



# **Scénarios de débits induits par le changement climatique pour le bassin du Rhin**

***Actualisation des scénarios de débit dans le bassin du  
Rhin sur la base des connaissances les plus récentes sur  
le changement climatique***

Commission Internationale pour la Protection du Rhin

**Rapport n° 297**

### **Clause de non-responsabilité sur l'accessibilité aux documents**

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

### **Mentions légales**

#### **Editeur :**

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

**Principal rédacteur du rapport :** Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde - Allemagne ; GE HCLIM)

**Suivi technique de la gestion des données et de leur évaluation :** Carsten Viergutz (Bundesanstalt für Gewässerkunde, DAS-Basisdienst - Allemagne)

**Autres membres du groupe d'experts HCLIM de la CIPR ayant contribué à l'élaboration de ce rapport :**

Nom	Fonction/institution/État
Jan Kruijshoop	Président du GE HCLIM, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Pays-Bas)
Manuela Nied	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Allemagne)
Astryd Handwerk	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement « Grand Est » (DREAL Grand Est) (France)
Petra Schmockler-Fackel	Office fédéral de l'Environnement (OFEV), Suisse
Sylvia van Doorn	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Pays-Bas)
Ralph Schielen	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Pays-Bas)
Marlene Willkomm	Hochwassernotgemeinschaft Rhein (HWNG Rhein) (observatrice/ONG)
<i>Fourniture d'informations :</i>	
Claude Meisch	Administration de la gestion de l'eau (AGE) (Luxembourg)
Clemens Neuhold	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Autriche)
Ernst Überreiter	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Autriche)
Dieter Vondrak	Amt der Vorarlberger Landesregierung (AVL) (Autriche)

### **Clause de non-responsabilité sur l'accessibilité aux documents**

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

### **Remarque sur l'utilisation et la transmission à tiers de données et d'informations (voir détails importants au chapitre 5.3) :**

1. Si des données ou informations sont utilisées, le numéro et l'année du rapport CIPR (rapport CIPR n° 297, 2024) et, le cas échéant, le nom du service national (voir détails au point 3) sont à indiquer.
2. Les données (*données brutes, diagrammes dits ADN ou spaghetti, autres illustrations*) du rapport sont tirées du site web/système d'information de la Commission pour l'Hydrologie du Rhin.
3. On obtiendra sur demande auprès du secrétariat de la CIPR ([sekretariat@iksr.de](mailto:sekretariat@iksr.de)) d'autres données détaillées (par ex. sur d'autres échelles ou indicateurs hydrologiques) qui n'ont pas été utilisées dans le présent rapport. Le secrétariat transmettra dans un tel cas la demande aux membres compétents du GE HCLIM et/ou renverra aux équipes de chercheurs et services climatologiques nationaux mentionnés dans le présent rapport.

# Scénarios de débits induits par le changement climatique pour le bassin du Rhin

## Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Résumé extensif</b>	<b>4</b>
<b>1 Contexte de la présente étude</b>	<b>7</b>
<b>2 Données et méthodes</b>	<b>7</b>
2.1 Institutions et équipes de chercheurs productrices de données	8
2.2 Intégration des données et schéma d'analyse	10
2.2.1 Périodes de temps	11
2.2.2 Scénario	11
2.2.3 Échelles/sous-bassins	11
2.2.4 Statistiques et indicateurs hydrologiques	12
2.2.5 Agrégation et intégration	14
2.2.6 Indicateurs pour les crues extrêmes	16
2.2.7 Indicateurs additionnels	17
2.3 Remarques sur l'hétérogénéité des bases de données	18
<b>3 Résultats</b>	<b>19</b>
3.1 Modifications des conditions hydrométéorologiques	20
3.2 Modifications du régime d'écoulement	22
3.3 Modifications des indicateurs hydrologiques	23
3.3.1 Modifications jusqu'à la période présente (ici : 1991-2020)	23
3.3.2 Modifications jusqu'au milieu du XXI <sup>e</sup> siècle (ici : 2031-2060)	24
3.3.3 Modifications jusqu'à la fin du XXI <sup>e</sup> siècle (ici : 2071-2100)	25
<b>4 Autres impacts du changement climatique</b>	<b>31</b>
4.1 Influence des glaciers et de la neige	31
4.2 Niveaux d'eau des grands lacs en amont	32
4.3 Effets combinés de la modification du débit et de la hausse du niveau des mers (delta du Rhin et région de l'Ijsselmeer)	33
4.4 Pluies intenses et crues subites	35
4.5 Interférences et impact des aspects non climatiques	35
<b>5 Discussion et conclusions</b>	<b>36</b>
5.1 Modifications attendues de débit et du système hydrologique d'ici à 2100	36
5.2 Comparaison avec le rapport CIPR de 2011	37
5.3 Suggestions pour une utilisation future des données et des résultats	38
<b>6 Perspectives</b>	<b>39</b>
6.1 Nouvelles tendances découlant du rapport AR6	39
6.2 Besoins de recherche	41
6.3 Prochaine mise à jour du rapport de la CIPR	42
<b>7 Bibliographie</b>	<b>43</b>
<b>Annexe A: Technical and methodological background</b>	<b>48</b>
1. Coverage and scenarios	48
1.1 Spatial coverage	48
1.2 Temporal coverage	48
1.3 Underlying IPCC report	48
1.4 Selected scenario	48
2. Model chains	48
2.1 Climate models	49
2.2 Climate data processing schemes	50
2.3 Ensembles (number of members)	50
2.4 Hydrological models	50
2.5 Time periods	51
<b>Appendix B: Comparison of old and new discharge scenarios</b>	<b>52</b>

## Résumé

1. Le présent document actualise le **rapport CIPR n° 188 de 2011 sur les scénarios de débit**. Le rapport est en conformité avec le 5<sup>e</sup> rapport de situation du GIEC (version antérieure : 4<sup>e</sup> rapport du GIEC). Les données climatiques régionales fondées sur le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC, rapport le plus récent, n'étaient pas encore disponibles avec le degré de détail et l'étendue requis à la date de rédaction du présent rapport. On se fondera éventuellement sur les enseignements et les données issues du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC dans le cadre de futures remises à jour des scénarios de débit.
2. Le présent rapport de la CIPR fait référence à un **scénario d'émissions élevées (RCP8.5)** pour l'évaluation du risque et l'estimation des outils requis pour adapter le bassin du Rhin au changement climatique et renforcer sa résilience.
3. En synthèse, les changements identifiés sur une longue période de temps dans le passé (observations) et ceux attendus dans le futur (projections fondées sur les hypothèses du scénario RCP8.5) confirment l'idée déjà pressentie d'une évolution vers des **régimes d'écoulement davantage pluviaux** au détriment de régimes d'écoulement alimentés par la neige et les glaciers dans le bassin du Rhin. Il en résulte **une baisse des débits estivaux, une hausse des débits hivernaux et un état pratiquement inchangé du débit annuel moyen**.
4. La succession d'années avec des débits d'étiage extrêmement bas au cours de la dernière décennie ne concorde qu'en partie avec l'idée évoquée plus haut car les faibles débits des épisodes d'étiage les plus récents ne sont pas survenus uniquement en été mais également au cours des autres saisons. Cette **succession récente d'années sèches** est **exceptionnelle** comparée aux changements à long terme observés par le passé et simulés pour le futur proche.
5. Les scénarios présentés ici reposent sur des **modèles climatiques et hydrologiques** perfectionnés et apportent en partie de nouvelles informations sur les changements. Ces nouvelles connaissances invitent à **réévaluer la stratégie CIPR d'adaptation au changement climatique** et les rapports s'y référant (par ex. ceux des Groupes de travail et groupes d'experts B, S, H, STEMP, LW de la CIPR).
6. Le groupe d'experts HCLIM de la CIPR a fait ressortir certains thèmes spécifiques à traiter dans des **futurs projets de recherche**, à savoir a) élaborer une méthode uniforme permettant d'intégrer les projections de débits des États et institutions associés, b) dresser l'inventaire de méthodes dans le but d'améliorer les statistiques de valeurs extrêmes à partir de projections, et développer éventuellement des statistiques de valeurs extrêmes, c) réaliser des projections d'épisodes infrajournaliers de précipitations et de crues subites, d) examiner plus en détail les effets combinés du changement climatique (sécheresse, montée du niveau de la mer, changements climatiques et sociohydrologiques).

## Résumé extensif

Dans un volet de son **programme Rhin 2040** intitulé « Le Rhin et son bassin - Un milieu géré durablement et résilient aux impacts du changement climatique » (CIPR, 2020), la CIPR a chargé son groupe d'experts en climatologie (anciennement GE KLIMA, à présent GE HCLIM) de **remettre à jour d'ici 2024 l'ancienne étude des scénarios de débit**. Alors que les scénarios CIPR antérieurs, qui ont été publiés en 2011, se fondaient sur les informations du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2007 (GIEC, 2007), la présente mise à jour repose pour l'essentiel sur le 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation (GIEC, 2014). Les données climatiques régionales fondées sur le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC (GIEC, 2021), rapport le plus récent, n'étaient pas encore disponibles avec le degré de détail et l'étendue requis à la date de rédaction du présent rapport.

Comme dans la version antérieure, les nouveaux scénarios de débit de la CIPR combinent des connaissances récentes et des données des États riverains sur les répercussions du changement climatique sur le régime hydrologique du Rhin. La présente mise à jour se fonde sur les données de la Suisse, de l'Allemagne, de la France, des Pays-Bas et du réseau de recherche de la Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin (CHR). À la différence de la version antérieure, la saisie et l'intégration des données n'ont pas eu lieu dans le cadre du réseau mais ont été effectuées par le groupe d'experts HCLIM. Ce travail a été possible grâce à l'assistance technique apportée par un service climatologique géré par l'une des institutions associées.

En cohérence avec de nombreuses évaluations nationales sur les effets du changement climatique, le GE HCLIM a sélectionné le scénario d'émissions élevées (Representative Concentration Pathways - RCP8.5) jugé plus pertinent pour les interrogations de la CIPR concernant la gestion et les actions préventives que des scénarios plus modérés ou plus optimistes. Plusieurs de ces interrogations se réfèrent aux risques de situations critiques induites par le changement climatique dans le bassin du Rhin et au développement d'un hydrosystème résilient. Ces aspects seront repris dans une **stratégie globale d'adaptation au changement climatique de la CIPR en 2025**.

Le présent rapport se base sur des données d'observation et sur cinq jeux de données de simulation hydrologique établis dans le cadre de **diverses études nationales et régionales**. Ces jeux de données se différencient tant par les modèles utilisés que par les méthodes d'évaluation appliquées. Pour évaluer de manière comparative ces jeux de données, des décisions ont été fixées au niveau des **périodes à évaluer (référence 1981-2010 ; présent 1991-2020 ; futur proche 2031-2060 ; futur lointain 2071-2100), des indicateurs (indicateurs de débit moyen, d'étiage et de crue) et des échelles** ou sous-bassins. Ces décisions ont visé à assurer a) la comparabilité avec le rapport antérieur sur les scénarios de débits publié en 2011 et b) la meilleure intercomparabilité possible entre les différents jeux de données simulées. Malgré ces efforts, un certain niveau d'hétérogénéité subsiste entre les données issues de différentes sources. Il en résulte une plus grande dispersion des résultats par rapport au rapport précédent et une comparabilité restreinte entre les échelles limnimétriques individuelles.

À l'échelle mondiale, le changement climatique agit sur le régime hydrologique du Rhin en modifiant les précipitations, la température de l'air et d'autres variables qui conditionnent des changements au niveau de l'évaporation et de l'enneigement. Les principaux **changements hydrométéorologiques dans le bassin du Rhin** sont les suivants :

- a) Sur le bassin du Rhin dans son ensemble, la **température de l'air a déjà enregistré une hausse sensible** (de 0,7 à 1 °C selon les saisons) depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle et va continuer à **augmenter** d'1 à 2,5 °C à toutes les saisons météorologiques jusqu'au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (2031-2060) et de 3 à 5 °C d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2071-2100) avec des hausses majeures pendant l'été et l'automne (entre juin et novembre). Par conséquent, le **nombre de jours chauds** (> 30 °C) va augmenter alors que la fréquence des jours de gel et de glace va baisser.
- b) Les observations, tout comme les projections, montrent que le changement climatique aura pour effet de **décaler les quantités de précipitations** entre les saisons météorologiques, avec des **augmentations en hiver et au printemps et des diminutions en été**. Des **hausse modérées de la somme des précipitations annuelles** en découlent. Ces modifications se poursuivent au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et se traduisent vers la fin de ce siècle par des hausses et des baisses pouvant dépasser les 20 %.

- c) Les **projections** montrent **en tendance générale une plus grande fréquence d'épisodes de précipitations extrêmes**. Cette tendance ne ressort pas encore clairement dans les **observations**. On part du principe que les **précipitations intenses augmenteront tout comme le nombre de jours secs**. En outre, la **durée des périodes de sécheresse** devrait augmenter, même si ce signal n'est pas aussi clair que les autres signaux susmentionnés.

Ces changements hydrométéorologiques agissent entre autres sur la distribution saisonnière des débits dans les différents tronçons du Rhin. Le **régime d'écoulement** modifié se présente comme suit :

- d) Si l'on compare la période 1981-2010 avec celle allant de 1991 à 2020, on note que le débit **augmente actuellement en hiver et baisse en été**, quel que soit le régime de débit (nival, pluvial ou mixte). La tendance générale va donc vers des **régimes plus pluviaux**.
- e) D'une manière générale, les scénarios indiquent pour le **futur** que les **changements et tendances déjà observés s'amplifieront**, en particulier pour la période couvrant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2071-2100 comparée à 1981-2010) par rapport au milieu du siècle (2031-2060 comparée à 1981-2010).
- f) Bien que les différents jeux de données indiquent principalement une orientation de changement identique, on relève des **différences** sur certains mois, saisons, semestres et tronçons fluviaux, notamment en ce qui concerne la baisse des débits estivaux simulée pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dans le Rhin supérieur.

Les modifications des régimes d'écoulement sont liées à des changements agissant sur les indicateurs statistiques des **débits de crue, moyens et d'étiage**.

- g) Par rapport à la **période de référence (1981-2010)**, le **passé récent (1991-2020)**, et plus particulièrement la période démarrant après 2010, se caractérise par de **nombreuses années de sécheresse**. Des crues importantes ont certes été observées sur certains tronçons du Rhin (par ex. à l'échelle de Bâle en mai 1999 ou en août 2007 avec une crue plus que centennale) mais pas sur le Rhin dans son ensemble.
- h) Il en résulte donc que **tous les indicateurs de débit** (étiage et crue, saisonnier et annuel) affichent des **baisses** de quelques pour cent sur la plupart des échelles. Ce constat d'une baisse de débit en été et en hiver diffère des évolutions relevées au XX<sup>e</sup> siècle, qui montrent par ex. des débits en hausse (MQ) pour l'hiver. Ces récentes modifications, qui sont survenues sur une période de 10 ans, sont également reconnaissables dans les indicateurs pluriannuels (30 ans).
- i) **Plus on s'éloigne des Alpes**, plus les modifications susmentionnées sont **prononcées** en raison de l'impact plus important des affluents originaires des zones de moyenne altitude (Main, Moselle) qui accusent les changements relatifs les plus importants.
- j) Pour le **milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (2031-2060)**, tous les résultats reproduisent en synthèse le modèle connu dans les analyses climatiques antérieures réalisées pour le bassin du Rhin. En moyenne, les diminutions des débits estivaux (MQété, NM7Qété) sont contrebalancées par des augmentations des débits hivernaux (MQhiver) et il n'en résulte finalement qu'un **faible changement des débits annuels** (MQ).
- k) Ces changements sont associés à une **hausse des débits** dans la plage supérieure (MHQ, HQT) comme dans la plage inférieure du régime hydrologique (MNQ).
- l) On constate que **l'augmentation des débits en hiver** (MQ) indiquée dans les projections d'avenir diffère des évolutions actuellement observées. Les observations montrent actuellement une baisse pendant les mois d'hiver.
- m) Jusqu'à la **fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2071-2100)**, les modifications susmentionnées se poursuivent globalement et **s'intensifient** même dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle.
- n) En moyenne, des **baisses de débit** restent reconnaissables jusque vers la fin du XXI<sup>e</sup> **en été** (MQété, NM7Qété) **et des hausses en hiver** (MQhiver). Comme ces signaux contraires se neutralisent en grande partie, le **débit annuel moyen (MQ) évolue peu**.
- o) Une **intensification des situations hydrologiques extrêmes** est visible autant dans les indicateurs de débit de crue (MHQ, HQT) que dans ceux de débit d'étiage (MNQ). Au niveau de plusieurs échelles limnimétriques, certains signes indiquent également une baisse des débits hivernaux (NM7Qhiver).

En synthèse, les analyses à long terme des changements survenus par le passé (observations) et de ceux estimés pour le futur (projections du scénario RCP8.5) confirment le scénario déjà reconnaissable d'un changement vers des **régimes d'écoulement davantage pluviaux** au détriment de régimes d'écoulement alimentés par la neige et les glaciers dans le bassin du Rhin. **Il en résulte une baisse des débits estivaux, une hausse des débits hivernaux, un état pratiquement inchangé des débits annuels** et, pour plusieurs tronçons et affluents du Rhin, une intensification des étiages et des crues extrêmes par rapport à la période de référence. En revanche, la succession d'années de sécheresse extrême après 2010 ne concorde pas vraiment avec les projections, car elle affiche des baisses pour tous les indicateurs de crue et d'étiage et toutes les saisons (y compris l'hiver).

En raison des scénarios mis à jour, de l'amélioration continue des capacités des modèles climatiques et hydrologiques et de signaux de changement en partie nouveaux pour les indicateurs évalués, **le GE HCLIM recommande d'actualiser la stratégie d'adaptation de la CIPR et les rapports y afférents** (par ex. celui sur la température de l'eau) sur la base des nouveaux scénarios de débit.

Les **glaciers** restent des sources d'eau importantes pendant les situations prolongées de temps sec. Certains travaux de recherche axés sur les composantes du débit fluvial liées à la neige et à la glace montrent que le débit provenant des glaciers en soutien d'étiage dans le Rhin à hauteur de Bâle est déjà en retrait par rapport à son maximum (appelé « peak water ») et qu'il tombera presque à zéro d'ici la fin du siècle dans l'hypothèse d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5).

Avec le changement climatique, les modifications des débits des affluents alimentant les **grands lacs** du bassin amont du Rhin se répercutent généralement sur ceux-ci (niveaux plus élevés en hiver et plus bas en été et en automne que jusqu'à présent). Toutefois, la gestion actuelle des barrages de vallée dans la partie amont du bassin du Rhin, qui est dictée par le marché énergétique, accentue les effets du changement climatique en retenant l'eau en été et en la relâchant en hiver.

Dans le delta du Rhin, il faut tenir compte des répercussions convergentes des changements des débits fluviaux et de la **hausse du niveau des mers**. Ces deux aspects perturbent les possibilités d'évacuation des eaux, la gestion des risques d'inondation, de même que l'approvisionnement en eau douce et le reflux des eaux salées. Ici aussi, les pratiques et objectifs actuels de gestion risquent d'atteindre leurs limites dans le contexte du changement climatique.

Les modifications simulées avec le scénario RCP8.5 vont fondamentalement dans la même direction que celles de **scénarios antérieurs** (Special Report on Emissions Scenarios - SRES A1B). La dispersion des résultats est toutefois plus large en raison du plus grand nombre de jeux de données utilisés et de leur hétérogénéité. Le présent rapport est une première tentative de **comparaison d'études nationales basées sur le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC**. Il n'a pas été possible d'analyser de plus près dans le cadre du GE HCLIM les différences entre les modèles et les méthodes de traitement des données des équipes de chercheurs associés et de les éliminer éventuellement. Ce travail devrait faire partie intégrante de futurs projets au sein du réseau de chercheurs. Il est nécessaire par ailleurs **d'approfondir les recherches** sur a) un inventaire des méthodes disponibles pour produire des statistiques de valeurs extrêmes incluant des séries de débit simulé, b) les phénomènes extrêmes infra-quotidiens tels que les précipitations convectives et les crues subites qui en résultent et c) les effets complexes du changement climatique, par ex. ceux dus aux effets conjoints de modifications hydrologiques et de la hausse du niveau des mers, ainsi que de l'utilisation et de la gestion futures de l'eau sur l'ensemble du bassin.

La **génération la plus récente** de scénarios climatiques publiée dans le 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC de 2021 (GIEC, 2021 et 2023) n'est pas encore évaluée avec un degré de détail suffisant pour permettre une évaluation des impacts régionaux sur le Rhin et ses sous-bassins. Une comparaison globale basée sur le nouveau scénario d'émissions élevées (Shared Socioeconomic Pathways - SSP5-8.5) montre des modifications de température globale plus importantes (dans une grande plage de variation) que celles indiquées dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC sur lequel se fonde le présent rapport. Les scénarios climatiques KNMI'23 (du service météorologique néerlandais) se fondent déjà sur un jeu sélectionné de modèles climatiques mondiaux (Coupled Model Intercomparison Projects - CMIP6). Dans l'ensemble, les printemps et les étés seront plus secs.

La prochaine **mise à jour du présent rapport de scénarios** est planifiée en relation avec ou avant celle de la prochaine stratégie CIPR d'adaptation au changement climatique s'inscrivant dans un cycle de dix ans (prochaine mise à jour en 2035).

## 1 Contexte de la présente étude

La Conférence ministérielle sur le Rhin de 2007 a constaté que les impacts du changement climatique étaient nettement perceptibles dans le domaine de l'eau et a chargé la CIPR de prendre des mesures d'adaptation à ces impacts.

En réponse à cette demande, la CIPR a publié en 2011 son « Étude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin » (Rapport CIPR n° 188, 2011) à laquelle a également contribué la Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin (rapport de la CHR sur le projet « Rheinblick2050 » ; CHR, 2010). Ce rapport a débouché sur la première stratégie de la CIPR sur l'adaptation du bassin du Rhin au changement climatique, publiée en 2015a (CIPR 2015).

En 16<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin (2020), une nouvelle étape importante a été franchie dans l'examen du changement climatique à l'échelle du bassin du Rhin avec le lancement du Programme Rhin 2040 sous le titre « Le Rhin et son bassin : un milieu géré durablement et résilient aux impacts du changement climatique » (CIPR 2020). Un des principaux objectifs de Rhin 2040 est celui visant à actualiser la stratégie d'adaptation au changement climatique d'ici 2025.

Le groupe de travail 'Inondations et étiages' (GT H) a chargé le groupe d'experts HCLIM de la CIPR (GE HCLIM) d'actualiser le rapport n° 188 et de renouveler dans ce cadre les scénarios de débit. Le présent rapport constituera la base de la stratégie actualisée d'adaptation au changement climatique (2025) et se prolongera dans les activités des autres groupes de la CIPR ainsi que dans le rapport intermédiaire à publier en 2027 au titre du programme Rhin 2040. Le présent rapport et les résultats obtenus pourront aider diverses institutions (par ex. administrations, instituts de recherche, universités et bureaux de conseil) dans le bassin du Rhin comme en dehors de celui-ci, à analyser les répercussions du changement climatique, par ex. dans le cadre de directives européennes importantes.

## 2 Données et méthodes

Le changement climatique est l'un des défis majeurs pour l'homme, son cadre social et son environnement. Depuis la publication du rapport CIPR n° 188 (CIPR, 2011), plusieurs événements extrêmes se sont produits dans le bassin du Rhin et dans d'autres bassins fluviaux. Ils ont attiré l'attention sur les études des impacts climatiques et les stratégies d'adaptation au climat. Les bases de données et la bibliographie ont fortement augmenté en parallèle. Le présent rapport se limitera à mentionner quelques-uns des travaux essentiels en relation directe avec les activités du GE HCLIM.

Le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP) du Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) fournit des projections climatiques à l'échelle mondiale et des connaissances sur le changement climatique sous la forme d'un ensemble multi-modélisé de modèles climatiques mondiaux. Les résultats des différents modèles contribuent à étayer scientifiquement les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Meehl et al., 2011 ; Eyring et al., 2016). Pour réaliser des analyses régionales, par ex. pour le bassin du Rhin, les modèles climatiques mondiaux (par ex. EC-Earth) sont transposés à une échelle régionale dans le cadre de programmes financés par l'UE ou de programmes nationaux (par ex. EURO-CORDEX) (Jacob et al., 2014). Ces modèles régionaux sont à la base de simulations des impacts du changement climatique et d'analyses hydrologiques d'impact qui débouchent sur des projections de débit. Le présent rapport s'appuie sur des études hydrologiques régionales d'impact qui se concentrent soit sur le bassin du Rhin dans son ensemble soit sur ses sous-bassins.

Différents services climatiques ont été mis en place ces dix dernières années. Les portails nationaux et le Service Copernicus concernant le changement climatique proposent des informations sur les impacts hydrologiques du changement climatique (Berg et al., 2021 ; EU-Copernicus, 2024). Dans ce contexte, le terme « informations » signifie l'accès aux données et, dans certains cas, les conseils sur des questions particulières incluant des évaluations spécifiques pour les utilisateurs. Par ailleurs, des guides variés ont été développés ou remis à jour ces dernières années. Ils apportent des outils et des propositions sur la manière de considérer la gestion des eaux dans le contexte du changement climatique. Le niveau européen, par ex. sous forme du document guide n° 24 (EU-CIS, 2009, 2024), est également à prendre en compte.

## 2.1 **Institutions et équipes de chercheurs productrices de données**

Le présent rapport a pour objectif d'évaluer et d'actualiser les actuels scénarios de débit de la CIPR (CIPR, 2011). Par souci de cohérence et de comparabilité, le schéma d'évaluation de l'étude de scénarios de 2011 a été maintenu dans ses grandes lignes. En revanche, des sources de données plus riches et plus récentes, qui sont actuellement à la base des stratégies d'adaptation dans les États riverains du Rhin, ont été utilisées.

Les États du bassin du Rhin ont mené récemment ou mènent actuellement des études relatives aux impacts du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin du Rhin. On trouvera par la suite une brève description des études sur lesquelles se fonde le présent rapport et des équipes de chercheurs qui ont fourni des données au GE HCLIM. Des informations succinctes sur les sources de données et sur le cadre technique et méthodologique (scénarios, simulations climatiques et modèles hydrologiques utilisés) figurent au chapitre 2.3 et en annexe A.

La **Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin (CHR)** a lancé le projet « The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change » (CHR, 2016 et 2022). Il examine comment les composantes de débit du Rhin ont changé et comment elles continueront à évoluer à l'avenir sous l'impact du changement climatique, du recul des glaciers et de la baisse du manteau neigeux dans les zones montagneuses. Le projet quantifie les fractions journalières des composantes de pluie, d'eau de fonte des neiges et de fonte des glaciers jusqu'en 2100 en partant d'un scénario climatique sélectionné (RCP8.5) et d'un ensemble de sept projections pour les principaux affluents du Rhin et pour son cours principal (libellé « **ASGII** »).

En **Suisse**, le Conseil fédéral a chargé l'Office fédéral de l'environnement de préparer des bases hydrologiques fiables pour les mesures d'adaptation. À cette fin, le National Centre for Climate Services (NCCS) a analysé les impacts du changement climatique sur le bilan hydrique, les cours d'eau et la gestion des eaux dans le cadre du thème prioritaire intitulé « Cycle hydrologique » sous la désignation **Hydro-CH2018**. Ce travail s'est fondé sur les scénarios climatiques CH 2018 qui ont servi à simuler entre autres le scénario RCP8.5 pour la Suisse (NCCS, 2018). Différents modèles hydrologiques ajustés à des questions de recherche spécifiques (modèles pour les eaux souterraines, la température de l'eau, la végétation et l'agriculture) ont été appliqués dans le projet Hydro-CH2018 (Office fédéral de l'environnement - OFEV, 2021). Il en est ressorti des scénarios hydrologiques indiquant les futures évolutions attendues pour les cours d'eau suisses. Les résultats sont accessibles au public dans plusieurs publications et sur le site web du NCCS ([Scénarios hydrologiquesHydro-CH2018 \(admin.ch\)](https://www.nccs.admin.ch/ScenariosHydro-CH2018)) et dans l'atlas hydrologique de la Suisse ([HADES](https://www.hades.ch/), [HYDROmapsCC](https://www.hydromaps.ch/)).

En **Allemagne**, des connaissances, modèles et méthodes sont développés en continu au sein des réseaux institutionnels des Länder (par ex. dans le cadre de la coopération [KLIWA-changement climatique et conséquence pour la gestion de l'eau](https://www.kliwa.de/)) ainsi qu'au travers de projets et programmes de recherche de la fédération (par ex. [Réseau d'experts du BMDV](https://www.bmdv.de/) ; Nilson et al. 2020). La fourniture de données est assurée par des services climatologiques permanents (par ex. celui appelé « [DAS Basisdienst Klima und Wasser](https://www.das.de/) ») ou par des services de conseil des Länder qui appuient les stratégies nationales et régionales d'adaptation au changement climatique (par ex. la stratégie allemande d'adaptation, Deutsche Anpassungsstrategie - DAS). Au total, l'Allemagne fournit deux jeux de données sur les débits journaliers qui sont utilisés dans le présent rapport. Ces deux jeux se fondent sur le scénario d'émissions élevées RCP8.5, de même que sur un modèle de bilan hydrique intégrant des processus et une distribution spatiale détaillés (Bremicker, 2000 ; Nilson et al., 2020), et couvrent la période allant jusqu'en 2100. L'ensemble de projections mis au point par l'Office fédéral de l'hydrologie allemand (Bundesanstalt für Gewässerkunde - BfG) par le biais du service DAS « Climat et Eau » englobe 16 projections pour le bassin international du Rhin. Cet ensemble a été établi avec le modèle de bilan hydrique LARSIM-ME (résolution horizontale de 5 km, libellé « **DAS** »). Un autre ensemble de neuf projections a été constitué dans le cadre de la coopération KLIWA. La zone de modélisation englobe le bassin couvert par l'échelle limnimétrique de Cologne. Les simulations ont été effectuées avec le modèle de bilan hydrique LARSIM (résolution horizontale de 1 km) et un modèle dit synoptique pour le cours principal du Rhin (libellé « **KLIWA** »).

La **France** a fourni des données produites dans le cadre du projet **MOSARH21** (Moselle-Sarre-Rhin au XXI<sup>e</sup> siècle) (Thirel et al., 2018). Le projet, achevé en 2017, a été financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et l'IRSTEA (à présent INRAE) et mené par l'IRSTEA en collaboration avec le Laboratoire LOTERR (Université de Lorraine), l'HYDRON et la DREAL Grand Est. Ce projet a eu

pour objectif de faire une évaluation, pour le XXI<sup>e</sup> siècle, des impacts futurs des changements climatiques sur les débits de la **partie française des affluents du Rhin**, par ex. la Moselle et la Sarre. L'étude a été réalisée selon une approche multi-modèles (à l'aide de deux modèles hydrologiques, GRSD et LARSIM, et différents jeux de paramètres) conjointement avec un ensemble de projections climatiques ramenées à une échelle réduite (sur la base du scénario d'émissions AR5 du GIEC).

Aux **Pays-Bas**, l'Institut météorologique royal néerlandais (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut - KNMI) produit des scénarios et données climatiques à rythme régulier. Les scénarios **KNMI'23** sont les scénarios climatiques les plus récents et se fondent déjà sur le 6<sup>e</sup> rapport de situation du GIEC. Ces scénarios climatiques sont les données d'entrée des modèles de débit traités par Deltares en coopération avec le KNMI et le Rijkswaterstaat, qui est l'autorité compétente en matière de gestion des grands fleuves. Étant donné que les projections de débit réalisées sur la base des scénarios climatiques KNMI'23 étaient encore en cours de mise au point à la date de rédaction du présent rapport, il a fallu se replier ici sur des projections fondées sur le 5<sup>e</sup> rapport de situation (libellé « **KNMI'14** »). Les premiers résultats de KNMI'23 sur les changements météorologiques sont indiqués au chapitre 6.1. Les projections de débit sélectionnées dans la présente étude (libellé « **KNMI'14** ») utilisent le modèle hydrologique HBV et se fondent entre autres sur le scénario d'émissions élevées RCP8.5. Le jeu de données néerlandais se distingue des autres jeux de données à la fois au niveau du traitement des données et de l'approche suivie. On trouvera des détails à ce propos dans l'annexe technique A et dans les rapports qui y sont cités.

Certains États riverains ont certes réalisé en partie des études générales sur les impacts du changement climatique sur le bassin du Rhin, mais les informations n'existent pas avec un degré de détail tel qu'il permettrait étayer les évaluations du présent rapport. Néanmoins, comme certains jeux de données mentionnés plus haut couvrent de grandes superficies du bassin du Rhin, des informations sont également disponibles. Le **Liechtenstein** p.ex. est couvert par les données de la Suisse et la CHR. L'**Autriche** est couverte par les données de la CHR. Le **Luxembourg** et la **Belgique (région wallonne)** sont couverts par les données de la CHR, de KLIWA et de DAS.

Au total, le bassin du Rhin dans son ensemble est couvert par des données, mais les sources et les processus de traitement de ces données varient en fonction des sous-bassins et des échelles limnimétriques.

## 2.2 Intégration des données et schéma d'analyse

À l'heure actuelle, il n'existe encore aucune « meilleure pratique » univoque ou globalement reconnue pour évaluer les répercussions hydrologiques du changement climatique. Établir des projections modélisées de débit reste encore au contraire un défi lié à de nombreuses incertitudes à différents niveaux. Les équipes de chercheurs ayant apporté leurs données à la présente étude (cf. chapitre 2.1) ont choisi et utilisé de manière indépendante leurs propres approches et modèles. Le Tableau 1 donne un aperçu général des ressemblances (en vert) et des différences (en orange) entre les études mises à la disposition du GE HCLIM.

**Tableau 1 : vue synoptique des ressemblances (en vert) et des différences (en orange) entre les bases de données utilisées dans la présente étude**

État, groupe	CHR	NL	CH	DE	DE (Länder)	FR
Travaux réalisés	CHR-ASG II	KNMI'14	Hydro-CH2018	DAS (2021)	KLIWA	MOSARH21
Travaux antérieurs	CHR-Rheinblick (2010)	KNMI'06	Hydro-CH2011	KLIWAS, DAS (2015)	KLIWA	EXPLORE 2070
Couverture spatiale	Rhin (intégral)	Rhin (intégral)	Rhin (CH)	Rhin (intégral)	Rhin (Cologne)	Rhin (FR)
Couverture temporelle	1973-2100	1951-2100 (plages de temps <sup>1</sup> )	1981-2100	1971-2100	1971-2100	1971-2100 (plages de temps <sup>1</sup> )
Rapport du GIEC	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5
Scénario	RCP8.5	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5	RCP8.5, ...
Modèles climatiques	CORDEX	CMIP5, RACMO	CORDEX	CORDEX	CORDEX	CMIP5, CORDEX
Traitement des données climatiques	Correction des biais	Delta Change	Correction des biais	Correction des biais	Correction des biais	Delta Change
Taille des ensembles	7	3 <sup>2</sup>	20	16	9	4 <sup>3</sup>
modèle hydrologique	HBV-light, LARSIM	HBV	HBV-light, PREVAH	LARSIM	LARSIM	GRSD, LARSIM
Période de référence	1981-2010	1951-2006	1981-2010	1971-2000	1971-2000	1971-2000 (2005)
Futur « proche » (futur 2)	Futur lointain		2020-2049 (2045-2074)	Futur lointain	2021-2050 (2041-2070)	2021-2050
Futur « lointain »	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100
Travaux postérieurs	CHR-Rheinblick (2027)	KNMI'23	Hydro-CH2025	DAS (2027)	KLIWA ...	Explore 2

<sup>1</sup> Explication du terme « plages de temps » : les jeux de données KNMI'14 et MOSARH21 ne contiennent pas de périodes continues (séries temporelles quotidiennes s'étendant de 1971 à 2100) comme les autres jeux de données, mais des périodes limitées à quelques dizaines d'années (appelées ici « plages de temps »).

<sup>2</sup> ici uniquement  $W_L$ ,  $W_H$ ,  $W_{dry}$  ; les scénarios  $G_L$  et  $G_H$  également compris dans KNMI'14 n'ont pas été pris en compte, car ils ne se fondent pas sur le scénario RCP8.5. Voir explications et définitions y relatives au chapitre 2.1 et en annexe A.

<sup>3</sup> 2 x LARSIM, 2 x GRSD

Dans les limites des capacités des données brutes (série de données journalières), le groupe d'experts a réalisé une intégration technique des différentes contributions et sources de données en se référant aux conventions résumées dans les paragraphes suivants.

La Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) a traité et analysé les données pour le présent rapport dans le cadre du service de base DAS « Climat et Eau ». Les résultats des analyses ont été discutés dans le cadre du GE HCLIM. Le GE HCLIM a pris plusieurs décisions communes sur l'intégration des données et les étapes d'analyse. Le schéma d'analyse esquissé ci-après a été appliqué à toutes les données et a débouché sur les résultats présentés au chapitre 3. On trouvera des informations supplémentaires d'arrière-plan dans l'annexe technique (annexe A).

### 2.2.1 Périodes de temps

Les données de base (observations, projections) ont été communiquées sous forme de séries de données journalières allant de 1971 à 2100<sup>4</sup> (ou sous forme similaire, cf. Tableau 1). Il a été décidé de fonder les périodes d'évaluation sur les données disponibles en cohérence partielle avec des études sous-jacentes. Le présent rapport évalue les changements survenus pendant les périodes **2031-2060** (« futur proche », « milieu du XXI<sup>e</sup> siècle ») et **2071-2100** (« futur lointain », « fin du XXI<sup>e</sup> siècle ») par rapport à la période **1981-2010** prise comme période de référence. La période 1991-2020 (« présent ») a été ajoutée par ailleurs pour reproduire les changements hydrologiques observés dans un passé récent.

### 2.2.2 Scénario

Bien que plusieurs groupes utilisent plus d'un scénario, il a été décidé de limiter l'évaluation au scénario d'émissions élevées **RCP8.5**. En outre, il a été décidé de n'exécuter que des modélisations climatiques cohérentes avec le **5<sup>e</sup> rapport de situation du GIEC**.

Cette décision a été prise en premier lieu pour des raisons pragmatiques, car le scénario RCP8.5 est le seul qui a été appliqué dans *toutes* les études sur lesquelles se fonde le présent rapport. Le GE HCLIM a décidé en second lieu de suivre une approche à *orientation préventive*. On est ici parti de l'hypothèse que les groupes de la CIPR focaliseront et prépareront leurs travaux en partant de conditions défavorables (scénarios d'émissions élevées) plutôt que de conditions plus modérées. On notera ici que tous les scénarios (y compris le scénario RCP8.5) doivent être considérés comme des orientations futures *possibles* dont la probabilité d'occurrence dépendra des décisions et des mesures qui seront prises dans les années à venir. La prise en compte d'autres scénarios RCP (2.6 ou 4.5) mène à des résultats différents.

Le choix de se limiter aux scénarios et aux bases de données globales du 5<sup>e</sup> rapport de situation du GIEC vient du fait que les données et scénarios plus récents et conformes au nouveau 6<sup>e</sup> rapport de situation n'étaient pas encore disponibles sous forme de projections de débit.

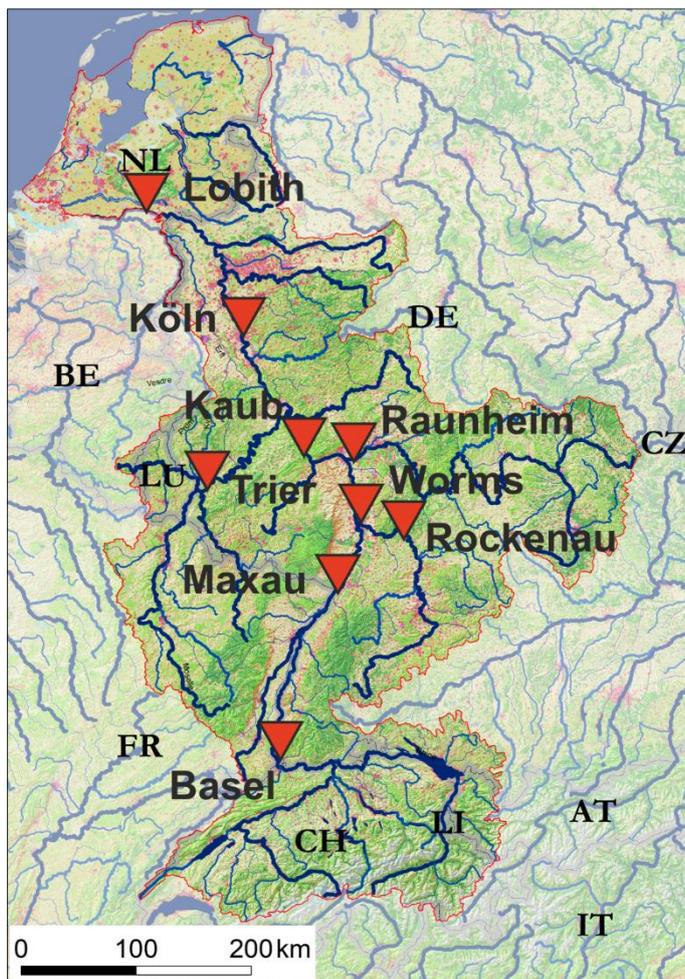
### 2.2.3 Échelles/sous-bassins

D'après les projections climatiques disponibles, le changement climatique va se faire ressentir sur différentes composantes du cycle hydrologique (précipitations de type neige et pluie, eaux souterraines, évaporation, etc.). Ces composantes ont un poids variable selon les régions du bassin du Rhin (par ex. la neige dans les zones alpines, la pluie dans les zones de moyenne montagne), de sorte que les modifications des conditions d'écoulement varieront également à l'échelle régionale dans le bassin du Rhin.

Pour recenser ces différences avec la concision requise dans le présent rapport et pour assurer la comparabilité avec le rapport de scénarios antérieur (CIPR, 2011), neuf échelles limnimétriques représentatives ont été sélectionnées. Ces échelles donnent un aperçu des caractéristiques régionales importantes du régime hydrologique et des conditions d'écoulement (Figure 1). Bâle et Maxau sont représentatives de la partie alpine du Rhin (actuellement forte influence nivale). Trèves, Raunheim et Rockenau sont représentatives des zones de moyenne montagne (à dominance pluviale). Worms, Kaub, Cologne et Lobith sont représentatives de caractéristiques mixtes de ces deux régions (régime sous influence nivo-pluviale). Le rapport n° 188 (CIPR, 2011) considère huit des stations susmentionnées. L'échelle de Rockenau a été ajoutée.

<sup>4</sup> À noter que ceci est vrai pour tous les modèles excepté pour KNMI'14 et MOSARH21 dont les plages de temps sont définies dans le tableau 1/chapitre 2.2.

*N.B. : Le jeu de données utilisé dans le présent rapport provient d'un plus grand nombre d'échelles que celui affiché dans la figure 1. On obtiendra d'autres informations et résultats d'évaluation sur demande auprès du secrétariat de la CIPR (sekretariat@iksr.de). Si besoin, le secrétariat transmettra la demande aux membres du GE HCLIM concernés et/ou renverra aux équipes de chercheurs et services climatologiques nationaux correspondants.*



**Figure 1** : Carte synoptique des échelles limnimétriques du bassin rhénan sélectionnées pour le présent rapport

#### 2.2.4 Statistiques et indicateurs hydrologiques

Comme dans le rapport n° 188 antérieur (CIPR, 2011), il a été procédé à une sélection de statistiques hydrologiques pour illustrer les impacts du changement climatique (Tableau 2). Les indicateurs ont été choisis de telle sorte que la comparabilité avec le rapport précédent (CIPR, 2011) soit assurée et que puissent être traités par ailleurs différents aspects de la gestion des eaux, comme par ex. la disponibilité annuelle de la ressource en eau, la navigation, l'écologie et la gestion des risques d'inondation. Par souci de concision, le présent rapport ne couvre pas tous les indicateurs et aspects hydroéconomiques envisageables. D'autres indicateurs peuvent être produits sur demande. Veuillez vous adresser ici au secrétariat de la CIPR.

**Tableau 2 : Aperçu général des indicateurs hydrologiques utilisés dans le présent rapport**

(N.B. : des informations sur d'autres indicateurs et paramètres hydrologiques peuvent être obtenues sur demande auprès du secrétariat de la CIPR. Si besoin, le secrétariat transmettra la demande aux membres du GE HCLIM concernés et/ou renverra aux équipes de chercheurs et services climatologiques nationaux correspondants.)

Indicateurs annuels (années hydrologiques : de nov. à oct.) :		Pertinence possible
Débit annuel moyen	MQ	Indicateur de la disponibilité générale de la ressource en eau
Débit moyen annuel le plus faible	MNQ	Indicateur des étiages annuels, important par ex. pour la navigation, la qualité de l'eau et l'environnement
Débit moyen annuel le plus important	MHQ	Indicateurs de débits annuels de crue (hors crue extrême), importants par ex. pour l'écologie alluviale et pour l'environnement
Indicateurs saisonniers (saisons hydrologiques estivale (de mai à oct.) et hivernale (de nov. à avril))		Pertinence possible
Débit moyen estival	MQS et MQW	Indicateurs de changements dans la saisonnalité du débit (régime d'écoulement) et de disponibilité de la ressource en eau
Débit estival moyen le plus faible (moyenne sur 7 jours)	NM7QS	Indicateur de stress dû aux étiages pendant la saison chaude (écologie, par ex. pour l'ichtyofaune en relation avec des températures d'eau trop élevées)
Débit hivernal moyen le plus faible (moyenne sur 7 jours)	NM7QW	Indicateur de stress dû aux étiages pendant la saison froide (écologie, par ex. pour l'ichtyofaune en relation avec des températures d'eau trop basses)
Débits de crues en relation avec les plans de gestion des risques d'inondation		Pertinence possible
Crue fréquente	HQ10	En relation avec le scénario de forte probabilité, conformément à la directive de l'UE sur la gestion des risques d'inondations (cartes et plans) <sup>5</sup>
Crue moyenne	HQ100	En relation avec le scénario de moyenne probabilité, conformément à la directive de l'UE sur la gestion des risques d'inondations (cartes et plans) <sup>5</sup>
Crue extrême	HQ1000	En relation avec le scénario extrême, conformément à la directive de l'UE sur la gestion des risques d'inondations (cartes et plans) <sup>5</sup>

<sup>5</sup> Les valeurs de référence considérées pour le débit dans le calcul des modifications se fondent sur les bases de données du présent rapport. Elles ne concordent pas obligatoirement avec les valeurs officielles convenues (p. ex. dans le cadre de la mise en œuvre nationale de la DI). Pour éviter toute confusion, il n'est pas indiqué de valeurs absolues.

Tous les indicateurs ont été calculés pour les échelles mentionnées ci-dessus à l'aide des données d'observation et de projection disponibles. Dans le cas des indicateurs de débit, les indicateurs annuels se réfèrent aux années hydrologiques (de nov. à oct.) et les indicateurs saisonniers se réfèrent aux saisons hydrologiques estivales (de mai à oct.) et hivernales (de nov. à avril). Les séries annuelles HQ à la base des statistiques de valeurs extrêmes se réfèrent aux années hydrologiques. On trouvera en annexe A d'autres indications sur l'analyse statistique des valeurs de crues extrêmes.

NB : les indicateurs hydrométéorologiques s'orientent sur les pratiques météorologiques usuelles et ont des références annuelles et saisonnières différentes de celles utilisées couramment (cf. chapitre 3.1 et tableau 6).

Tous les signaux de changement sont arrondis au pour cent supérieur.

### **2.2.5 Agrégation et intégration**

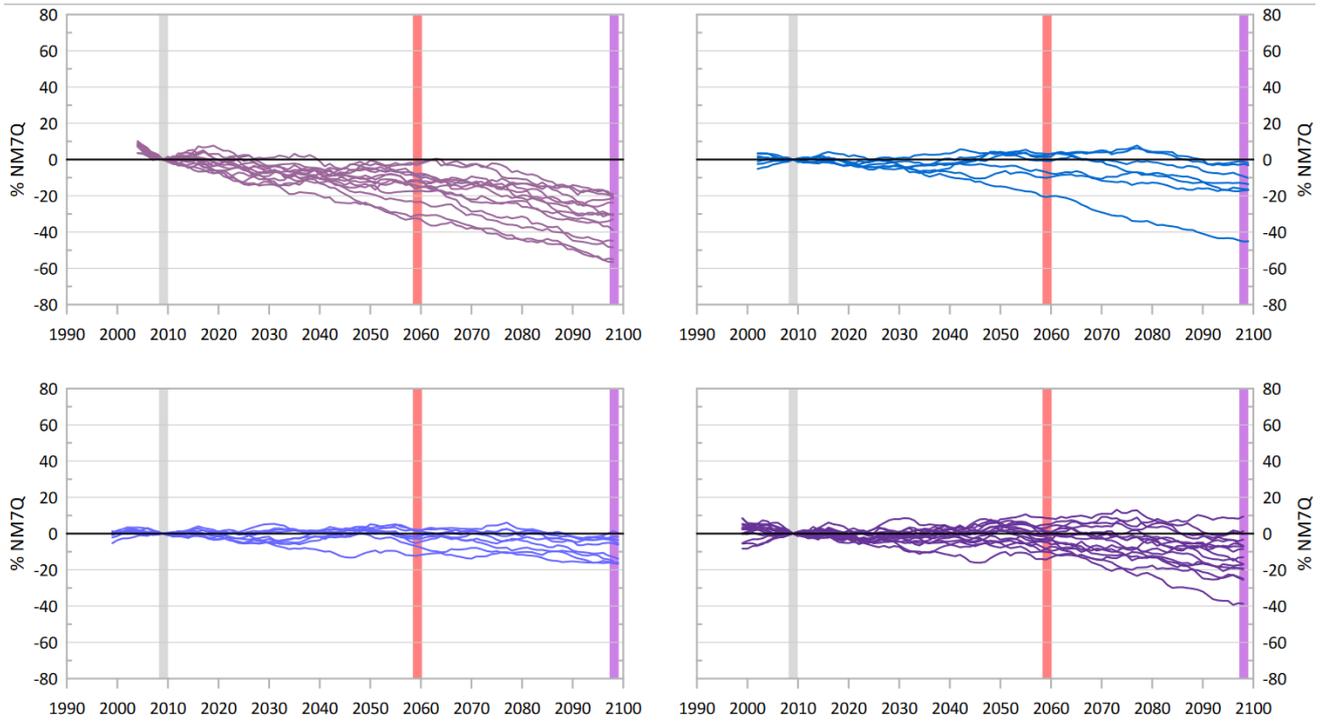
À partir des séries annuelles et saisonnières d'observation et de projection, les signaux de changement pluriannuels entre le futur et la période de référence (1981-2010) ont d'abord été calculés en pourcentages sous forme de moyennes glissantes de 30 ans (Figure 2).

Dans une deuxième étape, la fourchette des signaux de changement a été déterminée pour chaque jeu de données (projections de débit de la CHR, Hydro-CH2018, KLIWA, DAS, KNMI'14) entre la période de référence (1981-2010) et les périodes convenues pour le futur (2031-2060, 2071-2100) (colonnes verticales dans la Figure 2, partie gauche de la figure 3). La fourchette correspond à la dispersion des différentes projections pour le futur et donne une idée de la marge de variation des évolutions possibles.

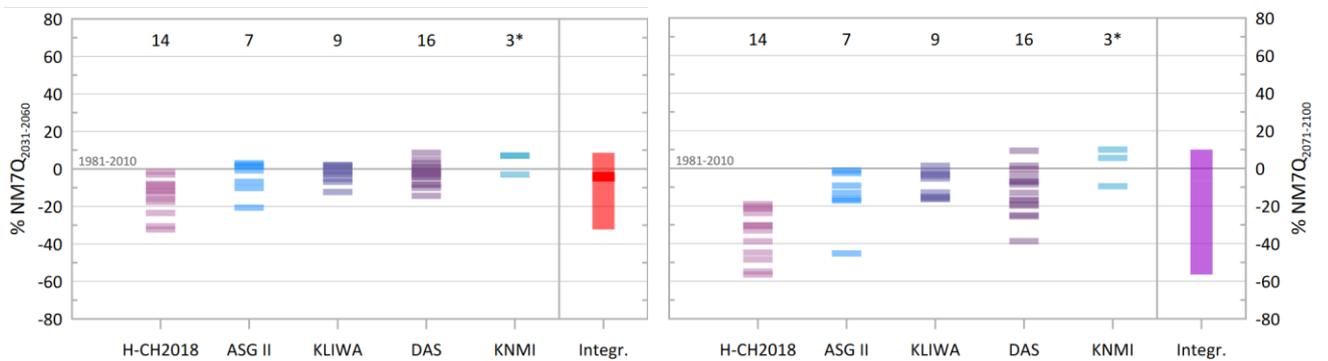
Pour finir et pour donner une vue intégrale de toutes les données, on a déterminé la dispersion totale (minimum et maximum) et, quand elle était disponible, l'intersection des jeux de données (partie droite de la figure 3). Ces informations sont également représentées dans les tableaux du chapitre 3.3.

Cette procédure a été appliquée à tous les indicateurs hydrologiques (Tableau 2) et à toutes les échelles sélectionnées (Figure 1) à l'exception des indicateurs HQ10, HQ100 et HQ1000 à traiter dans les statistiques des valeurs extrêmes (voir texte plus bas).

Il convient de signaler que cette forme d'intégration des données est certes très simplifiée mais néanmoins qu'un certain pragmatisme était de mise au regard des ressources, du mandat et des données disponibles. Vu les disparités et déséquilibres significatifs entre les différents jeux de données (cf. Tableau 1 et annexe A, chapitre 2), il n'a pas été effectué d'intégration statistique complète (par ex. détermination de percentiles de l'ensemble global). En outre, il n'a pas été réalisé d'évaluation des avantages et inconvénients des modèles et méthodes utilisés. Il en découle qu'une certaine prudence est de rigueur dans l'interprétation de la vue d'ensemble « intégrée » du chapitre 3.3 et dans les graphiques en annexe.



**Figure 2 : exemple de graphique de travail illustrant la plage de variation des différents ensembles (du haut vers le bas et de gauche à droite : Hydro-CH2018, ASGII, KLIWA, DAS).** Représentation exemplaire du débit d'étiage annuel (NM7Q) à l'échelle de Bâle, modification des moyennes glissantes sur 30 ans par rapport à la période de référence. Les colonnes verticales définissent la période de référence (1981-2010), de même que les périodes sélectionnées pour le futur dans le présent rapport (2031-2060 et 2071-2100 ; cf. figure 3). Tous les diagrammes sont disponibles sur le [site web de la CHR](#). La base de données KNMI'14 ne peut pas être reproduite ici car elle ne contient pas de séries temporelles continues (voir chapitre 4.2.2).



**Figure 3 : Exemple de graphique de travail illustrant la dispersion des ensembles reposant sur les différentes bases de données pour deux plages de temps du futur sélectionnées dans le présent rapport.** La « figure intégrée » montre l'écart entre les valeurs simulées les plus basses et les plus élevées de tous les ensembles (N.B. : il convient de tenir compte du fait que certaines lignes du graphique se superposent, ce qui explique pourquoi l'épaisseur des lignes est variable).

## 2.2.6 Indicateurs pour les crues extrêmes (et les scénarios de crues établis conformément au Plan de gestion des risques d'inondation : HQ10, HQ100, HQ1000)

La méthode évoquée plus haut n'a pas pu être maintenue pour les indicateurs de crue pertinents pour la gestion des risques d'inondation au titre de la directive de l'UE correspondante. La raison en est qu'il est nécessaire de disposer de séries temporelles très longues pour obtenir des statistiques de valeurs extrêmes qui soient robustes. À l'exception des Pays-Bas qui ont mis au point une méthode spécifique<sup>6</sup> (voir explications plus bas), il est pratiquement impossible d'estimer un événement de crue d'une période statistique de retour de 1 000 ans (HQ1000) à partir des périodes mentionnées dans le présent rapport, qui ne couvrent que des observations sur 30 ans et qui restent très imprécises, même pour un événement centennal (HQ100). Les équipes de chercheurs ayant contribué au présent rapport ont traité de différentes manières la durée (trop) courte de ces séries annuelles.

Inspirée de Rauthe et al. (2020), l'approche a consisté à traiter sous forme de « Grand Samples » ou de « séries regroupées » les projections des ensembles « Hydro-CH2018 », « ASGII » et « DAS ». Cette approche repose sur l'hypothèse que toutes les projections d'un ensemble se fondent sur le même collectif. Ceci suppose (a) que toutes les simulations climatiques aient été générées par le même scénario d'émissions, (b) qu'une correction des biais ait été effectuée à partir d'observations d'une période climatique similaire (1971-2000 ou 1981-2010) et (c) que toutes les simulations hydrologiques aient été réalisées avec le même modèle hydrologique. Ces conditions sont remplies pour chacun des trois jeux de données mentionnés. On agrandit de cette manière les jeux de données disponibles pour les statistiques de valeurs extrêmes (Tableau 3). Les temps de retour (HQ10, HQ100, HQ1000) de l'ensemble ASGII sont calculés par exemple sur la base de 7x30 ans (210 ans) plutôt que 1x30 ans<sup>7</sup>. Cette approche permet certes d'obtenir des statistiques plus robustes et de maintenir les périodes d'évaluation susmentionnées, mais il n'est plus possible en revanche d'indiquer des fourchettes d'évolutions possibles (c'est-à-dire que l'on n'a qu'une seule valeur de modification par ensemble, période et indicateur).

Dans le cas de l'ensemble « KLIWA » également, la base de données a été prolongée pour les statistiques des valeurs extrêmes. Ici, on a suivi le raisonnement selon lequel les crues extrêmes sont, plus que toutes autres crues, des phénomènes pratiquement imprévisibles dans le temps. Pour les statistiques des valeurs extrêmes, on a donc considéré « un » espace de temps futur intégrant toutes les années sur la période 2031-2100. Chacune des neuf projections KLIWA a été évaluée séparément sur la base de ces 70 ans. Cette méthode permet de reproduire la fourchette des évolutions simulées et d'ancrer les statistiques de valeurs extrêmes sur une période d'évaluation prolongée (projection de 70 ans au lieu de 30 ans). En revanche, il n'est pas possible d'indiquer de modifications temporelles spécifiques pour le milieu et la fin du siècle (c'est-à-dire que l'on a la même fourchette pour les deux périodes futures par indicateur).

Pour générer de longues séries annuelles synthétiques à partir desquelles peuvent être déterminées des crues/périodes de retour extrêmes, le modèle KNMI'14 a utilisé un générateur de précipitations permettant de simuler 50 000 ans pour le climat actuel. Le générateur de précipitations utilise la méthode dite de rééchantillonnage (resampling) qui consiste à générer de nouvelles séries synthétiques de précipitations pour le climat actuel avec les mêmes caractéristiques que les observations de la quantité journalière des précipitations avec différents modèles dans le temps (Deltares, 2014). Il est effectué une transformation des séries temporelles synthétiques pour le climat actuel, appelé référence par la suite, sachant que la transformation appliquée dépend entre autres du scénario climatique et de l'horizon temporel souhaité. La transformation des séries temporelles génère de cette manière des séries temporelles localisées de températures et de précipitations (et d'évapotranspiration potentielle - ETP). À partir de ces séries synthétiques, on détermine pour finir les temps de retour élevés à l'aide des outils hydrologiques et hydrauliques en place. Les séries synthétiques peuvent fournir de nouvelles sommes plurijournalières de précipitations plus élevées, mais elles sont limitées pour l'identification de la modification de la persistance (jours consécutifs humides ou secs).

<sup>6</sup> Aux Pays-Bas, les séries de données sont prolongées artificiellement par un générateur de précipitations et des modèles hydrologiques et hydrauliques, par ex. pour générer des temps de retour extrêmes. L'inconvénient est cependant qu'aucune modification de la persistance ne peut être appréhendée et que les incertitudes doivent être prises en compte.

<sup>7</sup> Hydro-CH2018 14x30 = 420 ans ; DAS 13x30 = 390 ans

À propos du jeu de données néerlandais « KNMI'14 », et tout particulièrement pour les statistiques de valeurs extrêmes à l'échelle de Lobith, des efforts importants ont été investis pour obtenir des informations robustes de modification des crues extrêmes. La méthode a été établie pour des temps de retour allant jusqu'à 50 000 ans et elle intègre, en plus de divers scénarios climatiques, différentes hypothèses de submersion en amont de la frontière néerlandaise.

Là encore, le jeu de données « MOSARH21 » (France) n'a pas été pris en compte dans l'analyse car il ne comporte aucune des échelles sélectionnées dans le présent rapport.

Le Tableau 3 regroupe les caractéristiques essentielles des méthodes mentionnées plus haut.

**Tableau 3: caractérisation des différentes bases de données et méthodes utilisées pour déterminer les indicateurs de crue HQ10, HQ100 et HQ1000.**

Source	Nombre d'années pour déterminer HQT	Méthode	Différenciation dans le tableau 9		
			Fourchette	Périodes de temps	Indicateurs
ASGII	210	Grand Sample	non	oui	oui
Hydro-CH2018	420	Grand Sample	non	oui	oui
KLIWA	70	Individual projections	oui	non	oui
DAS	390	Grand Sample	non	oui	oui
KNMI	56	Individual projections	oui	oui	oui

On voit clairement combien il est difficile de déterminer des modifications en termes d'occurrence et d'intensité d'événement extrêmes rares sous l'effet du changement climatique et que la fourchette des évolutions possibles qui en découle est particulièrement large. À côté de cette large fourchette d'évolutions simulées de précipitations dans la plage extrême, les incertitudes augmentent plus les temps de retour s'allongent, autant dans la modélisation hydrologique que dans l'évaluation statistique. Dans le cas des modélisations hydrologiques de la plupart des études (sauf KNMI'14), la capacité hydraulique du lit mineur n'est pas limitée et les ouvrages de rétention tels que des polders n'ont pas été considérés dans les modélisations. Dans la réalité, les crues extrêmes (hypothétiques) ainsi obtenues provoqueraient en partie des submersions et ruptures de digues déjà plus en amont. Ceci signifie que les modélisations obtenues surestiment en tendance les débits de crues extrêmes.

La « vue intégrale » exposée dans le Tableau 9 qui reproduit les indicateurs de crue HQ10, HQ100 et HQ1000 (ou HQ « fréquent », HQ « moyen » et HQ « extrême ») est, de manière similaire aux autres indicateurs, conditionnée par l'évolution respective la plus élevée et la plus faible du jeu complet de données actuel. Les résultats sur les différents jeux de données peuvent être consultés dans l'annexe des graphiques accessible en ligne ([site web de la CHR](#)).

À la différence des indicateurs hydrologiques restants, on a renoncé à représenter des valeurs d'observation (« référence » et « présent ») dans le cadre des évaluations pour HQ10, HQ100 et HQ1000. Les raisons en sont ici aussi, entre autres, des questions relatives à l'homogénéité des données. On trouvera des valeurs de débit officielles correspondantes par ex. dans le rapport CIPR sur le second cycle de la directive de l'UE sur la gestion des risques d'inondations (DI) « Mise à jour des cartes des zones inondables et cartes des risques d'inondation dans le DHI Rhin » (annexe 3) (CIPR, 2019).

### 2.2.7 Indicateurs additionnels

En plus de calculs réalisés sur les indicateurs hydrologiques, des calculs ont été effectués sur des **indicateurs hydrométéorologiques**. Ces derniers livrent des indications sur les **modifications de la température de l'air et des précipitations** dans le bassin du Rhin (ensemble du bassin jusqu'à l'échelle de Lobith ; chapitre 3.1). En outre, un indicateur de **changement de régime d'écoulement** (débit mensuel moyen pluriannuel) a été calculé pour des échelles sélectionnées (chapitre 3.2) afin de mieux comprendre les modifications hydrologiques (Tableau 2).

### 2.3 Remarques sur l'hétérogénéité des bases de données

Contrairement au rapport antérieur n° 188 (CIPR, 2011), le GE HCLIM n'a pas pu ancrer son travail sur un jeu de données consolidé auparavant mais a dû composer avec plusieurs jeux de données en partie hétérogènes (voir chapitre 2.2 et détails en annexe A). L'éventail global des différents jeux de données fait que la fourchette des résultats représentée ici est plus large que celle affichée par chaque équipe de chercheurs dans leurs études respectives. La dispersion est par ailleurs plus large que dans le rapport antérieur (CIPR, 2011) en raison de la multitude de projections dans le futur considérées.

En outre, cette hétérogénéité débouche sur différentes bases de données pour les échelles distinctes, qui sont chacune représentatives de tronçons fluviaux et affluents particuliers. Ceci vient du fait que quelques jeux de données ne couvrent que des parties du bassin du Rhin. Le Tableau 4 donne une vue d'ensemble des équipes de chercheurs qui ont fourni des données pour les différentes échelles.

Des aspects particuliers découlent des indicateurs de crues extrêmes (HQ10, HQ100 et HQ1000) ; voir le bloc rédactionnel distinct dans le chapitre 2 sous le titre « Agrégation ».

**Tableau 4 : Vue synoptique des groupes de recherche associés par échelle<sup>8</sup>**

Station	Fleuve	États (dans le bassin versant)	Hydro-CH2018 (CH)	ASGII (CHR)	KLIWA (DE)	DAS-BfG (DE)	KNMI14 (NL)	Total
Bâle	Rhin	CH	x	x	x	x	x	5
Maxau	Rhin	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Worms	Rhin	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Kaub	Rhin	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Cologne	Rhin	CH-FR-BE-LUX-DE		x	x	x	x	4
Lobith	Rhin	CH-FR-BE-LUX-DE-NL		x		x	x	3
Rockenau	Neckar	DE		x	x	x		3
Raunheim	Main	DE		x	x	x	x	4
Trèves	Moselle	FR-LUX-DE-BE		x	x	x	x	4

<sup>8</sup> Les données MOSARH21 ne sont pas mentionnées ici car elles ne couvrent aucune des échelles sélectionnées dans le présent rapport. Remarque : Le jeu de données complet englobe d'autres échelles limnimétriques. Ces données peuvent être obtenues sur demande via le [site web de la CHR](#).

### 3 Résultats

Le présent chapitre montre les résultats des modifications hydrométéorologiques (ensemble du bassin du Rhin, chapitre 3.1), des modifications du régime d'écoulement (trois échelles, chapitre 3.2) et, comme résultat central du présent rapport, des modifications d'indicateurs sélectionnés de débit d'étiage, moyen et de crue (neuf échelles, chapitre 3.3). Les tableaux comprennent des modifications du « présent » (1991-2020), du futur proche (2031-2060) et du futur lointain (2071-2100) par rapport à la période de référence (ici : 1981-2010).

Les plages de résultats affichées dans les tableaux 7 et 8 représentent pour chaque indicateur de débit, la fourchette totale respective de tous les jeux de données fournis (« vue intégrale », cf. chapitre 2.2) et (entre parenthèses) les intersections entre tous les jeux de données. Les tableaux ont une présentation similaire à celle du rapport n° 188 antérieur (CIPR, 2011). Le code de couleur suit les règles du tableau ci-dessous. Le tableau 5 explique le code de couleur choisi dans le présent rapport (pour les tableaux 6 à 9 et l'annexe B).

Le tableau 9 suit une autre méthode (voir chapitre 2.2 « Indicateurs de crues extrêmes ») mais conserve le code de couleur décrit ci-dessous.

**Tableau 5 : Code de couleur des tableaux 6 à 9**

Code de couleur	Signification	Explications
Orange	Modification vers des conditions plus chaudes/sèches	plus des 2/3 de la gamme totale signalent la modification correspondante
Bleu	Modification vers des conditions plus froides/humides	plus des 2/3 de la gamme totale signalent la modification correspondante
Gris	Signal indifférent	Autres cas

Les chapitres 2.2 et suivants et l'annexe technique A donnent des indications sur l'analyse et l'interprétation des données.

Les résultats du présent sont comparés à ceux du rapport n° 188 de la CIPR (CIPR 2011) en annexe B sous forme synoptique.

Les graphiques affichés à titre d'exemples dans la Figure 2 et la Figure 3 sont disponibles pour tous les indicateurs et toutes les échelles sur le [site web de la CHR](#).

### 3.1 **Modifications des conditions hydrométéorologiques**

Les modifications hydrométéorologiques sont des facteurs de changement hydrologique à plusieurs titres. Les modifications de précipitations ont un impact direct sur la répartition spatiale et saisonnière de l'eau. Les modifications de température entraînent des changements des formes d'évaporation (par ex. fonte de neige ou de glace) et de précipitations (par ex. neige, pluie).

Le tableau 6 décrit les modifications générales des conditions hydrométéorologiques dans le bassin international du Rhin en amont de l'échelle de Lobith sur la base de divers indicateurs de température et de précipitation. Y sont représentées les moyennes pluriannuelles pour le passé (1951-1980) et la période de référence (1981-2010) dérivées de données d'observation. Les signaux de changement simulés se réfèrent à un ensemble de 19 membres de modèles climatiques régionaux<sup>9</sup> reposant sur l'hypothèse du scénario d'émissions élevées RCP8.5. Bien que les projections de débit se fondent sur différents ensembles de projections climatiques (voir tableau 1 et annexe A), la direction et l'amplitude générales des changements hydrométéorologiques sont similaires pour tous les ensembles.

Dans la vue générale des résultats (Tableau 6), les modifications hydrométéorologiques suivantes sont mises en relief dans le bassin international du Rhin en amont de Lobith :

- a) La température de l'air a déjà enregistré une hausse sensible (de 0,7 à 1 °C selon les saisons) et va continuer à augmenter d'1 à 2,5 °C à toutes les saisons météorologiques jusqu'au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (2031-2060) et de 3 à 5 °C d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2071-2100) avec des hausses majeures pendant l'été et l'automne (entre juin et novembre). Par conséquent, le nombre de jours chauds (> 30 °C<sup>10</sup>) va continuer à augmenter alors que la fréquence des jours de gel et de glace (températures en dessous de zéro) va baisser.
- b) Les observations, tout comme les projections, montrent que le changement climatique aura pour effet de décaler les quantités de précipitations entre les saisons météorologiques, avec des augmentations en hiver et au printemps (de décembre à mai) et des diminutions en été (de juin à août). Des hausses modérées de la somme des précipitations annuelles en découlent. Ces modifications se poursuivent au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et se traduisent vers la fin de ce siècle par des hausses et des baisses pouvant dépasser les 20 %.
- c) Les projections montrent en tendance générale une plus grande fréquence d'épisodes de précipitations extrêmes. Les observations ne mettent pas encore clairement cette tendance en évidence. On part du principe que les précipitations intenses iront en augmentant, de même que les jours secs. En outre, la durée des périodes de sécheresse devrait augmenter, même si ce signal n'est pas aussi clair que les autres signaux susmentionnés.

<sup>9</sup> Mêmes membres que pour le jeu de données « DAS » mais avec trois runs additionnels (cf. Tableau 11 de l'annexe A).

<sup>10</sup> N.B. : aux Pays-Bas (KNMI'14), on les définit par > 25°C, mais ceci ne figure pas dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Vue synoptique des modifications hydrométéorologiques sur l'ensemble du bassin international du Rhin jusqu'à l'échelle de Lobith pour le futur proche et le futur lointain par rapport à la période 1981-2010.** Remarque : les références calendaires indiquées dans le tableau s'orientent sur les pratiques météorologiques usuelles : l' « hiver » va de décembre à février, le « printemps » de mars à mai, l' « été » de juin à août et l' « automne » de septembre à novembre. L' « année » correspond ici à l'année civile allant de janvier à décembre.

Sources de données du service fédéral allemand de météorologie (Deutsche Wetterdienst - DWD) comme partie du service de base DAS<sup>11</sup>

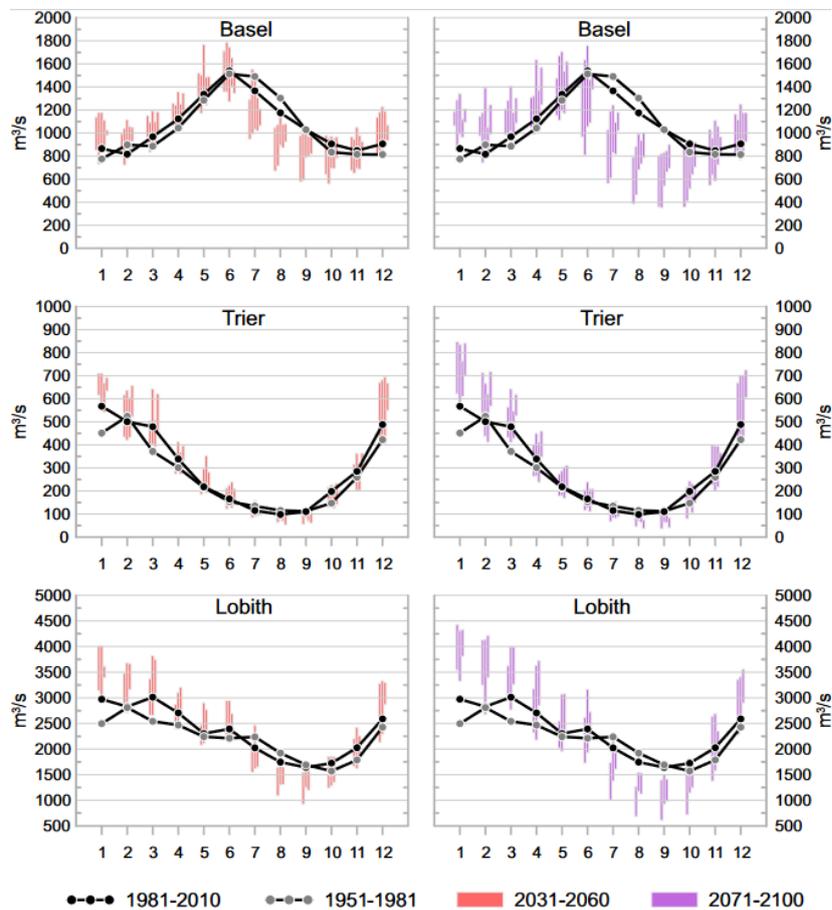
Bassin du Rhin jusqu'à l'échelle de Lobith	Valeurs observées		Modifications simulées	
	Passé 1951-1980	Référence 1981-2010	Futur proche 2031-2060	Futur lointain 2071-2100
Température moyenne de l'air (année)	7,9 °C	8,6 °C	de 1,5 à 2,3 °C	de 3,1 à 4,9 °C
Température moyenne de l'air (hiver)	0,1 °C	0,8 °C	de 1,2 à 2,6 °C	de 3,4 à 4,6 °C
Température moyenne de l'air (printemps)	7,4 °C	8,2 °C	de 1,1 à 1,9 °C	de 2,3 à 3,6 °C
Température moyenne de l'air (été)	15,7 °C	16,7 °C	de 1,6 à 2,4 °C	de 3,5 à 5,4 °C
Température moyenne de l'air (automne)	8,3 °C	8,8 °C	de 1,5 à 2,7 °C	de 3,3 à 5,7 °C
Quantité de précipitations (année)	940 mm	994 mm	de -1,9 à 8,6 %	de -3,8 à 13 %
Quantité de précipitations (hiver)	219 mm	238 mm	de -0,1 à 22,9 %	de 7,0 à 30,1 %
Quantité de précipitations (printemps)	210 mm	235 mm	de 1,5 à 16,6 %	de 1,2 à 24,4 %
Quantité de précipitations (été)	291 mm	274 mm	de -12,5 à 5,8 %	de -24,5 à 0,7 %
Quantité de précipitations (automne)	217 mm	245 mm	de -7,7 à 9,4 %	de -13,7 à 15,4 %
Nombre de jours chauds (année, Tmax > 30 degrés)	4 jours	6 jours	+6 à +12 jours	+16 à +33 jours
Nombre de jours de glace (année, Tmax < 0 degré)	27 jours	24 jours	-15 à -7 jours	-21 à -15 jours
Nombre de jours de gel (année, Tmin < 0 degré)	103 jours	93 jours	-38 à -22 jours	-67 à -45 jours
Nombre de jours avec précipitations intenses (année, somme > 20 mm)	7 jours	8 jours	0 à +2 jours	+1 à +3 jours
Nombre de jours secs (année)	230 jours	228 jours	-2 à +14 jours	+1 à +23 jours
Durée maximale de phase de sécheresse (année)	42 jours	37 jours	-7 à +14 jours	-6 à +16 jours

<sup>11</sup> Les indicateurs ont été fournis par les services météorologiques allemands comme contribution au service de base DAS « Klima und Wasser ». Les conditions observées sont reproduites sur l'outil international HYRAS (rasters journaliers de 5 km de côté des variables hydrométéorologiques depuis 1951 ; Rauthe et al., 2013) et les modifications simulées reposent sur l'ensemble climatique global et régional (Global Climate Model-Regional Climate Model - GCM-RCM) de 19 membres (CMIP5-CORDEX/ReKliEs ; Sperna-Weiland et al., 2021 ; HLNUG, 2024) impulsé par le scénario RCP8.5.

### 3.2 Modifications du régime d'écoulement

La répartition spatiale et les interférences entre pluie et neige (glace) débouchent sur des régimes distincts d'écoulement pouvant être attribués à différentes zones du bassin du Rhin. Aujourd'hui et dans le passé récent, les processus de formation de glace et de neige dominent les tronçons proches des Alpes, ce qui se traduit en moyenne par des débits bas en hiver et des débits de crue alimentés par l'eau de fonte en été. Dans la figure 4, cette alimentation en glace et en neige (régime nivo-glaciaire) est représentée par l'échelle de Bâle/Rhin. Cependant, les affluents qui drainent les zones de moyennes montagnes se caractérisent par un régime pluvial associé habituellement à des débits relativement élevés en hiver et à des débits d'étiage à la fin de l'été. Ce régime pluvial est représenté par l'échelle de Trèves/Moselle dans la figure 4. Là où les régimes glaciaux, nivaux et pluviaux se rejoignent (c'est-à-dire sur le cours moyen et aval du Rhin), un régime mixte (complexe) se constitue, comme il ressort de l'échelle de Lobith/Rhin.

La figure 4 montre par comparaison des périodes 1951-1980 et 1981-2010 (lignes grises et noires, observations) la modification observée des régimes d'écoulement par le passé. Les projections du futur sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100 se fondent sur les différentes études de scénarios. La dispersion des divers jeux de données est représentée sous forme de barres flottantes. Comme il est déjà expliqué au chapitre 2.2 et dans la figure 4, ces barres illustrent la dispersion respective de chaque projection de débit<sup>12</sup>. Les valeurs affichées sont les moyennes pluriannuelles du débit mensuel<sup>13</sup>.



**Figure 5 : moyenne pluriannuelle des débits mensuels pour trois échelles représentant les principaux régimes d'écoulement du Rhin (lignes noires, période 1981-2010) : régime nivo-glaciaire (Bâle), régime pluvial (Trèves), régime mixte (Lobith).** En outre, la figure montre la situation dans le passé (ligne grise, 1951-1980) et dans le futur (2031-2060, en rouge à gauche ; 2071-2100, en violet foncé à droite). Les projections dans le futur se fondent sur différentes études de scénarios (voir texte).

<sup>12</sup> Bâle (ASGII, Hydro-CH2018, DAS, KLIWA, KNMI'14) ; Trèves (ASGII, DAS, KLIWA, KNMI'14) ; Lobith (ASGII, DAS, KNMI'14)

<sup>13</sup> On a obtenu les valeurs mensuelles en calculant, pour chaque mois et chaque projection, le pourcentage de modification de chaque période dans le futur (2031-2060 ou 2071-2100) par rapport à la période de référence simulée (1981-2010) et en augmentant ou en diminuant la valeur observée de la période de référence (1981-2010) de ce pourcentage correspondant.

On note déjà dans les observations (comparaison entre 1951-1980 et 1981-2010) principalement des augmentations des débits en hiver et au début du printemps (décembre, janvier, mars) et des baisses en été (juillet, août) pour les trois régimes hydrologiques. Il se dessine donc une tendance vers des régimes plus alimentés par les pluies, ce qui est la conséquence du réchauffement planétaire progressif et se traduit par un déplacement vers les hauteurs de la limite d'enneigement et une régression des glaciers.

On s'attend globalement à une accentuation des changements déjà observés à l'avenir, notamment vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2071-2100).

Les modifications les plus visibles (voir figure 4) sont les fortes baisses des débits mensuels sur le Rhin supérieur (Bâle) en été et les fortes augmentations de débit sur le Rhin inférieur (Lobith) et dans les affluents (Trèves) en hiver. Bien que les différents ensembles affichent globalement la même orientation de changement, ils varient parfois fortement, notamment en ce qui concerne la baisse des débits estivaux simulée pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle pour le Rhin supérieur (Bâle). À ceci s'ajoute que les changements absolus semblent certes peu prononcés pendant les mois d'été dans les affluents de moyenne montagne (ici : Trèves/Moselle), mais les changements relatifs sont cependant comparativement importants en raison des faibles valeurs considérées (débit mensuel moyen se limitant parfois à 100 m<sup>3</sup>/s).

Les modifications des régimes d'écoulement donnent de premières indications sur les changements des indicateurs de crue et d'étiage décrits dans les chapitres suivants.

### **3.3 Modifications des indicateurs hydrologiques**

Les tableaux et les chapitres suivants regroupent toutes les informations disponibles sur les modifications des débits de crue, moyens et d'étiage. L'analyse porte sur une sélection d'échelles, d'indicateurs et de périodes (cf. chapitre 2.2). Les tableaux 7 à 9 comprennent des indications sur les modifications observées (présent, 1991-2020, chapitre 3.3.1) et les modifications simulées pour le futur (2031-2060, chapitre 3.3.2 et 2071-2100, chapitre 3.3.3), chaque fois par rapport à la période de référence (1981-2010). Pour l'interprétation des données, on invitera à se reporter aux remarques sur l'hétérogénéité et le traitement des données de base (voir chapitre 2.2 et annexe A).

Tous les signaux de modification restituent l'aperçu intégral tel qu'expliqué au chapitre 2.2. L'étendue des données est donc définie par les projections individuelles les plus extrêmes de tous les jeux de données et vont des situations simulées les « moins favorables » aux « plus favorables ». Lorsqu'elle existe, la plage de valeurs en cohérence avec les projections de toutes les études est indiquée entre parenthèses.

Cet affichage diffère d'autres évaluations de l'impact et de l'approche du GIEC (p. ex. GIEC, 2021, p. 62), qui ne couvrent pas l'ensemble des variations de tous les résultats, mais qui présentent des percentiles (p. ex. 15<sup>e</sup> et 85<sup>e</sup>) et excluent donc des projections extrêmes particulières. Il n'a pas été possible d'analyser dans le présent rapport la structure interne de l'ensemble en raison de l'hétérogénéité des données de base et des disparités de l'ensemble global compilé. L'annexe A (tableau 11) et l'annexe des graphiques publiée en ligne (voir le site web de la CHR) donnent plus d'explications.

#### **3.3.1 Modifications jusqu'à la période présente (ici : 1991-2020)**

Le passé récent (1991-2020, appelé « présent » dans ce document) s'est caractérisé par de nombreuses années sèches, en particulier pendant la dernière décennie (2011-2020), où les étiages extrêmes ont été fréquents (p. ex. en 2011, 2015, 2018). Des crues importantes ont certes été observées sur certains tronçons du Rhin (par ex. à l'échelle de Bâle en mai 1999 et en août 2007 avec une crue plus que centennale) mais pas sur le Rhin dans son ensemble. La crue de 2013 a été indiquée sur le Rhin comme ayant une période de retour inférieure à 20 ans (BfG, 2014).

Si l'on compare le « présent » (1991-2020) avec la période de référence (1981-2010 ; tableaux 7 et 8), on observe une baisse des indicateurs hydrologiques. Ceci signifie qu'on n'observe pas uniquement des baisses pour les débits d'étiage en été, mais également pour les indicateurs de crue en hiver ou le débit moyen annuel.

Plus on s'éloigne des Alpes, plus ces baisses sont prononcées. On remarque ici l'impact croissant des affluents à régime pluvial des zones de moyenne montagnes (par ex. Neckar, Main, Moselle) qui accusent les changements relatifs les plus amples. À première vue, les modifications paraissent minimales car elles se limitent à quelques pour cent sur la plupart des échelles. Il faut

cependant tenir compte du fait que ces changements sont devenus apparents sur une phase de temps relativement courte, environ 10 ans, et qu'ils sont même reflétés dans les valeurs moyennes sur 30 ans.

La plus récente diminution des débits moyens pendant l'hiver se distingue des tendances au changement des précédentes décennies (cf. chapitre 3.2) présentant une augmentation des débits hivernaux (comparaison des périodes 1951-1980 et 1981-2010). De même, le rapport CIPR n° 188 (CIPR 2011) a fait apparaître une forte augmentation du débit hivernal moyen au cours du XX<sup>e</sup> siècle (comparaison entre les deux périodes 1901-1930 et 1971-2000), ce qui a conduit à une hausse du débit annuel moyen au cours de ce siècle (CIPR, 2011).

### 3.3.2 Modifications jusqu'au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (ici : 2031-2060)

Les résultats synthétiques confirment les analyses antérieures sur le changement climatique réalisées pour le Rhin : en moyenne, les débits estivaux diminuent (MQété, NM7Qété), alors que les débits hivernaux augmentent (MQhiver). Il en découle que les débits annuels (MQ) n'évoluent que légèrement tandis que les débits de crue et d'étiage gagnent en intensité (hausse de MHQ, baisse de MNQ). Contrairement à la tendance saisonnière susmentionnée, des baisses des débits d'étiage hivernaux (NM7Qhiver) sont simulées à certaines échelles pour le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle.

Pour le cours principal du Rhin, la fourchette des modifications de débit pronostiquées pour le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (tableaux 7 et 8) peut être décrite de la manière suivante :

- a) L'orientation principale met en évidence une **baisse** des débits moyens estivaux (**MQété**), des débits d'étiage estivaux (**NM7Qété**) et des débits d'étiage annuels (**MNQ**). Dans l'ensemble, la plage de variation va de -25 % et -36 % à +5 % et +8 %.
- b) L'orientation principale met en évidence une **augmentation** du débit moyen hivernal (**MQhiver**) et du débit de crue annuel (**MHQ**). La fourchette globale va de 23 % et 44 % à la hausse jusqu'à -7 % à -10 % à la baisse. L'augmentation prévue du débit moyen hivernal (MQhiver) se distingue des modifications observées actuellement (présent 1991-2020, chapitre 3.3.1), qui indiquent une diminution du débit moyen hivernal.
- c) Les débits d'étiage hivernaux (**NM7Qhiver**) ne font **pas** apparaître **d'orientation claire** de changement sur les échelles du Rhin supérieur et du Rhin moyen et une **baisse** sur les échelles du Rhin inférieur.
- d) Les débits moyens annuels (**MQ**) ne font **pas** ressortir **d'orientation claire** de changement (de -15 % à +13 %).
- e) À l'exception de l'échelle de Bâle, des hausses sont enregistrées pour les **débits de crue avec un temps de retour de 10, 100 et 1000 ans** (HQ10, HQ100 et HQ1000). La fourchette de résultats et les incertitudes vis-à-vis de ces indicateurs sont importantes.

Pour les échelles sur les affluents (Neckar, Main, Moselle), l'éventail des modifications exprimées en pourcentage est généralement plus large que pour le cours principal du Rhin, ce qui est principalement dû aux faibles valeurs absolues de débit conduisant à des modifications relatives importantes. Certains signaux de changement sont moins reconnaissables sur les affluents cités ; par exemple le débit moyen estival (MQété) n'indique pas de changement robuste.

En règle générale, l'intersection de tous les ensembles (entre parenthèses) suit la même orientation de changement que la fourchette de distribution dans son ensemble, ce qui peut être considéré comme un indice simple de la concordance des principales informations de changement. Toutefois, certains indicateurs présentent des différences tellement grandes entre les ensembles qu'il n'y a pas d'intersection (« - »). Ceci est valable pour les indicateurs d'étiage MNQan et NM7Qété sur l'échelle de Bâle. De futurs travaux de recherche doivent expliquer ces différences (cf. idées dans le chapitre 6.2).

À propos des très larges fourchettes de résultats, il convient également de noter que certains signaux de changement extrêmes ne s'appuient dans certains cas que sur une unique projection. La hausse de l'indicateur du débit annuel de crue (MHQ) de plus de 60 % à Rockenau et de plus de 40 % à Kaub ne s'appuie par exemple que sur un seul membre d'un seul ensemble alors que la plupart des projections font ressortir des hausses de moins de 30 % (Rockenau) ou de moins de 20 % (Kaub). Se reporter aux graphiques pour analyser plus en détail la structure des données (voir site internet de la CHR).

### 3.3.3 Modifications jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (ici : 2071-2100)

Les modifications indiquées pour le milieu du siècle s'intensifient dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Les tendances saisonnières de changement se maintiennent donc : en moyenne, les débits estivaux diminuent (MQété, NM7Qété), alors que les débits hivernaux augmentent (MQhiver). Sur l'année complète, ces modifications se compensent et entraînent des modifications relativement faibles du débit moyen annuel (MQ). Une intensification est visible autant pour les indicateurs de débit de crue (MHQ, HQT) que pour ceux de débit d'étiage (MNQ). Certains indicateurs laissent également attendre une baisse des débits d'étiage hivernaux (NM7Qhiver).

Pour le cours principal du Rhin, la fourchette des modifications simulées pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (tableaux 7 et 8, dernière colonne) peut être décrite de la manière suivante :

- a) L'orientation principale met en évidence une **baisse** des débits moyens estivaux (**MQété**), des débits d'étiage estivaux (**NM7Qété**) et des débits d'étiage annuels (**MNQ**). Dans l'ensemble, la plage de variation montre des valeurs atteignant respectivement -48 %, -67 % et -57 % (limite inférieure) et des valeurs de +4 % à +9 % (limite supérieure).
- b) L'orientation principale met en évidence une **augmentation** du débit moyen hivernal (**MQhiver**) et du débit de crue annuel (**MHQ**). Dans l'ensemble, la plage de variation montre des valeurs atteignant respectivement +36 % et +38 % (limite supérieure) et -17 % à -2 % (limite inférieure).
- c) Les débits d'étiage hivernaux (**NM7Qhiver**) ne font **pas** apparaître **d'orientation claire** de changement sur les échelles du Rhin supérieur (de -38 % à +22 %) et une **baisse** sur les échelles du Rhin moyen et inférieur.
- d) Les débits moyens annuels (**MQ**) ne font **pas** ressortir **d'orientation claire** de changement sur toutes les échelles (de -23 % à +19 %) à l'exception de celle de Bâle qui indique dans une certaine mesure une tendance à la baisse (de -26 % à +10 %).
- e) À l'exception de l'échelle de Bâle, des hausses sont enregistrées pour les **débits de crue avec un temps de retour de 10, 100 et 1000 ans** (HQ10, HQ100 et HQ1000). La fourchette de résultats et les incertitudes vis-à-vis de ces indicateurs sont importantes.

Comme déjà mentionné dans le chapitre 3.3.2, l'éventail des modifications est généralement plus large pour les affluents (Neckar, Main, Moselle) que pour le cours principal du Rhin. À la différence du cours principal du Rhin, les échelles du Neckar et de la Moselle (Rockenau Trèves) indiquent en tendance une augmentation des débits annuels moyens (MQ).

Ici également, l'intersection de tous les ensembles (entre parenthèses) suit la même orientation de changement que la fourchette de distribution dans son ensemble (cf. chapitre 3.3.2). Sur les échelles du Rhin supérieur de Bâle et de Maxau, les différents jeux de données divergent tellement pour les débits d'étiage estivaux qu'il n'y a pas d'intersection commune.

Les remarques concernant la structure de l'ensemble au chapitre 3.3.2 sont également valables ici. Pour les indications relatives au futur lointain (2071-2100) également, il convient de prendre en compte que les données quantitatives doivent être interprétées avec prudence, car elles proviennent en partie de projections extrêmes. Par exemple, les baisses de débits d'étiage (NM7Qété, MNQ) de -50 % et au-dessous ne sont représentées que par un seul membre d'un seul ensemble sur certaines échelles. Tous les autres membres affichent des baisses de -30 % ou moins. Pour cette raison, une évaluation détaillée de la structure des données sur la base des diagrammes de l'annexe graphique (cf. [site internet de la CHR](#)) est fortement recommandée.

**Tableau 7 : Indicateurs annuels de débit moyen, d'étiage et de crue (MQ, MNQ, MHQ).** Toutes les modifications relatives par rapport à 1981-2010 (%). Intégration de diverses sources de données (chapitre 2 et annexe A).

Remarques concernant la colonne « Modifications simulées » : Voir Tableau 5 et chapitre 2 pour les explications sur le code de couleurs et des informations complémentaires sur les valeurs affichées. Les valeurs qui ne sont pas entre parenthèses donnent l'ensemble de la fourchette des variations potentielles du débit dans le bassin du Rhin (variations minimales à maximales de toutes les projections) ; les valeurs entre parenthèses présentent la fourchette de résultats présentés dans tous les jeux de données utilisés concordants. (Intersection des différents ensembles de projections. S'il n'y a pas d'intersection, ceci est indiqué par un « - ».)

Indicateur	Échelle	Valeurs observées (m <sup>3</sup> /s)	Modifications observées (%)	Modifications simulées (%)	
		Référence 1981-2010	Présent 1991-2020	Futur proche 2031-2060	Futur lointain 2071-2100
MQ	Bâle	1073	-3	-15 à +11 (-6 à +5)	-26 à +10 (-8 à -2)
	Maxau	1272	-4	-14 à +12 (-7 à +4)	-23 à +12 (-8 à -1)
	Worms	1457	-4	-12 à +13 (-7 à +4)	-19 à +14 (-7 à +2)
	Kaub	1745	-5	-13 à +13 (-5 à +6)	-16 à +17 (-4 à +4)
	Cologne	2203	-6	-12 à +11 (-4 à +7)	-13 à +19 (-3 à +8)
	Lobith	2324	-6	-11 à +11 (-4 à +10)	-12 à +19 (-3 à +13)
	Rockenau (Neckar)	146,2	-8	-13 à +24 (-11 à +16)	-13 à +28 (-2 à +15)
	Raunheim (Main)	223,3	-7	-22 à +23 (+5 à +15)	-44 à +33 (+11 à +15)
	Trèves (Moselle)	295,5	-8	-12 à +19 (0 à +10)	-12 à +27 (+7 à +23)
MNQ	Bâle	504,0	-1	-32 à +8 (-)	-57 à +9 (-)
	Maxau	618,6	-4	-26 à +7 (-8 à 0)	-48 à +6 (-15 à -6)
	Worms	700,0	-5	-27 à +7 (-11 à 0)	-48 à +3 (-19 à -6)
	Kaub	836,1	-4	-27 à +6 (-15 à -1)	-46 à +1 (-23 à -5)
	Cologne	1001	-6	-29 à +4 (-18 à -2)	-47 à -1 (-27 à -6)
	Lobith	1074	-5	-29 à +4 (-19 à -3)	-48 à -1 (-27 à -6)
	Rockenau (Neckar)	41,53	-6	-28 à +18 (-21 à +7)	-35 à +15 (-22 à +4)
	Raunheim (Main)	70,72	-4	-33 à +16 (-19 à +8)	-42 à +21 (-25 à -3)
	Trèves (Moselle)	49,40	-11	-51 à +8 (-26 à -4)	-66 à +16 (-30 à -21)

**Tableau 7 :** (suite)

MHQ	Bâle	2844	-3	-14 à +17 (0 à +10)	-17 à +24 (+5 à +8)
	Maxau	3223	-4	-7 à +30 (+2 à +14)	-3 à +28 (+9 à +14)
	Worms	3599	-5	-3 à +43 (+3 à +16)	-3 à +31 (+12 à +17)
	Kaub	4547	-6	-3 à +44 (+4 à +19)	-8 à +37 (+15 à +21)
	Cologne	6751	-7	-4 à +39 (+5 à +21)	-12 à +38 (+17 à +22)
	Lobith	7 043	-8	-7 à +36 (+5 à +21)	-12 à +37 (+16 à +30)
	Rockenau (Neckar)	1108	-7	-9 à +69 (-3 à +46)	-16 à +46 (+5 à +35)
	Raunheim (Main)	1036	-12	-20 à +42 (+8 à +28)	-27 à +60 (+24 à +33)
	Trèves (Moselle)	2081	-11	-1 à +35 (+6 à +21)	-12 à +49 (+23 à +31)

**Tableau 8 : Indicateurs saisonniers de débit moyen et d'étiage (MQ, NM7Q ; saisons hydrologiques).** Modification relative par rapport à 1981-2010 (%). Intégration de diverses sources de données (chapitre 2 et annexe A).

Remarques concernant la colonne « Modifications simulées » : Voir Tableau 5 et chapitre 2 pour les explications sur le code de couleurs et des informations complémentaires sur les valeurs affichées. Les valeurs qui ne sont pas entre parenthèses donnent l'ensemble de la fourchette des variations potentielles du débit dans le bassin du Rhin (variations minimales à maximales de toutes les projections) ; les valeurs entre parenthèses présentent la fourchette de résultats présentés dans tous les jeux de données utilisés concordants. (Intersection des différents ensembles de projections. S'il n'y a pas d'intersection, ceci est indiqué par un « - »).

Indicateur	Échelle	Valeurs observées (m/s <sup>3</sup> )	Modifications observées (%)	Modifications simulées (%)	
		Référence 1981-2010	Présent 1991-2020	Futur proche 2031-2060	Futur lointain 2071-2100
MQ Été	Bâle	1225	-4	-25 à +4 (-16 à -2)	-48 à -4 (-21 à -15)
	Maxau	1352	-5	-24 à +5 (-16 à -1)	-47 à -3 (-21 à -14)
	Worms	1482	-6	-23 à +6 (-16 à 0)	-46 à -1 (-21 à -12)
	Kaub	1671	-6	-21 à +7 (-16 à +1)	-43 à +2 (-20 à -10)
	Cologne	1913	-7	-21 à +6 (-17 à 0)	-42 à +3 (-21 à -8)
	Lobith	1971	-7	-20 à +6 (-17 à +4)	-42 à +4 (-21 à -6)
	Rockenau (Neckar)	103,4	-10	-16 à +24 (-16 à +19)	-37 à +22 (-20 à +6)
	Raunheim (Main)	144,1	-6	-30 à +27 (-10 à +8)	-56 à +27 (-13 à +3)
	Trèves (Moselle)	151,1	-14	-26 à +15 (-21 à +6)	-41 à +19 (-25 à +10)
MQ Hiver	Bâle	919,2	0	-10 à +22 (+6 à +14)	0 à +32 (+10 à +20)
	Maxau	1191	-2	-2 à +21 (+5 à +14)	+4 à +31 (+9 à +19)
	Worms	1431	-3	-4 à +21 (+4 à +14)	+3 à +32 (+10 à +20)
	Kaub	1820	-4	-7 à +22 (+6 à +14)	0 à +35 (+12 à +20)
	Cologne	2498	-5	-7 à +23 (+6 à +14)	-2 à +36 (+13 à +23)
	Lobith	2683	-5	-6 à +23 (+6 à +16)	0 à +35 (+12 à +28)
	Rockenau (Neckar)	189,6	-7	-11 à +24 (-8 à +16)	-12 à +34 (+5 à +20)
	Raunheim (Main)	303,7	-7	-21 à +30 (+14 à +16)	-43 à +46 (-)
	Trèves (Moselle)	442,3	-6	-8 à +28 (+7 à +13)	-7 à +38 (+18 à +27)

**Tableau 8 :** (suite)

NM7Q Été	Bâle	648,4	-2	-35 à +5 (-7 à -5)	-62 à +7 (-)
	Maxau	750,8	-5	-36 à +2 (-12 à -5)	-57 à +2 (-)
	Worms	824,8	-5	-36 à +1 (-15 à -4)	-56 à -1 (-24 à -21)
	Kaub	956,3	-5	-35 à +1 (-19 à -3)	-54 à -5 (-28 à -18)
	Cologne	1105	-6	-34 à +1 (-22 à -3)	-53 à -6 (-32 à -17)
	Lobith	1173	-5	-33 à 0 (-22 à -2)	-53 à -6 (-32 à -17)
	Rockenau (Neckar)	47,21	-7	-24 à +16 (-20 à +8)	-38 à +7 (-23 à -2)
	Raunheim (Main)	81,35	-3	-33 à +22 (-21 à +4)	-46 à +15 (-23 à -6)
	Trèves (Moselle)	58,07	-11	-51 à +9 (-28 à -7)	-68 à +9 (-32 à -26)
NM7Q Hiver	Bâle	544,0	0	-17 à +15 (-2 à +7)	-32 à +26 (-8 à +8)
	Maxau	687,2	-2	-12 à +11 (-7 à +5)	-38 à +22 (-14 à +7)
	Worms	785,4	-3	-15 à +10 (-10 à +4)	-41 à +20 (-18 à +5)
	Kaub	952,4	-2	-17 à +10 (-15 à +2)	-42 à +21 (-21 à +1)
	Cologne	1177	-4	-20 à +9 (-18 à +3)	-46 à +21 (-23 à -1)
	Lobith	1264	-4	-20 à +9 (-19 à +3)	-45 à +20 (-27 à -1)
	Rockenau (Neckar)	62,67	-4	-28 à +23 (-24 à +6)	-40 à +30 (-28 à +20)
	Raunheim (Main)	109,4	-4	-33 à +17 (-19 à +8)	-41 à +23 (-25 à -3)
	Trèves (Moselle)	111,8	-11	-43 à +14 (-21 à +1)	-54 à +23 (-29 à -9)

**Tableau 9 : Indicateurs de modification de débit de crue « fréquente », « moyenne » et « extrême » (définition s'appuyant sur les scénarios des cartes des zones inondables) par rapport à 1981-2010 (% , HQ10, HQ100, HQ1000)**

Remarques concernant la colonne « Modifications simulées » : Voir Tableau 5 et chapitre 2 pour les explications sur le code de couleurs et des informations complémentaires sur les valeurs affichées. L'approche pour déterminer les indicateurs diffère des précédents tableaux. Voir ici le chapitre « Indicateurs pour les crues extrêmes » sous 2.2. \*très incertain

Indicateur	Échelle	Modifications simulées (%)	
		Futur proche 2031-2060	Futur lointain 2071-2100
HQ10 « fréquent »	Bâle	-8 à +11	-8 à +20
	Maxau	-1 à +20	-1 à +30
	Worms	+2 à +26	+2 à +36
	Kaub	-1 à +24	-1 à +40
	Cologne	-7 à +27	-7 à +38
	Lobith	+8 à +21	+12 à +37
	Rockenau (Neckar)	0 à +44	0 à +44
	Raunheim (Main)	-18 à +48	-18 à +48
	Trèves (Moselle)	0 à +31	0 à +36
HQ100 « moyen »*	Bâle	-12 à +21	-18 à +21
	Maxau	-5 à +42	-5 à +43
	Worms	-3 à +45	-3 à +47
	Kaub	-8 à +56	-8 à +56
	Cologne	-26 à +61	-26 à +61
	Lobith	+5 à +18	+7 à +42
	Rockenau (Neckar)	-17 à +67	-17 à +67
	Raunheim (Main)	-24 à +94	-24 à +94
	Trèves (Moselle)	-20 à +49	-20 à +52
HQ1000 « extrême »*	Bâle	-25 à +32	-28 à +32
	Maxau	-12 à +59	-12 à +59
	Worms	-13 à +81	-13 à +81
	Kaub	-18 à +89	-18 à +89
	Cologne	-39 à +97	-39 à +97
	Lobith	+3 à +20	+5 à +51
	Rockenau (Neckar)	-31 à +155	-31 à +155
	Raunheim (Main)	-27 à +151	-27 à +151
	Trèves (Moselle)	-38 à +94	-38 à +94

## 4 Autres impacts du changement climatique

Les modifications du débit dans le bassin du Rhin ont un impact sur diverses stratégies de gestion des eaux. Alors que les chapitres précédents résument l'état actuel des connaissances sur les modifications du débit, il existe d'autres aspects supplémentaires spécifiques et régionaux qui sont pertinents pour comprendre la dynamique de l'hydrosystème rhénan. Ce chapitre fournit de **plus amples connaissances sur l'évolution future de l'hydrosystème rhénan sous l'effet du changement climatique**. Ces connaissances portent sur la fonte des glaciers et du manteau neigeux, sur les épisodes de pluie intenses et sur l'effet d'une hausse du niveau de la mer.

### 4.1 Influence des glaciers et de la neige

Hier comme aujourd'hui, la fonte de la neige et des glaciers apporte une contribution majeure au débit du Rhin, en particulier dans le bassin amont du Rhin, et influence aussi le cours principal du Rhin jusqu'aux Pays-Bas. Une réduction des réserves de neige et du volume des glaciers en hiver due à l'augmentation de la température de l'air modifie les débits alimentés par la neige et les glaciers (régime nivo-glaciaire) dans les régions alpines et influence donc aussi les régimes mixtes de débit du Rhin moyen et Rhin inférieur (cf. chapitre 3.2).

L'eau issue de la fonte des neiges et glaciers fournit une contribution importante pour soutenir le débit pendant les périodes de sécheresse prolongées du semestre d'été. Ainsi, il est important de comprendre les évolutions dynamiques des glaciers et de la neige sous l'effet du changement climatique pour les **situations d'étiage** dans le cours principal du Rhin. Des études de la Suisse (OFEV, 2021) et de la Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR, 2016 et 2022) apportent des explications dans ce sens.

**Fonte des neiges :** La proportion des précipitations qui tombent sous forme de neige est dictée par la température de l'air et a déjà fortement diminué en Suisse en raison du réchauffement (OFEV, 2021). L'aspect le plus important est l'augmentation de l'isotherme zéro degré, qui fixe la limite entre pluie et neige. Cette « limite » se décale de 150 mètres en altitude environ par degré Celsius ajouté par le changement climatique (Hydro-CH2018). Ceci signifie pour un climat réchauffé que moins de précipitations seront stockées dans les masses neigeuses. En outre, la période où les précipitations tombent et sont stockées sous forme de neige se raccourcit. À cette date, ce sont principalement les régions à faible et moyenne altitude qui sont affectées. Les scénarios Hydro-CH2018 indiquent une diminution de la quantité d'eau annuelle moyenne stockée dans le manteau neigeux d'ici la fin du siècle : 42 % de moins avec atténuation du changement climatique (RCP2.6) et 78 % sans (RCP8.5). Parallèlement, le volume de neige ne sera plus à son maximum en mars mais en février. Tant que les températures continuent à augmenter, la hausse attendue des précipitations en hiver n'aura un effet positif sur le manteau neigeux qu'à très haute altitude et ne pourra donc pas compenser la baisse générale de la quantité de neige.

**Fonte des glaciers :** Les glaciers suisses ont déjà perdu 60 % de leur volume depuis 1850 (GLAMOS, 2022)<sup>14</sup>. D'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, il ne restera de résidus des grands glaciers qu'à très haute altitude. Dans les Alpes, près de 37 % du volume glaciaire de 2017 resteront en cas d'atténuation du changement climatique (RCP2.6), mais seulement 5 % sans atténuation (RCP8.5). Si on considère le bassin du Rhin alpin dans l'hypothèse du scénario RCP8.5, tous les glaciers auront disparu d'ici la fin du siècle. Étant donné que les glaciers ont souvent besoin de plusieurs décennies pour s'adapter à un nouveau climat, un recul supplémentaire des glaciers ne peut plus être évité, même en cas de protection stricte et immédiate du climat (Zekollari et al., 2019).

Avec la fonte des glaciers, le débit estival en provenance des glaciers diminuera fortement. Ceci se ressentira aussi en aval. Parallèlement, le permafrost fond dans les régions glaciaires, augmentant ainsi le risque de catastrophes naturelles (OFEV, 2021).

**Répercussions sur le cours aval :** Les modifications des réserves de neige et de glace et leurs répercussions sont reflétées de manière théorique dans les modèles hydrologiques sous-tendant ce rapport. Ainsi, les modèles sont par exemple capables de simuler l'augmentation du débit direct hivernal, étant donné que les précipitations ne sont plus stockées sous forme de neige en raison de la hausse des températures. De plus, des modules de glaciers basiques sont intégrés

<sup>14</sup> Alpes suisses : volume de glaciers d'environ 130 km<sup>3</sup> (en 1850), 77 km<sup>3</sup> (en 2001), 49 km<sup>3</sup> (en 2022) (GLAMOS, 2022)

dans certains modèles (par ex. LARSIM-ME). Ces effets expliquent en partie les modifications saisonnières présentées en exemple dans la figure 4.

Dans le cadre d'une étude de la CHR, une attention particulière a été portée aux « Impact du changement climatique sur les parts d'écoulement issus de la pluie, de la neige et de la fonte des glaciers dans le Rhin et ses affluents » (ASG ; CHR, 2016 et 2022). Dans cette étude, l'eau issue de la fonte des neiges et des glaciers a été « pistée » par un modèle de son origine jusqu'à la frontière germano-néerlandaise. Une analyse rétrospective (phase 1 du projet ASG - ASGI ; CHR, 2016) et prospective en a été dressée sur la base de données climatiques observées et d'une sélection de projections climatiques (phase 2 du projet ASG - voir la mention « ASGII » dans le chapitre 2 et l'annexe technique A ; CHR, 2022), ce qui a conduit à des estimations des proportions absolues et relatives d'eau issue de la fonte des neiges et des glaciers à un rythme quotidien pour différentes échelles limnimétriques.

En moyenne sur le long terme, la part d'eau issue de la fonte des neiges s'élève à 39 % du débit annuel total à Bâle (Rhin amont) et baisse à 34 % jusqu'à Lobith (Rhin aval). Comme indiqué ci-dessus (chapitre 3.2), le débit issu de la neige est donc un facteur déterminant pour le régime d'écoulement sur toutes les échelles du cours principal du Rhin. La part annuelle moyenne d'eau issue de la fonte des glaciers est en revanche de seulement environ 2 % à Bâle et 1 % à Lobith. Cependant, en situation de sécheresse extrême, elle s'élève à 25 % à Bâle et à 17 % à Lobith. Ainsi, les glaciers sont des sources d'eau importantes pendant les situations de sécheresse et d'étiage. En outre, les résultats montrent que la part du débit originaire des glaciers dans le Rhin à hauteur de Bâle en situation d'étiage est déjà en retrait par rapport à son maximum (appelé « glacier peak water »). Ceci signifie que le réchauffement climatique a provoqué une fonte si importante par le passé que le volume réduit des glaciers a conduit aujourd'hui à un apport restreint d'eau de fonte dans les cours d'eau. La diminution de cet apport d'eau de fonte se poursuivra à l'avenir.

#### **4.2 Niveaux d'eau des grands lacs en amont**

Les lacs sont des sous-systèmes importants pour l'écologie et l'économie régionales. La rétention d'eau et l'évaporation dans les grands lacs du bassin rhénan sont également pris en compte par les modèles hydrologiques. Étant donné que ce rapport se concentre majoritairement sur les cours d'eau et les niveaux d'eau des fleuves/rivières, certains de ces lacs du bassin rhénan méritent une attention spéciale.

On sait que les niveaux des lacs varient à différentes périodes en raison de la disponibilité des ressources naturelles d'eau et de la gestion par l'homme de ces ressources.

**Lac de Constance :** En raison de son bassin versant majoritairement alpin, le niveau du lac de Constance est caractérisé par des variations saisonnières prononcées, avec des valeurs maximales moyennes pendant les mois d'été et des valeurs minimales moyennes pendant les mois d'hiver. Ceci illustre un régime alimenté par la neige (cf. chapitre 3.2), qui est dû au stockage des précipitations sous forme de neige et donc à l'absence de ruissellement pendant l'hiver, et la fonte des neiges et la pluie au printemps et en été.

Plus de 100 ans de mesures du niveau du lac sur l'échelle de Constance montrent une augmentation générale du niveau du lac en hiver et une diminution en été (KLIWA, 2016). Le changement climatique pourrait en être la force motrice. Des réserves de neiges moins importantes en hiver, une fonte précoce au printemps et des taux d'évaporation plus élevés conduisent à une baisse générale de niveau du lac en été. Pendant l'hiver, les précipitations sous forme de pluie plutôt que de neige mènent à une augmentation du niveau du lac. La gestion actuelle des systèmes de barrages et de rétention dans les Alpes, qui est dictée par le marché énergétique, amplifie les effets du changement climatique. L'eau est stockée en été et relâchée en hiver pendant la période de débits naturellement faibles du lac de Constance. Par conséquent, les différences saisonnières de niveau d'eau du lac de Constance, qui étaient particulièrement sensibles entre les mois d'hiver et les mois d'été, sont plus faibles entre-temps en moyenne saisonnière. Cependant, on estime globalement que les effets de la gestion des retenues sur la ligne d'eau d'étiage du lac de Constance sont très faibles par rapport à ceux du régime hydrologique du Rhin alpin.

Le changement climatique va continuer à influencer l'évolution du niveau du lac et ses dynamiques saisonnières. On peut supposer voir à l'avenir une poursuite de la baisse du niveau pendant les mois estivaux ainsi qu'une hausse pendant l'hiver liées au changement climatique. De cette manière, l'amplitude des fluctuations saisonnières du niveau d'eau du lac de Constance va se restreindre. Outre la modification du régime hydraulique, d'autres paramètres importants

du lac tels que la température de l'eau, le brassage du lac ainsi que la faune et la flore sont également sujets à des modifications dues au changement climatique (voir par ex. IGKB, 2015).

**Lacs régulés en Suisse :**<sup>15</sup> Le changement climatique influencera fortement les apports dans les lacs naturels. Dans les lacs non régulés, il aura un effet direct sur les niveaux d'eau et conduira à des niveaux d'eau plus faibles en été et en automne plus particulièrement. Dans les lacs régulés, ces effets peuvent être en partie atténués, mais les règlements de gestion des barrages n'ont pas été créés à cette fin (OFEV, 2021). Pour ces raisons, des études sont actuellement menées par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sur l'impact des modifications des apports sur les niveaux des lacs régulés.

Les premiers résultats sont disponibles pour le lac régulé de Zurich (Wechsler, T. et Zappa, M., non publié). En raison des réglementations s'appliquant aux lacs, le lac de Zurich a un régime annuel comprenant un niveau d'eau plus bas en hiver et plus haut en été. Le niveau des eaux augmentera à l'avenir légèrement en hiver et diminuera légèrement en été. Avec le scénario RCP8.5, les débits les plus bas du lac de Zurich pourraient dorénavant se produire en été et non plus en hiver. Il est possible que les demandes de prélèvement d'eau des lacs augmentent à l'avenir, en particulier en été, ce qui peut entrer en conflit avec la baisse de la ressource en eau disponible.

### **4.3 Effets combinés de la modification du débit et de la hausse du niveau des mers (delta du Rhin et région de l'IJsselmeer)**

Le présent rapport se concentre en premier lieu sur les effets du changement climatique sur le débit du milieu fluvial. Le champ principal de l'étude se termine ainsi à l'échelle de Lobith juste après la frontière germano-néerlandaise. Toutefois, la **région du delta intégrant l'IJsselmeer** est confrontée à des défis supplémentaires dus au changement climatique impactant la gestion régionale de l'eau. Ici, les effets combinés des modifications hydrologiques dans le bassin amont, les processus hydrologiques locaux (précipitations, évaporation) et l'élévation du niveau de la mer entrent en ligne de compte.

**Scénarios d'élévation du niveau de la mer :** En conséquence du changement climatique, le niveau des mers va continuer à augmenter au cours des prochains siècles. Entre 1901 et 2018, la hausse moyenne mondiale du niveau des mers a été d'environ 20 cm, avec une élévation moyenne de 1,7 mm/an. Ces dernières années (2006-2018), une accélération de cette hausse mondiale a été observée, avec une augmentation de 3,7 mm par an (KNMI Klimaatsignaal '21, 2021 & KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). Sur la côte néerlandaise, la montée du niveau des mers a été de  $1,8 \pm 0,1$  mm par an jusqu'à 1990 environ. Ces 30 dernières années, ce taux a augmenté pour atteindre une élévation moyenne annuelle de  $2,9 \pm 0,4$  mm (Zeespiegelmonitor, 2022). En fonction des émissions mondiales de gaz à effet de serre, le taux d'augmentation du niveau des mers à l'avenir peut changer. Le Tableau 10 présente les scénarios de niveau des mers pour la côte néerlandaise. En Allemagne, on s'oriente sur le scénario d'émissions élevées SSP5-8.5, qui prévoit une augmentation de +29 cm (2050, 83<sup>e</sup> percentile) voire de +100 cm (2100, 83<sup>e</sup> percentile) (p. ex. GDWS, 2023).

Il faut toutefois souligner que cette augmentation pourrait atteindre jusqu'à 2,5 m d'ici 2100 si des processus imprévisibles avaient lieu, comme la déstabilisation de la calotte polaire antarctique (non représenté dans le tableau 10).

**Tableau 10 : Chiffres indicatifs de l'élévation du niveau de la mer sur la côte néerlandaise** pour différents scénarios d'émissions<sup>16</sup> pour 2050 (2046-2055) et pour 2100 (2096-2105), comparée à 1995-2014, avec une marge d'incertitude de 90 %. Ces chiffres intègrent l'affaissement des sols due aux forces tectoniques et à d'autres processus (KNMI'23 Gebruikersrapport & KNMI'23 database).

Année	2050 (2046-2055)		2100 (2096-2105)	
	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Scénario d'émissions				
Hausse du niveau de la mer	+24 (16-34) cm	+27 (19-38) cm	+44 (26-73) cm	+82 (59-124) cm
Taux d'élévation en mm/an	+3 (1-6) mm/an	+5 (4-8) mm/an	-1 (-4-4) mm/an	+11 (6-23) mm/an

<sup>15</sup> Cet exemple peut également être étendu à d'autres réservoirs et lacs régulés dans le bassin.

<sup>16</sup> Les chiffres se basent sur les « scénarios SSP » du 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC. SSP5-8.5 est un scénario avec des émissions élevées, SSP1-2.6 des scénarios avec atténuation des émissions. Comparés aux « scénarios RCP » qui sous-tendent le reste du rapport, les chiffres indicatifs pour la hausse du niveau de la mer sont plus élevés avec les nouveaux scénarios.

**Effets sur le drainage :** Comme indiqué dans le chapitre 3.3, une augmentation des débits hivernaux du Rhin est attendue, ce qui conduira à des apports d'eau beaucoup plus importants en provenance du bassin versant dans les régions du delta et de l'IJsselmeer pendant cette période. Parallèlement, le niveau de la mer augmente, ce qui conduira à une évacuation plus restreinte des eaux. Par exemple, si le niveau de la mer s'élève de plus de 0,65 m, le niveau de la mer des Wadden sera plus élevé que le niveau de l'IJsselmeer même en cas de marée basse. Dans ces conditions, l'écoulement des eaux de l'IJsselmeer dans la mer des Wadden sera impossible par gravitation naturelle (Deltares, 2018). En conséquence, l'eau devra soit être stockée dans l'IJsselmeer (ce qui conduira à un niveau de l'eau plus élevée) ou évacuée ailleurs par pompage (Deltares, 2022).

**Effets sur la gestion du risque d'inondation :** La gestion du risque d'inondation dans le delta Rhin-Meuse est affectée directement par la hausse du niveau de la mer ainsi que par le débit et sa distribution dans le delta (Rhin, Meuse, Waal, IJssel et Nederrijn). Les interventions anthropiques comme le barrage anti-tempête de l'Europoort réduisent l'effet de la hausse du niveau de la mer sur les niveaux de crue de l'hydrosystème fluvial. En raison de la hausse du niveau de la mer, le barrage de l'Europoort devra être fermé plus fréquemment par temps de tempête. Pendant une fermeture temporaire, les zones côté terre de ce barrage stockent l'eau fluviale. La hausse du niveau de la mer va donc conduire à stocker plus souvent l'eau fluviale du fait de la fermeture plus fréquente du barrage (KP ZSS, 2023).

En plus des effets directs de la hausse du niveau des mers, les processus morphologiques du lit du fleuve jouent également un rôle (KP ZSS, 2023). La hausse du niveau des mers va conduire à une « vague d'accumulation de sable » qui va se déplacer de l'aval vers l'amont dans le delta (Ylla Arbós et al., 2023). Dans le delta, un nouvel équilibre morphologique va se mettre en place pour compenser à la fois les modifications du niveau de la mer et du débit. En supposant une hausse du niveau de la mer de 1 m, le lit du cours principal pourrait alors se relever d'1 m également, tant qu'une quantité suffisante de sédiments sera disponible (KP ZSS, 2023), bien que ce changement s'effectuera sur plusieurs centaines d'années.

**Effets sur les réserves d'eau douce et la salinité :** Le niveau de l'eau de la mer, les précipitations et l'évaporation ainsi que le débit du Rhin et de la Meuse déterminent l'équilibre eau douce/eau salée dans l'estuaire Rhin-Meuse. En raison de la hausse du niveau de la mer et des faibles débits estivaux, l'eau salée s'introduit dans l'hydrosystème fluvial et pénètre plus en avant dans les terres, ce qui conduit à de fortes concentrations de sel sur les sites de captage d'eau pour l'agriculture et l'eau potable. De plus, l'introduction d'eau salée conduit aussi à une salinisation des systèmes d'eaux souterraines et des cours d'eau superficiels (Deltares, 2018).

La stratégie néerlandaise pour l'eau douce vise à maintenir certaines zones stratégiques d'eau douce comprenant certaines zones tampons. La zone de l'IJsselmeer est une zone tampon importante d'eau douce dont la quantité et la qualité de l'eau deviennent de plus en plus vulnérables en raison du changement climatique (KP ZSS B, 2023). L'apport en eau douce plus faible attendu en été, une plus forte évaporation et la hausse du niveau des mers vont provoquer une augmentation de la pression saline dans l'IJsselmeer, en raison notamment d'un afflux accru de sel à partir des rivières régionales sous l'effet de la hausse du niveau des mers et à partir des systèmes de drainage et des écluses. De plus, quand du sel s'introduit dans l'IJsselmeer, il est difficile de le retirer du lac.

Dans les bras Lek et Haringvliet-Hollands Diep de l'estuaire Rhin-Meuse, l'intrusion de sel est contrebalancée par l'afflux d'eau d'autres bras (par ex. le Waal). En cas à la fois d'une hausse du niveau de la mer de plus de 1 m et de débits estivaux extrêmement faibles, cet afflux supplémentaire pourrait ne plus être disponible ou être insuffisant pour lutter contre la salinisation de l'eau. Ceci mènerait à des niveaux de concentration de chlorures plus élevés dans les zones d'eau douce. Par conséquent, maintenir certaines de ces zones tampons d'eau douce ne sera plus avantageux. En outre, en raison de la hausse du niveau de la mer, l'hydrosystème Haringvliet-Hollands Diep deviendra plus vulnérable à une intrusion de sel transporté par le vent. Des intrusions salines dues au vent pourraient donc provoquer des restrictions de longue durée (de plusieurs semaines au moins) sur les sites de captage d'eau douce.

#### 4.4 **Pluies intenses et crues subites**

Les modèles climatiques et hydrologiques sous-tendant ce rapport produisent des données à une fréquence journalière et dans un quadrillage ou des bassins versants où chaque cellule recouvre plusieurs kilomètres carrés. Même si ces modèles peuvent simuler un grand nombre de phénomènes météorologiques et hydrologiques sur ces échelles spatio-temporelles, ils ne peuvent pas reproduire intégralement des phénomènes qui se produisent à une échelle infrajournalière ou infracellulaire. Les pluies intenses convectives, caractérisées par une forte densité de précipitations sur une courte période de temps et une zone restreinte, qui conduisent potentiellement à des crues subites accompagnées d'une érosion des sols, entrent dans ce dernier groupe de phénomènes.

Jusqu'ici, des considérations en grande partie théoriques ont mené à la conclusion que des épisodes de pluies intenses convectives gagneront en intensité et en fréquence avec le réchauffement climatique (Trenberth 1999 ; Pfahl et al., 2017). Depuis peu, une nouvelle génération de modèles climatiques capables de simuler les phénomènes convectifs, permet de pronostiquer les futures évolutions d'épisodes convectifs de pluies. En raison de leur forte résolution spatiale et temporelle, ces modèles sont capables de simuler les averses et orages (Poncet et al., 2023).

Jusqu'à présent, de grands ensembles convectifs ne sont toujours pas disponibles. Un premier ensemble à 5 runs de modélisation a récemment été compilé et évalué à titre d'exemple par la coopération allemande KLIWA. Axés sur le scénario de fortes émissions RCP8.5, ces modèles montrent que les épisodes de pluies intenses augmentent réellement en intensité et en fréquence en été. Alors que le signal est clair, la fourchette des changements est étendue. Ainsi, l'intensité d'un épisode d'une heure avec une période de retour de dix ans augmentera par exemple de 10 à 30 % selon la projection considérée. De plus, une large part des précipitations estivales tombera probablement sous forme de pluies intenses à l'avenir (KLIWA, 2023, 2024).

#### 4.5 **Interférences et impact des aspects non climatiques**

Il est établi que l'évaluation des futurs impacts climatiques ne couvre que certains aspects de ce que sera le « futur » réel attendu. La raison n'en est pas uniquement l'évolution future inconnue des émissions de gaz à effet de serre et de leurs concentrations, ni l'ordre de grandeur des efforts de protection contre le changement climatique, mais également, outre le climat, les évolutions que connaîtront à l'avenir de nombreux moteurs de changement hydrologique. Par exemple, l'évolution **démographique** aura des répercussions sur le nombre et l'âge des personnes vivant dans les différentes régions du bassin du Rhin. Les changements **économiques** et **technologiques** influenceront la quantité et la manière dont l'eau sera utilisée par les hommes, l'agriculture et l'industrie. Les modes de gestion durable qui appréhendent également l'hydrosystème « Rhin » dans ses fonctions écologiques et ses **services écosystémiques** auront également un impact.

Au premier regard, les **aspects socio-économiques** semblent être des moteurs « non climatiques ». Une analyse plus approfondie montre toutefois qu'ils interfèrent également sur le changement climatique. La migration provoquée par le changement climatique contribue au changement démographique ; on peut s'attendre à ce que la quantité d'eau nécessaire pour boire, pour l'irrigation, le refroidissement et les écosystèmes augmente avec la hausse des températures. En outre, l'adaptation au changement climatique amènera dans une certaine mesure à redistribuer différemment l'eau entre les usages, les secteurs et les régions.

Ces effets pourraient s'ajouter positivement ou négativement aux changements hydrologiques résumés dans le présent rapport. Ils sont toutefois difficilement quantifiables pour l'instant, surtout en ce qui concerne l'avenir.

## 5 Discussion et conclusions

Conformément au mandat du GE HCLIM, ce rapport regroupe les connaissances et les données actuelles sur les changements passés et futurs de débit dans le bassin du Rhin, ainsi que certains aspects des évolutions météorologiques. Tous les États riverains ont été sollicités et cinq équipes de recherche ont fourni des données. Tous les jeux de données étaient basés sur un scénario d'émissions élevées et de données climatiques mondiales conformes au 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC, actualisant ainsi les scénarios de l'ancien groupe d'experts de la CIPR, le GE KLIMA, qui s'appuyaient sur le 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC. Cependant, les jeux de données varient sur plusieurs points méthodiques comme les modèles climatiques et hydrologiques.

D'un côté, les projections de débit sous-tendant ce rapport peuvent être considérées comme l'une des plus larges bases de données de simulation disponibles dans ce domaine d'études. Elles peuvent potentiellement donner une image des modifications du débit rhénan dues au changement climatique plus exhaustive que les études antérieures. De l'autre côté, l'interprétation des données est limitée en raison des différentes méthodes suivies pour créer les bases de données individuelles et d'autres questions de recherche non encore résolues. Évaluer les causes des différences et répondre aux questions de recherche dépassaient le mandat et les ressources du GE HCLIM.

L'approche d'intégration choisie ici montre les principaux changements de débit attendus pour le Rhin, en partant du principe d'un scénario avec des fortes émissions à titre de précaution. Avec l'approche intégrée, les résultats publiés ici évoluent dans une fourchette plus large que ceux publiés par chacune des cinq équipes de chercheurs ayant contribué au rapport.

Ce chapitre résume les principaux résultats au regard de changements de débit prévus (chapitre 5.1), les compare avec ceux du précédent rapport (chapitre 5.2) et en tire des conclusions sur l'utilisation des résultats dans les travaux de la CIPR et du réseau de chercheurs (chapitre 5.3).

### 5.1 Modifications attendues de débit et du système hydrologique d'ici à 2100

En synthèse, l'étude montre à la fois pour le passé (observations) et pour l'avenir (projections du RCP8.5) un changement à long terme vers des **régimes d'écoulement davantage pluviaux** au détriment de régimes d'écoulement alimentés par la neige et les glaciers dans le bassin du Rhin. Le débit diminue en été et augmente en hiver bien que le débit annuel n'ait que très peu changé. À cela s'ajoutent une hausse et une baisse respective des indicateurs de crue et d'étiage et donc une tendance à des extrêmes plus marqués. D'autres indicateurs non mentionnés dans le rapport laissent présager une persistance de la sécheresse et donc des périodes de faibles débits prolongées. Une des causes est la baisse des débits alimentés par la fonte de la neige et de la glace.

Même si le scénario général semble partout cohérent et correspond aux considérations théoriques sur le bassin du Rhin en conditions de réchauffement climatique, les fourchettes de résultats restent larges. Certaines projections présentent même des signaux de changement contradictoires. Ceci est dû à la complexité et à la dynamique de l'hydrosystème du Rhin et à différents processus de modélisation et de traitement des données utilisées. La succession d'épisodes d'étiage marqués au cours de la dernière décennie montre que les évolutions observées du débit fluvial peuvent s'écarter (au moins pendant un certain temps) de l'évolution globale reproduite par les données observées ou simulées sur le long terme. Par exemple, des réductions du débit hivernal moyen ont pu être observées ces dernières années, ce qui contredit les observations sur le long terme du XX<sup>e</sup> siècle et les projections du XXI<sup>e</sup> siècle.

En plus des répercussions du changement climatique qui peuvent être évaluées en appliquant les données de modèles climatiques régionaux dans des modèles hydrologiques, le présent rapport souligne certaines caractéristiques spécifiques de l'hydrosystème du Rhin.

Les **glaciers** ont jusqu'ici été des sources d'eau importantes pendant les sécheresses prolongées. Les projets de recherche axés sur les composantes du débit fluvial liées à la neige et à la glace montrent que la contribution des glaciers en période d'étiage dans le Rhin à Bâle a déjà dépassé son point culminant (appelé « glacier peak water ») et qu'elle tombera 4142 presque à zéro d'ici la fin du siècle dans l'hypothèse d'un scénario d'émissions élevées (RCP8.5). Les **grands lacs** du bassin amont du Rhin subissent généralement les effets saisonniers du changement climatique susmentionnés (niveaux élevés en hiver et bas en été et à l'automne) en raison des modifications de leur débit entrant. Dans le delta du Rhin, il faut tenir compte des répercussions convergentes des changements des débits fluviaux et de la

**hausse du niveau des mers.** Ces deux aspects perturberont les possibilités d'évacuation des eaux, la gestion des risques d'inondation, de même que l'approvisionnement en eau douce et l'intrusion d'eau salée. Ici aussi, les pratiques et objectifs actuels de gestion risquent d'atteindre leurs limites dans le contexte du changement climatique.

## 5.2 Comparaison avec le rapport CIPR de 2011

Au cours de l'élaboration de la précédente étude (CIPR, 2011), l'ancien groupe d'experts KLIMA de la CIPR (GE KLIMA) avait pu s'appuyer sur les amples travaux préparatoires de la Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR). Dans le cadre du projet Rheinblick (CHR, 2010), les partenaires de la CHR avaient compilé les projections disponibles de variables météorologiques (température, précipitation) et hydrologiques (débit), les avaient évaluées, les avaient examinées sous l'angle technique et les avaient ajustées. Les projections étaient basées à l'époque sur les données de modélisations climatiques sous-tendant le 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC (CMIP3, scénario SRES A1B), le projet de l'UE ENSEMBLES et les activités de recherche nationales.

Les résultats ajustés comme ceux du projet Rheinblick n'étaient pas disponibles pour la présente étude de scénario. Le GE HCLIM a donc dû acquérir et intégrer lui-même les données de différentes sources. Ceci n'a été possible que grâce à la mise à disposition des données par les différents partenaires au sein du GE HCLIM et l'utilisation d'un service climatique bien établi auprès d'une institution partenaire participante. En raison de ressources limitées et de l'absence de mandat, le GE HCLIM n'a toutefois pas pu effectuer une analyse scientifique approfondie ni procéder à une intégration technique complète des données fournies. En revanche, des évaluations ont été effectuées sur la base d'une méthode uniforme (scénario, indicateurs, périodes) à partir des données brutes des projections (séries temporelles).

La période de référence a été décalée de 20 ans (1981-2010 au lieu de 1961-1990 précédemment) parce que l'ancienne étude remontait déjà à plusieurs années et que les données de modélisation climatique pour l'étude actuelle n'étaient pas disponibles pour la période de référence du rapport n° 188 (CIPR, 2011). Le « futur proche » a dû être repoussé de 10 ans (2031-2060 au lieu de 2021-2050 précédemment) parce que le « futur proche » tel qu'indiqué dans la dernière étude de scénario avait déjà commencé au moment de la rédaction (2023). De plus, certains indicateurs additionnels et une échelle supplémentaire ont été ajoutés à l'évaluation, et les résultats ne sont plus arrondis aux 5 % les plus proches comme dans le précédent rapport.

En raison de ces conditions préliminaires et de différences méthodologiques, le **degré de comparabilité des études de la CIPR de 2011 et de 2023 est limité**. Toutefois, la présentation générale des résultats sous forme de tableaux avec un code couleur est restée la même pour les deux études. L'annexe B présente et compare les résultats des scénarios des études de 2011 et de 2023.

Dans l'ensemble, les changements prévus dans les deux études de scénarios vont **dans le même sens**. Ils indiquent des faibles débits ou des débits élevés extrêmes plus marqués. Les deux générations de scénarios montrent également une redistribution saisonnière des débits de l'été vers l'hiver. Des différences sont observées quant à la **dispersion des résultats**, qui est **plus élevée** pour la plupart des indicateurs et des sites. Ceci est en partie dû à la multitude et l'hétérogénéité des modélisations climatiques, des schémas de traitement des données (régionalisation, méthode de correction des biais, méthode Delta-Change etc.) et des différents modèles hydrologiques utilisés.

Au regard des scénarios remis à jour, qui sont désormais conformes au 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC, des capacités croissantes des modèles climatiques et hydrologiques et de la nouvelle gamme de signaux de changement, **le groupe d'experts HCLIM recommande d'actualiser la stratégie d'adaptation de la CIPR et les rapports y afférents** (p. ex. celui sur la température de l'eau) sur la base des nouvelles informations.

### 5.3 **Suggestions pour une utilisation future des données et des résultats**

Ce rapport a regroupé et produit des informations qui sont en libre accès et peuvent être utilisées par différents acteurs dans le domaine de l'évaluation de l'impact et de l'adaptation au changement climatique.

**Les acteurs au niveau stratégique** peuvent utiliser les informations agrégées de ce rapport pour voir si les stratégies d'adaptation existantes doivent être repensées. Même si les signaux de changement ne divergent pas fondamentalement des précédentes études, de nouveaux jeux de données ont été traités dans ce rapport et quelques relations complémentaires ont été établies (p. ex. avec la sécheresse des années 2010, avec la fonte toujours plus importante des glaciers ou avec l'impact de la gestion des retenues). Ceci peut être une raison pour réévaluer les précédentes décisions.

**Les acteurs scientifiques et/ou les délégués des groupes de la CIPR**, par exemple ceux traitant des questions d'inondations et d'étiages (GT H, GE LW), d'écologie (GT B) et de qualité de l'eau (GT S) ainsi que de températures de l'eau (GE STEMP), trouveront d'importantes informations de synthèse dans ce rapport. De plus amples informations pour déterminer leurs propres scénarios « moteurs » (de crue ou d'étiage) pourront être trouvées dans l'annexe comprenant les graphiques (publiée en ligne : [site internet de la CHR](#)). Dans celle-ci, les résultats des équipes de chercheurs en hydrologie venant de Suisse, France, Allemagne, des Pays-Bas et de la CHR qui ont contribué sont visibles sous forme de « facteurs de changement climatique » individuels à l'échelle d'ensembles et de projections. Des runs de modélisation individuels peuvent être sélectionnés pour des échelles individuelles, ceci pour permettre le calcul des indicateurs qui n'étaient pas inclus dans ce rapport. De même, **les acteurs scientifiques hors du cadre de la CIPR** peuvent évaluer les projections de débit en détail ainsi que des séries temporelles individuelles sur une échelle précise.

Il est également possible de continuer à développer le vaste jeu de données, afin de **mieux consolider les facteurs de changement climatique**. Ainsi, les Länder fédéraux allemands sur le Rhin se réservent par exemple la possibilité de définir des facteurs de changement de crue au sein de la fourchette de résultats ici délimitée sur la base d'éventuelles informations supplémentaires et de connaissances d'experts. Par exemple, les séries temporelles des échelles et les informations hydrauliques historiques peuvent être considérées comme des informations supplémentaires.

Il est possible d'accéder aux graphiques et aux projections de débit sur la **page internet de la Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin (CHR)** (voir [ici](#)). La sélection est limitée aux **indicateurs et échelles** mentionnés dans ce rapport. **D'autres données concernant une multitude d'autres échelles** peuvent être obtenues sur demande **auprès du secrétariat de la CIPR** ([sekretariat@iksr.de](mailto:sekretariat@iksr.de)). Si besoin, le secrétariat transmet la demande aux **membres du GE HCLIM** concernés et/ou renvoie aux **équipes de chercheurs et services climatiques nationaux** mentionnés dans l'introduction ou dans le rapport.

## 6 Perspectives

Étant donné que le changement climatique progresse et que les connaissances sur ses potentielles conséquences gagnent en importance, on peut s'attendre à ce que la présente mise à jour des scénarios de débit de la CIPR ne soit pas la dernière. À la date de publication du présent rapport, la nouvelle (6<sup>e</sup>) évaluation du GIEC a elle-même été publiée et elle comprend une nouvelle génération de scénarios climatiques et de résultats de modèles climatiques mondiaux (chapitre 6.1). De plus, le groupe d'experts HCLIM a formulé plusieurs questions de recherche auxquelles doit répondre le réseau de chercheurs dans les prochaines années (chapitre 6.2). Les résultats de ces activités ainsi que d'autres seront évalués et pris en compte dans la prochaine mise à jour de la CIPR (chapitre 6.3).

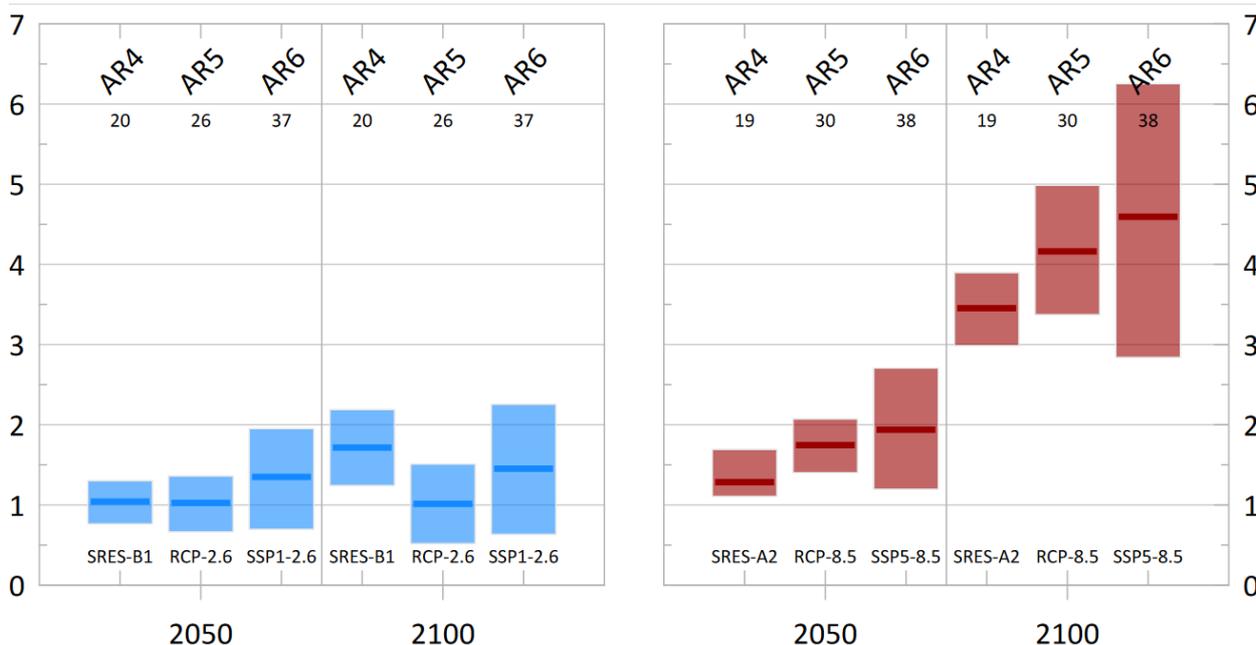
### 6.1 Nouvelles tendances découlant du rapport AR6

Le rapport de la CIPR n° 188 (CIPR, 2011) élaboré par le groupe d'experts KLIWA (GE KLIWA) était basé essentiellement sur le **4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC** (GIEC, 2007), lequel était le dernier rapport disponible à l'époque de la préparation (2010). Ont été utilisés en particulier les informations clés et les scénarios (et surtout le scénario équilibré SRES A1B) de ce rapport, ainsi que les données des modélisations climatiques générées sur cette base (CMIP3, EU-ENSEMBLES). Les résultats des modélisations hydrologiques ont été regroupés par l'équipe de chercheurs du projet Rheinblick (CHR, 2010) en appliquant une méthode harmonisée.

Dans la phase de préparation (2023) du présent rapport du groupe d'experts HCLIM, les projections de débit disponibles dans les États riverains ont été utilisées. Elles se fondent sur les scénarios dits scénarios RCP (Representative Concentration Pathways, et surtout le scénario d'émissions élevées RCP8.5) tels que publiés dans le **5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC** (GIEC, 2013), de nouvelles simulations climatiques (CMIP5, EURO-CORDEX) et une variété de modèles hydrologiques (comme dans les études nationales, cf. Tableau 1 et annexe A).

Pendant la phase de rédaction, un nouveau jeu de scénarios (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) et de modélisations climatiques mondiales (CMIP6) a été publié avec le **6<sup>e</sup> rapport d'évaluation par le GIEC** (GIEC, 2021), dont la synthèse a été publiée en 2023 (GIEC, 2023). Toutefois, les informations relatives au changement climatique régional (par ex. une mise à l'échelle régionale des résultats de la modélisation CMIP6) pour le bassin du Rhin et les évaluations des répercussions hydrologiques n'étaient pas encore disponibles pour tous les États riverains. De plus, aucune décision claire n'avait encore été prise sur le scénario qui serait appliqué aux fins d'adaptation.

Figure 5 compare les changements mondiaux de température indiqués par les rapports du GIEC susmentionnés avec les scénarios de fortes et de faibles émissions. Les scénarios à fortes émissions en particulier ont tendance à afficher une augmentation successive plus importante des températures mondiales. Ceci peut être considéré comme une première indication que la prochaine génération des scénarios de débit pour le Rhin apportera également des changements plus importants.



**Figure 6** : Comparaison provisoire des changements de température dans le monde comme indiqués dans les modélisations climatiques mondiales sous-tendant les 4<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup> et 6<sup>e</sup> rapports du GIEC pour les scénarios de faibles émissions ou d'atténuation (à gauche : SRES-B1, RCP2.5, SSP1-2.6) et de fortes émissions (à droite : SRES-A2, RCP8.5, SSP5-8.5). Tous les changements portent sur des moyennes de 20 ans par rapport à la période 1986-2005. La taille des ensembles respectifs est indiquée en nombre dans les graphiques. Données de Knutti, R. et Sedláček, J. (2012), et Tebaldi et al. (2021) ; compilation et visualisation par la BfG.

Dans le rapport AR5, les scénarios climatiques sont des scénarios d'émissions (RCP) basés sur la modification de la concentration des émissions de gaz à effet de serre. En revanche, le nouveau rapport AR6 du GIEC (GIEC, 2021) utilise les scénarios SSP. Ceux-ci prennent en compte diverses évolutions socio-économiques, qui viennent compléter les scénarios d'émissions. Par exemple, SSP5-8.5 désigne la trajectoire commune d'évolution socio-économique 5 (développement à base de combustibles fossiles) associée au scénario d'émissions RCP8.5. Une comparaison globale basée sur le nouveau scénario d'émissions élevées (SSP5-8.5) laisse attendre une hausse des températures globales plus forte avec une plus grande dispersion des résultats que celle indiquée dans le 5<sup>e</sup> rapport GIEC sur lequel se fonde le présent rapport (KNMI'23, 2023).

Les Pays-Bas utilisent déjà ces informations tirées du nouveau rapport AR6 pour les évaluations des impacts nationaux et régionaux dans le cadre des **scénarios KNMI'23**. Ceux-ci affichent tous une hausse de la température (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). Comme la température, les précipitations en hiver vont continuer à augmenter pour tous les scénarios. Par rapport aux hivers entre 1991 et 2020, les précipitations hivernales vont augmenter de 4 à 24 % respectivement pour les scénarios Ld (faibles émissions, temps sec), et Hn (fortes émissions, temps humide). Ceci est dû à une augmentation des vents d'ouest, porteurs d'humidité en provenance de la partie nord de l'océan atlantique. Contrairement à la hausse des précipitations estivales observée au cours des dix dernières années aux Pays-Bas, les quatre scénarios climatiques montrent une baisse des précipitations en été. La plus forte diminution va jusqu'à 29 % dans le scénario Hd (fortes émissions, temps sec) en 2100. Une baisse des précipitations estivales est attendue en raison des vents continentaux secs en provenance de l'est. Ces vents vont devenir plus fréquents en raison de modifications des températures de l'eau de la mer à l'ouest de l'Irlande et du fort réchauffement au sud de l'Europe (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023).

De plus, la fréquence des événements extrêmes (pluies intenses et sécheresses extrêmes) va augmenter. Ceci signifie qu'un été extrêmement sec actuellement deviendra un été normal en 2100. Étant donné que les projections de débit KNMI'23 sont encore en cours de développement, les répercussions sur les futurs débits ne sont pas encore connues avec certitude.

Les nouveaux scénarios AR6 du GIEC vont également être utilisés par d'autres équipes de chercheurs et dans des projections hydrologiques, entre autres dans le bassin du Rhin (par ex. la BfG). Comme ces équipes s'appuient sur un ensemble de modélisations climatiques régionales consolidé attendu pour 2025 (couplé aux modélisations mondiales), une nouvelle compilation des projections de débit ne pourra être faite que plus tard.

## 6.2 **Besoins de recherche**

Contrairement à 2011, le groupe d'experts HCLIM de la CIPR mandaté pour ce travail n'a pas pu s'appuyer sur des travaux aboutis du réseau de chercheurs (comme c'était le cas avec Rheinblick 2050). L'étape consistant en l'intégration des différents résultats des études pour le bassin rhénan a dû être effectuée par le GE HCLIM. Ceci a été fait par (a) regroupement des jeux de données individuels des équipes de chercheurs associés ou de leurs personnes de contact en GE HCLIM et (b) consolidation et évaluation par la BfG dans le cadre du service de base DAS « Climat et Eau ». Au regard de son mandat et du temps imparti, le groupe d'experts a pu uniquement réaliser l'intégration technique. Une analyse scientifique en profondeur des différences identifiées n'a pas été possible.

Au cours des travaux sur ce rapport, différentes questions de recherche ont été soulevées :

1. Est-il possible d'avoir des **approches plus uniformes des évaluations régionales ou nationales de l'impact du changement climatique** ? Même s'il est évident que chaque évaluation nationale de l'impact du changement climatique doit répondre à des questions régionales spécifiques, l'hétérogénéité des approches dans le bassin international du Rhin semble actuellement très élevée. Des degrés d'intégration envisageables pourraient inclure la compilation des connaissances spécialisées disponibles dans les pays partenaires avec pour objectif d'améliorer les différents modèles hydrologiques, voire même d'élaborer un modèle commun. En outre, l'adoption d'un protocole de simulation commun ou l'utilisation d'un système d'évaluation intégré des résultats des modèles seraient souhaitables.
2. Comment **expliquer ou réduire les différences entre les ensembles de simulations pour une même échelle** ? Même si les résultats intégrés dans ce rapport présentent un grand nombre de similitudes et une vision générale cohérente pour les grands sous-bassins du Rhin, il en est ressorti que les résultats des équipes de chercheurs ayant contribué diffèrent grandement au niveau d'échelles individuelles dans les affluents rhénans, même si les mêmes données ont été utilisées pour forcer les modèles. Ces différences montrent que les processus hydrologiques sont saisis différemment par les différents modèles hydrologiques. Cela permet donc d'apprendre les uns des autres et d'améliorer ainsi les modèles pour faire en sorte que les prochains scénarios de la CIPR puissent couvrir plus de détails régionaux.
3. Comment les **épisodes de crues subites ou d'événements similaires** peuvent-ils être mieux couverts par les évaluations de l'impact du changement climatique ? De courts épisodes localisés de précipitations intenses se sont révélés particulièrement cruciaux pour la gestion de l'eau. Cependant, les modélisations climatiques actuelles ne sont pas capables de couvrir complètement ce type d'événements car elles ne produisent des données qu'une fois par jour (et non pas par heure ou plusieurs fois par heure) dans des cellules de quadrillage couvrant plusieurs kilomètres carrés, et ne reproduisent généralement pas complètement les processus de convection atmosphérique. Ces nouveaux modèles convectifs devraient être utilisés dans les futures estimations des répercussions hydrologiques du changement climatique.
4. A-t-on de meilleures méthodes pour identifier les changements dans le cas de **valeurs extrêmes** ? Les changements des extrêmes les plus élevés et les plus bas sont associés à de grands risques et sont donc particulièrement importants pour les décideurs politiques. Même si des premières approches existent au niveau national, évaluer les changements d'événements qui ont lieu tous les 100 ans ou même tous les 1000 ans à partir d'observations et de projections reste encore particulièrement difficile, voire impossible (car les séries de données sont relativement courtes, à savoir 100 à 200 ans tout au plus, et souvent moins). Les résultats actuels doivent être considérés comme très incertains. Il est nécessaire d'avoir de meilleures méthodes et de mieux se concerter sur le choix des évaluations jugées possibles et acceptables. Il conviendra éventuellement de dresser un inventaire des méthodes d'identification des changements des valeurs extrêmes/des statistiques sur les valeurs extrêmes et de développer des statistiques harmonisées (afin d'identifier les extrêmes sur l'ensemble du bassin du Rhin). À l'heure actuelle, les Pays-Bas

utilisent déjà un générateur de précipitations et des modèles hydrologiques et hydrauliques pour générer des débits de récurrence extrême, cette méthode permettant de créer artificiellement de longues séries de données prospectives sur la base d'observations.

5. Comment faire face aux défis dus aux **effets combinés du changement climatique** ? Le changement climatique conduit à divers changements dans le bassin international du Rhin. Dans ce rapport, une grande attention a été portée aux impacts du changement climatique sur l'hydrologie du Rhin. D'autres effets du changement climatique tels que ceux d'une augmentation du niveau des mers sur le delta du Rhin ou les effets combinés du changement climatique en matière d'utilisations futures et de gestion de l'eau dans le bassin n'ont été que brièvement évoqués. Il est nécessaire d'acquérir plus de connaissances sur ces effets combinés.
6. Comment les effets des changements socio-économiques peuvent-ils être reflétés dans la prochaine version des scénarios ? Comme indiqué dans le paragraphe chapitre 4.5, les futurs changements socio-économiques peuvent interférer avec les effets hydrologiques directs du changement climatique, provoquant des réactions à la fois positives et négatives (en aggravant ou réduisant les effets directs du changement climatique). Cependant, étant donné qu'il manque encore des informations quantitatives, ces réactions ne peuvent pas être prises en compte dans ce rapport. Il est nécessaire d'avoir plus de données et plus d'études dans le domaine de la **socio-hydrologie** (impacts des activités socio-économiques sur l'hydrologie).

La CIPR n'a pas les ressources ni le mandat pour mener ses propres recherches dans ce domaine. La commission et ses groupes d'experts ont une fonction d'observateurs et accompagnent les programmes de recherche couvrant le bassin du Rhin dans son ensemble ou en partie et portant sur les questions susmentionnées et des questions similaires.

Pour cette raison, le GE HCLIM transmet ces questions au réseau de chercheurs à titre d'impulsions pour leurs études, en espérant que des réponses à certaines de ces questions seront apportées dans les prochaines années.

### **6.3 Prochaine mise à jour du rapport de la CIPR**

La prochaine mise à jour de ce scénario est planifiée par le programme Rhin 2040 en relation avec ou avant celle de la stratégie CIPR d'adaptation au changement climatique prévue tous les 10 ans (prochaine mise à jour en 2035). Ceci signifie qu'une mise à jour des scénarios de débit devrait être faite en 2032 environ.

La CIPR devra évidemment prendre en compte les nouvelles évolutions techniques et scientifiques dans ce domaine, ce qui pourrait permettre à l'avenir des mises à jour plus régulières, voire même plus rapides, et une régionalisation des scénarios de débit après la publication des rapports d'évaluation du GIEC.

## 7 Bibliographie

- Berg, P., Bozhinova, D., Photiadou, C. (2021): Climate explorer for the Water Sector. [https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/sis-hydrology-derived/C3S\\_424\\_ClimateExplorerApplication\\_v1\\_corr\\_pb.pdf](https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/sis-hydrology-derived/C3S_424_ClimateExplorerApplication_v1_corr_pb.pdf)
- BfG (2014) : Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilung 31. 232 p.
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg. <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>
- CIPR (2011) : Étude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin. Rapport CIPR n° 188, [https://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp\\_Fr\\_0188.pdf](https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0188.pdf)
- CIPR (2015) : Stratégie d'adaptation au changement climatique dans le DHI Rhin. Rapport CIPR n° 219, [https://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp\\_Fr\\_0219.pdf](https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/FR/rp_Fr_0219.pdf)
- CIPR (2019) : Rapport sur le deuxième cycle de la DI « Mise à jour des cartes des zones inondables et cartes des risques d'inondation dans le DHI Rhin » [https://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/FR/bwp\\_Fr\\_2d\\_RapportDI\\_MAJ2019.pdf](https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/FR/bwp_Fr_2d_RapportDI_MAJ2019.pdf)
- CIPR (2020) : Rhine 2040: The Rhine and its Catchment: Sustainably Managed and Climate-resilient, 16th Rhine Ministerial Conference, February 13, 2020, Amsterdam, [https://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro\\_En\\_2040\\_long.pdf](https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_long.pdf) (long), [https://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro\\_En\\_2040\\_short.pdf](https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_short.pdf) (court, brochure)
- CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0
- CHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. CHR report No. I-23. Görgen et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. [https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport\\_i\\_-\\_23.pdf](https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport_i_-_23.pdf)
- CHR (2016): *EN*: The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change – Synthesis report (*ASGI*). CHR report no. I 25. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. *EN*: [https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein\\_synthesis\\_en.pdf](https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein_synthesis_en.pdf);
- CHR (2022): *EN*: Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries – Synthesis report (*ASGII*). CHR report no. I 28. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. *EN*: [https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II\\_Synthese\\_EN\\_mit-Links\\_korr-Tab-2.pdf](https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_EN_mit-Links_korr-Tab-2.pdf);
- Deltares (2014): Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins - Final report of GRADE 2.0. [https://publications.deltares.nl/1209424\\_004\\_0018.pdf](https://publications.deltares.nl/1209424_004_0018.pdf)
- Deltares & KNMI (2015): Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? [https://cdn.knmi.nl/system/data\\_center\\_publications/files/000/069/858/original/samenvatting\\_grade\\_knmi14\\_definitief2.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf)
- Deltares & KNMI (2017): [https://cdn.knmi.nl/system/data\\_center\\_publications/files/000/069/858/original/samenvatting\\_grade\\_knmi14\\_definitief2.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf)
- Deltares / Haasnoot et al (2018): Een verkenning van mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Rapport Deltares in opdracht van de staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat WVL.

EU-CIS (2009, updated in 2024): River basin management in a changing climate. Guidance document 24. [https://environment.ec.europa.eu/publications/river-basin-management-changing-climate\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/river-basin-management-changing-climate_en)

EU-Copernicus (2024) : <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9(5): 1937-1958. DOI:10.5194/gmd-9-1937-2016

GDWS (2023): Fortschreibung der aktuellen Verfügungslage zur Aktualisierung der Daten- und Erkenntnislage zum Meeresspiegelanstieg. <https://izw.baw.de/wsv/umwelt/anpassung-klimawandel>

GIEC (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K & Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

GIEC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

GIEC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

GIEC (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

GLAMOS (2022): Schweizerisches Gletschermessnetz (GLAMOS – Glacier Monitoring in Switzerland). <https://glamos.ch>

HLNUG (2024): Informations sur ReKliEs. <https://reklies.hlnug.de/home>

Hydrological Atlas of Switzerland - HADES (2024). Atlas hydrologique de la Suisse. <https://atlashydrologique.ch/?language=switch>

HYDROmapsCC - Hydro-CH2018 dans l'HADES (2024): [https://hydromapscc.ch/#fr/8/46.832/8.190/bl\\_hds/NULL](https://hydromapscc.ch/#fr/8/46.832/8.190/bl_hds/NULL)

IGKB (2015): KlimBo - Klimawandel am Bodensee, rapport n° 60. [https://www.igkb.org/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Forschungsprojekte/Klimbo/KlimBo\\_Bla\\_uer\\_Bericht\\_60\\_l.pdf](https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/Downloads/Forschungsprojekte/Klimbo/KlimBo_Bla_uer_Bericht_60_l.pdf)

Jacob, D. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change*, 14(2): 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2

KLIWA (2016): Monitoringbericht 2016: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, [https://www.kliwa.de/\\_download/KLIWA\\_Monitoringbericht\\_2016.pdf](https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Monitoringbericht_2016.pdf)

KLIWA (2023): Heft 24, 7. KLIWA-Symposium am 14. und 15. September 2022 in Ingelheim am Rhein, Fachvorträge und Diskussionen, ZU WENIG | ZU VIEL – Wasserwirtschaft zwischen Trockenheit und Starkregen.

KLIWA (2024): Zukünftige Entwicklung von Starkregen – Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles. [https://www.kliwa.de/\\_download/KLIWA\\_Kurzbericht\\_zukuenftige\\_Entwicklung\\_Starkregen.pdf](https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Kurzbericht_zukuenftige_Entwicklung_Starkregen.pdf)

KNMI'14 (2014): [https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/klimaatbrochures/Brochure\\_KNMI14\\_NL.pdf](https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/klimaatbrochures/Brochure_KNMI14_NL.pdf)

- KNMI (2021): KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt
- KNMI'23 database (2023): For the SSP2-4.5 the KNMI'23 database was used. This is published on the database website but not yet in a report: <https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/>
- KNMI'23 scientific report / KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands (2023) [https://cdn.knmi.nl/system/data\\_center\\_publications/files/000/071/902/original/KNMI23\\_climate\\_scenarios\\_scientific\\_report\\_WR23-02.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/902/original/KNMI23_climate_scenarios_scientific_report_WR23-02.pdf)
- KNMI23 Klimaatscenarios Gebruikersrapport (2023): [https://cdn.knmi.nl/system/data\\_center\\_publications/files/000/071/901/original/KNMI23\\_klimaatscenarios\\_gebruikersrapport\\_23-03.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf) OR [KNMI23\\_klimaatscenarios\\_gebruikersrapport\\_23-03.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf)
- Knutti, R., Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Clim Change* 3, 369–373. <https://www.nature.com/articles/nclimate1716>. <https://doi.org/10.1038/nclimate1716>
- KP ZSS (*Kennisprogramma Zeespiegelstijging - Research program Sea level rise which is part of the Dutch Delta Program*) (2022): Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel <https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-kpzss-grondwaterverzilting-watervraag-bij-een-stijgende-zeespiegel>
- KP ZSS A (2023): Systeemanalyse KP ZSS zoetwater regio Rijn-Maasmonding 2023
- KP ZSS (2023): <https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/kennisontwikkeling-en-signalering/zeespiegelstijging/onderzoeksresultaten-2023> <https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-rijnmonddrechtsteden-en-rivierengebied---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+RijnmondDrechtsteden+en+Rivierengebied+-+KP+ZSS.pdf>
- LAWA (2023): Anpassung an den Klimawandel. <https://www.lawa.de/Publikationen-363-Anpassung-an-den-Klimawandel.html>
- Meehl, G.A., Bony, S. (2011): Introduction to CMIP5. *CLIVAR Exchanges*, 16(56). [https://web.lmd.jussieu.fr/~bony/TMP/Meehl\\_Bony\\_Clivar2011.pdf](https://web.lmd.jussieu.fr/~bony/TMP/Meehl_Bony_Clivar2011.pdf)
- NCCS (National Centre for Climate Services) (ed.) (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Zurich: 24. ISBN: 978-3-9525031-3-3.
- Nilson, E. et al. (2014). Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz, Germany. DOI :10.5675/Kliwas\_43/2014\_4.01
- Nilson, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- OFEV (ed.) (2021): Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. *Environmental Studies* No. 2101: 125 p.
- Pfahl, S.; O’Gorman, P. A.; Fischer, E. M. (2017): Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. In: *Nature Clim Change* 7 (6), S. 423–427. DOI:10.1038/nclimate3287
- Poncet, N., Lucas-Picher, P., Trambly, Y., Thirel, G., Vergara, H., Gourley, J., and Alias, A. (2024): Does a convection-permitting regional climate model bring new perspectives on the projection of Mediterranean floods?, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* (final revised paper). <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1163-2024>. <https://nhess.copernicus.org/articles/24/1163/2024/nhess-24-1163-2024.pdf>

- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3): 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436
- Rauthe, M., Brendel, C., Helms, M., Lohrengel, A.-F., Meine, L., Nilson, E., Norpoth, M., Rasquin, C., Rudolph E, Schade N H, Deutschländer T, Forbriger M, Fleischer C, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J, Seiffert R. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetz-werks. 136 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- Sperna-Weiland, F.C, et al. (2021): Estimating Regionalized Hydrological Impacts of Climate Change Over Europe by Performance-Based Weighting of CORDEX Projections. *Front. Water*, 3 - 2021 <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.713537>
- Tebaldi, C. et al. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293. <https://esd.copernicus.org/articles/12/253/2021/>. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>, 2021.
- Thirel, G. et al. (2018) (*résumé du projet MOSARH21*): Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill) ? (Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Moselle, Sarre and Ill)) <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb/2019039>
- Thirel, G. et al. (2018) (*rapport final sur MOSARH21 en français*): Rapport final du projet MOSARH21: Évolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC [https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport\\_final\\_MOSARH21\\_v2\\_1.pdf](https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport_final_MOSARH21_v2_1.pdf)
- Trenberth, K. E. (1999): Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. In: *Climatic Change* 42 (1), S. 327–339. DOI: 10.1023/A:1005488920935
- Wechsler, T., Zappa, M. (non publié): Auswirkungen Klimaszenarien CH2018 auf Alpenrandseen, Walensee und Zürichsee. Studie im Auftrag des BAFU.
- Ylla Arbós, C., Blom, A., Sloff, C. J., & Schielen, R. M. J. (2023). Centennial channel response to climate change in an engineered river. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103000. <https://doi.org/10.1029/2023GL103000>
- Zeespiegelmonitor (2022): Stolte W. et al.; Deltares and KNMI <https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000021208>
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D.: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, 13, 1125–1146, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>, 2019

**ANNEXES**  
*(en anglais)*

## **Annexe A: Technical and methodological background**

The national institutes and services that supplied data for this study (cf. section 2.1 of the report), have independently chosen different approaches, methods and models. Table 1 in section 2.2 of the report shows some similarities and many differences between the respective studies.

The following subsections give some background to the decisions lined out in section 2.2 of the report (Data integration and analysis scheme). They summarise the main similarities and differences between the different data packages and discuss potential implications on the results of this report. More detailed information can be found in the references and project reports of the underlying climate impact projects and teams mentioned in section 2.1 of the report.

### **1. Coverage and scenarios**

#### **1.1 Spatial coverage**

The studies contributed to EG HCLIM cover various gauging stations of the Rhine catchment. However, not all studies cover the complete international Rhine catchment i. e. the non-tidal part of the Rhine up to and including the Lobith gauging station at the DE/NL border. Some studies are confined to specific parts of the catchment.

As a consequence, the data base differs between Rhine stretches and gauges evaluated in this study (see table 1).

#### **1.2 Temporal coverage**

Except for two contributing research teams, all data packages delivered for this report cover climate changes through the 21<sup>st</sup> century up to 31<sup>st</sup> December 2100 based on daily values. They differ however in the starting year (see table 1). This is due to different spin up strategies of the hydro modelling teams at the simulation start. All contributing research teams except two provided continuous simulation from the first to the last year. Two contributing research teams provided data for selected time slices only (see project documentation).

Overall, the differences in the starting years interfere with the selection of the reference period (see table 1). The time slice-based studies show a few differences to the other studies (see table 1 and text below).

#### **1.3 Underlying IPCC report**

At the time of writing, all contributing research teams still referred to the 5<sup>th</sup> IPCC assessment report (IPCC, 2013) thus updating their respective previous activities that referred to the 4<sup>th</sup> assessment report (IPCC, 2007). One contributing research team (NL) has already started working on the information underlying the 6<sup>th</sup> IPCC report (IPCC, 2021, IPCC, 2023), but results were not available at the time of writing this report.

Thus, with respect to the underlying IPCC report version, all studies used to update the discharge scenarios are comparable.

#### **1.4 Selected scenario**

The 5<sup>th</sup> IPCC report offered various Representative Concentration Pathways (RCP) suggesting stronger (RCP8.5) through weaker (RCP2.6) modifications of the climate system by human activity. While some contributing research teams investigated more than one scenario, all contributors investigated the high emission pathway RCP8.5 for reasons of precaution. This scenario is thus adopted for this study.

Thus, with respect to the climate scenario, all studies are comparable.

### **2. Model chains**

The following sections describe the similarities and dissimilarities of the modelling approach of the studies that are integrated in this report: the model and processing chain consists of climate models, data selection and processing schemes and hydrological models.

The choices were made by the individual contributing research teams in advance of the EG HCLIM activity. Adjusting the choices was not possible in EG HCLIM.

## 2.1 Climate models

All contributing research teams except for one rely on outputs of coordinated regional climate modelling activities (CORDEX). Two contributing research teams included climate model runs from an additional source (ReKliEs). One contributing research team chose another approach relying on outputs of selected global climate models (CMIP), another contributor chose two alternative approaches. Differences exist between the groups relying on the CORDEX output because different model runs and sub-ensembles were selected (cf. section 2.3 of appendix A). For the hydro-meteorological analysis (section 3.1 of the report) the DAS-ensemble was used including three additional runs that were not intended to be used for hydrological analyses of DAS.

This heterogeneity limits the compatibility between the results of the different research teams to some extent.

Table 11 gives an overview of the different choices made.

**Table 11: Overview of the GCM-RCM runs used in the studies underlying this report. \* indicates alternative climate data processing schemes (cf. section 2.2 of appendix A).**

RCP	GCM	RUN	RCM	ASG2	H-CH2018	KLIWA	DAS/XPN	KNMI14	MOSARH21	Number
RCP85	CanESM	1	CCLM4	x						1
RCP85	CanESM	1	RCA4		x					1
RCP85	CanESM	1	REMO2015				x			1
RCP85	CNRM	7	AdvDC						x*	1
RCP85	CNRM	7	ALADIN						x	1
RCP85	ECEARTH	12	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	ECEARTH	12	CCLM5		x					1
RCP85	ECEARTH	3	HIRHAM5		x					1
RCP85	ECEARTH	1	RACMO		x	x	x	x*		4
RCP85	ECEARTH	12	RACMO			x	x	x*		3
RCP85	ECEARTH	12	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	ECEARTH	12	REMO2015				x			1
RCP85	GFDL	7	AdvDC						x*	1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM4		x					1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM5		x					1
RCP85	HADGEM2	1	RACMO		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	RCA4		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	REMO2015				x			1
RCP85	HADGEM2	1	WRF			x				1
RCP85	IPSL	1	AdvDC						x*	1
RCP85	IPSL	1	RCA4	x			x			2
RCP85	IPSL	1	WRF						x	1
RCP85	MIROC	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MIROC	1	CCLM5		x					1
RCP85	MIROC	1	REMO2015				x			1
RCP85	MIROC	1	RCA4		x					1
RCP85	MPIESM	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MPIESM	1	CCLM5		x					1
RCP85	MPIESM	1	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	MPIESM	1	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	2	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	1	WRF			x				1
RCP85	MRI	7	AdvDC						x*	1
RCP85	NORES	1	RCA4		x					1
			Number		7	14	9	16	3	

### Specific explanations on KNMI'14 scenarios (in DE, FR, NL languages):

Les projections de débit sélectionnées dans la présente étude (libellé « KNMI'14 ») utilisent le modèle hydrologique HBV et se fondent entre autres sur le scénario d'émissions élevées RCP8.5. Le jeu de données néerlandais se distingue des autres jeux de données à la fois au niveau du traitement des données et de l'approche suivie.

Les modèles de variabilité climatique régionale des scénarios climatiques de KNMI'14 sont impulsés par la température moyenne mondiale obtenue comme réponse de l'ensemble des modélisations du projet CMIP5 sur la période 1951-2100. En outre, on utilise comme autre facteur d'impulsion des modifications régionales du climat pour couvrir une gamme de scénarios. Les projections modélisées obtenues sont divisées en quatre scénarios spécifiques. Les scénarios sont en connexion avec les scénarios d'émissions élevées du 5<sup>e</sup> rapport de situation du GIEC (sans être identiques à ceux-ci), à savoir les scénarios RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (Deltares et KNMI, 2017) avec des modifications « faibles » ( $G_L$  et  $W_L$ ) et « importantes » ( $G_H$  et  $W_H$ ) des précipitations hivernales,  $G$  (signifie « gematigt », c'est-à-dire « modéré » en néerlandais) et  $W$  (signifie « Warm », c'est-à-dire « chaud » en néerlandais) signifiant température globale « basse » et « élevée », et changent respectivement avec les scénarios "W" forcés par le scénario RCP8.5. Il a été généré par ailleurs un scénario  $W_{dry}$  pour reproduire des conditions particulièrement sèches (Deltares et KNMI, 2015). Ces scénarios sont des entrées du modèle hydrologique (HBV) pour produire des débits et des statistiques de débit utilisés ensuite à la fois dans le cadre de la gestion des risques d'inondation (intégration dans les outils d'évaluation et de conception) et de la gestion des ressources en eau douce.

## 2.2 Climate data processing schemes

The way climate data is processed for hydrological modelling includes several steps: for example, spatial aggregation or disaggregation of the original climate model data (depending on the spatial resolution of the hydrological model). Among others, there are several ways to handle climate model biases (deviations of observed and simulated climate). In general, two different approaches have been used by the contributing research teams.

The approach labelled "bias correction" uses observations<sup>17</sup> to correct the climate model outputs by factors determined by comparison of simulated and observed meteorological fields<sup>18</sup>. This approach maintains for example the temporal structure of the climate models; i. e. continuous timeseries of daily values. The approach labelled "delta change" shifts observations by change signals determined by comparing the simulated future and the past climate system states<sup>19</sup>. This approach generally maintains more properties of the observed meteorological fields and allows time slice assessments instead of continuous assessments. Both approaches have advantages and drawbacks. Differences in climate data processing schemes limits compatibility of the results between the different research teams but a "best approach" cannot be selected and therefore both approaches have been integrated in this analysis.

## 2.3 Ensembles (number of members)

The uncertainty inherent to the climate system and the climate models is usually captured by using an ensemble of climate simulations (projections) instead of a single simulation (projection). However, the number of ensemble members varies in a wide range between the data packages contributed by the research teams for this study. The reasons include computational resources, criteria of quality checks and model selection.

As not only the number of ensemble members but also the selected models and model runs (cf. section 2.1 of appendix A) were different between the delivered data packages, the selection of ensemble members is given. Changing this was not possible within the mandate of EG HCLIM.

The ensemble size and thus the sample size has a clear impact on the comparability of the results between the different research teams and the statistics (extreme values) that can be applied to the data.

## 2.4 Hydrological models

Table 1 in section 2.2 shows the different hydrological models used to calculate the regional water balances and the river discharge that are the core data used in this study. Hydrological models differ in the representation and discretisation of hydrological processes such as evaporation, groundwater recharge, snow storage, water management routing etc. in catchments or grid cells and in the data used for model setup (soil, landcover, topography etc.). Even models labelled identically in the table show differences, e. g. LARSIM with spatial resolutions of 1 km and 5 km.

It is beyond the scope of this study to assess and explain the differences between the hydrological models used in detail, but this could be part of future research (see section 5.4). In principle, the application of different hydrological models contributes to a holistic uncertainty assessment and allows mutual learning and model improvement. In other words, model uncertainties are somehow reduced by showing a bigger range of possible evolutions.

---

<sup>17</sup> different observation products in different contributing studies

<sup>18</sup> e. g. monthly correction factors for different quantiles of air temperature or precipitation

<sup>19</sup> e. g. by comparing the simulated future and the past climate system states as presented by multi-annual time slices (usually 30 years) of air temperature or precipitation

## 2.5 Time periods

Changes signals are obtained by comparing river flow statistics of future time periods with a reference period. In the original studies of the research groups, different reference periods were selected (table 1). In EG HCLIM, the common reference period **1981-2010** was chosen. Setting the reference period to 1961-1990 as in the earlier report (ICPR, 2011) was not possible due to lack of model output (see section 1.2 of appendix A). The period 1991-2020 was not selected as reference because starting with the year 2006, the CO<sub>2</sub> concentrations underlying the climate and hydrological simulations are based on the scenarios of the 5<sup>th</sup> IPCC assessment report (thus: assumed/projected values, not observed).

As more than 10 years have passed between the end of the selected "reference period" (2010) and "today", EG HCLIM decided to calculate the "present" - defined as the period **1991-2020** - change signals based on observations to evaluate the recent changes.

With respect to future periods, there was an approximate match of the "distant future" ("far future", "end of the century") between the original studies of the contributing research teams, defined as the period **2071-2100** (2069-2098) (table 1). For the definition of the "near future" ("mid of the century") the original studies differed. For EG HCLIM, the period **2031-2060** was selected.

## Appendix B: Comparison of old and new discharge scenarios

Please find detailed explanation on this comparison between the old ICPR report no. 188 (ICPR, 2011) and the current report in section 5.2.

**Table 12: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Annual indicators of mean, low and high flow change (% , MQ, MNQ, MHQ) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report).**

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report.

Indicator	Gauge	Projected change (%) ( <i>ICPR report no. 188</i> )		Projected change (%) ( <i>Current report</i> )	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
Values without brackets: 'integrated picture': minimum to maximum changes of all projections/ensembles Values in brackets `(`)`: 'common part': intersection of the different ensembles of the contributions					
MQ	Basel	n.d.	n.d.	-15 to +11 (-6 to +5)	-26 to +10 (-8 to -2)
	Maxau	n.d.	n.d.	-14 to +12 (-7 to +4)	-23 to +12 (-8 to -1)
	Worms	n.d.	n.d.	-12 to +13 (-7 to +4)	-19 to +14 (-7 to +2)
	Kaub	n.d.	n.d.	-13 to +13 (-5 to +6)	-16 to +17 (-4 to +4)
	Cologne	n.d.	n.d.	-12 to +11 (-4 to +7)	-13 to +19 (-3 to +8)
	Lobith	n.d.	n.d.	-11 to +11 (-4 to +10)	-12 to +19 (-3 to +13)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-13 to +24 (-11 to +16)	-13 to +28 (-2 to +15)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-22 to +23 (+5 to +15)	-44 to +33 (+11 to +15)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-12 to +19 (0 to +10)	-12 to +27 (+7 to +23)
MNQ	Basel	n.d.	n.d.	-32 to +8 (-)	-57 to +9 (-)
	Maxau	n.d.	n.d.	-26 to +7 (-8 to 0)	-48 to +6 (-15 to -6)
	Worms	n.d.	n.d.	-27 to +7 (-11 to 0)	-48 to +3 (-19 to -6)
	Kaub	n.d.	n.d.	-27 to +6 (-15 to -1)	-46 to +1 (-23 to -5)
	Cologne	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-18 to -2)	-47 to -1 (-27 to -6)
	Lobith	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-19 to -3)	-48 to -1 (-27 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +18 (-21 to +7)	-35 to +15 (-22 to +4)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-33 to +16 (-19 to +8)	-42 to +21 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-51 to +8 (-26 to -4)	-66 to +16 (-30 to -21)

MHQ	Basel	-5 to +10	-25 to +15	-14 to +17 (0 to +10)	-17 to +24 (+5 to +8)
	Maxau	-5 to +15	-20 to +15	-7 to +30 (+2 to +14)	-3 to +28 (+9 to +14)
	Worms	-10 to +20	-15 to +15	-3 to +43 (+3 to +16)	-3 to +31 (+12 to +17)
	Kaub	-5 to +25	-10 to +20	-3 to +44 (+4 to +19)	-8 to +37 (+15 to +21)
	Cologne	0 to +20	-5 to +20	-4 to +39 (+5 to +21)	-12 to +38 (+17 to +22)
	Lobith	0 to +20	-5 to +20	-7 to +36 (+5 to +21)	-12 to +37 (+16 to +30)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-9 to + 69 (-3 to +46)	-16 to + 46 (+5 to +35)
	Raunheim (Main)	0 to +35	0 to +35	-20 to +42 (+8 to +28)	-27 to +60 (+24 to +33)
	Trier (Moselle)	-10 to +15	-10 to +20	-1 to +35 (+6 to +21)	-12 to +49 (+23 to +31)

**Table 13: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Seasonal indicators of mean, low and high flow change (% , MQ, NM7Q) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report); hydrological seasons.**

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report.

Indicator	Gauge	Projected change (%) ( <i>ICPR report no. 188</i> )		Projected change (%) ( <i>Current report</i> )	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
MQ Summer	Basel	-10 to +5	-25 to -10	-25 to +4 (-16 to -2)	-48 to -4 (-21 to -15)
	Maxau	-10 to +5	-25 to -10	-24 to +5 (-16 to -1)	-47 to -3 (-21 to -14)
	Worms	-10 to +5	-25 to -10	-23 to +6 (-16 to 0)	-46 to -1 (-21 to -12)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +7 (-16 to +1)	-43 to +2 (-20 to -10)
	Cologne	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +6 (-17 to 0)	-42 to +3 (-21 to -8)
	Lobith	-10 to +10	-25 to -10	-20 to +6 (-17 to +4)	-42 to +4 (-21 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-16 to +24 (-16 to +19)	-37 to +22 (-20 to +6)
	Raunheim (Main)	0 to +25	-20 to +10	-30 to +27 (-10 to +8)	-56 to +27 (-13 to +3)
	Trier (Moselle)	-5 to +10	-25 to -5	-26 to +15 (-21 to +6)	-41 to +19 (-25 to +10)
MQ Winter	Basel	0 to +20	+5 to +25	-10 to +22 (+6 to +14)	0 to +32 (+10 to +20)
	Maxau	0 to +20	+5 to +25	-2 to +21 (+5 to +14)	+4 to +31 (+9 to +19)
	Worms	0 to +20	+5 to +25	-4 to +21 (+4 to +14)	+3 to +32 (+10 to +20)
	Kaub	0 to +20	+5 to +25	-7 to +22 (+6 to +14)	0 to +35 (+12 to +20)
	Cologne	0 to +15	+5 to +25	-7 to +23 (+6 to +14)	-2 to +36 (+13 to +23)
	Lobith	0 to +15	+5 to +25	-6 to +23 (+6 to +16)	0 to +35 (+12 to +28)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-11 to +24 (-8 to +16)	-12 to +34 (+5 to +20)
	Raunheim (Main)	0 to +25	+15 to +40	-21 to +30 (+14 to +16)	-43 to +46 (-)
	Trier (Moselle)	0 to +20	+10 to +30	-8 to +28 (+7 to +13)	-7 to +38 (+18 to +27)

NM7Q Summer	Basel	-10 to +10	-20 to -10	-35 to +5 (-7 to -5)	-62 to +7 (-)
	Maxau	-10 to +10	-20 to -10	-36 to +2 (-12 to -5)	-57 to +2 (-)
	Worms	-10 to +10	-25 to -10	-36 to +1 (-15 to -4)	-56 to -1 (-24 to -21)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-35 to +1 (-19 to -3)	-54 to -5 (-28 to -18)
	Cologne	-10 to +10	-30 to -10	-34 to +1 (-22 to -3)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Lobith	-10 to +10	-30 to -10	-33 to 0 (-22 to -2)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-24 to +16 (-20 to +8)	-38 to +7 (-23 to -2)
	Raunheim (Main)	0 to +20	-20 to 0	-33 to +22 (-21 to +4)	-46 to +15 (-23 to -6)
	Trier (Moselle)	-20 to +20	-50 to -20	-51 to +9 (-28 to -7)	-68 to +9 (-32 to -26)
NM7Q Winter	Basel	+5 to +15	0 to +15	-17 to +15 (-2 to +7)	-32 to +26 (-8 to +8)
	Maxau	0 to +10	-5 to +15	-12 to +11 (-7 to +5)	-38 to +22 (-14 to +7)
	Worms	+5 to +15	-5 to +15	-15 to +10 (-10 to +4)	-41 to +20 (-18 to +5)
	Kaub	0 to +15	-5 to +15	-17 to +10 (-15 to +2)	-42 to +21 (-21 to +1)
	Cologne	0 to +15	0 to +20	-20 to +9 (-18 to +3)	-46 to +21 (-23 to -1)
	Lobith	0 to +15	-5 to +15	-20 to +9 (-19 to +3)	-45 to +20 (-27 to -1)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +23 (-24 to +6)	-40 to +30 (-28 to +20)
	Raunheim (Main)	+5 to +15	0 to +20	-33 to +17 (-19 to +8)	-41 to +23 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	-15 to +15	0 to +20	-43 to +14 (-21 to +1)	-54 to +23 (-29 to -9)

**Table 14: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Indicators of 'frequent', 'medium', and 'extreme' flood change (%; HQ10, HQ100, HQ1000) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report); see text for particular uncertainties associated with these values.**

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report. \*very uncertain

Indicator	Gauge	Projected change (%) (ICPR report no. 188)		Projected change (%) (Current report)	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
HQ10 'frequent'	Basel	-10 to +10	-20 to +20	-8 to +11	-8 to +20
	Maxau	-15 to +20	-15 to +25	-1 to +20	-1 to +30
	Worms	-15 to +15	-10 to +35	+20 to +26	+2 to +36
	Kaub	-15 to +15	-5 to +40	-1 to +24	-1 to +40
	Cologne	-5 to +15	0 to +40	-7 to +27	-7 to +38
	Lobith	-5 to +15	0 to +35	+8 to +21	+12 to +37
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	0 to +44	0 to +44
	Raunheim (Main)	0 to +30	5 to +40	-18 to +48	-18 to +48
	Trier (Moselle)	-5 to +15	0 to +25	0 to +31	0 to +36
HQ100 'medium' *	Basel	-20 to +10	-30 to +25	-12 to +21	-18 to +21
	Maxau	-10 to +15	-25 to +30	-5 to +42	-5 to +43
	Worms	-5 to +20	-25 to +35	-3 to +45	-3 to +47
	Kaub	-5 to +20	-10 to +25	-8 to +56	-8 to +56
	Cologne	0 to +20	0 to +25	-26 to +61	-26 to +61
	Lobith	0 to +20	0 to +25	+5 to +18	+7 to +42
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-17 to +67	-17 to +67
	Raunheim (Main)	0 to +20	0 to +35	-24 to +94	-24 to +94
	Trier (Moselle)	-5 to +30	-5 to +25	-20 to +49	-20 to +52
HQ1000 'extreme' *	Basel	-20 to +35	-10 to +50	-25 to +32	-28 to +32
	Maxau	-20 to +35	-20 to +65	-12 to +59	-12 to +59
	Worms	-15 to +30	-20 to +45	-13 to +81	-13 to +81
	Kaub	-5 to +25	-10 to +30	-18 to +89	-18 to +89
	Cologne	-5 to +25	0 to +30	-39 to +97	-39 to +97
	Lobith	-5 to +20	-5 to +30	+3 to +20	+5 to +51
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-31 to +155	-31 to +155
	Raunheim (Main)	-5 to +40	0 to +45	-27 to +151	-27 to +151
	Trier (Moselle)	-35 to +20	-20 to +45	-38 to +94	-38 to +94