.hlug.de/forschungsprojekte/inklim-a-und-weitere-projekte.html>

IPCC (2007a): Climate Change 2007: Synthesis Report. 74 S.

URL: [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 (2007b): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 996 S. URL:

[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg1\\_report\\_the\\_physical\\_science\\_basis.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm)

Klein Tank, A.M.G., Lenderink, G. (red.) (2009): Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's, KNMI, De Bilt.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/>

KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Heft 5. 76 S.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. KLIWA-Heft 9. 104 S.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2009a): Modellgestützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee. KLIWA-Heft 13. 123 S.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>

KLIWA (2009b): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Heft 14. 114 S.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>

KNMI (2006): KNMI Klimaatscenario's: Samenvatting.

Téléchargeable à l'adresse : <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/>

Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D., Moser, H. (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 5/2009. S. 316-331.

LANUV-NRW (2010): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. 304 S. URLs:

[http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht\\_exus\\_teil1.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil1.pdf)

[http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht\\_exus\\_teil2.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil2.pdf)

Leibundgut, C. (2010): Nachhaltige Sicherung von Wasserressourcen – das NFP 61 im Spiegel globaler und nationaler Herausforderungen. Wasser Energie Luft. 102/3. S. 222-228.

Moser, H., Krahe, P., Maurer, T. & E. Nilson (2008): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Beitrag zum Symposium Klimaänderung - Was kann die Wasserwirtschaft tun? am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW), Heft 24.08 (ISBN: 978-3-940173-97-3)

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P., Maurer, T., H. Moser (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. KLIWA-Heft 15. S. 265-277. Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>

PRUDENCE (2007): Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects: The PRUDENCE Project. Climatic Change 81, Supplement 1.

Conférence ministérielle sur le Rhin (2007) : Le Rhin et son bassin : une ambition commune pour un fleuve qui vit et nous relie. Communiqué de la Conférence ministérielle

sur le Rhin du 18 octobre 2007 à Bonn. 10 p.

URL : [http://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/Dokumente\\_de/MIN07-02d.pdf](http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/MIN07-02d.pdf)

Richter, K-G., Schlaffer, S., Chomoev, E., & M. Hunger (2009): Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW. Projektbericht im Auftrag des LANUV NRW. 79 S.

URL: [http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/abfluss\\_studie.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/abfluss_studie.pdf)

Te Linde, A.H., Aerts, J.C.J.H. and Kwadijk, J.C.J. (2010a): Effectiveness of flood management strategies on peak discharges in the Rhine basin. *Journal of Flood Risk Management*, 3: 248-269.

Te Linde, A.H., Aerts, J.C.J.H., Bakker, A.M.R. and Kwadijk, J.C.J. (2010b): Simulating low probability peak discharges for the Rhine basin using resampled climate modeling data. *Water Resources Research*, 46 (WR03512).

Viner, D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. In: Beniston, M. (Hrsg.): *Climatic Change*. 10. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. S. 139-149.

Volken, D. (2010): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer der Schweiz. *KLIWA-Heft 15*. S. 279-284. (Téléchargeable à l'adresse : <http://www.kliwa.de>).

**Annexe A**

*Modifications survenues au 20<sup>ème</sup> siècle (état des faits en 2009)*

**Tableau 6 : Synthèse, sur la base de données hétérogènes<sup>18</sup> (citées dans : CIPR, 2009), des modifications de paramètres (hydro)météorologiques au 20<sup>ème</sup> siècle. Eté et hiver sont compris comme des saisons météorologiques (DJF, JJA).**

*Source : CIPR (2009)*

Taille	Résultat
Précipitations, hiver	Augmentation systématique, de +16% à +37%
Précipitations, été	Principalement en baisse, notamment dans le sud
Précipitations annuelles	Selon les modifications saisonnières : augmentation (de +8% à +10%) ou aucun changement
Température de l'air en hiver	Forte hausse de +1°C à +1,6°C
Température de l'air en été	Hausse de +0,6°C à + 1,1°C
Température moyenne annuelle	Hausse de +0,5°C à +1,2°C
Neige et glaciers	Baisse (de la hauteur de neige, de la durée de la couverture nivale, du nombre de jours avec chute de neige, de volume des glaciers etc.)
Conditions météorologiques générales	Augmentation de situations humides en zone non alpine. Augmentation de conditions occidentales cycloniques en hiver (favorisant la formation de crues)

**Tableau 7 : Synthèse, sur la base de données hétérogènes (citées dans : CIPR, 2009), des modifications de paramètres hydrologiques au 20<sup>ème</sup> siècle. Eté et hiver sont compris comme des saisons météorologiques (nov.-avril, mai-déc.).** *Source : CIPR (2009)*

Taille	Résultat
Evolution sur l'année	Déplacement volumique du débit de l'été vers l'hiver. Il en résulte une augmentation de la variabilité interannuelle en régime pluvial (hautes plaines centrales au nord) et une baisse en régime glacio-nival (Alpes au sud).
Débit annuel	Aucun changement au sud, augmentation au nord
Inondations	Augmentation généralisée des débits moyens de crue en hiver
Crues (rares)	Aucune tendance (nette)
Etiage	Plus prononcé : de manière significative (régime nival) ou tendancielle (régime pluvial)
température de l'eau	Hausse

<sup>18</sup> Sauf indication contraire, les modifications sont des valeurs moyennes. Il n'est pas possible de faire la distinction entre tendance significative et tendance non-significative dans le cadre de la présente synthèse. De même, des indications quantitatives ne sont pas possibles pour tous les paramètres. On trouvera plus de détails dans l'évaluation synthétique de la CIPR (2009) et dans les sources bibliographiques qu'elle cite.



**Annexe B**

*Modifications au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (état des faits en 2009)*

**Tableau 8 : Synthèse, sur la base de données hétérogènes (citées dans : CIPR, 2009), des modifications de paramètres (hydro)météorologiques jusqu'au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle. Été et hiver sont compris comme des saisons météorologiques (DJF, JJA). Cf. annotation 17. Source : CIPR (2009)**

Taille	Résultat
Précipitations, hiver	Augmentation de +4% à +35% selon les régions et les chaînes de modèles
Précipitations, été	Baisse de -4% à -20% selon les régions et les chaînes de modèles
Précipitations annuelles	pas d'infos
Température de l'air en hiver	Hausse de +1,1°C à 2,4°C
Température de l'air en été	Hausse de +1,4°C à 2,8°C
Température moyenne annuelle	pas d'infos
Neige et glaciers	pas d'infos
Conditions météorologiques générales	pas d'infos

**Tableau 9 : Synthèse, sur la base de données hétérogènes (citées dans : CIPR, 2009), des modifications de paramètres hydrologiques dans la première moitié du 21<sup>ème</sup> siècle. Été et hiver sont compris comme des saisons météorologiques (nov.-avril, mai-déc.). Source : CIPR (2009)**

Taille	Résultat
Evolution sur l'année	Augmentation en hiver de +14% à +40% Aucun changement ou baisse en été, 0 à -42% selon les régions et les chaînes de modèles
Débit annuel	pas d'infos
Inondations	Augmentation généralisée des débits moyens de crue en hiver
Crues (rares)	Hausse de +15 à +25%
Etiage	Baisse des débits entrants dans le lac de Constance et dans le bassin du haut Rhin, sinon augmentations possibles
température de l'eau	pas d'infos

**Annexe C**

**Figure 4 : Carte synoptique des zones d'évaluation et des échelles mentionnés dans le texte.** La délimitation choisie ici pour les régions « sous-bassin Rhin inférieur », « sous-bassin Rhin moyen/Rhin supérieur septentrional » et « sous-bassin Rhin supérieur méridional » s'écarte des définitions usuelles (par ex. secteurs de travail de la DCE).

