



# **État actuel des connaissances relatives aux impacts possibles du changement climatique sur les écosystèmes fluviaux et sur la biodiversité dans le bassin du Rhin**

Commission Internationale pour la Protection du Rhin

**Rapport n° 309**

### **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)

# État actuel des connaissances relatives aux impacts possibles du changement climatique sur les écosystèmes fluviaux et sur la biodiversité dans le bassin du Rhin

## Contenu

Résumé .....	4
Introduction .....	5
<b>1. Répercussions du changement climatique sur les habitats aquatiques et amphibies du bassin du Rhin .....</b>	<b>6</b>
1.1 Interactions globales .....	7
1.1.2 Pluies intenses, débits élevés et crues .....	7
1.1.3 Étiages .....	8
1.1.4 Température de l'eau .....	9
1.1.5 La température comme valeur indicative de sensibilité .....	11
1.1.6 L'oxygène comme valeur indicative de sensibilité .....	12
1.2 Phytoplancton .....	13
1.3 Macrophytes / phytobenthos .....	16
1.4 Macrozoobenthos .....	16
1.5 Ichtyofaune .....	19
1.5.1 Apports de matériaux fins et régime de charriage .....	19
1.5.2 Étiages .....	20
1.5.3 Température de l'eau .....	22
1.5.4 Répartition des ichtyocénoses sur le profil longitudinal .....	24
1.5.5 Migration des poissons .....	26
1.5.6 Maladies .....	26
1.6 Espèces néobiotiques .....	27
1.6.1 Macrophytes .....	28
1.6.2 Macrozoobenthos .....	29
1.6.3 Ichtyofaune .....	30
<b>2. Répercussions éventuelles du changement climatique sur les habitats semi-aquatiques et terrestres du bassin du Rhin .....</b>	<b>31</b>
<b>3. Actions envisageables pour atténuer les répercussions négatives du changement climatique sur l'écosystème du Rhin .....</b>	<b>34</b>
3.1 Renforcer les écosystèmes en protégeant et en mettant en réseau les habitats .....	35
3.2 Atténuer les répercussions des pics de températures de l'eau .....	37
3.3 Atténuer les répercussions des étiages .....	39
3.4 Réduire l'érosion des sols et les apports sédimentaires consécutifs aux précipitations intenses et aux crues .....	40
Références .....	42
Annexes .....	49

## Résumé

Pour la plupart des organismes des écosystèmes aquatiques, le changement climatique accentue l'influence des facteurs de stress déjà existants découlant des multiples usages anthropiques. Cette remarque vaut notamment pour le bassin du Rhin caractérisé par une densité élevée de population, une forte industrialisation et une exploitation agricole intensive.

Les effets du changement climatique sont très étendus et agissent de manière cumulée et simultanée sur les écosystèmes.

Les modifications de la température de l'eau dues au changement climatique et la disponibilité de la ressource en eau influencent directement le métabolisme des organismes et leurs habitats, mais aussi indirectement l'oxygène disponible et l'offre en nutriments. Des modifications du régime de précipitations ont également des impacts directs sur le bilan des matières et sur l'hydrodynamique des habitats fluviaux.

Les jeux de données sur la gestion de l'eau ne permettent actuellement pas d'avoir une vue d'ensemble des modifications et des répercussions du changement climatique sur la biologie fluviale. Toutefois, les épisodes d'étiage comme en 2018 montrent que les répercussions du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques progressent beaucoup plus rapidement et sévèrement que ne le laissaient attendre les projections. Ceci concerne en particulier l'importance des épisodes de sécheresse et d'étiage. Les prévisions de débit les plus récentes pour le Rhin indiquent pour les décennies à venir une augmentation du débit pendant les mois d'hiver et une diminution pendant les mois d'été, ainsi qu'un renforcement de cette tendance vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Les prévisions relatives à la température de l'eau du Rhin affichent pour l'ensemble du bassin une augmentation de la température moyenne annuelle de l'eau comprise entre +1,1 et +1,8 °C pour le futur proche et entre +2,9 et +4,2 °C pour le futur éloigné. Le nombre de jours par an où la valeur seuil de 25 °C est dépassée augmente dans un futur proche pour atteindre 1 à 2 semaines. Dans un futur lointain, le nombre de jours où la température dépasse 28 °C s'élève à  $1 \pm 0,5$  semaine par an.

La préservation et l'extension des réserves naturelles et la désignation de nouvelles zones de protection, de même que les diverses mesures de restauration visant à améliorer la qualité, la diversité et la connexion des habitats, permettront de rendre plus résilientes les espèces déjà menacées actuellement et celles susceptibles de le devenir sous l'impact du changement climatique.

La connectivité des habitats est à mettre en avant pour une meilleure résilience écologique des espèces aquatiques. Outre la continuité longitudinale sur laquelle se concentrent généralement les mesures, elle intègre aussi la continuité écologique latérale et verticale. C'est une condition essentielle pour que les compartiments aquatiques connectés puissent offrir efficacement des habitats plus favorables ou servir de refuges. Au niveau du bassin versant, renforcer l'ombragement par un reboisement des berges et améliorer le régime hydrologique des milieux sont des éléments essentiels de l'adaptation au changement climatique.

Le programme Rhin 2040 de la CIPR affiche d'autres mesures et objectifs concrets à mettre en œuvre dans les États ou à atteindre globalement pour rendre le Rhin et son bassin plus résilients face aux impacts du changement climatique. Il prévoit, entre autres, d'étendre les habitats périfluviaux dépendants du milieu aquatique en renaturant 200 km<sup>2</sup> de surfaces alluviales, en raccordant 100 anciens bras et rivières latérales à la dynamique du Rhin, et en augmentant la diversité morphologique de 400 km de berges.

Outre des mesures sur le long terme, des mesures sur le court terme fixées dans un plan d'urgence peuvent aussi aider à atténuer par ex. l'impact de températures de l'eau élevées sur l'ichtyofaune.

## Introduction

Le Groupe de travail Écologie (GT B) et ses groupes d'experts BMON, FISH et BIOTOP ont rassemblé les récentes connaissances scientifiques sur les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et sur la biodiversité et actualisé le rapport CIPR n° 204 de 2013 intitulé « État des connaissances sur les éventuelles répercussions de modifications du régime hydrologique et de la température de l'eau sur l'écosystème du Rhin et actions envisageables ».

Ils ont pris en compte les nouveaux enseignements tirés des études et expériences récentes sur les épisodes de sécheresse des années antérieures, comme par exemple celui de 2018, et effectué un inventaire des synthèses disponibles à l'échelle nationale sur les répercussions du changement climatique sur l'écologie.

Le présent rapport décrit les répercussions attendues sur les quatre groupes d'organismes aquatiques : phytoplancton, macrophytes/phytobenthos, macrozoobenthos et poissons. D'autres chapitres traitent de la problématique des espèces néobiotiques et des impacts du changement climatique sur les habitats semi-aquatiques et terrestres. Enfin, des actions envisageables pour atténuer les répercussions négatives du changement climatique sont mises en avant.

Les résultats de ces travaux du GT B ont été présentés dans le cadre de l'atelier de la CIPR sur le changement climatique des 19 et 20 mars 2025 à Arnhem (NL) et apportent une précieuse contribution à la mise à jour de la stratégie de la CIPR d'adaptation au changement climatique, qui doit être publiée en 2025.

## 1. Répercussions du changement climatique sur les habitats aquatiques et amphibies du bassin du Rhin

Pour la plupart des organismes des écosystèmes aquatiques, le changement climatique accentue l'influence des facteurs de stress déjà existants découlant des multiples usages anthropiques.<sup>1</sup> Cette remarque vaut notamment pour le bassin du Rhin caractérisé par une densité élevée de population, une forte industrialisation et une exploitation agricole intensive.

Globalement, on considère que les modifications des conditions écologiques mettent particulièrement en péril :

- les espèces rares ;
- les espèces implantées dans des habitats de petite ou de moyenne superficie ;
- les espèces endémiques présentes dans une région particulière et précisément délimitée ;
- Les espèces sténobiotes ou sténotopes, qui ne supportent que les faibles variations des facteurs écologiques.

Les marécages, forêts, pelouses sèches et zones de bruyère, de même que les sources, les cours amont, les berges, les lacs et les habitats littoraux comptent parmi les biotopes les plus sensibles au changement climatique<sup>2</sup>.



**Figure 1 : Pelouses sèches dans la réserve naturelle du Taubergiessen  
(Photo : Regierungspräsidium Freiburg)**

Le risque de dégradation d'un écosystème dépend de l'intensité du changement climatique dans une région donnée et de la capacité d'adaptation de l'écosystème et/ou des espèces en présence.

On estime que les écosystèmes des régions mentionnées ci-après sont exposés à un risque élevé de dégradation dans le bassin du Rhin :

- Les conditions de vie des organismes implantés dans le fossé du Rhin supérieur vont vraisemblablement changer sous l'impact de températures et de taux d'évaporation plus élevés, de crues plus fréquentes, de précipitations intenses et d'un décalage des précipitations estivales vers l'hiver. La disponibilité de la ressource en eau baissera globalement en conséquence et on connaîtra des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse plus fréquentes, plus sévères et plus longues en été<sup>3</sup>.
- On s'attend à ce que le changement climatique soit particulièrement prononcé dans les Alpes et qu'il affecte un nombre important d'espèces animales et végétales endémiques vivant en partie dans des sites microclimatiques spécifiques et ne disposant pratiquement pas d'issue de secours.

<sup>1</sup> Divers auteurs dans RABITSCH et al. 2010

<sup>2</sup> RABITSCH et al. 2010

<sup>3</sup> SCHMIDT et al. 2023

Les modifications directes et indirectes des facteurs abiotiques et les impacts du changement climatique sur les organismes ou groupes d'organismes ont été rassemblées dans le cadre du projet KLIWA<sup>4</sup>. En raison de la grande diversité de facteurs et usages multi-actifs dans les grands bassins, les interactions en présence dans les parties aval des cours d'eau sont plus complexes que dans les parties moyennes ou amont. Le cours principal du Rhin entre en grande partie dans la catégorie « cours inférieur d'une rivière ». Il est souvent difficile d'identifier ici des réactions nettes dans une direction donnée (renforcement ou affaiblissement), les études faisant fréquemment apparaître des phénomènes opposés. Les effets directs du changement climatique, les hausses de température par ex., sont souvent moins marquants que d'autres facteurs (par ex. les concentrations de substances) ou les usages anthropiques. A l'opposé des cours moyens et amont, l'éventuel manque d'oxygène est un facteur important dans les tronçons régulés.

Les résultats de cette étude bibliographique de grande ampleur sur les interactions dans les cours supérieurs, moyens et inférieurs sont reproduits dans les figures de l'annexe 1.

## 1.1 Interactions globales

Le changement climatique modifie les habitats par des voies d'action diverses. Le changement climatique agit sur le régime hydrique et nutritif des habitats. On constate ainsi un impact direct de la température et de la disponibilité de la ressource en eau sur le métabolisme des organismes et sur leurs habitats, mais également un impact indirect sur l'oxygénation et l'alimentation. Des modifications du régime de précipitations ont également des impacts directs sur le bilan des matières et sur l'hydrodynamique des habitats fluviaux.

Les crues et les étiages, ressentis en cas exceptionnels par les hommes comme des événements perturbateurs ou catastrophiques, sont des phénomènes fondamentalement naturels caractéristiques des écosystèmes fluviaux et essentiels pour leur fonctionnement. Les variations dynamiques de niveau d'eau offrent régulièrement aux organismes vivant dans les eaux et dans ses alentours de nouvelles opportunités de colonisation et d'extension et de nombreuses espèces ont développé des stratégies d'adaptation pour survivre à ces fluctuations. Cependant, les impacts sur les organismes de niveaux de crues extrêmes plus fréquents<sup>5</sup>, phénomènes récents dus aux changements de la dynamique des débits sous l'effet du changement climatique, restent encore peu analysés et leurs répercussions pourraient avoir une grande portée. Étant donné que les biocénoses des grands fleuves nécessitent 1 à 2 ans (selon les groupes d'espèces) pour se régénérer, une augmentation de la fréquence et de la durée d'états de crue et d'étiage peut amener à modifier à moyen ou long terme les formes de colonisation du milieu aquatique.<sup>6</sup>

En plus de brefs pics extrêmes de températures de l'eau qui ont aussi fréquemment un impact mortel sur certains peuplements, il faut également souligner les effets d'une hausse prolongée, voire même durable de la température de l'eau, car celle-ci règle de nombreux processus vitaux dans les organismes (cf. chap. 1.1.4). Elle modifie durablement la biocénose et favorise le développement d'espèces tolérant la chaleur et aptes à s'adapter.

### 1.1.2 Pluies intenses, débits élevés et crues

En situation de débit élevé et de crue, de même qu'en phase de pluies intenses suivies de processus d'érosion et de ruissellement, des quantités importantes de matières organiques, nutriments et polluants se déversent dans les rivières. En relation avec des températures élevées, ces apports peuvent stimuler la dégradation microbienne et faire

---

<sup>4</sup> KLIWA 2010, <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>

<sup>5</sup> STAHL et al. 2022

<sup>6</sup> KOOP et al. 2007

ainsi augmenter la consommation d'oxygène dans les eaux, notamment en aval des stations d'épuration, sous l'effet des apports des déversoirs d'orage<sup>7</sup>.

Si la fonte des neiges démarre plus tôt ou si surviennent des pluies intenses, notamment après des phases de sécheresse prolongées, les sédiments, nutriments et pesticides (de présemis) provenant des surfaces labourées peuvent se déverser en très grandes quantités dans les eaux. L'apport de sédiments fins peut provoquer le colmatage des habitats interstitiels dans le lit fluvial (dans les zones de frayères des espèces phytophiles) et, par conséquent, une carence d'oxygène. À l'opposé, les déplacements de matériaux charriés peuvent agrandir les bancs de gravier riches en interstices ou en créer de nouveaux.

La hausse des débits pourrait avoir éventuellement pour effet positif supplémentaire d'agrandir (temporairement) les habitats aquatiques et semi-aquatiques, là où existe une connexion entre le fleuve et le champ alluvial. La dynamique fluviale pourrait ainsi favoriser le développement de biotopes aquatiques tels que les marécages, les roselières et la végétation de hautes herbes, les prairies permanentes et les forêts alluviales ainsi que la dissémination de semences végétales. Si le champ alluvial était mieux connecté au cours d'eau, les zones inondables pourraient, sous certaines conditions, être submergées plus fréquemment par les petites ou moyennes crues. Avec le changement climatique, les pluies estivales intenses et imprévisibles, comme celles survenues en été 2021, se produiront plus souvent. En particulier dans les tronçons fluviaux aménagés et rectifiés, dans lesquels l'eau est rapidement évacuée vers l'aval et déborde rarement sur les surfaces adjacentes, les ondes de crues résultant de ces pluies peuvent emporter le frai et les poissons juvéniles et perturber leur croissance ultérieure. Si toutefois il existe un raccordement permanent ou temporaire (p. ex. en cas de crue estivale) du cours principal avec les milieux alluviaux, les poissons et le frai peuvent migrer du cours principal vers les cours d'eau alluviaux latéraux en cas de crues afin d'y trouver refuge. Après le passage de l'onde, ils peuvent retourner dans le fleuve. Les densités de peuplements peuvent être préservées. Dans ces surfaces inondables, les crues printanières et le retrait progressif de l'eau en été offrent les meilleures opportunités de développement écologique.

### **1.1.3 Étiages**

En période d'étiage, les surfaces asséchées en bordure des fleuves gagnent du terrain et donnent naissance, quand la morphologie des berges le permet, à de nouveaux biotopes et à des annexes hydrauliques séparés du cours principal. Dans le même temps, le volume et la surface de l'espace en eau se rétrécissent.

Quand ils le peuvent (c'est-à-dire quand la continuité fluviale existe), les organismes aquatiques mobiles suivent le cours de l'eau en baisse, alors que les organismes sessiles doivent surmonter la phase de sécheresse (p. ex. en constituant des formes persistantes), sont dévorés (p. ex. par les mouettes et les corneilles) ou meurent par assèchement ou sous l'effet des températures élevées.

Dans la masse d'eau subsistant au milieu du fleuve, le nombre d'espèces et leur abondance (nombre d'individus par unité de surface ou de volume) augmentent. Le courant y étant plus rapide que dans les habitats tombés à sec à proximité des berges, de nombreux organismes risquent de dériver ou d'être mangés par des prédateurs qui séjournent dans les eaux plus profondes.

Pendant les phases d'étiage, les eaux alluviales sont progressivement déconnectées du fleuve et s'assèchent totalement ou en partie. Dans des segments des bras régulés (p. ex. le Nederrijn/Lek), la vitesse du courant diminue nettement dans le cours principal du fleuve en période d'étiage. Ceci peut affecter plus fortement encore les peuplements d'invertébrés et de poissons rhéophiles souffrant déjà de la régulation des fleuves.

---

<sup>7</sup> Koop et al. 2007

Sur les berges, les bancs graveleux exempts de végétation sont des sites de couvaison d'oiseaux tels que le petit gravelot et le chevalier guignette et des biotopes d'alimentation pour les carabidés et les arachnides.



**Figure 2 : Coquilles de palourde d'eau douce (Corbicula) sur les berges du Rhin à hauteur d'Oberwesel le 24 août 2003 (photo : W. Wiechmann, BfG)**

Les étiages peuvent renforcer la pollution et la charge en nutriments, car les flux de polluants rejetés par ex. avec les eaux usées des stations d'épuration sont alors moins dilués. Il en résulte une hausse de l'eutrophisation et de la pression saline susceptible d'endommager les organismes sensibles. Les phases d'étiage peuvent en outre favoriser la concentration d'agents pathogènes, en particulier quand la température et la consommation d'oxygène augmentent parallèlement à la baisse du volume d'eau (voir chap. 1.1.4). En outre, les faibles niveaux d'eau ont un impact sur le niveau de la nappe phréatique dans les zones alluviales, ce qui est néfaste à divers types de végétation amphibie ou terrestre dépendants des eaux souterraines, de même qu'à la faune qui y vit.

Une étude du réseau néerlandais de connaissances sur le développement et la gestion du milieu naturel (OBN)<sup>8</sup> s'est consacrée aux effets du changement climatique sur l'écologie fluviale et voit dans les faibles débits au printemps et en été un des impacts climatiques les plus critiques sur les ichtyocénoses des grands fleuves néerlandais. L'absence de crue au printemps et les faibles débits estivaux accentueront l'assèchement des zones alluviales si le processus d'érosion du lit du fleuve lié à l'aménagement des cours d'eau continue à progresser, avec pour conséquence la déconnexion grandissante du fleuve et de son champ alluvial. En effet, ce processus fait perdre aux zones alluviales leur importante fonction de réservoir d'eau.

Au cours des années passées, plusieurs étiages extrêmes sont survenus dans le bassin du Rhin, entre autres en 2018 et 2022. Leurs effets, y compris sur l'écologie et la qualité de l'eau, ont été documentés dans deux rapports de la CIPR.<sup>9</sup> Les prévisions de débit les plus récentes pour le Rhin montrent que le débit des mois d'été diminuera au cours des prochaines décennies, alors que celui des mois d'hiver augmentera. Cette tendance va s'accroître à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.<sup>10</sup>

#### **1.1.4 Température de l'eau**

Pour la faune et la flore, la température ambiante est un des principaux facteurs environnementaux qui règle entre autres la reproduction, la croissance, le développement et la migration. Les organismes à sang froid (poïkilothermes) tels que les poissons et les macroinvertébrés, qui n'ont pas de processus de régulation de leur température interne mais dont la température corporelle est déterminée par le milieu

<sup>8</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>9</sup> CIPR 2020a et CIPR 2024b

<sup>10</sup> CIPR 2024a

ambiant, de même que les espèces sténothermes, qui ne supportent qu'une marge de température d'eau étroite, sont particulièrement touchés par les effets des modifications de la température de l'eau.

Des températures de l'eau en hausse peuvent modifier la composition des espèces et les structures de dominance le long des fleuves. Les sténothermes froids, c'est-à-dire les espèces uniquement présentes dans des régions à eaux froides et à faibles variations de température, sont très vulnérables (p. ex. l'ombre commun *Thymallus thymallus* et la lotte *Lota lota*). Leurs aires d'implantation peuvent se décaler vers le nord ou vers des zones fluviales plus en altitude dès lors que la température de l'eau augmente. Les températures croissantes sont problématiques en particulier pour les espèces vivant dans les têtes de bassin et dans les cours amont, car elles ne peuvent pas remonter plus haut dans les tronçons de cours d'eau plus frais pour y trouver refuge. Ce phénomène de « cul-de-sac » peut mener à l'extinction locale d'espèces sensibles dans le pire des cas et se traduire par une perte de biodiversité dans les rivières concernées. Les espèces eurithermes, qui peuvent supporter de vastes amplitudes thermiques, et les espèces thermophiles, parmi elles de nombreux néozoaires, que l'on rencontrait plutôt jusqu'à présent dans les zones d'embouchure, voient leurs conditions de vie améliorées et peuvent coloniser les cours fluviaux vers l'amont. Cette remarque s'applique ici surtout au macrozoobenthos et aux poissons, mais également aux macrophytes et à d'autres plantes aquatiques. Les faibles niveaux d'eau amplifient l'impact de la hausse des températures. Les mares peu profondes du champ alluvial deviennent isolées et se réchauffent plus rapidement avec la baisse progressive du niveau d'eau. Dans les zones de retenue, la vitesse d'écoulement diminue plus encore pendant les périodes d'étiage, ce qui favorise également le réchauffement des eaux et la croissance algale.

Les températures élevées ont en outre pour effet d'accélérer le métabolisme des espèces poïkilothermes. Quand la température augmente de 10 °C, la consommation d'énergie double plus ou moins (loi de van't Hoff). Si la nourriture est insuffisante, la croissance des espèces poïkilothermes est freinée et leurs peuplements baissent. Le taux de croissance relatif des poissons augmente généralement nettement quand les températures sont en hausse jusqu'à ce que la température optimale pour une espèce soit atteinte, mais elle baisse toutefois rapidement en cas de dépassement de cette température.<sup>11</sup> Certaines indications laissent penser que le changement climatique pourrait favoriser les espèces de petite taille.<sup>12</sup> En outre, la conjonction d'une carence de nourriture et de températures élevées peut affaiblir leur système immunitaire. Les fortes températures favorisent également la propagation des organismes pathogènes et parasites, etc.<sup>13</sup>

Dans le cours inférieur des grands fleuves en particulier, les éléments végétaux (phytoplancton, macrophytes et phytobenthos) sont également touchés par la hausse des concentrations en nutriments et le rayonnement solaire plus intensif. Ceci favorise une croissance végétale intensive avec des effets en partie positifs (p. ex. une plus grande richesse morphologique pour d'autres organismes) et en partie négatifs sur d'autres biotes (p. ex. une consommation accrue d'oxygène due à la dégradation des matières végétales).

Une analyse des températures de l'eau du Rhin sur la période 1987-2023 montre pour toutes les stations d'analyse, à une exception près, un réchauffement progressif de la température de l'eau<sup>14</sup>. Les tendances au réchauffement les plus marquées sont constatées dans le haut Rhin, le Rhin supérieur et le Rhin moyen. Une autre étude montre que des températures de l'eau plus chaudes sont prévues dans tous les tronçons du Rhin dans le futur proche (2045-2065) et lointain (2081-2100)<sup>15</sup>. L'augmentation de la température moyenne annuelle de l'eau sur l'ensemble du bassin oscille entre +1,1 et

---

<sup>11</sup> IMSLAND et al. 2005

<sup>12</sup> ABDOLI et al. 2005, ABDOLI et al. 2007

<sup>13</sup> KOOP et al. 2007, RABITSCH et al. 2010

<sup>14</sup> CIPR 2024c

<sup>15</sup> CIPR 2025

+1,8 °C pour le futur proche et entre +2,9 et +4,2 °C pour le futur éloigné. L'été et l'automne se réchauffent plus rapidement que la moyenne annuelle, tandis que le réchauffement est plus lent en hiver et au printemps. Dans un futur proche, le nombre de jours par an où la valeur seuil de 25 °C est dépassée augmente pour atteindre 1 à 2 semaines. Dans un futur lointain, le nombre de jours où la température dépasse 28 °C s'élève à  $1 \pm 0,5$  semaine par an.

Une étude du réseau néerlandais de connaissances sur le développement et la gestion du milieu naturel (OBN)<sup>16</sup> sur les effets du changement climatique sur l'écologie fluviale montre en outre que des températures de l'eau élevées se produiront de plus en plus tôt au printemps. En 2020 p. ex., les eaux fluviales du Waal, un des bras du Rhin, atteignaient déjà 15 °C vers le 1<sup>er</sup> avril alors que ce n'était le cas en 1990 que vers fin avril. Ce réchauffement précoce des eaux au printemps va probablement se poursuivre. Certains cycles de développement de différents organismes risquent de ne plus être simultanés (par ex. croissance accélérée du macrozoobenthos et ainsi offre alimentaire trop précoce pour l'ichtyofaune). Le réchauffement peut aussi se répercuter sur la phénologie du saumon (p. ex. sous la forme d'une baisse de taille et de poids).<sup>17</sup> De plus, les variations de température peuvent avoir un impact sur la période de frai de différentes espèces. L'augmentation de la température de l'eau au-delà d'une valeur critique a des effets négatifs sur le comportement migratoire des saumons.<sup>18</sup>

### 1.1.5 La température comme valeur indicative de sensibilité

Les plages de températures moyennes et maximales sont les plus significatives. On dispose d'une documentation étendue sur les plages de température d'eau appréciées par de nombreuses espèces de poissons (cf. chapitre 1.5.3).

Aux Pays-Bas, la hausse de température due à des rejets thermiques ne doit pas faire augmenter de plus de 3 °C la température du milieu récepteur. En 2004, il a été établi (système d'évaluation CIW pour les rejets thermiques) qu'une température de 28 °C ne devait pas être dépassée et un nouveau système d'évaluation incluant une norme de 25 °C est actuellement en cours d'élaboration. Cela correspond à la norme de 25 °C appliquée aux Pays-Bas au titre de la directive cadre Eau pour un bon état écologique des rivières<sup>19</sup>.

En France, l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif à l'évaluation de l'état écologique et modifié le 9 octobre 2023 prescrit deux seuils de température maximale (percentile 90) : 21,5 °C pour les cours d'eau salmonicoles et 25,5 °C pour les cours d'eau cyprinicoles. Ces seuils correspondent à la limite du bon état écologique et s'appliquent en principe de la même manière aux cours d'eau fortement modifiés. Une adaptation de ces seuils peut néanmoins être argumentée par un avis d'expert pour l'évaluation du potentiel écologique.

En Allemagne, les températures maximales et les hausses de température à ne pas dépasser pour l'atteinte du très bon et du bon état/potentiel écologique sont fixées dans le règlement sur la protection des eaux de surface (Oberflächengewässerverordnung – OGewV 2016) en fonction des différentes ichtyocénoses, types de masses d'eau et périodes. Dans le cas du Rhin, une température de l'eau  $\leq 21,5$  °C est requise d'avril à novembre pour les régions à ombres, de  $\leq 25$  °C pour les régions à barbeaux et de  $\leq 28$  °C pour les régions à brèmes et à grémilles/flets pour atteindre le bon potentiel écologique. L'augmentation de la température ne doit pas dépasser 1,5 K (région des ombres) ou 3 K (région à barbeaux et à grémilles/flets). Dans le cadre du projet O 10.20 du programme de financement « Eau, sol et déchets » des Länder allemands (2020), les valeurs d'orientation des températures affichées dans l'OGewV ont été vérifiées pour

<sup>16</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>17</sup> BAGLINIÈRE et al. 2004, BAL 2011

<sup>18</sup> SCHLÄPPI 2021

<sup>19</sup> VAN DER GRINTEN et al. 2007

différentes ichtyocénoses et des recommandations d'adaptation ont été publiées.<sup>20</sup> Un test pratique est en cours.

En Suisse et au Luxembourg, la température d'un cours d'eau ne doit varier au plus que de 3 °C par rapport à l'état si possible non influencé sous l'effet d'apports/de retraits thermiques, et au plus de 1,5 °C dans les tronçons fluviaux faisant partie de la zone à truites. Dans tous les cas, la température de l'eau ne doit pas dépasser 25 °C (CH: OEaux, article 12, paragraphe 4 ; LU: Règlement grand-ducal du 15 janvier 2016 relatif à l'évaluation de l'état des masses d'eau de surface).

En plus des températures maximales, la durée d'une période caniculaire est déterminante pour la survie des organismes. À l'été 2003, on a ainsi observé une mortalité massive de bivalves et d'anguilles quand la température du cours principal du Rhin est restée supérieure à 25 °C pendant 41 jours.<sup>21</sup> Dans le Rhin à hauteur de Coblenz par exemple, la valeur de 25 °C, critique pour de nombreuses espèces de poissons et d'invertébrés dans le Rhin, a été dépassée entre juillet et août 2018 durant 31 jours consécutifs. On estime que les périodes caniculaires augmenteront au cours des prochaines années et que de telles mortalités massives sont susceptibles de se reproduire.

Les débits sortants des grands lacs et les zones de retenue, dont les eaux se réchauffent plus fortement que les eaux courantes, sont particulièrement sensibles aux hausses de température. On rappellera dans ce contexte qu'env. 50 000 ombres (20,9 tonnes de poissons, env. 90 % du peuplement total) ont ainsi été décimés dans le tronçon du haut Rhin directement en aval du lac de Constance sous l'effet des températures caniculaires de l'été 2003. Le 12 août 2003, une température de 25,9 °C a été mesurée à Stein am Rhein à une profondeur de 4 m et l'eau des rives affichait plus de 27 °C<sup>22</sup>. De telles températures extrêmes deviennent plus fréquentes et ces records ont encore été dépassés en 2018 et 2022, ce qui a déclenché des mortalités massives de poissons en 2018 p. ex. malgré les plans d'urgences mis en place.<sup>23</sup> En 2022, ces grandes vagues de mortalité ne se sont pas produites, car les peuplements d'ombres qui auraient pu être affectés avaient déjà perdu 90 pour cent de leurs effectifs dans le Rhin à hauteur de Schaffhouse en 2018.

Pendant les mois d'hiver également, des températures de l'eau surélevées peuvent décimer des poissons en grand nombre<sup>24</sup> (voir chap. 1.5.3).

### 1.1.6 L'oxygène comme valeur indicative de sensibilité

La concentration d'oxygène dans l'eau dépend notamment de la température de l'eau ; une eau chaude absorbe moins d'oxygène qu'une eau froide et la solubilité de l'oxygène dans l'eau baisse à mesure qu'augmente la température. En prenant l'exemple d'une saturation de 100 % et d'une pression atmosphérique normale (1 bar), on a 12,7 mg O<sub>2</sub>/l dissous dans une eau à 5 °C alors qu'une eau à 25 °C n'a que 8,3 mg O<sub>2</sub>/l.<sup>25</sup>

Aux Pays-Bas, la saturation en oxygène d'un cours d'eau doit être supérieure à 60 % (ce qui correspond à 6 mg/l pour une température de 15° C) pour atteindre un bon état écologique.

En France, l'arrêté du 9 octobre 2023 fixe la valeur limite pour le bon état écologique à 6 mg/l pour l'oxygène, sans distinction selon l'espèce de poisson de la rivière. La valeur limite pour le degré de saturation est de 70 %.

<sup>20</sup> LAWA 2021

<sup>21</sup> KOOP et al. 2007

<sup>22</sup> OFEFP 2004

<sup>23</sup> CIPR 2020a, MÉTÉO SUISSE (2022) ;

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/annuaire-hydrologique.html> ; <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/canicule-et-secheresse.html>

<sup>24</sup> BRODERSEN et al. 2011

<sup>25</sup> <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/s/sauerstoffgehalt-wasser.php>

On estime que des valeurs inférieures à 3-4 mg O<sub>2</sub>/l sont généralement « critiques pour les poissons », c'est-à-dire éventuellement létales. Des perturbations sublétales sont déjà attendues un peu au-dessus de ce seuil. De plus, les valeurs dites « seuils » de mortalité ou de perturbations sublétales des poissons dépendent de divers facteurs comme la température de l'eau ou l'espèce. Les poissons consommant plus d'oxygène quand les températures de l'eau sont élevées, les seuils critiques sont plus bas que quand les températures de l'eau sont également basses. En outre, certaines espèces de poisson sont plus robustes que d'autres (p. ex. les anguilles sont nettement plus résistantes que les saumons).

En Allemagne, les dispositions concernant la concentration d'oxygène pour l'atteinte du très bon et du bon état/potentiel écologique sont fixées dans le règlement sur la protection des eaux de surface (Oberflächengewässerverordnung – OGewV 2016) en fonction du type de cours d'eau. Selon le type de cours d'eau, les valeurs pour le bon état sont comprises entre  $\geq 4$  et 8 mg/l. Pour le Rhin,  $\geq 7$  mg/l sont requis.

Si le milieu fluvial subit une pollution organique, la consommation d'oxygène peut fortement augmenter, notamment en période de températures élevées. Si la concentration d'oxygène descend au-dessous de 4 mg/l dans les rivières à cyprinidés ou de 6 mg/l dans les rivières à salmonidés, une limite critique est atteinte pour l'ichtyofaune de ces cours d'eau. Même si les températures restent basses, la plupart des poissons ne peuvent pas survivre dans des conditions d'oxygénation  $< 3$  mg/l.<sup>26</sup>

## 1.2 Phytoplancton

Une amélioration des conditions de vie du phytoplancton – ralentissement du courant, hausse des teneurs en nutriments et des températures sur une période plus longue de l'année - signifie généralement un abaissement de la qualité écologique d'un cours d'eau. En particulier dans les eaux calmes, une croissance accrue du phytoplancton se traduit tout d'abord par une sursaturation d'oxygène puis par des processus de dégradation consommateurs d'oxygène accompagnés d'une réduction d'activité des organismes filtreurs benthiques, c'est-à-dire des espèces planctophages comme par ex. la palourde asiatique du genre *Corbicula* et la dreissène polymorphe du genre *dreissena*, ce qui renforce à nouveau la croissance planctonique.

Dans la plupart des cas, les modélisations pronostiquent une augmentation des concentrations de chlorophylle due aux faibles débits, aux hausses de température et aux processus d'eutrophisation.<sup>27</sup>

Une expérience a cependant montré qu'une hausse de température pouvait avoir un effet négatif sur la biomasse phytoplanctonique, la taille moyenne des cellules et le pourcentage de diatomées microplanctoniques, laissant supposer un transfert d'énergie plus faible des producteurs primaires vers les poissons sur toute la chaîne alimentaire.<sup>28</sup>

On a observé, entre autres dans le Rhin, pendant une phase de sécheresse accompagnée d'une hausse des températures de l'eau, lors de l'été 2003 par ex., une forte augmentation du phytoplancton et des macrophytes<sup>29</sup>, surtout des diatomées. Il en résulte une prolifération herbeuse dans les eaux et un risque de forte augmentation des cyanobactéries.<sup>30</sup> Comme en 2017, un bloom de cyanobactéries du genre *Microcystis* potentiellement générateur de toxines est apparu à l'été 2018 sur tout le linéaire de la Moselle. Ce bloom n'a pris fin que vers fin octobre.

---

<sup>26</sup> Tiré de KOOP et al. 2007 : CASSELMANN & HARVEY 1975

<sup>27</sup> Tiré de KLIWA 2010 : Zebisch et al. 2005; WAGENSCHNEIN 2006, STADTHAGEN 2007, DUCHARNE et al. 2007, QUIEL et al. 2008

<sup>28</sup> Tiré de KLIWA 2010 : SOMMER & LENGFELLNER 2008

<sup>29</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde 2006

<sup>30</sup> CIPR 2020a

Par rapport à 2017, le bloom de cyanobactéries de 2018 a affiché des pics de plus de 80 µg/l de chlorophylle de cyanobactéries par litre, et a donc été nettement plus prononcé et plus long en raison des faibles débits prolongés.

L'apparition des « blooms de cyanobactéries » a été favorisée jusque fin octobre par le long temps de séjour de l'eau entre les barrages de la Moselle et son ralentissement supplémentaire dû la situation d'étiage<sup>31</sup>. L'ensoleillement intense et les températures élevées liés aux conditions météorologiques ont renforcé ce phénomène.

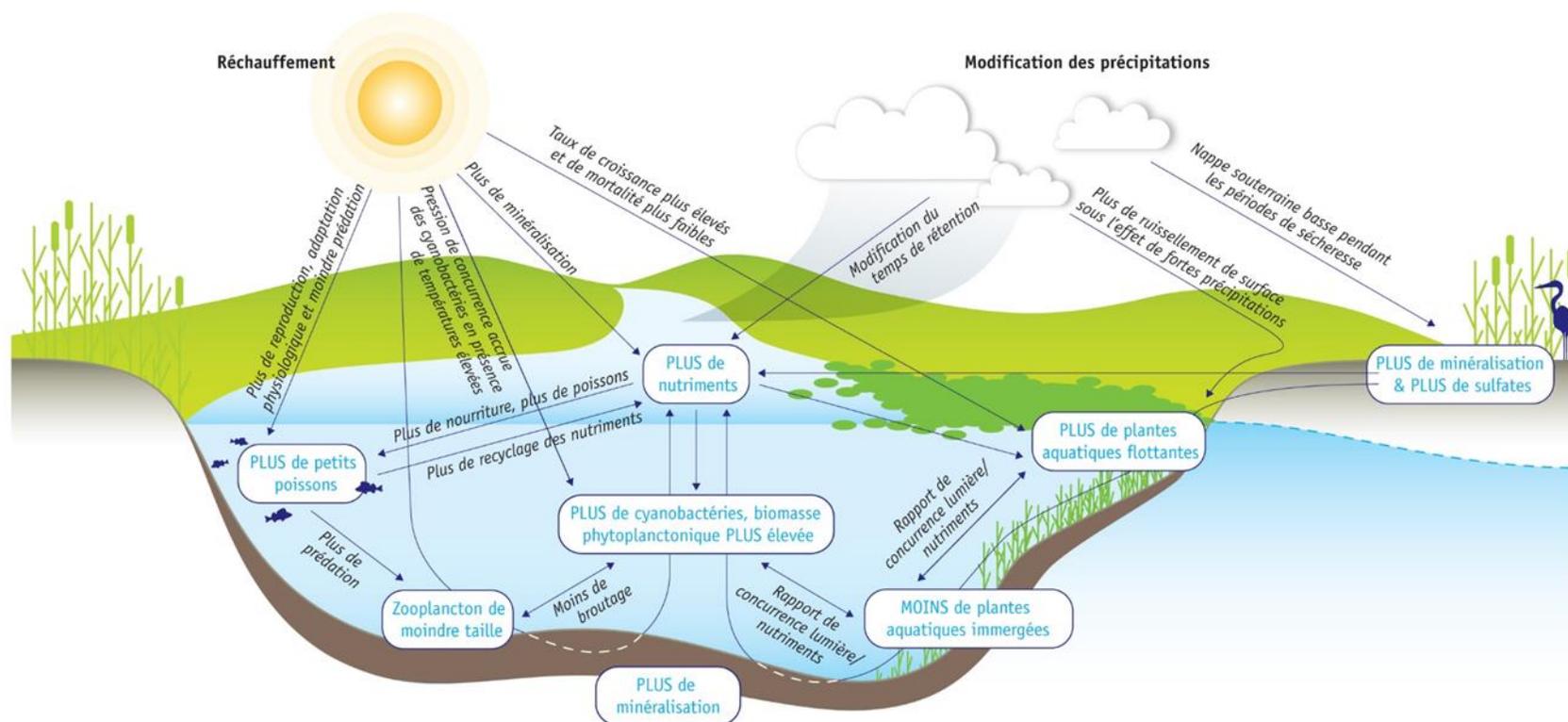
Parallèlement à l'impact de la formation algale sur le bilan d'oxygène des eaux (voir plus haut), une forte croissance des algues peut provoquer une « décalcification biogène ». L'eau prend une couleur laiteuse et de la mousse se forme sous l'effet des déjections calcaires des algues, comme on a pu l'observer en 2003 sur le haut Rhin. Lorsque les pH sont élevés, l'ammonium se transforme progressivement en ammoniac, substance toxique pour les poissons.<sup>32</sup>



**Figure 3 : Différentes vues de cours d'eau avec forte croissance de cyanobactéries. (Source : M. Leitão, Guide pratique des cyanobactéries planctoniques du Grand Ouest de la France)**

<sup>31</sup> KLEINTEICH ET AL. 2024

<sup>32</sup> OFEFP 2004



**Figure 4 : Principaux effets du changement climatique.**

Présentation schématique des principaux effets du changement climatique sur l'eutrophisation et sur les effets de l'eutrophisation. Source : STOWA 2011, d'après Moss et al. 2011 (International Society for Limnology).

### 1.3 Macrophytes / phytobenthos

Le régime hydrologique et le charriage qui y est lié ont un impact majeur sur la croissance macrophytique et phytobenthique.<sup>33</sup> En phase de crue notamment, les sédiments sont fortement brassés, ce qui a des répercussions négatives autant sur le phytobenthos que sur les macrophytes. Certaines espèces macrophytiques (par ex. la renoncule flottante *Ranunculus fluitans*) sont susceptibles de profiter des apports diffus de nutriments (par ex. lors de précipitations intenses) et de l'eutrophisation croissante qu'ils entraînent et de provoquer une surproduction herbeuse dans le milieu aquatique<sup>34</sup>. Ce phénomène est souvent lié à une baisse de qualité de l'eau et de biodiversité. En relation avec des températures élevées et un rayonnement intense, il peut se produire un développement rapide de la biomasse phytobenthique et macrophytique suivie d'une dégradation aussi rapide. Le dépérissement et la décomposition des matériaux organiques entraînent alors une baisse des teneurs en oxygène dans les interstices du lit mineur (« colmatage biogénique » ; cf. « ichtyofaune »)<sup>35</sup>.

Les espèces végétales sténothermes froides vivant dans les petites rivières riches en sédiments fins, les sources et les lacs de montagne sont les premières à être touchées par une hausse des températures et cet impact peut se traduire par un recul d'espèces rares. On citera ici la montie des fontaines (*Montia fontana*), la dorine à feuilles opposées (*Chrysosplenium oppositifolium*) et le potamot alpin (*Potamogeton alpinus*).<sup>36</sup>

### 1.4 Macrozoobenthos

Le changement climatique influence aussi le macrozoobenthos. Une étude réalisée sur des affluents du Rhin moyen (Wisper, Gründelbach, Nette, Saynbach, Ahr) a montré que l'effet de remous des crues du Rhin ralentissait le courant sur le cours inférieur des affluents et que la réduction de la force d'entraînement de l'eau faisait augmenter la sédimentation. Il résulte de ces perturbations, entre autres, une biodiversité macrozoobenthique moins riche que dans les zones plus en amont et une autre structure de dominance : le pourcentage d'espèces rhéophiles diminue. Dans les semaines suivant une crue du Rhin, le pourcentage d'espèces rhéophiles augmente à nouveau dans l'affluent ; la zoocénose qui s'y redéveloppe se démarque sensiblement de celle du Rhin.<sup>37</sup> Si la fréquence des crues du Rhin augmente, la période de récupération peut être plus courte, ce qui appauvrit durablement la biocénose.

Les espèces locales typiques de certains milieux peuvent en être chassées quand les substrats se dessèchent en phase d'étiage. La plupart des macroinvertébrés sont capables de supporter sans effort des variations de la ligne d'eau quand elles ne dépassent pas 40 à 50 cm par heure. Seules des crues extrêmes se répercutent sur les biocénoses.

On a déjà relevé des déplacements importants de macroinvertébrés vers les débouchés des affluents, ce qui leur permet d'éviter les effets de concentration et les températures plus élevées de l'eau<sup>38</sup>.

Une hausse de température touchera en particulier les espèces macrozoobenthiques des ruisseaux, des petites rivières et des zones de sources de haute et de moyenne montagne, et parmi elles de nombreuses espèces sténothermes froides. Il en résulte alors un décalage des biocénoses le long du cours fluvial avec le risque pour les

---

<sup>33</sup> CIPR (2020d) et CIPR (2020e)

<sup>34</sup> KLIWA<sup>34</sup> (2010)

<sup>35</sup> IBISCH 2004

<sup>36</sup> MKUNLV 2010

<sup>37</sup> Tiré de Kliwa 2010 : BECKMANN 2002

<sup>38</sup> Kliwa 2010

sténothermes de tomber dans un « cul de sac » dès lors que toute fuite plus en amont devient impossible (voir également 'ichtyofaune')<sup>39</sup>.

On citera ici à titre d'exemples :

- différents gastéropodes d'eaux de source (*Bythinella spp.*),
- la pisidie des sources (*Pisidium personatum*),
- plusieurs espèces d'odonates, par ex. le cordulégastré bidenté (*Cordulegaster bidentata*), l'aeschne azurée (*Aeshna caerulea*), l'aeschne subarctique (*Aeshna subarctica elisabethae*) et la cordulie des Alpes (*Somatochlora alpestris*),
- les larves de nombreux plécoptères, p. ex. *Nemoura marginata*, *Diura bicaudata* ou *Brachyptera seticornis* ;
- les larves de quelques éphéméroptères comme *Baetis alpinus* ou les espèces alpines du genre *Rhithrogena*.
- les larves de nombreuses espèces de trichoptères, p. ex. *Chatopterygopsis maclachlani*, *Ecclisopteryx guttulata*, *Rhyacophila praemorsa* ou *Drusus discolor*.<sup>40</sup>

Un effet secondaire de la régression d'espèces importantes de brouteurs, parmi lesquelles on compte p. ex. les larves d'éphéméroptères et de trichoptères, est une croissance végétale plus forte (biofilm plus épais et couches algales sur les pierres ; cf. macrophytes/phytobenthos).

On trouve ainsi surtout dans les Alpes calcaires un nombre élevé d'espèces invertébrées endémiques qu'une hausse de température pourrait mettre en péril.

On peut également attendre une mortalité importante de bivalves si la température estivale monte à un niveau extrême, comme on l'a vu à l'été 2003 dans des anciens bras et certains segments du Rhin.<sup>41</sup> En relation avec l'épisode d'étiage de 2018, quelques cas de mortalité de coquillages ont été signalés mais aucun phénomène massif ne s'est produit.<sup>42</sup>

Le changement climatique pourrait être favorable aux généralistes, p. ex. à certaines espèces de chironomides et de gammares supportant la chaleur ou aux espèces thermophiles comme le gastéropode *Physella acuta* ou d'autres néozoaires qui concurrencent en partie les espèces indigènes (voir « espèces néobiotiques »). On suppose que ce décalage dans la structure de dominance à l'avantage de ces espèces aura généralement pour conséquence une dégradation de l'état écologique défini par la DCE.<sup>43</sup>

À propos des écrevisses indigènes (*Astacidae*) très menacées, et que l'on peut rattacher au sens large au macrozoobenthos, les phases extrêmes de sécheresse et de canicule survenues en 2018 et 2019 ont eu des effets tels que certains peuplements locaux ont disparu (cf. figure 5).<sup>44</sup> Dans des ruisseaux du bassin du Rhin supérieur, l'année 2018 a été marquée par des débits d'étiage à grande échelle et certains segments, voire le cours d'eau dans son intégralité, sont tombés à sec. Le stress de la sécheresse de 2018 s'est encore fait ressentir en 2019 dans de nombreux ruisseaux à écrevisses, de sorte que les peuplements n'ont pratiquement pas eu le temps de récupérer. Les petites colonies isolées d'écrevisses sont surtout celles les plus affectées, par ex. les espèces indigènes du genre *Austropotamobius* (écrevisse de torrent et écrevisse à pattes blanches) refoulées dans le cours amont des rivières par des espèces envahissantes et la peste des écrevisses. Si des colonies locales sont exterminées par des phases de sécheresse et de canicule extrêmes, une recolonisation naturelle n'a plus lieu du fait de l'isolement des populations. Les habitats sont alors abandonnés pour longtemps. Avec l'intensité et la

<sup>39</sup> Tiré de KLIWA 2010 : CORDELLIER 2009, LORENZ & GRAF 2008; auteurs divers dans WWF 2009

<sup>40</sup> Kliwa 2018

<sup>41</sup> tiré de KLIWA 2010 : LUBW 2004

<sup>42</sup> CIPR 2020a

<sup>43</sup> DAUFRESNE et al. 2007, GROB 2003, LUBW 2004 et SCHÖLL 2007 dans KLIWA 2010

<sup>44</sup> CHUCHOLL 2019

fréquence croissantes de ces phénomènes de sécheresse, la menace ira en grandissant. Dans le même temps, les débits des épisodes de pluies intenses constituent un danger pour ces espèces, notamment quand ils remettent en mouvement des substrats grossiers (fractions mésolithales à mégolithales) des couches profondes du lit, dans lesquelles les animaux se cachent et s'enfouissent<sup>45</sup>.



**Figure 5 : A - écrevisse à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes*) découverte morte dans le cours aval asséché d'un affluent de la Dreisam (bassin du Rhin supérieur). B - écrevisse à pattes blanches morte récemment dans une mare d'eaux stagnantes fortement réchauffées (même cours d'eau que A). C - écrevisse à pattes blanches vivante (cercle) dans un interstice faiblement alimenté en eau (cachette ouverte ; ruisseau de cours amont de rivière dans le bassin du Rhin supérieur). D - cavités fraîchement creusées par des écrevisses (flèches) dans une berge humide en aval du cuvette d'eaux résiduelles (même cours d'eau que C). Toutes les photos sont tirées de CHUCHOLL (2019).**

Une hausse des températures de l'eau en hiver peut se traduire par l'interruption précoce d'une phase de repos ou modifier des périodes de développement<sup>46</sup>.

<sup>45</sup> ROBINSON et al. 2008

<sup>46</sup> Mehlig & Rosenbaum-Mertens 2008, FISCHER 2003, LADEWIG 2004 dans KLIWA 2010

On relève en outre sur certaines espèces un voltinisme plus prononcé, c'est-à-dire une reproduction plus fréquente donnant lieu à plusieurs générations par an.<sup>47</sup> Ce phénomène peut avoir un effet négatif sur les peuplements si les générations suivantes se développent à des périodes inopportunes où l'alimentation est p. ex. insuffisante. Les descendants ne peuvent alors pas se développer correctement en raison du manque d'alimentation et meurent. Cette perte d'énergie énorme pour la population procréatrice peut décimer toute un peuplement à l'échelle locale.

## 1.5 Ichtyofaune

### 1.5.1 Apports de matériaux fins et régime de charriage

Le changement climatique modifie le régime hydraulique. Ainsi, les crues peuvent avoir un impact généralement positif sur le régime de charriage d'un fleuve car les sédiments transportés par la crue peuvent se déposer sur le lit du fleuve ou le long des rives. Ceci est également important pour la création et la richesse morphologique des habitats aquatiques. Quand le régime sédimentaire n'est pas perturbé<sup>48</sup>, la dynamique naturelle des systèmes fleuve-mer assure un équilibre dynamique entre les processus de sédimentation, de remise en suspension et de redéposition des sédiments.

L'apport de matériaux fins, par ex. lors de fortes précipitations, est toutefois souvent associé à des effets négatifs. Il peut s'ensuivre un colmatage des interstices des fonds graveleux des rivières dans lesquels les poissons et les lamproies frayant sur le gravier déposent leurs œufs et dans lesquels les alevins demeurent après l'éclosion, et la concentration en oxygène des eaux interstitielles peut baisser.<sup>49</sup> Une baisse de qualité de l'eau et des sédiments due aux apports diffus de matériaux fins peut, en outre, endommager le frai et les juvéniles.



**Figure 6 : Saumon mâle (photo : Ulrich Haufe, LÖBF)**

Les poissons rhéophiles, qui se reproduisent sur des substrats graveleux et/ou sablonneux propres (entre autres les salmonidés, le barbeau, la vandoise, le goujon, la loche franche, la lamproie) réagissent de manière particulièrement sensible à l'alluvionnement des frayères. Les œufs et les larves fraîchement écloses entre les interstices du substrat supportent mal le brusque apport de sédiments et de matières en suspension provoqué par une montée des débits. Des apports élevés et prolongés de sédiments fins colmatent les fonds graveleux, compactent et durcissent le lit et font fortement baisser sa perméabilité. Il en résulte que les lits graveleux ne sont plus parcourus par le courant ni alimentés en oxygène. Les sédiments colmatés ne se prêtent pas aux activités de frai.

<sup>47</sup> Tiré de Kliwa 2010 : BRAUNE et al. 2008

<sup>48</sup> BRILS et al. 2017

<sup>49</sup> MKUNLV 2010, IBISCH 2004, SCHLÄPPI 2021

Le charriage (transport et déplacement de matériaux solides) est un phénomène hydrologique naturel qui restructure en permanence le lit fluvial. Cependant, les nombreux ouvrages transversaux perturbent fortement la dynamique du charriage dans de grandes parties de l'hydrosystème rhénan. Là où un charriage a encore lieu, il est une condition essentielle au renouvellement permanent de frayères adéquates pour les espèces de poissons frayant sur le gravier. Toutefois, la période et la fréquence sont des facteurs décisifs qui pourraient varier avec le changement climatique, par ex. si les précipitations hivernales tombent plus fréquemment sous forme de pluie (décalage d'un régime nival vers un régime pluvial).

La fonte des glaciers et du permafrost dans les Alpes libère des éboulis, ce qui laisse attendre à l'avenir un apport plus important de gravier et de sable dans de nombreux fleuves de montagne. La conséquence en est un charriage plus abondant qui devrait contribuer à former et à améliorer la qualité de frayères de gravier, notamment dans les tronçons à écoulement libre du réseau hydrographique. Si un fort transport de matériaux solides survient à plusieurs reprises pendant la période de reproduction et d'éclosion des œufs (en hiver et au début du printemps p. ex. pour les truites de rivière), comme le décalage saisonnier des précipitations dû au changement climatique le laisse attendre en partie, il peut affecter les peuplements de poissons frayant sur le gravier.<sup>50</sup> Cependant, comme l'hydrosystème du Rhin est interrompu vers l'aval par de nombreux ouvrages transversaux et barrages, et comme le lac de Constance agit comme une cuvette où se déposent les matériaux charriés et les sédiments, les répercussions d'un transport plus intense de matériaux solides devraient rester limitées.

### 1.5.2 Étiages

Les faibles débits sont en général défavorables à la migration des poissons. En situation d'étiage, les affluents et les rivières de frai sont plus difficiles à trouver, par ex. pour les saumons de retour, et la profondeur d'eau nécessaire à la migration de certaines espèces peut manquer. Si une phase d'étiage dure trop longtemps, les poissons migrateurs ne peuvent respecter la fenêtre de temps qui leur est accordée pour atteindre leurs rivières frayères et ils sont alors contraints de frayer dans des habitats moins adéquats. En outre, le risque de mortalité par prédation augmente. Le risque de collision avec des hélices des bateaux augmente, car le manque d'eau contraint les poissons à emprunter le passage étroit du chenal de navigation. Ce risque est le plus important dans le Waal (delta du Rhin), parce que la navigation y est intense et qu'elle est la principale voie de migration pour plusieurs espèces. Les anguilles sont particulièrement exposées au risque de collision avec les bateaux car elles voient et entendent mal. La probabilité d'une collision entre anguilles et bateaux est la plus forte quand le niveau d'eau est bas ou quand le débit commence tout juste à remonter, car il incite alors les anguilles à dévaler.<sup>51</sup>

Si des zones aquatiques étendues tombent à sec, la perte d'habitats touche toute la biocénose aquatique et modifie les relations prédateurs/proies et les rapports de concurrence, ce qui se répercute sur le réseau nutritif aquatique. Les peuplements d'organismes moins compétitifs (p. ex. moins mobiles que le sont généralement les espèces de poissons très réactives) peuvent baisser, ce qui peut avoir un effet négatif sur les conditions d'alimentation de l'ichtyofaune dans son ensemble. En outre, les phases de sécheresse, notamment celles accompagnées de températures élevées de l'eau, peuvent accroître la mortalité des poissons et les maladies (cf. chap. 1.5.6).

Une réduction des débits laisse attendre dans les prochaines décennies une baisse locale de biodiversité des poissons.<sup>52</sup> Une étude globale sur les fluctuations de débit dans les rivières et leurs répercussions sur l'abondance et la biomasse des poissons dans les

---

<sup>50</sup> OFEV 2012, Académies Suisses des Sciences 2016, KÖLLNER et al. 2017

<sup>51</sup> SCHULTE & VAN WINDEN 2024

<sup>52</sup> XENOPOULOS et al. 2005

régions tempérées a montré que les niveaux d'étiage comme de crues agissent de manière négative sur ces deux indices<sup>53</sup>.

OEXLE et al. (2020) ont analysé sur 373 stations de monitoring DCE les conséquences des épisodes d'étiages extrêmes survenus en 2018 et 2019 sur l'ichtyofaune des cours d'eau du Bade-Wurtemberg (123 stations de monitoring se trouvant sur des affluents directs du Rhin). Par rapport aux années précédentes, le pourcentage et l'abondance des espèces de poissons aimant le froid ont diminué de manière significative, alors que la densité totale de poissons (indiv./m<sup>3</sup>) a augmenté. Cette augmentation vient principalement de l'accroissement des espèces de petits poissons supportant mieux la chaleur. Il en ressort dans l'ensemble des déplacements dans la composition et l'abondance des ichtyocénoses.

Les étiages se traduisent également par un ralentissement sensible du courant dans le fleuve ou dans certains de ses segments, p. ex. dans quelques rivières latérales ou dans les segments canalisés. Les espèces rhéophiles (p. ex. les salmonidés, les barbeaux et les larves de lamproies fluviatiles) quittent les habitats où le courant a disparu. En outre, des vitesses de courant trop faibles ont un impact négatif sur le comportement migratoire des poissons migrateurs qui s'orientent entre autres dans leur trajet sur la vitesse du courant.

Les épisodes d'étiage printaniers entraînent une raréfaction des surfaces inondables caractéristiques. Les berges plates et les zones alluviales temporairement inondées sont cependant des habitats de frai et de grossissement précieux pour de nombreuses espèces de poissons (le brochet par ex.).

Si le changement climatique modifie dans le long terme le régime hydrologique du Rhin avec moins de crues et avec des phases d'étiage plus précoces dans l'année, les processus d'eutrophisation s'accroîtront, en particulier dans les régions à ombres et à barbeaux, et pourront avoir un effet négatif sur les peuplements de poissons.<sup>54</sup>

Par ailleurs, les étiages ont pour effet d'isoler progressivement les annexes alluviales et certains bras latéraux. Les poissons qui migrent habituellement de ces milieux aquatiques vers le fleuve après leur phase juvénile (p. ex. l'ide mélanote, la brème, le gardon) restent alors emprisonnés dans ces rivières latérales. Si ceux-ci s'assèchent et/ou si la température de l'eau augmente, il peut en découler une mortalité massive. Certaines espèces de poissons vivant dans les eaux alluviales moins dynamiques, comme la loche d'étang et le carassin, sont cependant adaptées à un assèchement temporaire partiel ou complet des eaux calmes peu profondes. Ces espèces survivent à de telles situations en s'enfouissant dans le sous-sol boueux et encore humide.<sup>55</sup> Si cette mise à sec se prolonge toutefois, ces espèces elles-mêmes finissent par périr.



**Figure 7 : Période d'étiage dans un bras latéral du Rhin en 2018 (photo : Marc Braun)**

<sup>53</sup> RYTWINSKI et al. 2023

<sup>54</sup> BRUNKE 2023

<sup>55</sup> NLWKN 2011

### 1.5.3 Température de l'eau

Afin de pouvoir mieux estimer l'influence des variations de la température de l'eau sur l'ichtyofaune, il est important de connaître les températures que les différentes espèces de poissons préfèrent. Pour ces températures, il convient de distinguer entre autres les paramètres mentionnés ci-dessous.

Les limites critiques de température (CTMax ou CTMin) sont atteintes quand un poisson n'est plus capable de s'échapper du milieu où dominent des températures critiques. Dans les marges critiques supérieures ou inférieures, on relève un net changement de comportement dû à la température. On fait par ex. une distinction entre une température entraînant la fuite du poisson, une température provoquant sa désorientation et une température constituant une perturbation (avoidance, restlessness ou disturbing temperature). Dans leur fourchette de température préférentielle, les poissons s'alimentent et aucun comportement anormal n'est observé. La température privilégiée est la plage de température correspondant au gradient de température dans lequel le poisson est le plus à son aise<sup>56 57</sup>.

Par rapport aux cyprinidés, poissons supportant généralement bien les variations de température, les salmonidés sont relativement peu tolérants à ces variations (voir tableau 1 de l'annexe 2).

Les valeurs telles que la température maximale critique et la fourchette de températures optimales pour chaque espèce varient selon les stades de vie ; les œufs et les juvéniles y sont plus sensibles que les poissons adultes. En revanche, ces derniers nécessitent des conditions particulières de température de l'eau pendant la période de frai. Pour le développement des poissons, le nombre de jours successifs où règne une température de l'eau donnée est déterminant<sup>58</sup>.

Des températures de l'eau plus élevées peuvent également provoquer la mort en masse des poissons pendant les mois d'hiver, quand une consommation plus importante d'énergie en raison de ces températures se heurte à une diminution de la nourriture disponible.<sup>59</sup>

Il arrive que certaines espèces ou populations de poissons s'adaptent aux conditions régionales rencontrées. Cependant, les températures d'eau élevées et les étiages mettent en péril les poissons aimant les eaux froides comme p. ex. la truite (*Salmo trutta*, plusieurs souches génétiquement distinctes dans le bassin du Rhin).<sup>60,61</sup> Selon l'étude de BASEN et al. (2022), les truites fario et les ombres de l'Allemagne du sud-ouest par ex. perdront respectivement 92 % et 75 % (à l'horizon 2070 = futur éloigné) des habitats de qualité adaptés à leurs besoins.<sup>62</sup> Les œufs, embryons et juvéniles de truites vivant en milieu alpin (et éventuellement dans les rivières de massifs moyens) sont susceptibles de mieux supporter des températures hivernales plus élevées que les truites de rivière adultes, mais uniquement jusqu'à un certain degré de réchauffement.<sup>63</sup> Les populations de truites de rivière adaptées aux conditions locales peuvent tolérer des températures en hausse et assurer ainsi la survie de l'espèce. De telles capacités de tolérance ne sont pas physiologiques mais résultent d'une adaptation du cycle de vie, par ex. d'un décalage de la période de frai.

Dans le cadre de l'étude climatique du réseau néerlandais de connaissances sur le développement et la gestion du milieu naturel (OBN)<sup>64</sup> sur les effets du changement

---

<sup>56</sup> ELLIOT 1981

<sup>57</sup> KÜTTEL et al. 2002, voir également le tableau 1 de l'annexe 2

<sup>58</sup> TISSON & SOUCHON 2010

<sup>59</sup> BRODERSEN et al. 2011

<sup>60</sup> EUROLIMPACS 2009, NOTTER & STAUB 2009

<sup>61</sup> OFEV 2021

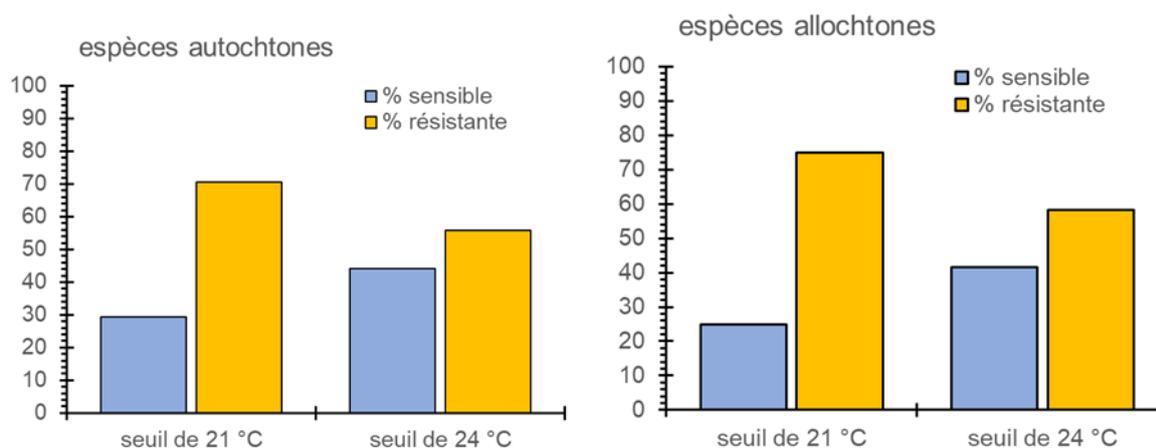
<sup>62</sup> BASEN et al. 2022a

<sup>63</sup> KÄRCHER et al. 2021

<sup>64</sup> DORENBOSCH et al. 2022

climatique sur l'écologie fluviale, il a été estimé pour une grande partie de l'ichtyocénose des fleuves néerlandais dans quelle mesure les espèces pouvaient supporter la présence prolongée (20 jours en été) d'une température de l'eau de 21 °C (représentative de la situation actuelle) et de 24 °C (représentative de la situation d'un climat réchauffé). En comparant ces températures avec une base de données intégrant des seuils de tolérance connus pour les poissons vis-à-vis de la température de l'eau, on a réparti les poissons en deux catégories, l'une 'sensible' (espèces affectées par l'exposition à de telles températures) et l'autre 'résistante' (espèces non perturbées par l'exposition à de telles températures). Si l'on se fonde sur les températures élevées de 21 °C en été que l'on rencontre régulièrement entre-temps dans le fleuve, env. 30 % des poissons autochtones (et env. 25 % des poissons allochtones) sont 'sensibles'. Si le climat continue à se réchauffer, avec des températures attendues de 24 °C en été, le pourcentage de poissons autochtones 'sensibles' augmente pour atteindre env. 44 % (et env. 41 % dans le cas des poissons allochtones). Une partie croissante de l'ichtyocénose souffrira éventuellement des conséquences de températures élevées de l'eau dues au réchauffement climatique. Pour les espèces allochtones, la part d'espèces 'sensibles' est comparable ou n'est que légèrement inférieure à celle des espèces autochtones (cf. figure 8). Cependant, plusieurs espèces allochtones très tolérantes aux hausses de températures de l'eau subsistent et elles auront un avantage compétitif croissant à l'avenir.

Le silure européen (*Silurus glanis*), le plus grand poisson prédateur autochtone du Rhin, se reproduit par des températures supérieures à 18 °C (Copp et al. 2009). Les populations de cette espèce augmentent depuis 1994 (van Aalderen en Beelen, 2011). Cette évolution est inquiétante pour la réimplantation de peuplements de saumons (Brevé et al. 2014 ; Schneider et al. en préparation).



**Figure 8 : Répartition des espèces de poissons (autochtones/allochtones) dans les catégories 'sensible' et 'résistante' aux températures de l'eau de 21 °C (situation actuelle) et de 24 °C (scénario climatique) (DORENBOSCH et al. 2022).**

Une étude a été réalisée par l'Office français de la biodiversité (OFB) en 2021 pour mesurer l'impact du changement climatique, sur les poissons grands migrateurs dans le Rhin, et en particulier le saumon Atlantique.<sup>65</sup> Les scénarios d'évolution climatique issus des données du GIEC français (température de l'air et précipitation) se sont basés sur l'étude du RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6, soit + 2 °C, ce qui correspond au respect des accords de Paris, et du RCP 8.5, soit + 4 °C. Les bilans ont été réalisés sur le cours du Rhin supérieur prenant en compte l'évolution des indicateurs des données météorologiques, de la température de l'eau et des débits.

<sup>65</sup> DORIDANT 2021

Selon le scénario RCP 2.6 à l'horizon 2100, une stabilisation des paramètres environnementaux est observée : les températures moyennes journalières de l'air et de l'eau se stabilisent vers 2030-2040 ainsi que les précipitations totales en 2020. Le scénario RCP 8.5 affiche des évolutions plus marquées : une augmentation de la température moyenne journalière de l'air de + 0,47 °C par décennie et de l'eau de + 0,3 °C par décennie et 2 jours en moins par décennie de gel. La hauteur de neige diminue de 4 cm par décennie et l'enneigement de 2,5 jours/10 ans.

Les résultats de l'étude dans le cas du scénario RCP 8.5 indiquent que seul le stade de tacon n'est pas trop affecté dans la mesure où une augmentation des températures permet au milieu de se rapprocher des conditions optimales de croissance de l'espèce. Les impacts sur les autres stades de vie de *Salmo salar* (œufs, alevin, smolt et adulte) sont très négatifs. Le stade œuf est sujet à une éclosion prématurée, une diminution de la taille des œufs et une baisse du taux de conversion du vitellus aux tissus. Le stade alevin est fortement impacté par une hausse de la prédation et le stade adulte par un retard des migrations, une augmentation de la consommation énergétique et une diminution des frayères accessibles. Globalement, une diminution de la survie affecte les 4 stades précités. Si l'on suit le scénario RCP 8.5, la survie du saumon est très menacée à l'horizon 2100.

Le scénario RCP 2.6 est plus encourageant quant à l'avenir du saumon dans le Rhin. Les conditions de vie de l'espèce à l'horizon 2100 seraient semblables à celles d'aujourd'hui, permettant de conserver le potentiel d'accueil du Rhin, avec toutefois une légère augmentation des températures de l'eau.

Les résultats de l'étude sont à prendre avec précaution. Des facteurs inconnus et limites de l'études persistent, comme la capacité d'adaptation des espèces, le poids des affluents, l'influence de la nappe souterraine et les limites des modélisations des facteurs de températures et de débit.

#### **1.5.4 Répartition des ichtyocénoses sur le profil longitudinal**

La subordination de processus biologiques aux températures (de même que d'autres facteurs comme la vitesse du courant et la composition du substrat) se traduit par un net zonage longitudinal spécifique des biocénoses de poissons en fonction des espèces depuis la source d'un fleuve jusqu'à son embouchure en mer.<sup>66</sup> On fait ainsi la distinction entre région à truites, région à ombres, région à barbeaux, région à brèmes et région à grémilles et flets. Cette subdivision grossière résulte, entre autres, de l'augmentation progressive de la température de l'eau et de l'atténuation de la pente d'un fleuve de sa source jusqu'à son embouchure. Ainsi, les salmonidés sont généralement localisés dans le cours supérieur et les cyprinidés se limitent pour la plupart au cours inférieur.

La hausse des températures de l'eau fait s'élargir l'espace de vie des poissons thermophiles comme le barbeau, la brème, l'ablette, la loche franche et le chevesne. Ils peuvent se propager vers l'amont et même profiter, sous certaines conditions, du changement climatique. Dans les bras rhénans de la plaine fluviale (aux Pays-Bas) tout particulièrement, ces espèces se trouvent plus dans les régions en amont de leur marge de température et le changement climatique peut alors faire rétrécir leurs habitats. La température maximale que peuvent supporter les barbeaux juvéniles est p. ex. de l'ordre de 25 °C<sup>67</sup>.

Les salmonidés en revanche, qui sont dépendants des rivières fraîches, sont refoulés de leur biotopes et tentent de migrer vers des cours d'eau de plus haute altitude pour éviter les températures critiques.<sup>68</sup> Des modélisations réalisées sur six espèces de poissons dans des rivières du sud de l'Allemagne montrent que les habitats actuellement propices aux salmonidés vont probablement baisser sensiblement (perte d'habitats appropriés

---

<sup>66</sup> VANNOTE et al. 1980

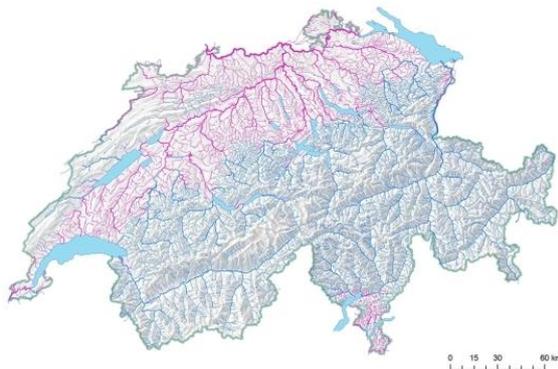
<sup>67</sup> MARIJS et al. 2020

<sup>68</sup> RABITSCH et al. 2010, BASEN et al. 2022a

pour les truites fario estimée à 92 % et de celle des ombres à 75 %).<sup>69</sup> Dans un modèle mis au point pour une rivière alpine (Mur, bassin du Danube), on a pronostiqué un décalage de la région à salmonidés de 27 km vers la source pour une hausse de la température de l'eau d'env. 1 °C. Il résulte d'une modélisation pour le Rhin supérieur une régression de la truite fario et une augmentation simultanée du chevesne.<sup>70</sup> La température de l'eau n'a augmenté que de 1,5 °C au cours des 30 dernières années dans le cours supérieur du Rhône (en aval du lac Léman), mais cette évolution a eu un impact plus prononcé que celui de la hausse de 3 °C relevée dans le cours inférieur, là où les espèces thermophiles étaient déjà dominantes. Quelques espèces de cyprinidés rhéophiles ont régressé vers les régions de plus haute altitude.<sup>71</sup>

Les poissons ne peuvent toutefois migrer vers des zones plus élevées que si les tronçons plus en amont sont accessibles et morphologiquement adaptés. La plupart des affluents montagneux du Rhin étant fortement fragmentés par des ouvrages transversaux et le décalage (émigration) pronostiqué des ichtyocénoses vers des zones de plus haute altitude étant donc impossible ou limité dans de nombreux cas, il est concevable qu'une hausse de température se traduise par l'extinction de certaines espèces et populations à l'échelle locale (voir tableau de l'annexe 2). Il faut donc viser à laisser plus de cours d'eau s'écouler librement en démantelant des ouvrages de rétention en place ou, là une telle mesure n'est pas possible, à rétablir au moins une continuité écologique fonctionnelle. Par ailleurs, de nombreuses espèces des cours fluviaux moyens et inférieurs (hyporhithral et épipotamal) ne sont pas adaptées aux vitesses d'écoulement élevées des cours supérieurs et on doute donc qu'elles puissent s'implanter dans ces milieux.

Les populations typiques des cours fluviaux moyens et inférieurs frais à moyennement chauds en été (hyporhithral et épipotamal) tendront à s'uniformiser sous l'effet de l'immigration d'espèces similaires.<sup>72</sup>



**Figure 9 : Aire de distribution possible de la truite de rivière en Suisse en 2050 selon un modèle de L'OFEV et dans l'hypothèse d'une hausse de température de 5,5°C.**

*Un tel scénario mènerait à une réduction de 44 % de l'habitat optimal des truites de rivière par rapport à la superficie actuelle (dans d'autres scénarios, la réduction est d'au moins 6 %). Ceci signifierait que la truite fario disparaîtrait pratiquement du Mittelland suisse. Bleu : Tronçons fluviaux dans lesquels peuvent vivre les truites de rivière. Violet : Tronçons fluviaux trop chauds pour les truites de rivière. Source : Notter & Staub 2009*

À l'échelle du bassin néerlandais du Rhin, la **lotte** est aujourd'hui principalement présente dans le delta de la Vecht. Depuis sa réintroduction, la lotte semble également se maintenir en équilibre naturel dans la Beerze.<sup>73</sup> Cette espèce est extrêmement sensible aux températures supérieures à 18 à 20 °C. On trouvait jadis dans la région des

<sup>69</sup> BASEN et al. 2022a

<sup>70</sup> PONT 2003

<sup>71</sup> KHALANSKI et al. 2008

<sup>72</sup> Tiré de Kliwa 2010 : BUISSON & GRENOUILLET 2009

<sup>73</sup> [Kwabaal \(ravon.nl\)](http://Kwabaal(ravon.nl))

grands fleuves des cuvettes ou mares profondes qui étaient suffisamment froides pour offrir des conditions de vie à la lotte de rivière. La marge de variation des températures des fleuves néerlandais est trop élevée en été pour la lotte de rivière, ce qui explique entre autres pourquoi cette espèce a pratiquement disparu du bassin néerlandais du Rhin. D'autres espèces fluviales sensibles aux températures, comme le chabot fluviatile, la vandoise et les larves de la lamproie fluviatile subiront rapidement des dommages en été si la température de l'eau dépasse 20 °C et plus encore si ces températures élevées se maintiennent plusieurs jours de suite (cf. tableau de l'annexe 2). Cette situation risque de se produire de plus en plus fréquemment sous l'impact du changement climatique.

### **1.5.5 Migration des poissons**

On peut s'attendre à ce que les poissons migrateurs s'adaptent en partie à la plus grande variabilité des précipitations et des débits, car on sait qu'ils profitent de conditions de débit avantageuses pour lancer leur migration et qu'ils restent en attente quand ces conditions sont défavorables.

Des précipitations intenses sur de petits bassins et des débits temporairement plus élevés dans toutes les rivières, quelle que soit leur taille, peuvent parfois créer des conditions locales de courte durée plus avantageuses pour la migration des poissons. Selon le « Flood Pulse Concept »<sup>74</sup>, l'onde de crue portée par le fleuve dans une zone alluviale connecte les habitats et permet ainsi aux poissons de migrer entre ces habitats.

En revanche, des tronçons aux eaux trop chaudes peuvent devenir des barrières thermiques pour les espèces migratrices (par ex. saumons, truites de mer) migrant de la mer vers leurs affluents frayères. Les salmonidés migrateurs doivent traverser les grandes rivières cyprinicoles (notamment le cours principal du Rhin, la Moselle, le Main) pour atteindre rejoindre leurs rivières de reproduction aux eaux plus fraîches (métarhital à épipotamal). On a pu constater entre autres lors d'études avec transpondeurs dans le Rhin que les salmonidés adultes qui remontent les rivières interrompent leur migration lorsque les températures atteignent 25 °C. ce qui peut être vu comme un facteur de stress et une réduction de la fenêtre de temps qu'ont les géniteurs pour frayer.<sup>75</sup> Des températures de l'eau élevées, comme celles mesurées lors de la canicule de l'été 2003 où elles ont dépassé les 27 °C dans le Rhin et ont frôlé les 28 °C dans certains affluents (par ex. la Sieg) pendant 6 semaines environ en juillet/août, ont interrompu la migration des salmonidés adultes, cependant uniquement sur une brève période de temps. A l'avenir, l'effet conjoint d'une hausse de température dans le Rhin et ses affluents et d'impacts anthropogènes (rejets thermiques entre autres) pourrait constituer un facteur limitant pour les peuplements de saumons dans le Rhin.<sup>76</sup> La température de l'eau joue également un rôle important dans la dévalaison des smolts. La croissance et la production de smolts peuvent ainsi augmenter dans les rivières de grossissement des juvéniles si les eaux se réchauffent sans pour autant dépasser un seuil léthal. Cette croissance plus rapide et les hausses de températures peuvent toutefois faire également avancer la période de migration des smolts et compromettre le bon déroulement de leur phase marine si le temps de migration et l'offre alimentaire ne concordent pas de manière optimale<sup>77</sup>.

### **1.5.6 Maladies**

En cas de températures élevées au-dessous du seuil léthal, le risque de mortalité imputable au stress et aux infections augmente également.<sup>78</sup>

Les températures élevées affaiblissent le système immunitaire des salmonidés et les rendent plus vulnérables aux maladies. Sous l'impact du changement climatique, on

---

<sup>74</sup> JAARSMa et al. 2007. Source : JUNK et al. 1998

<sup>75</sup> CIPR 2009a; BREUKELAAR (RWS), communication orale

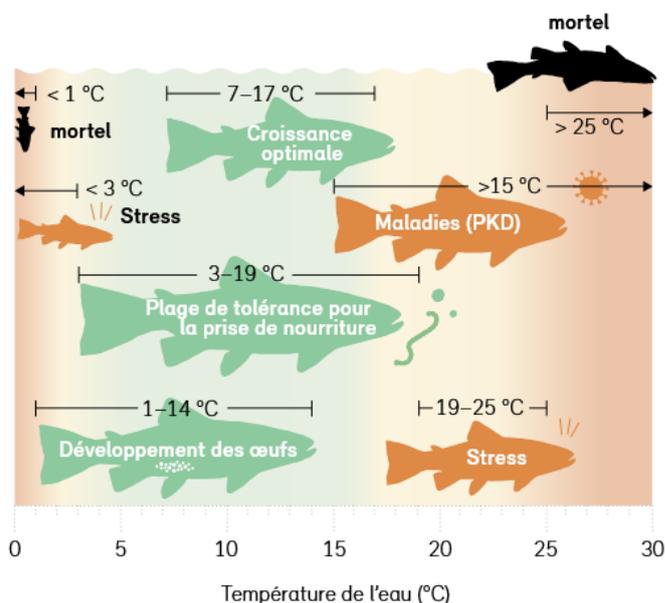
<sup>76</sup> CIPR 2009a

<sup>77</sup> ICES 2017

<sup>78</sup> CIPR 2009a

s'attend à une recrudescence de la maladie rénale proliférative par ex. (*Proliferative Kidney Disease*, PKD), qui est souvent mortelle pour les truites de rivière, surtout les truitelles d'été, à partir d'une température prolongée de l'eau de plus de 15 °C (cf. figure 10)<sup>79,80</sup>.

Il semblerait également que la vibriose, une maladie bactérienne touchant l'anguille européenne, soit favorisée par le stress induit par la chaleur et la présence concomitante fréquente des poissons dans un moindre volume d'eau<sup>81</sup>.



Source : adaptation d'après Elliott J.M. 1994

**Figure 10. Impacts du changement climatique (température de l'eau) sur l'ichtyofaune à l'exemple de la truite de rivière (OFEV 2021).**

## 1.6 Espèces néobiotes

On note depuis quelques décennies dans le Rhin et ses affluents une modification très prononcée et très dynamique des biocénoses due à l'immigration de néobiotes, ce phénomène étant renforcé par la navigation et les usages anthropiques, de sorte que les interactions biologiques se superposent en partie aux effets du changement climatique.

En cas de propagation et d'immigration d'espèces allochtones, le changement climatique n'est généralement pas le facteur déterminant, mais il peut toutefois faciliter l'implantation de certaines espèces et impacter fortement les rapports d'abondance<sup>82</sup>.

De nombreux néobiotes sont des généralistes et tolèrent des températures en hausse, une eutrophisation et un degré de salinité plus élevé ; ils profitent donc indirectement du changement climatique. Leur cycle de reproduction étant souvent plus court et leur comportement envahissant plus agressif<sup>83</sup>, ils sont fréquemment avantagés dans leur rapport de concurrence avec les espèces indigènes.

La reproduction et la propagation de la plupart des espèces néobiotes thermophiles sont favorisées par des hivers doux et freinées par de basses températures hivernales et

<sup>79</sup> OFEV 2021

<sup>80</sup> ROS ET AL. 2022

<sup>81</sup> CIPR 2004, KOOP et al. 2007

<sup>82</sup> STOWA 2011

<sup>83</sup> VAN KESSEL et al. 2011

prolongées de l'eau (p. ex. < 5 °C pour la moule quagga<sup>84</sup> et < 10 °C pour la truite arc-en-ciel<sup>85</sup>).

### 1.6.1 Macrophytes

Le nombre de plantes aquatiques néophytes et leur présence a nettement augmenté en Europe au cours des dernières années et décennies. Tout comme certaines plantes aquatiques autochtones, de nombreuses espèces allochtones (entre autres *Elodea nuttallii*) profitent des températures en hausse et des périodes de croissance prolongées. L'élodée de Nuttall (*Elodea nuttallii*), une espèce néophyte tolérant une large amplitude de température, s'est implantée et répandue très rapidement en Europe centrale depuis le milieu du siècle dernier. Sa croissance peut démarrer à partir d'une température de 4 °C et est encore temporairement concevable lorsque les eaux dépassent 28 °C. Cette espèce pourrait donc profiter du changement climatique si les températures de l'eau venaient à augmenter. Les populations massives d'*Elodea nuttallii* ont des effets négatifs et répulsifs sur d'autres plantes macrophytes immergées, de même que sur les algues planctoniques.

Les plantes aquatiques sempervirentes profitent également de températures de l'eau plus élevées en hiver. Elles peuvent refouler les espèces indigènes saisonnières, comme il a été montré dans l'Erft avec le retrait des peuplements de rubaniers émergés (*Sparganium emersum*) sous la poussée de l'espèce néophyte immergée *Vallisneria spiralis*. Dans le Rhin inférieur également, ce néophyte sempervirent, qui provient probablement de l'introduction de cette espèce dans les affluents rhénans Erft et Moselle, est déjà identifié à certains endroits et parfois depuis plusieurs années sans que l'on sache quelle est son extension actuelle. La myriophylle hétérophylle (*Myriophyllum heterophyllum*), une plante néophyte également sempervirente et immergée qui se propage actuellement à grande vitesse dans les canaux du nord de la France, n'est connue jusqu'à présent que dans certains affluents du Rhin. Il apparaît possible qu'elle s'établisse dans les zones du Rhin à faible courant ou à eaux dormantes ainsi que dans certains bras raccordés au Rhin.

Quelques plantes aquatiques néophytes sensibles au gel, comme la myriophylle aquatique (*Myriophyllum aquaticum*), espèce principalement flottante et émergente qui s'enracine dans les sédiments, s'implantent plus facilement sous l'effet des hausses de températures de l'air et de l'eau en hiver. Par ailleurs, un rayonnement solaire intense lié à des températures (atmosphériques) élevées et une grande disponibilité nutritive favorisent une croissance rapide de ces espèces. Les espèces flottantes et émergées prenant racine dans les sédiments colonisent principalement les zones de berges plates. Ces zones tombent souvent à sec sur le Rhin au cours des mois d'été ou sont soumises à de fortes fluctuations de niveau d'eau, ce qui dégrade plutôt le mode de croissance et de vie de ces espèces dans ces habitats. Quand ces espèces s'étendent massivement et en forte densité, elles ombragent fortement la colonne d'eau et influencent la croissance des plantes macrophytes et des algues planctoniques immergées. En outre, elles modifient les habitats du macrozoobenthos et des poissons.

Les espèces flottantes non sessiles, comme l'azolle fausse filicule (*Azolla filiculoides*) ou la laitue d'eau (*Pistia stratiotes*), toutes deux déjà présentes dans le bassin du Rhin, ne peuvent constituer de grands peuplements que dans les zones protégées du courant, car elles sont sinon entraînées par celui-ci. La présence de *Pistia stratiotes* se limite actuellement à l'Elft et ses températures de l'eau anormalement élevées, qui permettent à cette espèce de survivre en hiver. On a constaté également une hibernation par formation de graines, mais il s'agit ici probablement d'une exception. À partir de l'Erft, des milliers de cette *pistia* rejoignent le Rhin, surtout au cours des mois d'été, sans pouvoir cependant établir de nouvelles populations jusqu'à présent. Les eaux dormantes

---

<sup>84</sup> BORCHERDING 1991

<sup>85</sup> OFEFP 2002

reliées au Rhin sont nettement plus propices à l'implantation de néophytes flottant librement. Avec des températures en hausse, les conditions de croissance de ces espèces s'améliorent et elles pourraient se propager en masse dans des zones aquatiques appropriées, ce qui aurait de multiples conséquences sur le milieu en raison de l'ombragement de la masse d'eau.

### 1.6.2 Macrozoobenthos

La présence de nombreuses espèces d'invertébrés néozoïques est très dynamique : on a ainsi pu constater le développement massif de la palourde asiatique (*Corbicula fluminea*) originaire du sud-est de l'Asie, qui s'est implantée comme espèce dominante dans le haut Rhin et le Rhin supérieur en évinçant la dreissène polymorphe (*Dreissena polymorpha*) avant d'être supplantée à son tour par la moule quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*).

Originaire du bassin pontocaspian, la moule quagga (*D. rostriformis bugensis*) constitue actuellement une grande partie de la biomasse de la biocénose macrozoobenthique du haut Rhin et du Rhin supérieur, avec des densités massives de plusieurs milliers d'individus par mètre carré, et surpasse de loin *D. polymorpha*, son espèce sœur également néozoaire, en nombre et en densité.

*D. polymorpha* réagit à des températures maximales de 30 °C par un taux de croissance en hausse, mais cette croissance décroît à partir de 30 °C, et la plupart des dreissènes polymorphes meurent par des températures supérieures à 32 °C. À l'opposé, il semble que la moule quagga est moins tolérante aux températures élevées, des taux de mortalité significatifs étant déjà constatés dans des plages de températures de l'ordre de 30 à 31 °C. Cependant, alors que *D. polymorpha* nécessite une température de l'eau d'au moins 12 °C pour se reproduire avec succès, *D. rostriformis bugensis* se reproduit déjà à des températures d'eau inférieures à 5 °C et son cycle de reproduction s'étend donc pratiquement sur toute l'année<sup>86</sup>. Ceci signifie que la moule quagga peut déjà constituer des peuplements stables par des températures inférieures à 5°C<sup>87</sup> alors que *D. polymorpha* doit disposer de températures d'au moins 12 °C pour libérer des gamètes masculines et féminines et ne peut donc pas établir de populations viables sur toute l'année dans les cours d'eau dont la température journalière maximale est inférieure à 12 °C.

*C. fluminea* est également sensible aux basses températures de l'eau, ce qui limite probablement son extension vers l'est alors qu'on la rencontre parfois en colonies massives en aval des rejets d'eaux chaudes. Une telle extension massive de cette palourde peut provoquer le recul d'espèces indigènes de mollusques dulçaquicoles. Lorsque les températures de l'eau atteignent des valeurs maximales pouvant atteindre 30 °C, le temps de survie de *C. fluminea* passe toutefois d'un mois à quelques jours, ce qui peut donner lieu à une mortalité massive, comme en 2003 dans le Rhin.<sup>88</sup>

En règle générale, on peut partir de l'hypothèse que les espèces néozoaires et les souches génétiques d'espèces qui ont migré et continuent encore de migrer dans le bassin du Rhin depuis le bassin pontocaspian via le canal du Main au Danube, comme le gammare du Danube (*Dikerogammarus villosus*), qui a déjà remplacé le gammare tigré (*Gammarus tigrinus*) à hauteur de nombreuses stations d'analyse du Rhin ou des souches pontocasiennes de nérites des rivières (*Theodoxus fluviatilis*) initialement originaires du Rhin, continueront à être avantagées, du moins dans les voies navigables, en raison de leur plus grande tolérance aux températures. Des observations récentes dans les zones rivulaires du Rhin rhénan-palatin laissent en outre penser que les espèces brouteuses de biofilm et vivant sur des substrats durs profitent des longues périodes d'étiage, qui sont souvent combinées à des flux plus faibles de matières en suspension et des taux de croissances plus élevés du biofilm. Parmi ces espèces, on peut citer p. ex. la nérite des rivières mentionnée plus haut ou encore l'hydrobie des antipodes (*Potamopyrgus antipodarum*).

<sup>86</sup> KARATAYEV & BURLAKOVA 2022

<sup>87</sup> BORCHERDING 1991

<sup>88</sup> KOOP et al. 2007

### 1.6.3 Ichtyofaune

Les gobies à taches noires sont actuellement les poissons du Rhin les plus fréquents parmi les espèces néozoaires. Ils sont originaires du bassin pontocaspéen et ont transité à partir du Danube par le canal Main-Danube pour coloniser le bassin du Rhin. Leur large distribution et leur présence en peuplements de masse rendent très probables des effets sensibles sur l'ichtyofaune indigène et en concurrence avec celle-ci.<sup>89</sup>

Le gobie de Kessler (*Neogobio kessleri*) tolère des températures de l'eau atteignant 25 à 30 °C et se pose en concurrent d'espèces de poissons indigènes en tant que prédateur d'invertébrés. Il se nourrit également de frai et de poissons juvéniles et pourrait donc avoir un impact négatif sur les efforts de réimplantation du saumon et d'autres poissons, entre autres les espèces plus sédentaires.

On note un comportement similaire chez le gobie à taches noires (*Neogobio melanostomus*). Cette espèce prédatrice pourrait supplanter des poissons indigènes en raison de son comportement prédateur nocturne.

La truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), une espèce implantée de longue date en raison de son exploitation commerciale, est moins sensible aux températures d'eau élevées (10 °C à 24 °C) et aux teneurs plus faibles en oxygène que la truite de rivière autochtone (*Salmo trutta fario*) et pourrait donc également être avantagée par le changement climatique<sup>90</sup>.

---

<sup>89</sup> BORCHERDING & GERTZEN 2016

<sup>90</sup> OFEFP 2002

## 2. Répercussions éventuelles du changement climatique sur les habitats semi-aquatiques et terrestres du bassin du Rhin

Les conditions écologiques d'un écosystème intégrant le fleuve et son champ alluvial (structures et fonctions des biotopes et composition des biocénoses) sont directement marquées par les processus hydrologiques et morphodynamiques (érosion, transport, sédimentation, déplacement) des eaux courantes (Rhin, bras latéraux, annexes hydrauliques) et par la profondeur de la nappe souterraines<sup>91</sup>.

Par conséquent, les biocénoses de ces milieux sont considérées sensibles aux nombreuses modifications que le changement climatique occasionne sur le régime d'écoulement. Cependant, l'espace biotopique que constitue le milieu alluvial est lui-même caractérisé par des conditions de vie très changeantes et les espèces qui s'y implantent doivent s'adapter à de fortes variations hydrologiques et modifications d'habitats qui y sont liées. On leur attribue donc globalement une grande capacité d'adaptation plus ou moins prononcée le long des gradients hydrologiques<sup>92</sup>.

En outre, les impacts d'autres pressions anthropiques se superposent à ceux du changement climatique, ou leurs effets s'amplifient mutuellement. La fragmentation des écosystèmes alluviaux, entre autres par l'agriculture intensive et les zones d'habitation et d'activités économiques, de même que par les modifications anthropiques du régime hydrologique, amenuise fortement la capacité d'adaptation naturelle au climat de ces écosystèmes et la diversité de leurs habitats.

L'état écologique de ces écosystèmes et le bon fonctionnement de leurs processus hydrologiques, caractérisés par un régime naturel d'inondation, sont déterminants pour l'accomplissement des nombreux services écosystémiques importants tels que la régulation du climat local, la rétention des crues, l'offre en habitats ainsi que le stockage de gaz à effet de serre<sup>93</sup>.

Avec le changement climatique, la fréquence des inondations va probablement changer : les surfaces plus rarement inondées (jusqu'à 10 jours par an) vont gagner en superficie et celles inondées 20 à 60 jours par an vont diminuer<sup>94</sup>. Ce processus contribue à l'assèchement des zones alluviales et a des impacts négatifs particulièrement prononcés sur les biotopes humides (rivières alluviales peu profondes, marécages, roselières, végétation de hautes herbes, forêts alluviales et sites humides).

Pendant de longues phases de sécheresse en été, l'assèchement des sols et l'évaporation peuvent entraîner une baisse de la nappe phréatique dans les biotopes humides comme les roselières, la végétation de hautes herbes, les prairies humides et très humides et les forêts alluviales. De nombreuses espèces dans les habitats semi-aquatiques sont tributaires d'une grande humidité des sols et/ou d'une végétation donnée et peuvent disparaître si les conditions changent.<sup>95</sup> La modification des fréquences et des durées de crue et, par conséquent, des phases d'inondation abaisse la compétitivité des espèces spécialisées vivant dans les prairies permanentes à degrés d'humidité ou de sécheresse variables ainsi que dans les forêts alluviales.

Un autre effet d'un assèchement de grandes surfaces est qu'il peut renforcer la minéralisation de l'humus et de la tourbe et entraîner par là même un dégagement plus important de nutriments et une plus forte eutrophisation. Il en résulterait une baisse des capacités de stockage de carbone et de dénitrification, celles-ci étant plus grandes dans des sols humides ou très humides<sup>96</sup>. Dans les biotopes secs en revanche, la disponibilité de nutriments peut baisser et entraîner ainsi une oligotrophisation.

---

<sup>91</sup> GRÖNITZ et al. 1994

<sup>92</sup> CAPON et al. 2013

<sup>93</sup> HEGER et al. 2021, CAPON et al. 2013

<sup>94</sup> DORENBOSCH et al. 2022

<sup>95</sup> MKUNLV 2010

<sup>96</sup> BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2021

En revanche, les crues estivales peuvent être plus fréquentes sous l'effet du changement climatique, comme on l'a vu p. ex. en juillet 2021. La végétation du champ alluvial supporte normalement bien les crues hivernales mais résiste nettement moins bien aux inondations pendant la phase de croissance<sup>97</sup>. Il est impossible d'émettre une affirmation générale pour les animaux, car ici la mobilité, la durée de vie, le temps de développement larvaire et la stratégie de reproduction sont des éléments déterminants.



**Figure 11 : le Gelderse Poort dans la région frontalière germano-néerlandaise. Étiage en septembre 2019 (photo : Wendy Vercruisje, Rijkswaterstaat)**

Les effets physiologiques et phénologiques entraînent des décalages dans les cycles annuels et de vie des plantes et des animaux. De nombreuses plantes fleurissent plus tôt, ont une période de végétation plus longue ; le comportement de déplacement des oiseaux migrateurs peut également changer. Ces décalages peuvent déconnecter les interactions entre biocénoses, p. ex. celles entre la pousse de plantes alimentaires et la période d'éclosion des rhopalocères. Par ailleurs, les usages des habitats se modifient. Dans les prairies permanentes, on peut s'attendre à l'avenir à un démarrage plus précoce du fauchage et du pâturage.

Ces processus modifient les habitats et leurs fonctions aquatiques et nutritives, les interactions et les rapports de concurrence, et peuvent donc provoquer des décalages dans l'éventail des espèces et s'accompagner de la disparition d'espèces rares.

Si les conditions environnementales changent, les populations peuvent d'adapter, émigrer ou s'éteindre. Les capacités d'adaptation et d'extension d'une espèce sont essentielles. Il en résulte des déplacements vers d'autres aires d'implantation, p. ex. une montée vers le nord des espèces subméditerranéennes.

Les espèces méditerranéennes, et parmi elles des néophytes, s'implantent et s'étendent en outre dans les biotopes secs, du fait de leur capacité à supporter des phases de sécheresse prolongées. De nombreuses espèces thermophiles (par ex. certaines orchidées, quelques espèces d'oiseaux ou d'insectes volants) dont l'implantation se limitait aux marges septentrionales de leur aire d'extension, verront vraisemblablement leurs conditions de vie améliorées et pourront éventuellement recoloniser des habitats abandonnés à une époque antérieure. Entre le Rhin supérieur et le delta, la vallée rhénane est un corridor de migration particulièrement important pour les déplacements du sud vers le nord.

<sup>97</sup> DORENBOSCH et al. 2022

Les groupes d'espèces les plus exposés à une extinction sont surtout ceux qui se développent, se reproduisent et se propagent lentement, qui sont généralement peu mobiles et dont les aires de propagation sont déjà restreintes et isolées. Par ailleurs, les espèces particulièrement spécialisées et à faible capacité d'adaptation sont touchées, de même que les espèces nécessitant une forte humidité et une faible chaleur et étant peu tolérantes aux variations.

Il a été analysé entre autres dans le cadre du projet de recherche KLIWAS dans quelle mesure les habitats de plantes alluviales pouvaient subir des modifications ou des altérations sous l'effet du changement climatique. À cette fin, les habitats d'un ensemble d'espèces végétales typiques du milieu alluvial ont été modélisés à l'aide de données de projection hydrologiques et l'examen a surtout porté sur les habitats alluviaux répartis le long du Rhin<sup>98</sup>.

Les résultats de ces modélisations d'habitats montrent que les changements de niveaux d'eau et leur variabilité influencent la composition des espèces végétales dans le champ alluvial et que des modes de répartition vont évoluer localement. Certaines espèces et biocénoses réagiront de manière variable aux conditions environnementales modifiées, et il ne faut donc pas s'attendre à un simple décalage de tous les habitats en fonction des changements de niveaux d'eau. Les capacités futures d'un habitat à maintenir les espèces qui y séjournent dépend, entre autres, de facteurs spatiaux spécifiques. D'après la modélisation des habitats réalisée dans le cadre du projet KLIWAS, les habitats les plus menacés sont ceux situés dans les parties basses de la plaine alluviale (roselières, marais à laïches, prairies inondables, végétation pionnière) qui sont déjà peu étendus aujourd'hui.

Pour les espèces de ces milieux, la disponibilité de structures biotopiques appropriées et l'accessibilité aux habitats seront déterminantes à l'avenir. Y trouve-t-on des structures à géomorphologie variable, comme par exemple des bras morts, des cuvettes inondables ou des dépressions qui pourraient également devenir des habitats dans des conditions futures modifiées des niveaux d'eau et de débit. Les auteurs de l'étude KLIWAS indiquent en conclusion que chaque segment fluvial est à examiner à échelle locale pour estimer si des types de végétation particuliers s'y retrouveront à l'avenir.

Une autre étude réalisée dans le cadre du projet KLIWAS a porté sur l'analyse d'une chronique prolongée de données (14 ans) sur l'évolution de la végétation des prairies alluviales du cours moyen de l'Elbe. Pour les trois types de prairies permanentes étudiées (chenaux de crue, prairies permanentes humides et prairies fraîches), on a observé des disparitions significatives, mais également des tendances à la recolonisation par certaines espèces après des événements hydrologiques extrêmes. Ces changements sont surtout apparus dans les zones marginales humides et sèches des gradients hydrologiques, dans les chenaux de crue et dans les prairies alluviales fraîches. Les données indiquent que la biocénose des prairies alluviales de l'Elbe peut neutraliser en l'espace de quelques années les perturbations dues aux événements hydrologiques extrêmes. Il reste cependant à savoir avec quelle fréquence maximale les événements extrêmes peuvent se produire et se succéder pour que le système soit néanmoins en mesure de revenir à son état initial, et dans quelle ordre de grandeur les résultats obtenus peuvent être transposés à d'autres hydrosystèmes et régions, p. ex. au Rhin.

---

<sup>98</sup> MOSNER UND HORCHLER 2014

### **3. Actions envisageables pour atténuer les répercussions négatives du changement climatique sur l'écosystème du Rhin**

Le programme Rhin 2040 de la CIPR<sup>99</sup> adopté en 2020 dans le cadre de la 16<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin vise à faire du bassin du Rhin un bassin géré durablement, résilient aux impacts du changement climatique et dont les cours d'eau sont de précieux lieux de vie pour la nature et pour l'homme. Le programme s'adresse aux défis comme les épisodes d'étiages et de crues plus marqués, qui sont accompagnés de températures plus élevées de l'eau et de l'air, dans quatre différents champs d'action. Les objectifs de ce programme sont (1) la bonne santé de l'écosystème du Rhin, caractérisé par une grande biodiversité et sa continuité pour les migrations animales (« Habitats connectés et biodiversité enrichie »), (2) une bonne qualité de l'eau, (3) la réduction des risques d'inondation et (4) l'atténuation des effets négatifs des étiages. Le programme soutient les efforts engagés pour atteindre le bon état/potentiel chimique et écologique, conformément à la directive cadre européenne sur l'Eau (DCE) et vise à abaisser les risques d'inondation, conformément aux objectifs de la directive relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondations (DI).

Les objectifs de qualité écologiques, morphologiques et chimiques de la DCE semblent adaptés pour renforcer la résilience des hydrosystèmes face à des conditions climatiques modifiées.

Selon certaines estimations, le risque de ne pas atteindre le « bon état » augmente pour les masses d'eau qui oscillent actuellement entre atteinte de l'objectif et « état moyen » au regard des impacts attendus du changement climatique d'ici 2050. Pour les masses d'eau qui, selon les critères actuellement en vigueur, sont dans un « bon état », le risque est jugé faible. Il est à attendre cependant que moins la pression organique et trophique sera forte sur une masse d'eau (eaux de surface, eaux souterraines) et moins les altérations morphologiques des masses d'eau de surface seront prononcées, moins les répercussions d'une hausse de température pronostiquée seront ressenties sur la qualité de l'eau et du milieu aquatique<sup>100</sup>.

Au regard de ce constat, il convient de limiter au plus les altérations pour que le niveau de vulnérabilité des espèces, biocénoses et écosystèmes du Rhin passe de « élevé » à « moyen ».

Les actions envisageables indiquées ci-dessous proviennent en majeure partie des stratégies d'adaptation nationales déjà disponibles ainsi que de rapports internationaux sur le changement climatique. On trouvera en annexe 3 une représentation synoptique de ces actions.

---

<sup>99</sup> CIPR 2020b

<sup>100</sup> Déclaration « à degré moyen/élevé de fiabilité » tirée du MINISTÈRE FÉDÉRAL AUTRICHIEN DE L'AGRICULTURE, DE LA SYLVICULTURE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA GESTION DES EAUX Autriche 2010)

### **Enseignements tirés de l'atelier de la CIPR sur l'adaptation au changement climatique des 19 et 20 mars 2025 sur le sujet de l'écologie**

Depuis la publication de la première stratégie de la CIPR sur l'adaptation au changement climatique en 2015, les événements extrêmes tels que les étiages et les fortes pluies se sont multipliés dans le bassin du Rhin. La hausse des températures de l'eau dans le Rhin et les modifications des débits soulignent la nécessité d'actualiser la stratégie.

L'amélioration de la résilience des écosystèmes liés à l'eau est essentielle pour atténuer les effets du changement climatique. Pour ce faire, il convient de préserver et de restaurer des habitats précieux dans et au bord de l'eau. Une amélioration du régime hydrologique des milieux consistant à retenir l'eau autant que possible en surface et la mise en œuvre d'autres solutions basées sur la nature sont des contributions importantes. L'implication précoce d'autres secteurs et la prise en compte des usages dans la planification des mesures sont essentielles et peuvent éviter d'éventuels conflits d'intérêts.

Ces résultats de l'atelier ainsi que d'autres seront pris en compte dans la mise à jour de la stratégie

### **3.1 Renforcer les écosystèmes en protégeant et en mettant en réseau les habitats**

Le changement climatique aura probablement pour effet de modifier l'étendue des écosystèmes et la distribution des espèces y vivant. Pour cette raison, la protection des habitats reste une tâche de première importance. On veillera à renforcer la politique de préservation et d'extension des réserves naturelles et la désignation de nouvelles zones à protéger, de même que les mesures visant à améliorer les habitats des espèces déjà menacées actuellement et ceux d'espèces susceptibles de le devenir sous l'impact du changement climatique.

Les projets de protection et de préservation doivent être souples et adaptés aux nouvelles conditions en présence.<sup>101</sup> Il convient d'adapter les catalogues d'espèces indicatives par ex. pour réagir à la menace d'extinction d'espèces isolées ou d'espèces non menacées jusqu'alors. De même, on vérifiera, si besoin est, l'état de référence (des biocénoses entre autres). Il faut améliorer par ailleurs la connectivité entre les zones de protection et de préservation pour permettre aux espèces de fuir ou de migrer pour éviter les effets du changement climatique. Il est nécessaire de tenir également compte des exigences d'espèces aquatiques qui n'ont habituellement pas ou peu le désir de migrer, comme le chabot par exemple. Là où les espèces ne sont pas en mesure d'atteindre elles-mêmes leurs niches climatiques, il convient de réfléchir, dans des cas particuliers, à l'option d'une « migration assistée », c'est-à-dire à leur implantation ciblée dans des refuges climatiques ou des zones de protection mieux adaptées.

Des examens et des recherches plus poussés sont à engager sur les espèces allochtones et plus particulièrement sur celles à comportement invasif (néozoaires, néophytes, cf. chapitre 1.6). Dans les eaux douces, la hausse des températures peut être un facteur d'extension de l'aire de distribution ou d'agrandissement des peuplements d'espèces invasives ayant un impact négatif sur les espèces indigènes. Les possibilités de prévention et de contrôle restent cependant très limitées, en particulier sur les voies navigables<sup>102</sup>.

La protection des processus naturels est à mettre au premier plan dans le contexte général de conditions climatiques en évolution. On citera parmi ces processus le fait de tolérer la succession naturelle, la régénération écologique et la promotion de la libre migration des espèces (voir plus bas).

<sup>101</sup> BASEN ET AL. 2022b

<sup>102</sup> WIESNER et al. 2010, LUWG 2011

On sait que la présence d'une mosaïque variée d'habitats favorise la biodiversité. Sur le Rhin et ses affluents, cette variété prend par ex. la forme :

- de segments à écoulement libre (km), recelant notamment des frayères pour les espèces rhéophiles ;
- de berges écologiquement aménagées ;
- d'anciens bras, bras latéraux et autres annexes hydrauliques raccordés au cours principal ;
- de zones saumâtres (transition plus naturelle entre eaux douces et eaux salées).

S'y ajoutent tous les nouveaux habitats qui remplacent ceux disparus dans le lit mineur suite aux mesures d'aménagement ainsi que leur restauration.

Le milieu alluvial et les eaux alluviales sont à reconnecter dans la plus grande mesure possible au réseau d'eaux courantes. Les zones alluviales devraient être exploitées sous forme extensive comme prairies permanentes ou surfaces forestières et non comme surfaces labourées. Tous ces exemples de mesures de type « gagnant-gagnant » contribuent à promouvoir la biodiversité et la mise en réseau des biotopes. Elles aident à préserver le bon état des eaux et renforcent à deux égards la prévention des inondations : grâce à une meilleure rétention des eaux en surface et à leur effet préventif de réduction des dommages potentiels et des risques dans les zones inondables.

On s'efforcera, en tout lieu possible, de tolérer à nouveau la dynamique fluviale naturelle<sup>103</sup>.

On peut citer ici, à titre d'exemple, les programmes suivants appliqués au bassin du Rhin :

- « Revitalisations fluviales » en Suisse<sup>104</sup>
- « Trame verte et bleue » en France<sup>105</sup>
- Programme fédéral « Blaues Band » (bande bleue) en Allemagne<sup>106</sup>
- « Programme Intégré pour le Rhin » au Bade-Wurtemberg<sup>107</sup>
- « Aktion Blau » / « Aktion Blau Plus » en Rhénanie-Palatinat<sup>108</sup>
- « Lebendige Gewässer » en Rhénanie-du-Nord-Westphalie<sup>109</sup>
- « Espace pour le fleuve » aux Pays-Bas<sup>110</sup>
- « Le Rhin relie » aux Pays-Bas et en Rhénanie-du-Nord-Westphalie<sup>111</sup>
- « Plan directeur 'Poissons migrateurs' Rhin » de la CIPR sur l'ensemble du bassin du Rhin.<sup>112</sup>
- Mesures dans le prolongement de la mise en œuvre de la DCE.

<sup>103</sup> PARTENARIAT POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CLIMAT 2011, LUXEMBOURG ; MAKASKE & MAAS 2013

<sup>104</sup> vgl. CONFÉDÉRATION HELVÉTIQUE 2020, OFEV et.al., 2020

<sup>105</sup> cf. <https://www.ecologie.gouv.fr/trame-verte-et-bleue>

<sup>106</sup> vgl. [https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues\\_Band/DE/00\\_Home/home\\_node.html](https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues_Band/DE/00_Home/home_node.html)

<sup>107</sup> cf. <https://rp.baden-wuerttemberg.de/themen/wasser/irp/>

<sup>108</sup> Cf. <https://lfu.rlp.de/service/publikationen/umweltschutz/publikationen-wasser/fliessgewaesser/gewaesserentwicklung/-aktion-blau-plus>

<sup>109</sup> vgl. <https://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umwelt-und-wasser/gewaesser/programm-lebendige-gewaesser/>

<sup>110</sup> cf. <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/ruimte-voor-de-rivieren>

<sup>111</sup> <https://www.derrheinverbindet.de/>

<sup>112</sup> voir CIPR 2018

Des espaces de refuge climatique pourraient être identifiés et mis en réseau avec les habitats actuels d'espèces de poissons menacées.<sup>113</sup>

La mise en réseau des biotopes favorise les déplacements migratoires vers des zones climatiquement plus avantageuses d'espèces dont les habitats se décalent par ex. vers le nord ou vers les zones montagneuses sous l'effet d'une hausse de la température.

Dans l'optique d'une atténuation des répercussions du changement climatique également, la « mise en réseau des biotopes sur le Rhin »<sup>114</sup>, qui englobe les aspects susmentionnés pour le cours principal du Rhin et son milieu alluvial, gagne en importance. Le programme Rhin 2040 de la CIPR<sup>115</sup> adopté en 2020 dans le cadre de la 16<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin a fixé l'objectif de préserver, protéger et restaurer d'ici 2040 les habitats typiques du milieu rhénan. Le réseau de biotopes du Rhin doit s'améliorer nettement grâce à l'extension de réservoirs de biodiversité et à la connexion de passerelles écologiques adéquates et de taille suffisante. L'Atlas numérique<sup>116</sup> du réseau de biotopes du Rhin montre les résultats de la cartographie des biotopes de 2020 et met en relief les mesures et les projets dans lesquels ces mesures s'inscrivent. En outre, les espaces prioritaires et les zones déficitaires ayant une importance ou des répercussions sur le réseau de biotopes sont affichés avec des recommandations d'actions pour chaque groupe biotopique. L'Atlas des biotopes peut être vu comme un outil complémentaire d'aide à la planification à grande échelle.

Un paysage fluvial hétérogène caractérisé par de multiples connexions rend l'hydrosystème dans son ensemble plus résilient au changement climatique. Quand on y trouve divers habitats connexes et éventuellement raccordés aux anciennes zones alluviales, les espèces ont l'espace de déplacement requis pour changer d'habitat dans différentes conditions. Elles peuvent migrer, trouver refuge ou coloniser de nouvelles zones plus facilement.

### **3.2 Atténuer les répercussions des pics de températures de l'eau**

Quand les affluents sont mis en réseau avec le cours principal, les poissons et d'autres organismes aquatiques du Rhin ont la possibilité de refluer localement vers les rivières et bras latéraux aux eaux plus fraîches (car plus ombragées par exemple). Les redynamisations favorisent en outre l'échange entre eaux fluviales et eaux souterraines. Les processus morphologiques tels que la formation de bancs et de cuvettes, le dépôt de matériaux solides et la modification de la pente sur l'axe longitudinal jouent ici un rôle important. Leur ampleur dépend d'une part des dimensions de l'agrandissement du lit fluvial (en longueur comme en largeur) et d'autre part des conditions générales de l'environnement naturel en présence<sup>117</sup>.

Les résurgences d'eaux souterraines froides constituent également une aire de retrait pour les poissons quand les températures de l'eau sont élevées. Le niveau de la nappe souterraine baisse cependant lui aussi et l'on trouve de moins en moins de résurgences de sources le long du fleuve, en quantité comme en qualité. Pour limiter grâce à l'ombragement la hausse des températures de l'eau, on recommande de planter des bosquets le long des berges des affluents de petite et de moyenne taille et de promouvoir leur implantation sauvage. Une étude réalisée au sein de la coopération interrégionale KLIWA a permis de calculer, à l'aide de modèles de bilan hydrologique, des effets significatifs de rafraîchissement. On pourrait ainsi atteindre en été une baisse des températures maximales de plus de 2 °C dans de nombreux cours d'eau, voire même de plus de 5 °C dans certains tronçons.<sup>118</sup>

---

<sup>113</sup> FREYHOF 2009 dans RABITSCH et al. 2010

<sup>114</sup> CIPR 2006, CIPR 2022

<sup>115</sup> CIPR 2020b

<sup>116</sup> [https://geoportal.bafg.de/karten/cipr\\_atlas\\_des\\_biotopes\\_2020/](https://geoportal.bafg.de/karten/cipr_atlas_des_biotopes_2020/)

<sup>117</sup> HUNZINGER 2004

<sup>118</sup> KLIWA 2023

Une telle mesure est toutefois peu efficace sur de grandes parties du cours principal du Rhin et sur ses grands affluents en raison de leur largeur, mais elle peut vraiment être pertinente dans les annexes hydrauliques du champ alluvial. L'apport de bois mort apporte un ombragement des surfaces subaquatiques.

Les cuvettes sablonneuses et argileuses profondes dans les zones alluviales peuvent servir de refuge thermique. Du fait de leur stratification, les eaux calmes profondes (et raccordées) conservent de l'eau froide en été dans leurs couches les plus basses. Elles peuvent alors constituer un refuge pour les poissons sensibles aux températures si elles sont aménagées de manière naturelle et/ou raccordées au fleuve. Si l'on planifie des mesures visant à rehausser le niveau des eaux calmes dans le champ alluvial, il faut garder à l'esprit l'éventuelle fonction de refuge thermique d'une mare profonde<sup>119</sup>.

Les rivières latérales peuvent aussi être mieux mises à profit pour atténuer les impacts climatiques dans la région des grands fleuves. En améliorant les connexions (de montaison), on augmente les opportunités pour les poissons sensibles à la température de se réfugier dans les ruisseaux frais. Les ruisseaux sont également des lieux où les poissons peuvent trouver protection quand surviennent des crues subites en été. Les connexions de nombreuses zones de débouché de ruisseaux avec le fleuve peuvent encore être optimisées.

À côté des mesures prises dans le long terme pour lutter contre la hausse des températures de l'eau, comme celles de restaurer la continuité longitudinale, de raccorder au fleuve des rivières latérales ou d'ombrager les eaux en reboisant les berges, des mesures à plus court terme peuvent également être mises en œuvre dans le cadre d'un plan d'urgence pour atténuer les impacts de températures de l'eau dépassant de plus en plus fréquemment les seuils de tolérance de poissons sensibles.<sup>120</sup> Dans ce contexte, le développement d'un plan d'alerte peut être un instrument important pour la protection de l'écologie fluviale.<sup>121</sup> Par exemple, conformément au plan d'alerte Main « Écologie des eaux », des mesures préventives temporaires ont été prises pendant l'étiage de 2022 pour stabiliser le régime d'oxygénation (aération des turbines, déversoir)<sup>122</sup>. D'autres mesures d'urgence prises à court terme vont de la création par dragages de zones artificielles d'eaux fraîches avec ombragement à l'aide de structures artificielles de recouvrement jusqu'à des pêches de sauvetage.<sup>123</sup> D'autres mesures immédiates pourraient consister à interrompre immédiatement tous les rejets thermiques et à réduire, voire même à stopper, tous les prélèvements d'eau non nécessaires. Elles ont toutes en commun de protéger les poissons du stress intense dû à la chaleur et d'améliorer ainsi à court terme leurs chances de survie. Elles ne remplacent pas pour autant les mesures s'inscrivant dans le long terme, seules à même de contribuer durablement au maintien d'une ichtyocénose variée dans les cours d'eau malgré le changement climatique. Sur la base des expériences faites durant la canicule de 2003, le canton de Schaffhouse en Suisse a élaboré un plan d'urgence pour les poissons du Rhin qui est appliqué depuis pendant les étés particulièrement chauds comme en 2015, 2018 et 2022. Les mesures immédiates prévues dans ce plan contribuent à atténuer les impacts négatifs des températures d'eau élevées sans les éviter complètement cependant. Ainsi, pendant les étés caniculaires de 2015, 2018 et 2022, le Rhin et d'autres cours d'eau suisses ont connu des mortalités de poissons, même si elles sont restées d'ampleur inférieure à celles de 2003<sup>124</sup>.

Il convient de limiter le plus possible une hausse anthropogène supplémentaire de la température des eaux sous l'effet de rejets thermiques et de s'assurer qu'elle ne fait pas obstacle à l'atteinte du bon état ou du bon potentiel écologique. Dans les États, les températures maximales et les hausses de température à ne pas dépasser pour l'atteinte

<sup>119</sup> VERSTIJNEN et al. 2022

<sup>120</sup> AQUAPLUS 2022

<sup>121</sup> [Plan d'alerte Danube](#) et [Plan d'alerte Main](#)

<sup>122</sup> CIPR 2024b

<sup>123</sup> OFEV 2016, OFEV et al. 2019

<sup>124</sup> OFEV 2016, OFEV et al. 2019

du très bon et du bon état/potentiel écologique sont fixées dans les législations ou règlements nationaux (p. ex. en Allemagne dans le règlement sur la protection des eaux de surface OGEV 2016, cf. chap. 1.5) en fonction des différentes ichtyocénoses, types de masses d'eau et périodes. Les restrictions juridiques fixées au titre du droit de l'eau imposent une baisse quantitative des rejets thermiques à mesure que la température de l'eau augmente et généralement, en fonction du cours d'eau et de ces biocénoses, une interdiction d'apports thermiques supplémentaires quand les températures dépassent 21,5 °C à 28 °C.<sup>125</sup>

De nouveaux outils de pilotage des ouvrages peuvent contribuer à faire respecter les valeurs indicatives saisonnières avec un effet écologique optimal et des pertes économiques aussi limitées que possible. Quand une valeur indicative menace d'être dépassée, l'exploitation de centrales thermiques peut être ralentie ou d'autres mesures peuvent être prises pour réduire les rejets thermiques.<sup>126</sup> Dans le cas de périodes caniculaires, il conviendrait d'améliorer l'échange d'informations sur les mesures prises pour réduire les rejets thermiques et de relier plus étroitement les acteurs au niveau international.

Dans le cadre de la transition énergétique en Allemagne, la mise à l'arrêt de quelques centrales qui déversaient des rejets thermiques dans le Rhin et ses affluents, comme par exemple le Neckar, a permis de freiner de manière mesurable la hausse moyenne de la température de l'eau.<sup>127</sup> Ceci montre qu'une telle mesure serait également efficace en périodes d'étiage et de canicule.

Il conviendrait de vérifier, dans le cadre d'opérations d'alevinage, que les conditions de température actuelles et futures dans le tronçon sélectionné sont adaptées à l'espèce souhaitée, même si cette espèce y était jadis implantée<sup>128</sup>.

### **3.3 Atténuer les répercussions des étiages**

L'augmentation de la température de l'eau et le risque de déficit en oxygène se produisent souvent en combinaison avec les étiages, de sorte que bon nombre des mesures mentionnées au chapitre 3.2 contribuent également à accroître la résilience face aux étiages.

La mise en réseau des habitats et la reconnexion des zones alluviales et des cours d'eau latéraux jouent notamment un rôle central pour minimiser la perte d'habitats aquatiques due à l'assèchement des bras latéraux et des berges ou pour permettre aux organismes d'atteindre des habitats de substitution.

D'autres mesures à long terme visant à contrer les effets des étiages sont la renaturation des berges ou le retrait des aménagements artificiels des berges et la limitation de l'approfondissement du lit des rivières par l'enlèvement ciblé ou la mise en place de dépôts de gravier et de sable guidant le courant ou la construction d'ouvrages parallèles.

Le programme Rhin 2040 de la CIPR vise à réduire d'ici 2040 les impacts des étiages et de la sécheresse dans le bassin du Rhin. Pour ce faire, il convient d'améliorer le suivi des étiages, d'analyser la disponibilité future de l'eau jusqu'en 2050 et de mettre au point des approches de solutions transfrontalières.

La CIPR exploite depuis 2018, en coopération avec la BfG, un système de surveillance des étiages sur le Rhin et dans son bassin ([https://undine.bafg.de/rhein/zustand-aktuell/rhein\\_nw\\_mon.html](https://undine.bafg.de/rhein/zustand-aktuell/rhein_nw_mon.html))<sup>129</sup>. On peut y consulter, en plus des données de débit, des

---

<sup>125</sup> CIPR 2021

<sup>126</sup> HOFFMANN et al. 2011

<sup>127</sup> CIPR 2009b

<sup>128</sup> FIBER-Newsletter 03/2010,

[https://www.fischereiberatung.ch/fileadmin/sites/fiber/angebot/fiber\\_publ/newsletter/archiv/2010-03-d.pdf](https://www.fischereiberatung.ch/fileadmin/sites/fiber/angebot/fiber_publ/newsletter/archiv/2010-03-d.pdf)

<sup>129</sup> CIPR 2019

informations sur la température de l'eau et la teneur en oxygène pour différentes échelles du Rhin et quelques affluents.

Les impacts des étiages de 2018 et 2022 et les mesures mises en œuvre à court terme dans les États pour y réagir ont été documentés dans deux rapports techniques de la CIPR<sup>130</sup>. L'été sec et chaud de 2022 a entraîné une hausse sensible de la consommation d'eau, de nombreuses interdictions de prélèvement d'eau (entre autres pour les usages agricoles) et des appels à économiser l'eau (public, agriculture, industrie). D'une manière générale, les restrictions d'utilisation de l'eau se sont concentrées sur les prélèvements dans des cours d'eau de petite et moyenne taille ainsi que dans les nappes phréatiques locales.

Selon l'étude sur le saumon du Rhin commandée par la CIPR en 2023, on note une augmentation de la mortalité piscicole lors de faibles débits, notamment du fait de l'accentuation de la hausse des températures et de l'aggravation des effets de la navigation en période d'étiage (collision avec les hélices des bateaux).

Les faibles débits et les hausses de température affecteront toujours plus les conditions de montaison, de reproduction et de croissance des poissons dans le fleuve et ses affluents.

Pour atténuer les effets des étiages sur la vie biologique et plus particulièrement sur les poissons, un enjeu autour du soutien des étiages et/ou de l'adaptation de la navigation (limitation du poids des porte-conteneurs, forme des navires, régulation du nombre de bateaux en période critique) pourraient être des mesures efficaces. La régulation ou le soutien d'étiage pourrait également avoir un impact positif sur la limitation de la hausse des températures, améliorer la teneur en oxygène des milieux et garantir le bon fonctionnement des habitats et des opérations de renaturation utiles aux zones de refuge et de résilience du fleuve.

### **3.4 Réduire l'érosion des sols et les apports sédimentaires consécutifs aux précipitations intenses et aux crues**

Les apports de matériaux fins, p. ex. sous l'effet de pluies intenses ou de crues, peuvent colmater les interstices du lit graveleux d'un fleuve, de sorte que ce type d'habitat n'est plus adéquat pour le frai des poissons (cf. chapitre 1.5.1). Afin d'éviter cela, des mesures doivent être d'abord prises là où se produisent ces apports et aux abords du cours d'eau avant de mettre en œuvre des mesures dans le cours d'eau.

On peut limiter l'érosion des sols et les apports sédimentaires, en particulier ceux dus aux précipitations intenses et aux crues, en restaurant les berges et en optant pour une agriculture plus extensive sur les bandes riveraines, par ex. en favorisant les prairies et pâturages permanents par rapport aux terres labourées (voir chapitre 1.5.1).

De plus, la dynamique du courant naturelle peut être réactivée en y ajoutant des obstacles à l'écoulement, comme du bois mort p. ex. Réduire les surfaces imperméabilisées<sup>131</sup> et prendre des mesures d'amélioration du régime hydrologique des milieux qui favorisent l'infiltration à grande échelle sont également des contributions importantes et ont en outre un effet préventif contre les inondations (*gagnant-gagnant*).

Limiter le creusement du lit fluvial atténue l'effet de faibles niveaux d'eau. Des mesures telles que le retrait ou la mise en place de bancs de gravier ou de sable à des endroits adaptés pour orienter le courant, l'installation de digues longitudinales ou l'aplanissement du lit mineur aident à maintenir les berges fluviales, les anciens bras, les annexes hydrauliques et les zones alluviales basses plus longtemps reliés au fleuve. En retirant le revêtement artificiel des berges, on favorise en outre leur érosion et les processus de

---

<sup>130</sup> CIPR 2020a et CIPR 2024b

<sup>131</sup> Partenariat pour la protection de l'environnement et du climat 2011, LUXEMBOURG

sédimentation dans le lit fluvial. Il est important que de telles mesures restent compatibles avec les fonctions de la navigation (tirant d'eau nécessaire).

Pour lutter contre l'assèchement et pour maintenir plus longtemps l'eau, il faut restaurer les surfaces inondables. Ces surfaces inondables doivent être résilientes au changement climatique et p. ex. suffisamment profondes pour rester recouvertes d'eau pendant les périodes où elles doivent assurer certaines fonctions écologiques comme celles de sites de reproduction pour les poissons.

## Références

- ABDOLI A., PONT D. and SAGNES P. (2005): Influence of female age, body size and environmental conditions on annual egg production of the bullhead. *Journal of Fish Biology* (2005) 67, 1327-1341.
- ABDOLI A., PONT D. and SAGNES P. (2007): Intrabasin variations in age and growth of bullhead: the effects of temperature. *Journal of Fish Biology* (2007) 70, 1224-1238.
- AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN SCHWEIZ (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports* 11(5), Bern: 218 S.
- AQUAPLUS (2022): Fischschutzmaßnahmen bei Hitzeereignissen. Arbeitshilfe. Pilotprojekt F.13 im Rahmen des Pilotprogrammes zur Anpassung an den Klimawandel.  
[https://aquaplusblog.files.wordpress.com/2023/03/aquaplus\\_fischschutzmassnahmen\\_bei\\_hitzeereignissen\\_arbeitshilfe\\_2022.pdf](https://aquaplusblog.files.wordpress.com/2023/03/aquaplus_fischschutzmassnahmen_bei_hitzeereignissen_arbeitshilfe_2022.pdf).
- BAGLINIÈRE J.L., DENAIS L., RIVOT E., PORCHER J.P., PRÉVOST E., MARCHAND F., VAUCLIN V. (2004): Length and age structure modifications of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations of Brittany and Lower Normandy from 1972 to 2002. Technical Report, INRA-CSP, 24 S.
- BAL, G. (2011): Évolution des populations françaises de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et changement climatique. Dissertation. 352 S. [http://guillaume-bal.fr/images/bal\\_phd\\_thesis.pdf](http://guillaume-bal.fr/images/bal_phd_thesis.pdf).
- BASEN, T., CHUCHOLL, C., OEXLE, S., ROS, A., BRINKER, A. (2022b) Suitability of Natura 2000 sites for threatened freshwater species under projected climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 32(12): 1872–1887, doi: 10.1002/aqc.3899
- BASEN, T., ROS, A., CHUCHOLL, C., OEXLE, S., BRINKER, A. (2022a): Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany. *PLOS Clim* 1(5): e0000006
- BEHRENS M., FARTMANN T., HÖLZEL N., BERNDT A., BUNZEL-DRÜKE M., CONZE K. J., WEDDELING K. (2009): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biologische Vielfalt: Pilotstudie zu den voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels auf ausgewählte Tier- und Pflanzenarten in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW).
- BORCHERDING, J. (1991): The annual reproductive cycle of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha* Pallas in lakes. *Oecologia* 87, S. 208-218.
- BORCHERDING, J., GERTZEN, S. (2016): Die aktuelle Fischbestandsdynamik am Rhein uner besonderer Berücksichtigung invasiver Grundeln. Monitoring und adaptives Management für eine nachhaltige Fischerei und Verbesserung des ökologischen Potenzials am Rhein. Fischereiverband Nordrhein-Westfalen e.V..
- BREVÉ N. W. P., VERSPUI R., DE LAAK G. A. J., BENDALL B., BREUKELAAR A. W., SPIERTS I. L. Y. (2014): Explicit site fidelity of European catfish (*Silurus glanis*, L., 1758) to man-made habitat in the River Meuse, Netherlands. *Journal of applied Ichthyology*, Volume 30, Issue 3.
- BRILS, J., DE BOER, E., DE BOER, P., SCHIELEN, R., VAN DER SPEK, A., BLOM, A., HAMILTON, M., STERK, M., SMEEDES, R., PEERDEMAN, R., FRINGS, R., LASEROMS, R., VELLINGA, R., HUISMANS, Y., WIEGERS, J. (2017): Sediment uit balans. *Deltares*. 14 maart 2017.

- BRODERSEN, J., RODRIGUEZ-GILL, J.L., JÖNSSON, M., HANSSON, L.A., BRÖMARK, C., NILSON, P.A., NICOLLE, A., BERGLUND O. (2011): Temperature and resource availability may interactively affect over-wintering success of juvenile fish in a changing climate. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0024022>
- BRUNKE, M (2023): Der Einfluss von Nährstoffbelastungen auf die Fischfauna in Fließgewässern. Wasserwirtschaft 10: 20-27.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2021): Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland – Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr. 35, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 412 S., DOI: 10.5675/BfG\_Mitteilungen\_35.202
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. [www.klimawandelanpassung.at](http://www.klimawandelanpassung.at).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2010): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft – Kurzfassung. Wien.
- BUNZEL-DRÜKE, M. (2011): Wie reagieren Fische und Rundmäuler auf den Klimawandel? Natur in NRW 4/11, S. 27-32.
- CAPON S.J., CHAMBERS L.E., MAC NALLY R. ET AL. (2013): Riparian Ecosystems in the 21st Century: Hotspots for Climate Change Adaptation?. Ecosystems 16, 359–381. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9656-1>
- CHUCHOLL, C. (2019). Dürre und Hitze 2018: Folgen für die baden-württembergischen Stein- und Dohlenkrebsbestände. AUF AUF 1: 22-27.
- CIPR (2004) : Pressions thermiques sur les eaux pendant l'été 2003. Synthèse des rapports de situation nationaux. 70<sup>e</sup> Assemblée plénière des 8 et 9 juillet 2004 – Berne. Rapport CIPR n°142f, [www.iksr.org/fr/](http://www.iksr.org/fr/).
- CIPR (2006) : Réseau de biotopes sur le Rhin, [www.iksr.org](http://www.iksr.org) - brochures.
- CIPR (2009a) : Analyse ichtyo-écologique globale et évaluation de l'efficacité des mesures en cours et des mesures envisagées dans le bassin du Rhin pour réintroduire les poissons migrateurs. Rapport CIPR n° 167 (version longue), [www.iksr.org/fr/](http://www.iksr.org/fr/)
- CIPR (2009b): Présentation de l'évolution des températures de l'eau du Rhin sur la base de températures mesurées et validées de 1978 à 2011. Rapport CIPR n° 209, [www.iksr.org/fr](http://www.iksr.org/fr)
- CIPR (2018) : Plan directeur « Poissons migrateurs 'Rhin' », rapport CIPR n° 247, [www.iksr.org/fr/](http://www.iksr.org/fr/)
- CIPR (2019) : Surveillance des étiages du Rhin et de son bassin par la CIPR. Rapport CIPR n° 261, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- CIPR (2020a) : Rapport sur l'épisode d'étiage de juillet-novembre 2018. Rapport CIPR n° 263, [www.iksr.org/fr/](http://www.iksr.org/fr/)
- CIPR (2020b) : Programme Rhin 2040. Le Rhin et son bassin : un milieu géré durablement et résilient aux impacts du changement climatique, [www.iksr.org/fr](http://www.iksr.org/fr)
- CIPR (2020c) : Le phytoplancton du Rhin 2018. Rapport CIPR n°273, [www.iksr.org/fr](http://www.iksr.org/fr)
- CIPR (2020d) : Distribution des macrophytes dans le Rhin 2018/2019. Rapport CIPR n° 274, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)

- CIPR (2020e) : Diatomées benthiques dans le Rhin 2018/2019. Rapport CIPR n° 275, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- CIPR (2021) : Plan de gestion 2022-2027 coordonné au niveau international du district hydrographique international du Rhin, [www.iksr.org/fr](http://www.iksr.org/fr)
- CIPR (2022) : Développement de la méthode et résultats du monitoring du réseau de biotopes sur le Rhin 2020, rapport CIPR n° 284, [www.iksr.org/fr/](http://www.iksr.org/fr/)
- CIPR (2023) : Programme d'analyse biologique 'Rhin' 2024/2025. Rapport CIPR n°291, [www.iksr.org/fr](http://www.iksr.org/fr)
- CIPR (2024a) : Scénarios de débits induits par le changement climatique pour le bassin du Rhin. Rapport CIPR n° 297, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- CIPR (2024b) : Rapport sur l'épisode d'étiage et de sécheresse de 2022. Rapport CIPR n° 299, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- CIPR (2024c) : Évolution des températures de l'eau du Rhin de 1978 à 2023. Rapport CIPR n° 301, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- CIPR (2025) : Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development– update IPCC AR5. Rapport CIPR n° 302, [www.iksr.org](http://www.iksr.org)
- COPP G., BRITTON J., CUCHEROUSSET J., GARCÍA-BERTHOU E., KIRK R., PEELER E., STAKÉNAS S. (2009): Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges, *Fish and Fisheries*, 10, 252–282
- DORENBOSCH, M., DE LA HAYE, M., VAN DE HATERD, R., HUTHOFF, F., VAN KLEUNEN, A., LIEFVELD, W. (2022): Klimateffecten op riviernatuur, Rapport nummer OBN-2020-121-RI, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- DORIDANT, J. (2021): Etude de l'impact du changement climatique sur les communautés vivantes du Rhin et plus particulièrement les poissons grands migrateurs. [https://infodoc.agroparistech.fr/doc\\_num.php?explnum\\_id=6780](https://infodoc.agroparistech.fr/doc_num.php?explnum_id=6780)
- ELLIOT, J. M. (1981): Some Aspects of Thermal Stress on Freshwater Teleosts. In *Stress and Fish* (A. D. Pickering, ed), S. 209-245. London: Academic Press.
- Euro-Limpacs-Projekt (2009): Definition of indicators for Climate Change effects on freshwater ecosystems. <http://www.climate-and-freshwater.info>.
- EUROPEAN COMMISSION (2009): River Basin Management in a changing climate. Technical Report 2009-040, Guidance document No. 24, Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). (Leitfaden Nr. 24 zur Gemeinsamen Umsetzungsstrategie zur Wasserrahmenrichtlinie).
- GRÖNITZ, KATZMAREK UND SIEPE (1994): Grundsatzpapier Auenenschutz und Auenrenaturierung. Materialien zum Integrierten Rheinprogramm. Karlsruhe
- HEGER A, BECKER JN, VASCONEZ NAVAS LK & ESCHENBACH A (2021): FACTORS CONTROLLING SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN HARDWOOD FLOODPLAIN FORESTS OF THE LOWER MIDDLE ELBE RIVER. *GEODERMA* 404: 115389. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.GEODERMA.2021.115389](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115389)
- HOFFMANN, A., KAUEMANN, G., WINDMANN, M., TISCHBIERECK, J., LEONHARD, V. (2011): Temperaturmanagement in der Wupper. *Natur in NRW* 1/11, S. 34-40.
- HUNZINGER, L. (2004): Flussaufweitungen: Möglichkeiten und Grenzen. *Wasser Energie Luft*. 96. Jahrgang, Heft 9/10, Schweiz.
- IBISCH, Ralf B. (2004): Biogene Steuerung ökologischer Systemeigenschaften des hyporheischen Interstitials der Lahn (Hessen). *Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Wasserwesen, Institut für Hydrobiologie, Dresden*.

- ICES (2017): Report of the Workshop on Potential Impacts of Climate Change on Atlantic Salmon Stock Dynamics (WKCCISAL), 27–28 March 2017, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2017/ACOM:39. 90 S.
- IMSLAND, A.K., FOSS, A., FOLKVORD, A., STEFANSSON, S.O., T.M. JONASSEN (2005): The interrelation between temperature regimes and fish size in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*): effects on growth and feed conversion efficiency. *Fish Physiology and Biochemistry* (2005) 31:347-361.
- JAARSMAN, N., KLINGE, M., POT, R., (red.) (2007): Achtergronddocument referenties en maatlatten visserij ten behoeve van de kadderrichtlijn water.
- JUNK, W.J., BAYLEY, P.B., SPARKS, R.E. (1989). The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. P. 110-127. In D. Dodge (ed.) Proceedings of the International Large River Symposium. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 106.
- KANGUR A., KANGUR P., KANGUR K., MÖLS T. (2007): The role of temperature in the population dynamics of smelt *Osmerus eperlanus eperlanus m. spirinchus* Pallas in Lake Peipsi (Estonia/Russia). *Hydrobiologia* 584, 433–441.
- KANGUR A., KANGUR P., KANGUR K., MÖLS T. (2013): Long-term effects of concurrent eutrophication and environmental extremes on the fish community of Lake Peipsi (Estonia/Russia). Submitted to *Fishery Management and Ecology*.
- KANGUR K., KANGUR A., KANGUR P., LAUGASTE R. (2005): Fish kill in Lake Peipsi in summer 2002 as a synergistic effect of cyanobacterial bloom, high temperature and low water level. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. *Biology Ecology* 54, 67–80.
- KARATAYEV, A.Y. & BURLAKOVA, L.E. (2022): What we know and don't know about the invasive zebra (*Dreissena polymorpha*) and quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels. *Hydrobiologia*, <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04950-5>.
- KÄRCHER O., FLÖRKE M., MARKOVIC D. (2021): Different life stage, different risks: Thermal performance across the life cycle of *Salmo trutta* and *Salmo salar* in the face of climate change. *Ecology and Evolution*, <https://doi.org/10.1002/ece3.7731>.
- KHALANSKI, M., CARREL, G., DESAINT, B., FRUGET, J.-F., OLIVIER, J.-M., POIREL, A., SOUCHON, Y. (2008): Étude thermique globale du Rhône - Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés (*Global thermal study of the Rhone - Hydrobiological impact of cumulative warming - with english summary*). *Hydroécologie Appliquée* 16: 53-108.
- Kleinteich, J., Frassl, M.A., Schulz, M., Fischer, H. (2024): Climate change triggered planktonic cyanobacterial blooms in a regulated temperate river. *Sci Rep* 14, 16298 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66586-w>
- KLIWA (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturlauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung. Bericht im Auftrag des KLIWA-Konsortiums. 59 S. + Anhang.
- KLIWA (2010): Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (Kooperation zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD), dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg, dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit und dem Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz: „Fließgewässerbiologie und Klimawandel“
- KLIWA (2023): 2-Grad-Ziel für unsere Bäche - Wassertemperatur und Beschattung. KLIWA-Kurzbericht, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)
- KLIWA (2018): KLIWA Index<sub>MZB</sub>: Liste mit allen Makrozoobenthosarten und den taxaspezifischen Temperaturpräferenzen. Anhang zum Projektabschlussbericht –

Praxistest und Verifizierung des KLIWA-Index<sub>MZB</sub>, Projektteam umweltbüro essen – chromgruen – SENCKENBERG im Auftrag der KLIWA-Kooperation.  
<https://www.kliwa.de/publikationen-projektberichte.htm>

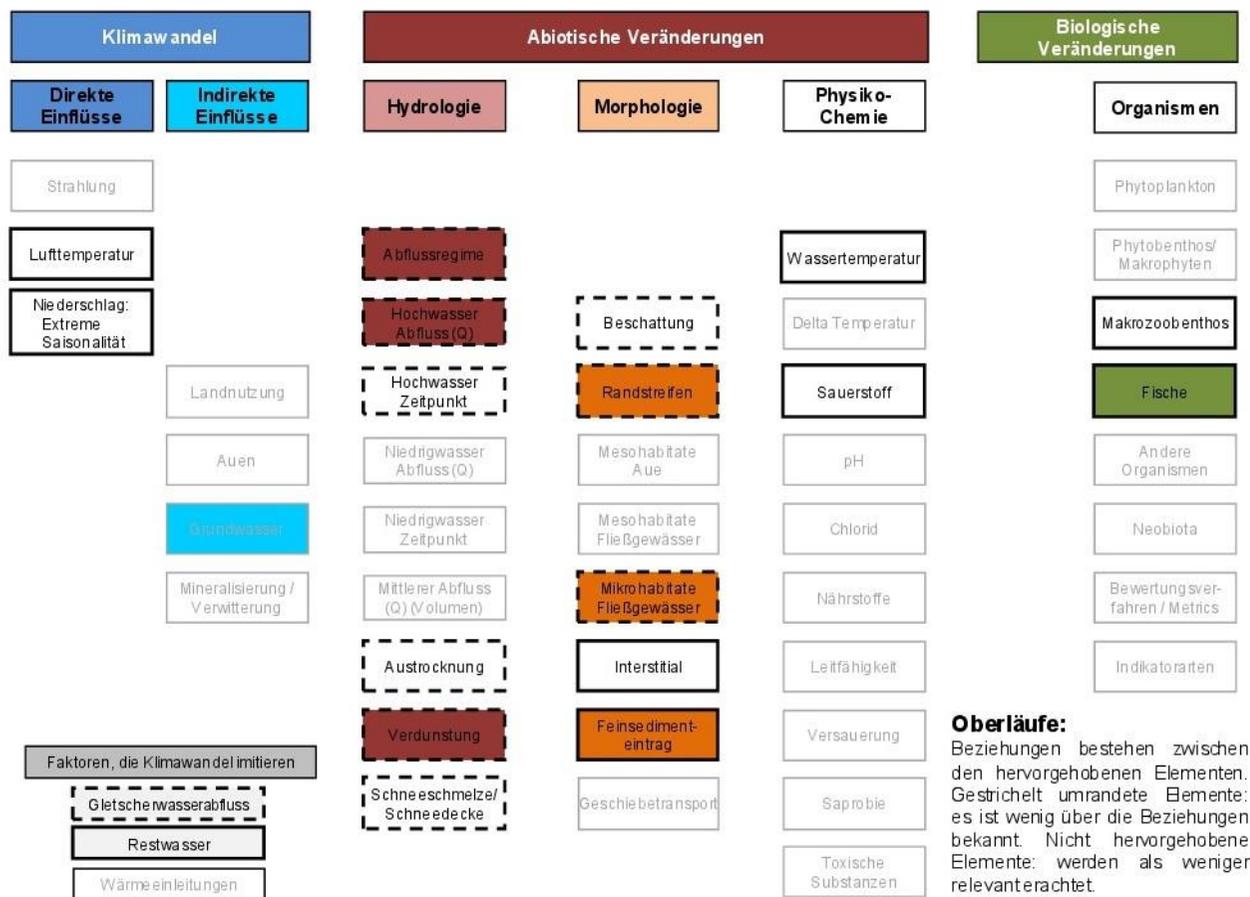
- KÖLLNER P., GROSS C., SCHÄPPI B., FÜSSLER J., LERCH J., NAUSER M. (2017): Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1706: 148 S.
- KOOP, J.H.E., BERGFELD, T., KELLER, M. (2007): Einfluss von extremen Niedrigwasser-Ereignissen und gleichzeitigen "Hitzeperioden" auf die Ökologie von Bundeswasserstraßen. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51, Heft 5, S. 202-209.
- KURSTJENS, G., NIJSSEN, M., VAN WINDEN, A., DORENBOSCH, M., MOLLER PILLOT, H., VAN TURNHOUT C., VELDT, P. (2020): Natte overstromingsvlakten in het rivierengebied. Ecologisch functioneren en ontwikkelkansen, rapport 2020/OBN237-RI. VBNE, Driebergen.
- KÜTTEL, S., PETER, A., WÜEST, A. (2002): Temperaturpräferenzen und –limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer. Rhône Revitalisierung, Publikation Nummer 1.
- LAWÄ (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2021): Temperaturempfindlichkeiten der Fischgemeinschaften in deutschen Fließgewässern – Überprüfung der Orientierungswerte für die Temperatur. Abschlussbericht. Projekt O 10.20 des Länderfinanzierungsprogramms „Wasser, Boden und Abfall“ 2020.  
[http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWÄ/AO/O\\_10\\_20\\_211119\\_Endbericht\\_O10.20\\_TempEmpf\\_Fische.pdf](http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/static/LFP/Dateien/LAWÄ/AO/O_10_20_211119_Endbericht_O10.20_TempEmpf_Fische.pdf)
- LUWG (Hrsg.) (2011): Neubürger in Rhein und Mosel. – Infoblatt Gewässerschutz 01/11.
- MAKASKE, B., MAAS, G. (2013): Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Klimaatverandering en riviernatuur in de periode 2015-2050; Een verkenning van effecten en adaptatiemogelijkheden. Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2484. 56 S.; 25 Abb.; 11 Tab.; 39 Ref.
- MARIJS, L.B., ACHTERKAMP, B., COLLAS, F.P.L., DE LA HAYE, M., DORENBOSCH, M., LIEFVELD, W.M., MAATHUIS, M., VAN GEEST, G., VAN KESSEL, N. (2020): KRW Leidraad Rijkswaterstaat.
- MÉTÉO-SUISSE (2022) : bulletin climatologique été 2022, Zurich.
- MKULNV (MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ NRW) (2010): Natur im Wandel: Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MOSNER E., HORCHLER P. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.06. KLIWAS-53/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_53/2014\_5.06, URL:  
[http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_53\\_2014\\_5.06.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_53_2014_5.06.pdf)
- NLWKN (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz) (Hrsg.) (2011): Vollzugshinweise für Arten und Lebensraumtypen.  
[https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/natura\\_2000/vollzugshinweise\\_arten\\_und\\_lebensraumtypen/vollzugshinweise-fuer-arten-und-lebensraumtypen-46103.html#fische](https://www.nlwkn.niedersachsen.de/naturschutz/natura_2000/vollzugshinweise_arten_und_lebensraumtypen/vollzugshinweise-fuer-arten-und-lebensraumtypen-46103.html#fische)
- NOTTER, B., STAUB, E. (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050. GWA Gas, Wasser, Abwasser. Nr. 1/2009: 39-44. HOP, J, Kleppe, R., Koole, M., Bleile, N. (2022): Overleving van jonge vis in het IJsselmeer – literatuurstudie. Rapportnr. 20220253/01. ATKB, Waardenburg.

- OEXLE, S, GAYE-SIESSEGGER, J, BASEN, T, BRINKER, A (2020): Untersuchungen zu den Auswirkungen der Extremsommer 2018 und 2019 auf die Fischbestände in baden-württembergischen Fließgewässern. AUF AUF: 1–12
- OFEFP (2002) : Einwanderung von Fischarten in die Schweiz – Rheineinzugsgebiet. Mitteilungen zur Fischerei, Nr. 72, Bern.
- OFEFP (2004) : Canicule de 2003 : conséquences pour les eaux (rapport en allemand, résumé en français). Cahier de l'environnement n° 369, Berne
- OFEV (2006) : Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2020–2025. Office fédéral de l'environnement, Berne. 164 p.
- OFEV (2012) : Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet « Changement climatique et hydrologie en Suisse » (CCHydro). Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement » n° 1217, 76 p.
- OFEV (2016) : la canicule et la sécheresse de l'été 2015. Impacts sur l'homme et l'environnement. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement n° 1629, 108 p.
- OFEV (2019) : la canicule et la sécheresse de l'été 2018. Impacts sur l'homme et l'environnement. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement n° 1909, 91 p.
- OFEV (2020) : Changements climatiques en Suisse. Indicateurs des causes, des effets et des mesures. Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement, n° 2013 : 105 p.
- OFEV (2021) : Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 2101 : 134 p
- PARTENARIAT POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CLIMAT (2011) : « Paquet Climat » (6 mai 2011), document de synthèse du *groupe de pilotage* pour une stratégie nationale de développement durable, Luxembourg.
- PONT, D. (Koordinator) (2003): Programme GICC – AQUABIO. Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques et riveraines françaises - Rapport final. CNRS, Université de Lyon.
- RABITSCH, W., WINTER, M., KÜHN, E., KÜHN, I., GÖTZL, M., ESSL, F., GRUTTKE, H. (2010): Auswirkungen des rezenten Klimawandels auf die Fauna in Deutschland. BfN-Heft Nr. 98, Bonn.
- REESE, M. (2011): Die Anpassungen an den Klimawandel im Bewirtschaftungssystem der Wasserrahmenrichtlinie. Zeitschrift für Wasserrecht, Heft 2/2011, S. 61-82.
- ROBINSON, C.A., THOM, T.J., LUCAS, M. C. (2008): Ranging behaviour of a large freshwater invertebrate, the white-clawed crayfish *Austropotamobius pallipes*. *Freshwater Biology*, 44, 509–521. Available from: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2000.00603.x>
- ROS, A., SCHMIDT-POSTHAUS, H., BRINKER, A. (2022): Mitigating human impacts including climate change on proliferative kidney disease in salmonids of running waters. *Journal of Fish Diseases*, Volume 45, Issue 4, <https://doi.org/10.1111/jfd.13585>
- RYTWINSKI, T., LIN, H.-Y., HARPER, M., SMOKOROWSKI, K.E., SMITH, A., REID, J.L., TAYLOR, J.J., BIRNIE-GAUVIN, K., BRADFORD, M.J., CROSSMAN, J.A., KAVANAGH, R., LAPOINTE, N.W.R., TURGEON, K., COOKE, S.J. (2023): How do natural changes in flow magnitude affect fish abundance and biomass in temperate regions? A systematic review. *Ecological Solutions and Evidence*, Vol. 4, 1.

- SCHLÄPPI, T. (2021): Atlantischer Lachs und Klimawandel, Zusammenstellung bestehender Studien und Grundlagen, Bericht im Auftrag des WWF Schweiz, 24 S.
- SCHMIDT, M., SCHINDLER, D., ARNETH, A., KESSELRING, S., LÖBBE, S., PEHNT, M. (2023): Klimawandelbedingte Gebietsniederschlagsänderung in Baden-Württemberg von 1881 bis 2099. Kurzpapier des Klima-Sachverständigenrats. 01109I2023.
- SCHULTE L. & A. VAN WINDEN (2024): Effect van droogte en lage rivierafvoeren op riviernatuur. Bureau Stroming in opdracht van WWF. effect droogte en lage rivierafvoeren op riviernatuur 4 2024.pdf (levenderivieren.nl)
- STAHL, K., WEILER, M., VAN TIEL, M., KOHN, I., HÄNSLER, A., FREUDIGER, D., SEIBERT, J., GERLINGER, K., MORETTI, G. (2022): Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries. CHR report no. I 28. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad.
- STERUD, E., FORSETH, T., UGEDAL, O., POPPE, T.T., JOERGENSEN, A., BRUHEIM, T., FJELDSTAD, H.-P., MO, T. A. (2007): Severe mortality in wild Atlantic salmon *Salmo salar* due to proliferative kidney disease (PKD) caused by *Tetracapsuloides bryosalmonae* (Myxozoa). *Disease of Aquatic Organisms*, 77: 191-198.
- STOWA (Stichting toegepast onderzoek waterbeheer) (2011): Een frisse blik op warmer water. Over de invloed van klimaatverandering op de aquatische ecologie en hoe je de negatieve effecten kunt tegengaan. Stowa-Bericht Nr. 2011-20 im Auftrag von Rijkswaterstaat waterdienst. Amersfoort.
- TISSOT, L., SOUCHON, Y. (2010): Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen (*Synthesis on thermal tolerances of the principal freshwater fish species of large Western Europe rivers*). *Hydroécologie Appliquée*, Band 17, S. 17-76.
- VAN AALDEREN, R., BEELEN, P. (2011): De opkomst van de meerval in Nederland. Verspreidingsonderzoek. Sportvisserij Nederland, Bilthoven.
- VAN DER GRINTEN, E.; VAN HERPEN, F.C.J.; VAN WIJNEN, H.J.; EVERS, C.H.M.; WUIJTS, S. EN VERWEIJ, W. (2007): Afleiding maximumtemperatuurnorm goede ecologische toestand (GET) voor Nederlandse grote rivieren. RIVM Rapport 607800003/2007
- VAN KESSEL, N., DORENBOSCH, M., DE BOER, M.R.M., LEUVEN, R.S.E.W., VAN DER VELDE, G. (2011): Competition for shelter between four invasive gobiids and two native benthic fish species. *Current Zoology* 57: 844-851.
- VANNOTE, R. L., MINSHALL, G.W., CUMMINS, K.W., SEDELL, J.R., CUSING, C.E. (1980). The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137
- VERSTIJNEN, Y., SMOLDERS, A.J.P., WESTENDORP, P.J., DE SENERPONT DOMIS, L., TEURLINCX, S., VAN GEEST, G., GROEN, M., DORENBOSCH, M., VAN ELS, P. (2022): Diepe uiterwaardplassen: verondiepen of niet? Rapportnummer 2022/OBN252-RI, VBNE, Driebergen.
- WAHLI, T., KNUESSEL, R., BERNET, D., SEGNER, H., PUGOVKIN, D., BURKHARDT-HOLM, P., ESCHER, M., SCHMIDT-POSTHAUS, H. (2002): Proliferative kidney disease in Switzerland: current state of knowledge. *Journal of Fish Disease*, 25: 491-500.
- WIESNER, C., WOLTER, C., RABITSCH, W., NEHRING, S. (2010): Gebietsfremde Fische in Deutschland und Österreich. *BfN-Skripten* 279, 192 S.
- XENOPOULOS, M. A., LODGE, D. M., ALCAMO, J., MÄRKER, M., SCHULZE, K. VAN VUUREN, D. P. (2005): Scenarios of freshwater fish extinctions from climate change and water withdrawal. *Global Change Biology*, 11/10: 1557-1564.

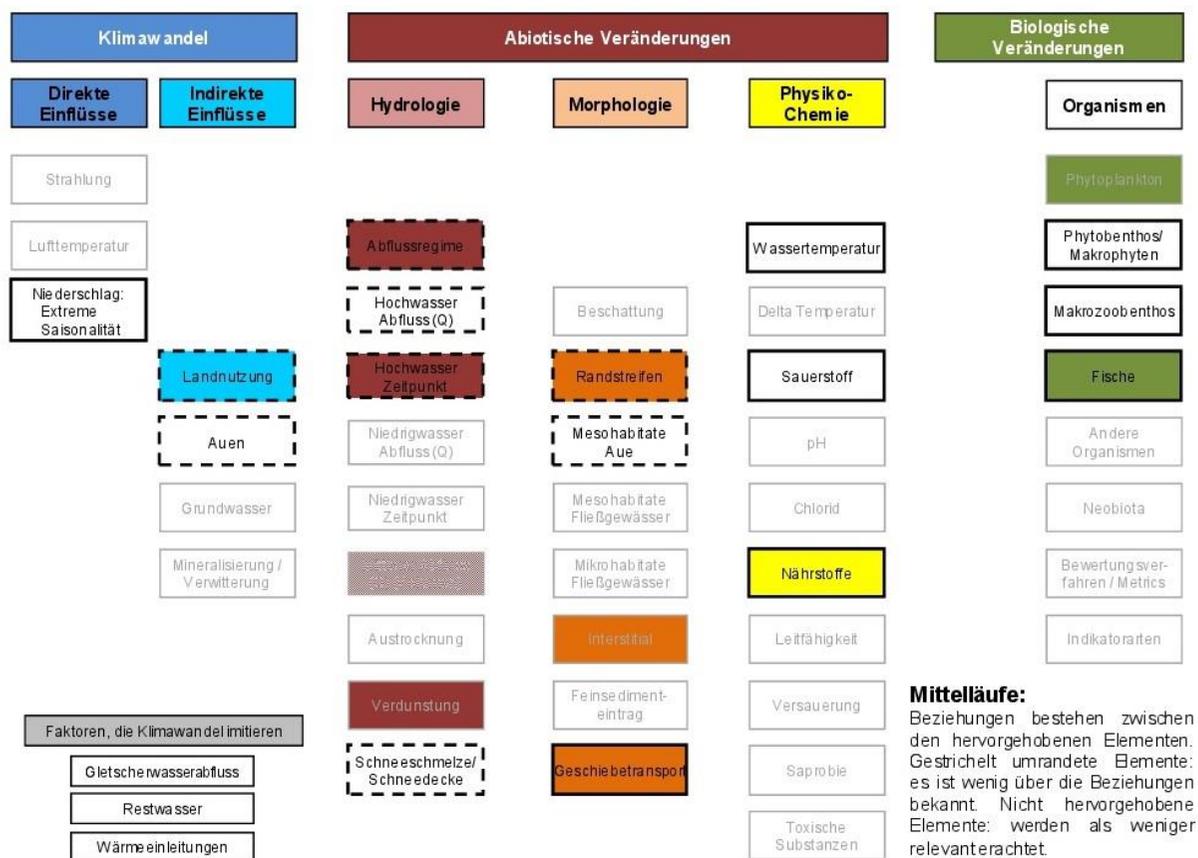
## Annexes

### Annexe 1 (légende des figures 1 à 3 en fin des tableaux)



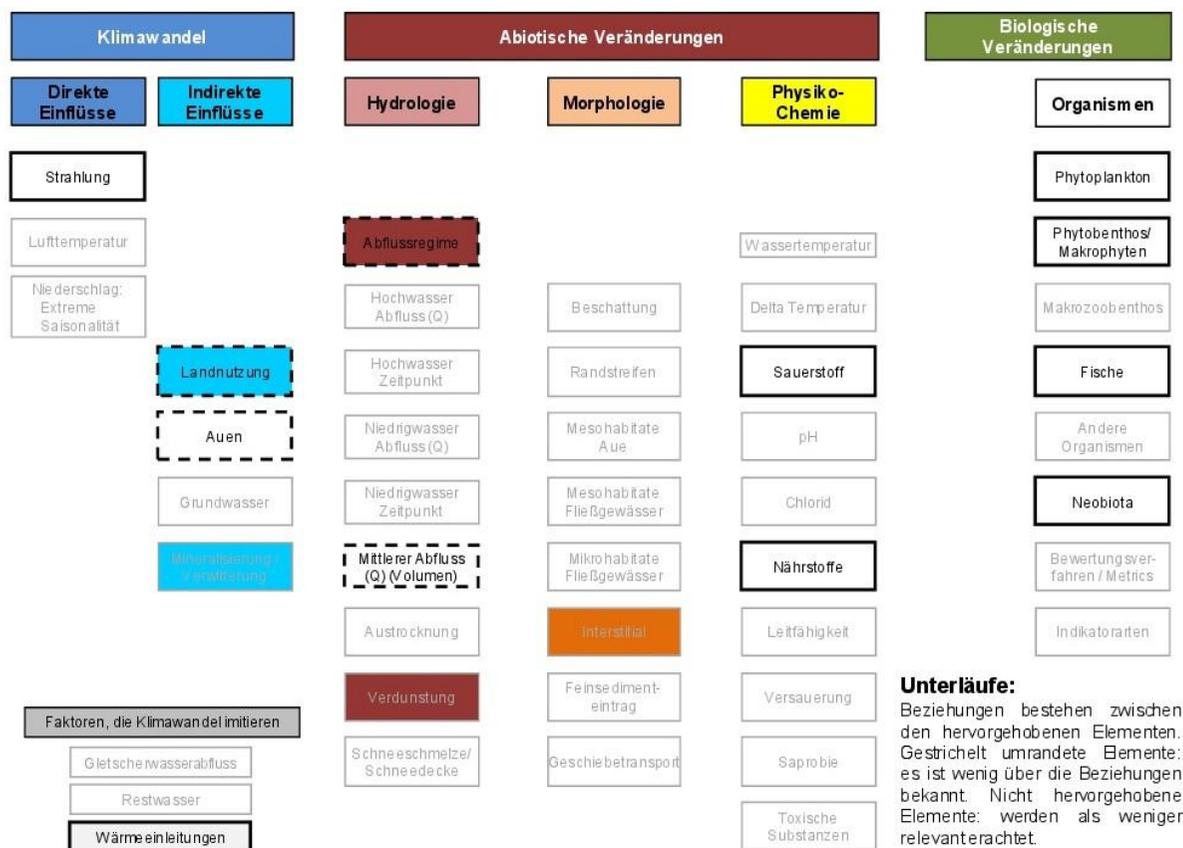
**Figure 1 : Facteurs abiotiques et groupes d'organismes du cours supérieur d'un fleuve sur lesquels un impact du changement climatique est concevable.**

Des relations existent entre les éléments mis en relief. Éléments dans un cadre en tirets : relations peu connues. Éléments en arrière-plan : pertinence jugée secondaire. Source : <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>



**Figure 2 : Facteurs abiotiques et groupes d'organismes du cours moyen d'un fleuve sur lesquels un impact du changement climatique est concevable.**

Des relations existent entre les éléments mis en relief. Éléments dans un cadre en tirets : relations peu connues. Éléments en arrière-plan : pertinence jugée secondaire. Source : <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>



**Figure 3 : Facteurs abiotiques et groupes d'organismes du cours inférieur d'un fleuve sur lesquels un impact du changement climatique est concevable.**

Des relations existent entre les éléments mis en relief. Éléments dans un cadre en tirets : relations peu connues. Éléments en arrière-plan : pertinence jugée secondaire. Source : <https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm>

Allemand	Français
<b>Klimawandel</b>	<b>Changement climatique</b>
<b>Direkte Einflüsse</b>	<b>Impacts directs</b>
Strahlung	Rayonnement
Lufttemperatur	Température de l'air
Niederschlag: Extreme, Saisonalität	Précipitations : valeurs extrêmes/saisonniers
<b>Indirekte Einflüsse</b>	<b>Impacts indirects</b>
Landnutzung	Occupation des sols
Auen	Milieu alluvial
Grundwasser	Eaux souterraines
Mineralisierung / Verwitterung	Minéralisation / altération atmosphérique
<b>Faktoren, die den Klimawandel imitieren</b>	<b>Facteurs imitant les impacts du changement climatique</b>
Gletscherwasserabfluss	Débit d'eaux de fonte des glaciers
Restwasser	Débit réservé
Wärmeeinleitungen	Rejets thermiques
<b>Abiotische Veränderungen</b>	<b>Modifications abiotiques</b>
<b>Hydrologie</b>	<b>Hydrologie</b>
Abflussregime	Régime hydrologique
Hochwasser-Abfluss (Q)	Débit de crue (Q)
Hochwasser-Zeitpunkt	Phase de crue
Niedrigwasser-Abfluss (Q)	Débit d'étiage (Q)
Niedrigwasser-Zeitpunkt	Phase d'étiage
Mittlerer Abfluss (Q) (Volumen)	Débit moyen (Q) (volume)
Austrocknung	Dessèchement
Verdunstung	Evaporation
Schneesmelze / Schneedecke	Fonte des neiges / couverture nivale
<b>Morphologie</b>	<b>Morphologie</b>
Beschattung	Ombrement
Randstreifen	Bandes riveraines
Mesohabitate Aue	Mésohabitats du milieu alluvial
Mesohabitate Fließgewässer	Mésohabitats des rivières
Mikrohabitate Fließgewässer	Microhabitats des rivières
Interstitial	Interstitial
Feinsedimenteintrag	Apport de sédiments fins
Geschiebetransport	Charriage
<b>Physiko-Chemie</b>	<b>Physicochimie</b>
Wassertemperatur	Température de l'eau
Delta Temperatur (= Amplitude)	Température delta (= amplitude)
Sauerstoff	Oxygène
pH	pH
Chlorid	Chlorures
Nährstoffe	Nutriments
Leitfähigkeit	Conductivité
Versauerung	Acidification
Saprobie	Saprobie
Toxische Substanzen	Substances toxiques
<b>Biologische Veränderungen</b>	<b>Modifications biologiques</b>
<b>Organismen</b>	<b>Organismes</b>
Phytoplankton	Phytoplancton
Phytobenthos / Makrophyten	Phytobenthos / macrophytes
Makrozoobenthos	Macrozoobenthos
Fische	Poissons
Andere Organismen	Autres organismes
Neobiota	Néobiotes
Bewertungsverfahren / Metrics	Méthode d'évaluation / métrique
Indikatorarten	Espèces indicatives

## Annexe 2

**Tableau 1 : Impact pronostiqué d'une hausse de la température sur les poissons et les cyclostomes dans le bassin du Rhin et d'autres rivières d'Europe centrale**

Explications : **Règlement communautaire sur l'anguille** : N° 1100/2007/CE du Conseil du 18/9/2007 comprenant des mesures de reconstitution du stock d'anguilles européennes ; **directive FFH ou faune-flore-habitats** n° 92/43/CEE du 21.5.1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages ; **CITES** : convention de Washington sur la protection des espèces

Espèce de poisson - appellation scientifique	Espèce de poisson – nom français	Prévision	Statut de protection, origine	Remarque <u>Températures tolérées / valeurs extrêmes (et optimales)</u>	Source
<i>Abramis brama</i>	Brème	Hausse		Œufs 8-28 °C (18-23 °C) Larves 17,5-19,5 °C Juvéniles 14-34 °C Adultes 8-28 °C / 35 °C (23-26 °C) Période de frai 8-23 °C / 28 °C (12-20 °C) Agrandissement de l'habitat dans les rivières des massifs moyens et dans les Alpes	KÜTTEL et al. 2002, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	Baisse		Baisse pronostiquée dans les fleuves français pour une hausse de température de 2 °C	PONT & CRANE dans PONT 2003
		Hausse		Peut tolérer des températures de l'eau > 20 °C ; forte hausse prévue Œufs 21-27 °C Larves 22,5 °C Adultes 20-38 °C (20-30 °C) Période de frai 14-28 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, MKUNLV 2010, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Alburnoides bipunctatus</i>	Schneider	Réception		Baisse due à une extension probablement plus faible de la région à ombres Œufs 16,3-19,3 °C Larves 12-24 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010

				Adultes 1,9-23,9 °C Période de frai 12-25 °C	
<i>Alosa alosa</i>	Grande alose	Hausse	FFH annexes II & V	Hausse due au programme de réintroduction et non au changement climatique	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Anguilla anguilla</i>	Anguille	Baisse	CITES annexe II, règlement européen sur l'anguille	Juveniles (civelles) : > 15 °C Adultes : > 0/ 8 °C, < 30 / 39 °C (8-29 °C / 22-23 °C) Espèce menacée par le stress et les maladies en période de canicule ; la vibriose est plus fréquente	KÜTTEL et al. 2002, CIPR 2004
				Pas de modification	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Aspius aspius</i>	Aspe	Hausse	FFH annexes II & V		BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Barbus barbus</i>	Barbeau	Baisse	FFH annexe V	pour une hausse de température de 2 °C	PONT 2003
		Hausse		Œufs 12,1-21 °C (16-19 °C) Larves 14,8-18,9 °C (18,5 °C) Juveniles 7-27 °C Adultes 7-30 °C Période de frai 8-20 °C / 29 °C Extension de l'habitat dans les rivières des massifs moyens et dans les Alpes	KÜTTEL et al. 2002
<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	Hausse		Peut tolérer des températures de l'eau > 20°C Il est possible que les habitats de la loche franche augmentent un peu dans l'ensemble dans les rivières du Bade-Wurtemberg.	MKUNLV 2010, BUNZEL-DRÜKE 2011, BASEN et al. 2022a
		Baisse		Baisse pronostiquée dans les fleuves français pour une hausse de température de 2 °C	PONT 2003
<i>Blicca bjoerkna</i>	brème bordelière	Hausse		Œufs 15-20 °C Adultes 15-25 °C Période de frai 9,6-29 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010

<i>Carassius carassius</i>	Carassin commun	Baisse		Baisse due à l'assèchement en été de petites surfaces d'eaux dormantes et de fossés	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Chondrostoma nasus</i>	Hotu	Baisse		Œufs : 8,6-19 °C Larves 10-28 °C (15 °C) Juvéniles 7-27 °C Adultes 4-24 °C Période de frai 6-16,2 °C	KÜTTEL et al. 2002, Pont 2003, DIVERSES SOURCES DANS TISSON & SOUCHON 2010
<i>Cottus gobio</i>	Chabot	Baisse	FFH annexe II	Juvéniles < 28 °C (5-27 °C) Adultes < 16-20 °C (10-15 °C) Période de frai 7-14 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe	Hausse	Espèce très répandue du fait des alevinages	Période de frai : > 17 °C Juvéniles : 16-25 °C Taux de reproduction élevé en cas d'inondation de la végétation terrestre en mai/juin	BALON 1995, STEFFENS 2008 et al. dans BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Esox lucius</i>	Brochet			Œufs 2-23 °C (8-15 °C) Larves 12,3-21 °C Juvéniles 9-28 °C (26 °C) Adultes 10-30 °C / 34 °C (20-26 °C) Période de frai 0-20 °C (7-17 °C)	EUROLIMPACS; KÜTTEL et al. 2002, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Epinoche	(Baisse)		Espèce pionnière à forte capacité d'adaptation et susceptible de profiter de l'assèchement temporaire des rivières mais toutefois peu compétitive. Évite en outre les températures supérieures à 20 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002
<i>Gobio gobio</i>	Goujon	Baisse		Œufs 16-20 °C Larves 20,5 °C Juvéniles 7-27 °C Adultes 5-30,9 °C / 37 °C (15-27 °C) Période de frai 12-17 °C	KÜTTEL et al. 2002, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010

<i>Gymnocephalus cernuus</i>	Grémille	Baisse		Œufs 9-21 °C Larves 16,5-30 °C Juvéniles 7-24,8 °C Période de frai 2-18 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Lampetra planeri</i>	Lamproie de Planer	Baisse	FFH annexe II	Baisse pronostiquée dans les fleuves français pour une hausse de température de 2 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, PONT 2003
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche-soleil	Baisse		Espèce allochtone Œufs 22,5 °C Larves 20,4-23,5 °C Juvéniles 13-28 °C (31,5 °C) Adultes 11,9-40 °C (24,2-30 °C) Période de frai 20-25 °C / 22,5 °C	Pont 2003, sources diverses dans TISSON & SOUCHON 2010
	Perche-soleil commune	Hausse			BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Leucaspius delineatus</i>	Able de Heckel	Baisse		Baisse due à l'assèchement en été de petites surfaces d'eaux dormantes et de fossés	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Leuciscus (Squalius) cephalus</i>	Chevesne	Hausse		Œufs 12,3-30 °C (17-23 °C) Larves 14-25 °C (17,5-25 °C) Juvéniles 7-24 °C Adultes 7-27 °C / 34 °C (8-25 °C) Période de frai 14-20 °C Propagation vers l'amont	Bunzel-Drüke 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Leuciscus leuciscus</i>	Vandoise	Baisse		Œufs 4-23 °C (6-15 °C) Larves 16-25 °C (12,3-17,5 °C) Juvéniles & adultes 10-20 °C Période de frai 5-16,5 °C (8-9 °C)	KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, diverse in TISSON & SOUCHON 2010

<i>Lota lota</i>	Lotte de rivière	Baisse		Forte baisse attendue, entre autres dans l'IJsselmeer, du fait d'un manque d'oxygène temporaire	BUNZEL-DRÜKE 2011, LAMMENS 2012, communication orale
<i>Misgurnus fossilis</i>	Loche d'étang	Baisse	FFH annexe II	Baisse due à l'assèchement en été de petites surfaces d'eaux dormantes et de fossés	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Neogobio kessleri</i>	Gobie de Kessler	Hausse	Espèce allochtone	Originaire de la mer Noire 25 °C à 30 °C, concurrente et prédatrice d'espèces autochtones et de leur frai, entre autres le saumon	KLIWA 2010
<i>Neogobio melanostomus</i>	Gobie à taches noires	Hausse	Espèce allochtone	Voir gobie de Kessler	KLIWA 2010
<i>Neogobio fluviatilis</i>	Gobie fluviatile	./.	Espèce allochtone	Devrait moins profiter du changement climatique que d'autres espèces de gobie du fait de sa marge de températures optimales relativement étroite comprise entre 4°C et 20°C	KLIWA 2010
<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Truite arc-en-ciel	Hausse	Espèce introduite pour l'exploitation	Œufs < 16 / 18 °C (8-11 °C) Juvéniles 26 °C (17 °C) Adultes < 26 °C (16-19 °C) Espèce introduite à des fins commerciales ; moins sensible aux températures plus élevées de l'eau que la truite fario ; susceptible d'évincer cette dernière.	BUNZEL-DRÜKE 2011, KLIWA 2010
<i>Osmerus eperlanus</i>	Eperlan	Baisse		Le manque d'oxygène dans les lacs (par ex. dans l'IJsselmeer) peut atteindre un niveau létal pour l'éperlan	LAMMENS 2012, communication orale
		./.		Pas de modification des peuplements pronostiquée pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche fluviatile	Hausse ?		Œufs 5-21 °C Larves 5-30 °C (11-15,5 °C) Juvéniles < 8 °C / < 36 °C (25 °C) Adultes 10-31 °C / 36,2 °C	Sources diverses dans TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al.2022a

				Période de frai 5-19 °C	
<i>Phoxinus phoxinus</i>	Vairon	Baisse		Baisse due à une extension probablement plus faible de la région à ombres	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Pseudorasbora parva</i>	Goujon asiatique	Baisse	Espèce allochtone	Baisse due à l'assèchement en été de petites surfaces d'eaux dormantes et de fossés	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Pungitius pungitius</i>	Epinochette	Baisse		Baisse due à l'assèchement en été de petites surfaces d'eaux dormantes et de fossés	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Rhodeus amarus</i>	Bouvière	Hausse	FFH annexe II	Adultes 12-30 °C / 37 °C (25 °C) Période de frai 12-22 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	Hausse		Œufs 5-27 °C (12-20 °C) Larves 17,5 °C Juvéniles 7-21 °C Adultes 12-30 °C / 36 °C (8 / 20-25 °C) Période de frai 5-22 °C (8-19 °C)	KÜTTEL et al. 2002, diverses sources dans TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al. 2022a
<i>Salmo trutta</i>	Truite de rivière, truite de mer et truite lacustre	Baisse		Œufs 0-13 °C (7-12 °C) Juvéniles < 23 / 28 °C (6-14 °C / 8-13 °C) Adultes < 25 / 28 °C (4-19 °C / 14-17 °C) Période de frai 1-10 °C / 6 °C  Baisse probable, au moins dans le sud de l'Europe, mais avantage éventuel plus au nord du fait de la survie des alevins pendant les hivers plus doux. Extinction possible là où elle ne peut pas migrer vers des zones plus élevées.	BUNZEL-DRÜKE 2011, EUROLIMPACS, MKUNLV 2010, NOTTER & STAUB 2009, PONT 2003, WEBB & WALSH 2004 in WWF 2009, BASEN et al. 2022a, KÜTTEL et al. 2002
<i>Salmo salar</i>	Saumon	Baisse	FFH annexe II & annexe V (en eau douce)	Œufs < 16 °C (4-11 °C) Juvéniles < 17°C (< 10°C) Alevins < 23°C Saumons d'été (âgés de 2-3 mois) < 28,7-29,2 °C	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, RABITSCH et al. 2010

				<p>Tacons (0+ bis 1+) &lt; 27,4-32,8 °C</p> <p>Smolts dévalants &lt; 19°C (7-14,3 °C)</p> <p>Œufs 28-32 °C (9-17 °C)</p> <p>Période de frai &lt; 10 °C (6-8 °C)</p> <p>Interruption de la migration à env. 25°C</p> <p>Une légère hausse de température en hiver a des impacts positifs sur le développement des œufs.</p> <p>Classe de risque moyen dans le cadre d'une analyse de sensibilité au climat.</p>	
<i>Salvelinus fontinalis</i>	Saumon de fontaine	Baisse	Espèce allochtone	Espèce présente dans l'épirhithral et le métarhithral	BUNZEL-DRÜKE 2011
<i>Sander (Stizostedion) lucioperca</i>	Sandre	?		<p>Œufs 3-24 °C / 25 °C</p> <p>Larves 13,1-26 °C (13,1-15,5 °C)</p> <p>Juveniles 27,3-30 °C</p> <p>Adultes &lt; 33,3 °C</p> <p>Période de frai 3-26 °C</p>	Sources diverses dans TISSON & SOUCHON 2010
<i>Silurus glanis</i>	Silure	Hausse		<p>Œufs 22-25 °C</p> <p>Juveniles &gt; 13 °C (24,5 °C)</p> <p>Adultes 7-33 °C / 27 °C</p> <p>Période de frai 17-25 °C</p>	BUNZEL-DRÜKE 2011, STOWA 2011, sources diverses dans TISSON & SOUCHON 2010, BASEN et al. 2022a
<i>Thymallus thymallus</i>	Ombre commun	Baisse	FFH annexe V	<p>Œufs 6-13 / 14°C (9°C)</p> <p>Adultes &lt; 18 / 24 °C (15-17 °C)</p> <p>Période de frai &lt; 15 °C (6-10 °C)</p> <p>Nécessite des eaux fraîches sur une largeur donnée ; là où de tels cours d'eau n'existent pas ou ne sont pas accessibles à une altitude plus élevée, l'espèce pourrait disparaître complètement.</p>	BUNZEL-DRÜKE 2011, KÜTTEL et al. 2002, PONT 2003, NOTTER & STAUB 2009, RABITSCH et al. 2010, BASEN et al. 2022a

				Classe de risque moyen dans le cadre d'une analyse de sensibilité au climat.	
Analyse de toutes les espèces de poissons présentes		Hausse : 26 %		Environ un tiers des espèces de poissons et des cyclostomes dans le Land allemand de Rhénanie-du-Nord-Westphalie subiront globalement des impacts négatifs, ce qui est parfois dû à d'autres aspects du changement climatique.	MKUNLV 2010

**Annexe 3****Tableau 1: Mesures de lutte contre les impacts du changement climatique sur l'écologie**

<b>Mesure</b>	<b>À quelles répercussions du changement climatique cette mesure répond-elle ?</b>	<b>À quelle(s) espèce(s) cette mesure bénéficie-t-elle ?</b>	<b>Efficacité d'une mesure (court, moyen ou long terme)</b>
Préservation et élargissement des zones protégées existantes, désignation de nouvelles zones protégées	Réduction de la surface et dégradation de la qualité des habitats  Extinction ou recul d'espèces spécifiques	Espèces qui sont déjà gravement menacées par le changement climatique et espèces qui pourraient le devenir  Espèces également menacées par d'autres facteurs de stress que le changement climatique (p. ex. par la pêche)	à long terme
Adaptation des catalogues d'espèces indicatives et éval. vérification de l'état de référence (des biocénoses entre autres). La protection doit avoir lieu rapidement en fonction des nouvelles conditions environnementales.	Extinction ou recul d'espèces spécifiques	Espèces qui n'étaient pas menacées jusqu'à présent mais qui pourraient l'être à l'avenir sous l'effet du changement climatique	à long terme
Examen et recherche sur les espèces allochtones et plus particulièrement sur celles à comportement invasif	Extension de l'aire de distribution ou prolifération d'espèces exotiques envahissantes	Espèces autochtones	à long terme
Protection des processus naturels : p.ex. tolérer la succession écologique, la régénération naturelle et la libre migration des espèces	Extension de l'aire de distribution ou prolifération d'espèces exotiques envahissantes  Hausse des températures de l'eau	Espèces autochtones	à long terme

<b>Mesure</b>	<b>À quelles répercussions du changement climatique cette mesure répond-elle ?</b>	<b>À quelle(s) espèce(s) cette mesure bénéficie-t-elle ?</b>	<b>Efficacité d'une mesure (court, moyen ou long terme)</b>
Restauration de la fonctionnalité des habitats, en particulier via la mise en réseau de biotopes diversifiés	Réduction de la surface et dégradation de la qualité des habitats	Espèces autochtones ; Espèces migratrices ; Biodiversité	à long terme
Remettre en connexion les zones alluviales et les cours d'eau alluviaux	Hausse des températures de l'eau Étiages	Espèces autochtones	à long terme
Identification de zones de refuge climatiques et connexion avec les aires de répartition d'espèces piscicoles menacées.	Hausse des températures de l'eau Étiages	Toutes les espèces de poissons et en particulier les plus sensibles aux évolutions de température	à long terme
Amélioration de la continuité longitudinale / rétablissement de la libre migration des espèces aquatiques	Hausse des températures de l'eau Étiages	Toutes les espèces, en particulier celles sensibles aux températures et migratrices	à long terme
Ombagement des petits et moyens affluents par reboisement des berges et introduction localisée de bois mort ; tolérer l'implantation sauvage d'espèces locales	Hausse des températures de l'eau	Toutes les espèces, en particulier celles sensibles aux températures et migratrices, mais aussi les espèces sédentaires	à moyen terme
Préservation et développement d'eaux calmes profondes (raccordées) proches du naturel dans les zones alluviales en tant que refuge thermique ; prise en compte des eaux calmes profondes également dans le cadre des mesures visant à aplanir les eaux calmes dans le champ alluvial	Hausse des températures de l'eau	Espèces sensibles aux températures	à court terme, à long terme

<b>Mesure</b>	<b>À quelles répercussions du changement climatique cette mesure répond-elle ?</b>	<b>À quelle(s) espèce(s) cette mesure bénéficie-t-elle ?</b>	<b>Efficacité d'une mesure (court, moyen ou long terme)</b>
Mesures d'un plan d'urgence, comme p. ex. création de zones artificielles d'eaux fraîches et pêches de sauvetage	Hausse des températures de l'eau et stress thermique aigu	Espèces piscicoles sensibles aux températures	à court terme
Limitation et réduction des rejets thermiques anthropiques et amélioration de l'échange d'informations sur ces rejets à l'échelle internationale	Hausse des températures de l'eau	Espèces sensibles aux températures Espèces autochtones	à court terme, à long terme
Revérification de tronçons d'eau sélectionnés pour voir s'ils sont adaptés à des mesures de repeuplement	Hausse des températures de l'eau	Espèces piscicoles pour le repeuplement	à long terme
Restauration de berges et extensification de l'exploitation agricole	Érosion des sols, apports de sédiments et colmatage, en particulier en cas de pluies intenses ou de crues ; Hausse des températures de l'eau Déconnexion du fleuve et de ses zones alluviales due aux étiages croissants Dégradation de la qualité des habitats Augmentation des facteurs de stress (p. ex. apports de pesticides) en raison du changement climatique	Toutes les espèces	à long terme à court terme
Redynamisation de la dynamique du courant naturelle	Colmatage Baisse de diversité des habitats	Toutes les espèces	à long terme
Réduction de l'imperméabilisation des surfaces	Érosion des sols, apports de sédiments et colmatage, en	Toutes les espèces	à long terme

<b>Mesure</b>	<b>À quelles répercussions du changement climatique cette mesure répond-elle ?</b>	<b>À quelle(s) espèce(s) cette mesure bénéficie-t-elle ?</b>	<b>Efficacité d'une mesure (court, moyen ou long terme)</b>
	particulier en cas de pluies intenses ou de crues		
Amélioration du régime hydrologique des milieux (paysages éponges, occupation des sols favorisant l'infiltration)	Inondation, érosion des sols, apports de sédiments, colmatage, notamment en cas de pluies intenses ou de crues ; assèchement et abaissement de la ligne d'eau	Toutes les espèces	à long terme
Limitation du creusement du lit fluvial via le retrait ou la mise en place de bancs de gravier ou de sable à des endroits visés pour orienter le courant, l'installation de digues longitudinales et le rehaussement du lit mineur	Déconnexion du fleuve et de ses zones alluviales due aux étiages croissants	Toutes les espèces	à court terme, à long terme
Retrait d'aménagements artificiels de consolidation des berges	Déconnexion du fleuve et de ses zones alluviales due aux étiages croissants	Toutes les espèces	à long terme
Restauration de surfaces inondables	Assèchement et abaissement de la ligne d'eau	Toutes les espèces	à long terme



**Annexe 4 : Inventaire des synthèses disponibles à l'échelle nationale sur les répercussions du changement climatique sur l'écologie (document itératif)**

Mise à jour : 25 septembre 2024

- Le questionnaire s'était focalisé sur les études décrivant les répercussions sur le biote (c-à-d. sur les espèces/biocénoses/fonctions écosystémiques). Les études portant sur les facteurs abiotiques (p. ex. le débit et la température de l'eau) n'ont pas été prises en compte, étant donné que le GE HCLIM et le GE STEMPT traitent de ces sujets.
- Le tableau affiche en premier lieu des contributions portant sur les répercussions du changement climatique sur l'écologie fluviale et plus bas également des contributions sur les mesures et la gestion (voir dernière colonne « Catégorie »). Ces deux volets sont classés par année de publication (de la plus à la moins récente) > pays (A-Z) > auteur/éditeur (A-Z).
- On trouvera sous l'onglet « Explications\_tableau » des explications sur les différents champs du tableau.
- Vous trouverez sous l'onglet « Explications\_approche DPSIR » des explications sur l'approche DPSIR, de même que des définitions.

Indicateurs sur l'étude					Caractérisation des études à l'aide de l'approche DPSIR									
Titre	Titre original	Auteur/éditeur	Année de publication	Etat/Land	Résumé du contenu	Mots clés	Remarque « Indicateurs sur l'étude »	« Pressures » (= pressions)	« State » (= état)	« Impacts » (= impacts)	« Responses » (= réponses)	Remarque sur les « réponses »	Remarque	Catégorie
Répercussions spatiales sur les ichtyocénoses des cours d'eau de hausses de température dues au changement climatique	Räumliche Auswirkungen klimawandelbedingter Wassertemperaturerhöhungen auf die Fließgewässer-Fischgemeinschaften	KLIWA – AG Gewässerökologie Fließgewässer, KLIWA-Konsortium,	2023	DE	Cette étude en cours rassemble des analyses appuyées par des modèles. Elles traitent d'une part de l'évolution dans l'espace et dans le temps de l'adéquation des habitats pour les ichtyocénoses en fonction de la température (sur la base du règlement allemand sur les eaux de surface) et mettent en lumière d'autre part les futures évolutions d'ichtyocénoses de référence en relation avec les exigences d'espèces dites 'parapluie' (représentatives), dans le but de tirer des enseignements sur les modèles de répartition attendus à l'avenir à partir de simulations d'évolution de la température de l'eau jusqu'en 2100.	Hausses de température due au changement climatique ; espèces sténothermes froides ; ichtyocénoses ; espèces parapluie ; modèles de répartition spatiale	Étude (continue) basée sur la simulation	Hausse de la température de l'eau	Ichtyofaune potentiellement présente	Modification d'adéquation des habitats	Renforcement de la résilience des cours d'eau à la température par ombragement de bandes riveraines proches de l'état naturel	Conservation et développement de bandes riveraines et de formes alluviales proches de l'état naturel en encourageant la succession végétale et en prenant des mesures de renaturation correspondantes.	Actuellement à l'état de projet ; on vérifie si cette approche peut être transposée/adaptée aux biocénoses invertébrées (macrozoobenthos).	Répercussions
Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany	Who will be where: Climate driven redistribution of fish habitat in southern Germany	Basen et al.	2022	DE	To improve the robustness of projections of freshwater fish distributions under climate change, species distribution models (SDMs) were calculated for six fish species in southwestern Germany with different ecological requirements along an upstream-downstream gradient in a multi-general circulation model (GCM) approach. Even when accounting for broad variation in GCMs and realistic RCPs, these results suggest climate change will drive a significant redistribution of fish habitat.	Conséquences climatiques ; propagation des populations de poissons	Étude			affect the distribution of four of the six fish species. The potential ranges of salmonids are predicted to decline by up to 92% (brown trout) and 75% (grayling). In contrast; habitat suitability for perch and roach is predicted to increase by up to 108% and 53%, respectively. Even when accounting for broad variation in GCMs and realistic RCPs; these results suggest climate change will drive a significant redistribution of fish habitat. Salmonid-dominated communities in				Répercussions
Un faible « degré » de mouvement - L'avenir des poissons dans la crise climatique. Analyses, prévisions, actions possibles	Auf schmalen Grad° - Die Zukunft der Fische in der Klimakrise. Analysen, Vorhersagen, Handlungsmöglichkeiten	Basen et al.	2022	DE	Une vague menace éloignée est devenue proche et réelle. Le changement climatique s'est clairement instauré en Allemagne. Nous ne le ressentons pas uniquement au travers des événements de grande ampleur qui font les grands titres des médias. De nombreux impacts de la hausse globale des températures s'expriment de manière rampante et parfois difficile à percevoir, tout particulièrement dans nos rivières. La présente brochure apporte des éléments d'éclaircissement scientifiques sur ce milieu exceptionnellement diversifié et simultanément fortement menacé. L'étude expose l'état actuel et les évolutions futures et propose également des possibilités d'action concrètes. En effet, nous avons encore en main les capacités d'atténuer les conséquences de la crise climatique sur l'ichtyofaune du Bade-Wurtemberg, de préserver les espèces indigènes de l'extinction et d'assurer ainsi la pérennité de la pêche dans le long terme.	Conséquences climatiques ; propagation des populations de poissons ; espèces de poissons	Étude							Répercussions
Les lacs bavaois dans le contexte du changement climatique	Bayerische Seen im Klimawandel	Ministère bavarois de l'environnement et de la protection des consommateurs	2022	DE	Exposé des résultats issus de 15 ans de recherches climatiques sur les lacs et mise en relief de futurs thèmes de recherche.	Habitats aquatiques et biocénoses ; services écosystémiques	Résultats de recherche	Réchauffement ; effets de mélange ; répartition des nutriments	Plantes aquatiques ; roseaux ; algues ; sédiments	Modifications avec gagnants et perdants	Prévention d'apports ; renaturation ; utilisation restreinte de l'eau			Répercussions
Étude éclair « Lacs et changement climatique »	Blitzlichtstudie „Seen und Klimawandel“	Office fédéral de l'environnement	2022	DE	Contributions sur les résultats actuels de recherches sur les impacts du changement climatique et sur les modifications de températures, de quantité et de répartition des précipitations sur les lacs, les petits cours d'eau et les zones humides en Allemagne, compte tenu des connaissances d'autres pays. Le module développe ici combine les connaissances sur les conditions de températures requises pour chaque espèce et les modèles de propagation des ichtyocénoses dans les rivières du Land. Il est dressé une liste des espèces de poissons de l'ichtyocénose de référence pour chaque tronçon fluvial et les conditions de température de l'eau actuelles sont comparées aux exigences de ces espèces. Il est possible de simuler les modifications possibles de la température pour mettre en relief les déficits à différents stades de vie et de développement d'espèces spécifiques de poissons. Ce module permet désormais de détecter les déficits thermiques pour l'ensemble de l'ichtyocénose existante (et les communautés absentes), et apporte des solutions de gestion future des peuplements de poissons pour combler ces déficits.	Étude bibliographique / évaluation de réseaux	Sécheresse ; modifications hydrologiques ; gestion des eaux		Perte de surfaces aquatiques ; modification des conditions de nidification	Prévention d'apports ; renaturation ; utilisation restreinte de l'eau				Répercussions
TeMFI Module de température pour les espèces de poissons indigènes	TeMFI TemperaturModul für heimische Fischarten	Centre de recherches ichtyologiques du Bade-Wurtemberg	2022	DE	Le module développe ici combine les connaissances sur les conditions de températures requises pour chaque espèce et les modèles de propagation des ichtyocénoses dans les rivières du Land. Il est dressé une liste des espèces de poissons de l'ichtyocénose de référence pour chaque tronçon fluvial et les conditions de température de l'eau actuelles sont comparées aux exigences de ces espèces. Il est possible de simuler les modifications possibles de la température pour mettre en relief les déficits à différents stades de vie et de développement d'espèces spécifiques de poissons. Ce module permet désormais de détecter les déficits thermiques pour l'ensemble de l'ichtyocénose existante (et les communautés absentes), et apporte des solutions de gestion future des peuplements de poissons pour combler ces déficits.	Espèces de poissons ; ichtyocénoses	Étude			Apporte des indications sur la sensibilité à la température de tronçons spécifiques de cours d'eau	[Ces indications peuvent être utiles dans la planification des mesures : promouvoir l'ombragement ; adapter les autorisations de rejet]			Répercussions
Trop   pas assez Maîtriser les extrêmes   faire face aux extrêmes	Zu viel   Zu wenig Extreme meistern   Extremen begegnen	KLIWA	2022	DE	Présentation des modifications climatiques et de leurs répercussions avec mise en exergue des événements hydrologiques extrêmes (inondations, pluies intenses, pénurie d'eau)	Changement climatique ; conséquences climatiques ; adaptation ; événements hydrologiques extrêmes ; inondations ; pluies intenses ; pénurie d'eau ; entre autres : impacts sur l'écologie fluviale			Présentation des modifications du régime hydraulique et de celui des précipitations	Présentation des impacts sur les eaux souterraines ; étages ; inondations ; pluies intenses ; débit moyen ; écologie fluviale ; température des eaux				Répercussions
Objectif de 2 °C pour nos ruisseaux Température de l'eau et ombragement	2 °C-Ziel für unsere Bäche Wassertemperatur und Beschattung	KLIWA	2022	DE	La présente étude analyse les effets de l'ombragement apporté par la végétation rivulaire sur la température moyenne journalière		Étude de modélisation bibliographique (première publication 2015, remise à jour 2022)	Hausse de la température de l'eau		Les cartes indiquent des cours d'eau concrets pour lesquels l'ombragement peut faire effet sur les températures de l'eau	[Ces cartes peuvent être utiles dans la planification des mesures : promouvoir l'ombragement ; adapter les autorisations de rejet]			Répercussions
Impact du changement climatique sur les lacs	Einfluss des Klimawandels auf Seen	KLIWA - Projet de coopération changement climatique et gestion de l'eau	2022	DE	Impacts du changement climatique sur les cours d'eau dans le sud de l'Allemagne ; accent placé sur les impacts physiques et écologiques spécifiques sur les lacs	Perte de diversité ; modifications dans le cycle vital ; conditions de concurrence		Hausse de la température de l'eau ; mélange des eaux		La diversité des habitats dulçaquicoles baisse				Répercussions

Indications sur l'étude						Caractérisation des études à l'aide de l'approche DPSIR									
Titre	Titre original	Auteur/éditeur	Année de publication	Liens	Etat/Langue	Contenu	Mots clés	Remarque « Indications sur l'étude »	« Pressions » (= pressions)	« State » (= état)	« Impacts » (= impacts)	« Responses » (= réponses)	Remarque sur les « réponses »	Remarque	Catégorie
Manuel d'application d'outils de diagnostic pour l'identification de pressions causales sur la base du macrozobenthos dans le cadre de l'évaluation des cours d'eau au titre de la DCE	Handbuch zur Anwendung von Diagnosetools für die Identifikation ursächlicher Belastungen auf der Basis des Makrozoobenthos im Rahmen der Fließgewässerbewertung nach WRRL	LUBW	2022	<a href="https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10250">https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10250</a>	DE	La documentation intitulée « Handbuch zur Anwendung von Diagnosetools für die Identifikation ursächlicher Belastungen auf der Basis des Makrozoobenthos im Rahmen der Fließgewässerbewertung nach WRRL » expose les objectifs du diagnostic, explique la structure et l'application de l'outil de diagnostic et l'interprétation des résultats du diagnostic. Ceci permet d'identifier et de hiérarchiser les différentes pressions et leurs impacts sur la biocénose macrozoobenthique dans le but de déterminer des mesures appropriées. Il est indiqué, entre autres, le degré de probabilité d'une pression thermique	Conséquences climatiques ; impacts sur la biocénose du MZB	Étude	Hausse de la température de l'eau	MZB		[L'outil de diagnostic peut être utile dans la planification des mesures ; promouvoir l'ombragement ; adapter les autorisations de rejet]			Répercussions
des caractéristiques écologiques des cours d'eau de surface dans le contexte de changement climatique	Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel	Office fédéral allemand de l'environnement	2022	<a href="https://www.umwelt.de/entwicklung-der-ökologischen-beschaffenheit-von-oberflaechengewaessern-im-klimawandel">Entwicklung der ökologischen Beschaffenheit von Oberflächengewässern im Klimawandel</a>	DE	Une analyse globale met en lumière les mécanismes du changement climatique sur les facteurs abiotiques et biotiques dans les cours d'eau et les lacs ainsi que leurs impacts sur les différents groupes d'organismes.	DCE ; écosystèmes aquatiques ; relations de cause à effet ; modélisation ; débit réservé nécessaire	Étude bibliographique / interviews d'experts	Sécheresse ; aridité ; gestion des eaux	Populations de poissons ; biomasse	Taux de croissance et de mortalité	Restauration d'éléments hydromorphologiques proches de l'état naturel ; références hydrologiques			Répercussions
Répercussions du changement climatique sur l'écologie fluviale	Klimaeffekten op riviernatuur	Dorenbosch et al.	2022	<a href="https://edepot.wur.nl/571889">https://edepot.wur.nl/571889</a>	NL	Cette étude rassemble toutes les connaissances sur les impacts du changement climatique sur le milieu naturel dans le bassin fluvial et évalue les mesures de gestion et d'aménagement les plus prometteuses pour la conservation et le renforcement des paysages fluviaux typiques dans le contexte du changement climatique. Le projet Hydro-CH2018 s'est penché sur les effets des changements climatiques sur les eaux suisses, lesquels modifient l'ensemble du régime des eaux, mais plus particulièrement la répartition saisonnière des ressources en eau dans les eaux superficielles et souterraines. Les étiages deviennent plus fréquents et les eaux se réchauffent, entraînant d'importantes répercussions sur l'écologie des eaux, la protection contre les crues et l'utilisation de l'eau. Le rapport « Effets des changements climatiques sur les eaux suisses » propose une vue d'ensemble synthétique des résultats et sert également de base à d'autres données et informations spécialisées. Le projet a été mené au National Centre for Climate Services (NCCS) en tant que thème prioritaire.	Répercussions climatiques ; paysage fluvial ; température ; débit ; qualité de l'eau ; eaux souterraines ; infiltrations ; submersion écologique ; mesures	Étude bibliographique	Précipitations extrêmes ; niveau abaissé de la nappe souterraine dans le champ alluvial ; salinisation ; hausse de la température de l'air ; montée du niveau de la mer.	Production primaire et plantes ; invertébrés et macrofaune ; poissons ; amphibiens ; oiseaux ; habitats	positifs pour quelques espèces et négatifs pour d'autres	Plus de végétation pour atténuer les températures élevées ; créer des zones d'eau plus profondes comme refuges d'eau fraîche ; promouvoir les zones d'infiltration (les eaux infiltrées ont des températures plus basses) ; restreindre les rejets d'eaux de refroidissement ; réduire l'érosion du lit mineur / rehausser le lit pour relever les niveaux de nappe souterraine dans le champ alluvial ; décaisser le lit majeur pour relever le niveau de la nappe ; promouvoir les submersions écologiques ; prolonger la rétention des eaux dans le champ alluvial	Mesures de restauration écologique ; législation ; gestion		Répercussions
Effets des changements climatiques sur les eaux suisses	Effets des changements climatiques sur les eaux suisses	OFEV	2021	<a href="https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/effets-des-changements-climatiques-sur-les-eaux-suisses.html">https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/effets-des-changements-climatiques-sur-les-eaux-suisses.html</a>	CH	La diversité des espèces de poissons est recensée sur l'ensemble du bassin de l'Aar avec une haute résolution spatiale et taxonomique. Une modélisation des niches écologiques est appliquée pour recenser les besoins de toutes les espèces. Grâce aux modèles, il est effectué un inventaire statistique des facteurs d'influences anthropiques qui ont, parallèlement au changement climatique, les effets les plus marqués sur la propagation des espèces de poissons. Des prévisions sont réalisées à l'aide de la modélisation des niches et compte tenu de modèles climatiques pour déterminer les modifications attendues sur la biodiversité des cours d'eau. Pour finir, des propositions sont élaborées pour améliorer la situation et atténuer les conséquences du changement climatique.	Modélisation ; biodiversité ; facteurs multiples de stress	Projets de recherche	Divers	Divers	Divers	Divers			Répercussions
Stopper la perte de biodiversité malgré le changement climatique	Biodiversitätsverlust stoppen - trotz Klimawandel	Université de Berne, Eawag et SKF	2021	<a href="https://www.wissacademy.org/Biodiversitätsverlust-der-Gewässer-stoppen-trotz-Klimawandel">Biodiversitätsverlust der Gewässer stoppen – trotz Klimawandel (wissacademy.org)</a>	CH	Le rapport 120 du LANUV « Klimawandel und Klimawandelfolgen in Nordrhein-Westfalen – Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring » présente les résultats du monitoring des conséquences climatiques et des adaptations de Rhénanie-du-Nord-Westphalie en les comparant à ceux d'un suivi classique des impacts climatiques.	Modélisation ; facteurs multiples de stress	Projets de recherche	Divers	Divers	Divers	Divers		Projet en cours ; le rapport n'est pas encore disponible	Répercussions
Le changement climatique et ses conséquences - Résultats du monitoring des conséquences climatiques et des adaptations	Klimabericht NRW 2021 Klimawandel und seine Folgen - Ergebnisse aus dem Klimafolgen- und Anpassungsmonitoring	LANUV	2021	<a href="https://www.klimabericht.nrw.de/">Klimabericht NRW 2021</a>	DE	The year 2018 has been the warmest year since 1881, when regular measurements started in Germany. It has also been one of the driest years, with ten months in succession being too dry. This combined heat and drought wave caused severe impacts on most freshwater ecosystems. It led to overheated water bodies and critically low water levels in many lakes and rivers, up to completely dried out riverbeds. Often, this resulted in high fish mortality. Fish-stock surveys in Baden-Württemberg showed a significant decline in the overall abundance of fish species. Especially the proportion of cold-adapted fishes decreased. However, in some parts, warm-adapted carp-like species became more abundant. Ongoing research will determine if fish stocks are able to recover from this record heat summer or if future weather extremes will further exacerbate the situation. To mitigate negative impacts of climate change on the local fish fauna and aquatic ecosystems, possible management measures are discussed.	Changement climatique ; monitoring des conséquences climatiques	Monitoring continu du changement climatique en NRW	Modification de la dynamique des débits ; hausse de la température de l'eau	Éléments de qualité biologiques et chimiques au titre de la DCE	Modifications de l'espace de vie aquatique	En cours d'établissement	Analyse détaillée de la température et du débit pour évaluer les conséquences climatiques dans les cours d'eau	Programme continu de monitoring des répercussions du changement climatique	Répercussions
Changement climatique et été caniculaire de 2018 : Conséquences pour les peuplements de poissons	Klimawandel und der Hitzesommer 2018: Folgen für die Fischbestände	Oexle et al.	2021	<a href="https://www.researchgate.net/publication/352035366_Klimawandel_und_der_Hitzesommer_2018_Folgen_fur_die_Fischbestande">https://www.researchgate.net/publication/352035366_Klimawandel_und_der_Hitzesommer_2018_Folgen_fur_die_Fischbestande</a>	DE	Cette étude est une analyse des impacts du réchauffement sur les grands fleuves néerlandais fondée sur la bibliographie internationale et les séries de données du Rijkswaterstaat et du KNMI. L'accent est placé ici sur les trois questions suivantes : 1) quels sont les effets sur le réseau trophique et les groupes d'espèces, 2) quels sont les liens avec d'autres facteurs de stress, 3) quelles sont les conséquences pour l'évaluation au titre de la DCE et de Natura 2000. Pour répondre à la première question, il a été fait la distinction entre quatre hydrosystèmes principaux : mer des Wadden, delta du sud-ouest, bassin des grands fleuves et bassin de l'IJsselmeer.	Conséquences climatiques ; propagation des populations de poissons ; espèces de poissons	Étude	Hausse de la température de l'eau ; hausse de la température de l'air	Écosystème ; réseau trophique ; production primaire ; macrofaune ; poissons ; oiseaux ; mammifères	Efflorescence phytoplanctonique précoce ; interactions avec une baisse de l'offre en nourriture ; décalage d'abondance du zooplancton ; décalage des oiseaux vers le nord.		Le rapport n'exprime pas de recommandations pour les réponses (« réponses »)		Répercussions
Étude bibliographique sur la température	Effecten van temperatuurotoemen op de grote wateren : een literatuurstudie met data-overzicht	Noordhuis et al.	2021	<a href="https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_630000_31/">https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_630000_31/</a>	NL		Température, écologie fluviale	Étude bibliographique	Hausse de la température de l'eau ; hausse de la température de l'air						Répercussions
Changement climatique sur le lac de Constance	Klimawandel am Bodensee	IGKB	2020	<a href="https://www.igkb.ch/faktenblatt-klimawandel-am-bodensee-2020">Faktenblatt „KLIMAWANDEL AM BODENSEE“ (2020)</a>			Conséquences pour la température de l'eau ; échelles limnimétriques et circulation	Résultats du projet de recherche	Température de l'eau ; échelles limnimétriques et circulation	Éléments de qualité biologiques et chimiques		Réduction des facteurs de stress anthropiques			Répercussions

Indications sur l'étude						Caractérisation des études à l'aide de l'approche DPSIR									
Titre	Titre original	Auteur/éditeur	Année de publication	Liens	Etat/Land	Résumé du contenu	Mots clés	Remarque « Indications sur l'étude »	Pressures « (r) pressions »	« State » (r) état)	« Impacts » (r) impacts)	« Responses » (r) réponses)	Remarque sur les « réponses »	Remarque	Catégorie
Changement climatique et écosystèmes d'eaux fraîches : impacts sur la qualité de l'eau et l'état écologique	Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status	Eawag, Beneteau et al.	2019	<a href="https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/asset-main/Report_BAFU_Water_Quality_Ecological_Status_2018_-_final_version_(lib4ri).ch">Report_BAFU_Water_Quality_Ecological_Status_2018_-_final_version_(lib4ri).ch</a>	CH	Climate change is one of the largest and possibly most impactful ongoing but also future environmental drivers. Understanding effects of climate change on aquatic ecosystems and their function is thus of high importance. Within the framework of the Hydro-CH2018 project, the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) initiated a synthesis of climate change effects on water quality and the ecological status of freshwater ecosystems. The present report is the result of these synthesis efforts	Impacts écologiques du changement climatique ; écosystème ; réseau trophique	Étude bibliographique	Divers	Divers	Divers	Divers			Répercussions
Monitoring des conséquences climatiques	Klimafolgenmonitoring	KLIWA – AG Gewässerökologie Fließgewässer, consortium KLIWA	2019	<a href="https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-monitoring.htm">https://www.kliwa.de/gewaesseroekologie-monitoring.htm</a>	DE	Base de données établie sur une longue période pour recenser les conséquences du changement climatique sur l'écologie fluviale dans 54 cours d'eau peu anthropisés et dans 9 stations d'analyse lacustres sur l'ensemble de l'espace KLIWA (BW, BY, RP, HE) ; macrozoobenthos, ichtyofaune et perspectives	Monitoring des conséquences climatiques sur l'écologie fluviale	Programme de monitoring continu	Hausse de températures de l'eau en premier lieu ; dynamique des débits modifiée	Éléments de qualité biologiques Poissons et MZB	Structures modifiées d'espèces et d'abondance	Zoocénoses naturelles de référence éventuellement adaptées	Impacts sur l'évaluation écologique des cours d'eau	Programme s'inscrivant dans le long terme ; évaluations fondées encore impossibles pour le moment	Répercussions
Scanner climatique	Klimaatcan : programmatische aanpak grote wateren (PAGW)	Noordhuis et al.	2019	<a href="https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_624995_31/">https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_624995_31/</a>	NL	Quels sont les impacts du changement climatique sur les grands fleuves néerlandais et comment leur résilience au climat peut elle être augmentée ? Cette question est au centre du présent rapport. Le degré de vulnérabilité des systèmes à court et long terme est mis en lumière et des mesures sont présentées pour abaisser cette vulnérabilité.	Répercussions climatiques ; écologie fluviale ; température ; qualité de l'eau ; mesures	Étude bibliographique	hausse de températures de l'eau ; montée du niveau de la mer ; précipitations extrêmes ; inondations ; étiages ; niveau rabaisé de la nappe souterraine dans le champ alluvial	Écosystème ; ichtyofaune ; production primaire et plantes aquatiques	Positif pour quelques espèces et négatif pour d'autres	Renforcement de la résilience au changement climatique par une plus grande diversité ; amélioration de la mise en réseau ; meilleure qualité de l'eau et restauration de la dynamique naturelle	Recommandations pour la politique		Répercussions
Identification des impacts de sécheresses prolongées sur les poissons dans les eaux néerlandaises	Verkenning van de gevolgen van langdurige droogte voor vissen in de Nederlandse wateren	van de Ven	2019	<a href="https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/ecologie/droogte-vis/">https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/water-ruimte/ecologie/droogte-vis/</a>	NL	2018 a été une année particulièrement sèche et chaude. La pénurie d'eau consécutive à l'absence de précipitations et à l'apport d'eau très limité a provoqué des dommages importants dans différents secteurs, entre autres l'agriculture, la navigation, l'approvisionnement en eau potable et la nature. Le présent rapport examine les conséquences de la sécheresse de 2018 sur les poissons dans les cours d'eau néerlandais.	Sécheresse ; assèchement des rivières ; étiages ; ichtyofaune ; température	Étude des répercussions ; interviews avec des gestionnaires de l'eau	Sécheresse ; étiages	Poissons	Impacts négatifs sur la migration des poissons ; entre mer et fleuve et vers l'amont	Pendant les phases de sécheresse, il est nécessaire d'avoir des zones d'eaux profondes comme refuge pour les poissons. Après la phase de sécheresse, il est important que la migration soit relancée pour recoloniser le fleuve vers l'amont		Répercussions	
Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation	Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation	Florence BAPTIST, Nicolas POULET, Nirmala SEON-MASSIN /ONEMA/	2014	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-0">https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-0</a>	FR	Cette étude présente: - l'impact observé du changement climatique sur la physiologie, la phénologie et les aires de distribution des poissons d'eau douce au cours de ces dernières décennies, - différents outils de projection et leur domaine d'application, permettant d'apporter des réponses quantitatives sur l'ampleur des changements attendus, - des mesures d'adaptation pour limiter la vulnérabilité des poissons et des écosystèmes d'eau douce.	changement climatique, milieux aquatiques, mesures d'adaptation, poissons, température, hydrologie	Étude	Hausse de la température de l'eau ; hausse de la température de l'air ; qualité de l'eau	température de l'eau ; qualité de l'eau ; débit ; état des habitats aquatiques	positifs pour quelques espèces et négatifs pour d'autres ; déplacement vers l'amont, croissance réduite, modification de la composition des communautés	restauration continuité écologique ; limitation des prélèvements d'eau, relèvement des débits réservés, amélioration de la qualité de l'eau, restauration des habitats aquatiques		Répercussions ; mesures	
Impact du changement climatique sur la qualité des cours d'eau - Évaluation bibliographique et première estimation de la vulnérabilité	Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität - Literaturauswertung und erste Vulnerabilitäts einschätzung	KLIWA - Projet de coopération changement climatique et gestion de l'eau	2010	<a href="https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-0">https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-0</a>	DE	Interactions entre changement climatique et qualité des cours d'eau dans le périmètre géographique des trois Länder fédéraux Bavière, Bade-Wurtemberg et Rhénanie-Palatinat ; première analyse de sensibilité et estimation de la vulnérabilité des biocénoses et types de cours d'eau	Impacts du changement climatique sur les eaux - chaînes d'effets ; vulnérabilité	Évaluation bibliographique	Hausse de la température de l'eau ; étiages ; phases de sécheresse	Éléments biologiques importants pour l'évaluation : poissons, MZB, flore aquatique ; phytoplancton selon sa localisation (cours supérieur, moyen, inférieur)			<a href="https://www.ofb.de/medien/14117/14117.pdf">o_Literaturauswertung: Übersicht zu Ursachen und Effekten des Klimawandels (2010) (PDF)</a>	Répercussions	
Aides à l'exécution : critères d'appréciation dans le cadre de demandes d'autorisations de captages d'eau (stratégie de pénurie d'eau du Bade-Wurtemberg)	Vollzugshilfe: Kriterien zur Ausübung des Ermessens bei Anträgen zu Wasserentnahmen (Wassermangelstrategie Baden-Württemberg)	Cercle de travail Biologie du Land	2023		DE	Aides à l'exécution sous forme de pur projet SIG pour l'appui des services (subordonnés) de l'eau dans le cadre de leur pouvoir discrétionnaire sur les demandes d'autorisations de captages d'eau. Une carte affiche les critères pouvant justifier un refus de captage d'eau à partir de rivières ou une restriction de captage, notamment en phase d'étiage, pour des raisons d'écologie fluviale.	On signalera ici entre autres les critères suivants : Types d'habitats FFH dépendant du milieu aquatique ; Coenagion mercuriale ; Unio crassus ; écrevisse à pattes blanches ; écrevisse de torrent ; ...	Projet SIG				Justifie les restrictions de prélèvements d'eau dans les cours d'eau sensibles pour retenir plus d'eau en surface.		Mesure	
Plan d'avenir de l'eau de Rhénanie-Palatinat	Zukunftsplan Wasser Rheinland-Pfalz	Ministère de la protection du climat, de l'environnement, de l'énergie et de la mobilité	2023	<a href="https://mkuem.rlp.de/themen/wasser/zukunftplan-wasser-rheinland-pfalz">https://mkuem.rlp.de/themen/wasser/zukunftplan-wasser-rheinland-pfalz</a>	DE	Dans le cas du « Plan d'avenir de l'eau de Rhénanie-Palatinat », il s'agit d'un processus participatif. Les parties prenantes des différents groupes d'intérêt doivent développer des mesures sur les modifications des ressources en eau et de l'utilisation de ces ressources dans le cadre d'un processus de discussion de médiation. En outre, le Land a déjà engagé différentes mesures et les a présentées dans le cadre du processus participatif. Le programme de travail se décompose en 6 volets d'adaptation aux modifications climatiques des ressources en eau et la protection des cours d'eau (écologie) est un de ces volets. Les mesures sont développées dans le cadre de processus associant les parties prenantes.	Stratégie d'adaptation ; développement de mesures ; hausses de température de l'eau ; rejets thermiques ; développement de polluants et de nutriments ; espèces envahissantes ;	Processus associant les parties prenantes.	Hausse de la température de l'eau ; précipitations extrêmes ; inondations ; étiages ; prélèvements d'eau ;	Éléments de qualité biologiques et chimiques au titre de la DCE	Milieux aquatiques et biodiversité	Développement écologique et autodynamique des cours d'eau ; bandes riveraines ; gestion intégrée des ressources en eau ; abaissement des pressions polluantes et thermiques ; régime hydrologique des milieux	Mesures de renaturation visant à renforcer la résilience face aux événements extrêmes	Lancement du processus associant les parties prenantes en 2023 ; sur un axe de temps de 10 ans et plus.	Mesure
RiverDiv : Protection de la diversité, réduction de la pollution de la Wieslauter – Gestion du cours d'eau adaptée aux défis du changement climatique	RiverDiv : Protection de la diversité, réduction de la pollution de la Wieslauter – Gestion du cours d'eau adaptée aux défis du changement climatique	Interreg Rhin supérieur, RPTU, université de Freiburg, université de Strasbourg & CNRS, ENGEEES	2023	<a href="https://www.interreg-rhin-sup.eu/projet/riverdiv-protection-de-la-diversite-reduction-de-la-pollution-de-la-wieslauter-gestion-du-cours-d'eau-adaptee-aux-defis-du-changement-climatique?rk_vid=8bbb8dea8fb3cf5d17099147989b03e3">https://www.interreg-rhin-sup.eu/projet/riverdiv-protection-de-la-diversite-reduction-de-la-pollution-de-la-wieslauter-gestion-du-cours-d'eau-adaptee-aux-defis-du-changement-climatique?rk_vid=8bbb8dea8fb3cf5d17099147989b03e3</a>	DE ; FR	Pour protéger la biodiversité aquatique et réduire les pressions des substances sur les eaux courantes, une importance croissante doit être accordée à l'avenir à une gestion transfrontalière des ressources en eau. RiverDiv s'est fixé comme objectif central la protection durable de la biodiversité et de la qualité des eaux de la Wieslauter franco-allemande.	Gestion fluviale adaptée au climat ; biodiversité ; développement des cours d'eau ; refuges écologiques	Projet transfrontalier en cours	Hausse de la température de l'eau ; étiages ; pressions polluantes	Éléments de qualité biologiques Poissons et MZB ; chimie	Milieux aquatiques et biodiversité	Analyses détaillées sur la température sur le cours longitudinal visant à évaluer les pressions climatiques dues au climat	Programme s'inscrivant dans le moyen terme ; les évaluations ne sont pas encore disponibles.	Mesure	
Fiches sur le climat dans les circonscriptions administratives de Bavière : Impacts du changement climatique et vulnérabilité des communes	Auswirkungen des Klimawandels und Betroffenheit von Kommunen	Bayerisches Landesamt für Umwelt	2022	<a href="https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaanpassung_bayern/index.htm#stueckbriefe">https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaanpassung_bayern/index.htm#stueckbriefe</a>	DE	Outils, informations, recommandations d'actions, exemples pratiques et tableaux de mesures pour la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation au climat en Bavière.	Répercussions du changement climatique sur la gestion des eaux ; adaptation au changement climatique ; pressions sur les habitats aquatiques	Résultats de diverses publications	Hausse de la température de l'eau ; hausse de la température de l'air	Pressions sur les eaux et les organismes ; poissons ; algues	Immigration d'espèces thermophiles ; surproduction algale ; refolement d'espèces ;			Mesure	
Changement climatique Rhin Meuse - Plan d'adaptation et d'atténuation pour les ressources en eau du bassin Rhin-Meuse	Plan d'adaptation et d'atténuation au changement climatique	Comité de bassin Rhin-Meuse	2023	<a href="https://www.eau-rhin-meuse.fr/plan-dadaptation-et-dattenuation-au-changement-climatique-0">https://www.eau-rhin-meuse.fr/plan-dadaptation-et-dattenuation-au-changement-climatique-0</a>	FR	En réponse aux vulnérabilités des territoires identifiés, le plan propose des solutions concrètes et fédératrices pour l'ensemble des acteurs de terrain au titre du volet « eau ». Le plan se structure autour de 10 axes stratégiques et est assorti d'objectifs chiffrés.	Adaptation au changement climatique ; milieux naturels terrestres et aquatiques, sols ; milieux urbains ; solutions fondées sur la nature	Plan	Hausse de la température de l'air ; hausse de la température de l'eau ; crues subites et sédiments en suspension (pression chimique) ; étiages ; hausse des prélèvements d'eau	température de l'eau ; qualité de l'eau ; débit ; état des habitats aquatiques	Dégradation des écosystèmes ; développement ou disparition d'espèces ; dégradation de la qualité de l'eau ; étiages plus sévères, crues plus intenses	Plan d'alerte Main nevégalais, reconstruire des corridors écologiques ; Augmenter l'infiltration des eaux/désimperméabiliser ; Développer des systèmes agricoles non dépendants des engrais et des produits phytosanitaires ; Réduire les transferts de micropolluants ; Développer les prairies et les forêts gérées durablement ; Améliorer les ripisylves ; Restaurer les capacités fonctionnelles des cours d'eau ; Restaurer les écosystèmes ; Diminuer de 10% les prélèvements d'eau d'ici 2030		Mesure	

	Colonne	Contenu de la colonne	Remarque
Indications sur la bibliographie et sur l'étude	Titre de l'étude	Titre de l'étude	/
	Titre original	Titre de l'étude dans la langue originale	/
	Auteur/Éditeur et année de publication	Référence en format auteur/éditeur et année de publication : p. ex. Dorenbosch et al. 2022	/
	Lien	Hyperlien vers l'étude (pdf, site web, etc.)	/
	État/Land	État/Land où a été réalisée l'étude	/
	Résumé du contenu	Les contenus et enseignements les plus informatifs tirés de l'étude doivent être synthétisés en une à deux phrases précises (exemple fictif : « l'étude se consacre aux impacts du changement climatique sur les populations d'écrevisses européennes et montre que le changement climatique accélère le processus d'éviction par les espèces envahissantes dans les zones de plaine »).	/
	Mots clés	Mots clés sur l'étude (pas plus de 5)	/
	Remarque « Indications sur la bibliographie et sur l'étude »	Mentions complémentaires ne pouvant être faites dans les colonnes A - G.	/
Mentions « Approche DPSIR »	Pressures (= pressions)	cf. onglet « Explications_Approche_DPSIR »	Dans le cas de plus d'une mention par cellule, séparez vos mentions par le signe « ; ». Merci d'utiliser autant que possible les mots-clés suivants : Hausse de la température de l'eau ; hausse de la température de l'air ; montée du niveau de la mer ; niveau abaissé de la nappe souterraine dans le champ alluvial ; précipitations extrêmes ; inondations ; étiages ; crues subites et érosion (pression chimique) ; crues subites et sédiments et pollution (pression chimique) ; hausse des prélèvements d'eau
	State (= état)	cf. onglet « Explications_Approche_DPSIR »	Dans le cas de plus d'une mention par cellule, séparez vos mentions par le signe « ; ».
	Impacts (= impacts)	cf. onglet « Explications_Approche_DPSIR »	Dans le cas de plus d'une mention par cellule, séparez vos mentions par le signe « ; ».
	Responses (= réponses)	p. ex. mesures (cf. onglet « Explications_Approche_DPSIR »	Dans le cas de plus d'une mention par cellule, séparez vos mentions par le signe « ; ».
		Indications complémentaires sur les mesures de la colonne « L » ; s'agit-il p. ex. de mesures théoriques ou de mesures planifiées/mises en œuvre et leur financement est-il assuré (si oui, comment) ? Possibilité de donner des indications sur la rapidité de la mise en œuvre de la mesure : faites la distinction entre les catégories « mise en œuvre à court terme (= mesures mises en œuvre en l'espace d'un an), « mise en œuvre à moyen terme » (= mesures mises en œuvre en l'espace de 5 ans) et « mise en œuvre à long terme » (= mesures mises en œuvre en l'espace de 10 ans) ou une combinaison de plusieurs types de mesures.	
	Remarque sur les « réponses »		Dans le cas de plus d'une mention par cellule, séparez vos mentions par le signe « ; ».

Les catégories d'indicateurs de l'approche DPSIR, qui a son origine dans la recherche environnementale, se réfèrent dans le présent projet aux répercussions du changement climatique sur l'écologie et leur définition s'inspire du rapport numéro 25/1999 de l'Agence européenne de l'environnement (<https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>).

Information : Les mentions sur les « forces motrices » disparaissent car il faudrait indiquer partout ici « changement climatique ».

	Nom de l'indicateur	Définition	Exemples
« Pressures »	Pressions et leurs indicateurs	Les pressions résultent des forces motrices et décrivent les impacts directs de celles-ci sur les composantes environnementales qui entraînent à leur tour une modification de l'état environnemental.	Augmentation des précipitations hivernales, montée de la température de l'eau (été et hiver), hausse du niveau des mers (estuaire)
« State »	État et ses indicateurs	Les indicateurs d'état décrivent un état environnemental modifié qui résulte des pressions et qui a, à son tour, des répercussions sur d'autres composantes environnementales.	Débit des eaux, vitesses du courant, niveaux d'eau et de nappe souterraine dans les zones inondables, qualité de l'eau, température de l'eau État de l'écologie fluviale
« Impacts »	Indicateurs d'impact	Les indicateurs d'impact décrivent des modifications de l'état par les pressions et ici plus particulièrement sur l'écologie/les biocénoses/les espèces. Les différents impacts peuvent s'influencer mutuellement.	Perte de biodiversité/extinction d'espèces et dégradation de l'écologie fluviale ; Pollution des eaux par des substances nuisibles et des produits chimiques ; efflorescence algale ; Perturbation de la disponibilité de la ressource en eau et des services écosystémiques ;
« Responses »	Indicateurs de réponses	Les indicateurs de réponses sont les réponses sociales à des problèmes environnementaux spécifiques qui peuvent se référer à toutes les catégories susmentionnées, p. ex. étendue et succès de stratégies, plans et mesures de préservation, d'adaptation et de développement des composantes environnementales. De telles réponses peuvent englober différents domaines et être de nature politique, juridique, programmatique ou financière.	Les mesures peuvent être distinguées sur la base de types : (1) Législation (p. ex. de restriction des apports de polluants), (2) Politique, (3) Programme (p. ex. le programme de gestion fluviale intégrée et l'approche programmatique appliquée aux grands cours d'eau aux Pays-Bas), (4) Projets d'aménagement visant à mettre en œuvre des mesures de restauration écologique, (5) Gestion (p. ex. pour renforcer l'usage efficient de la ressource en eau ou (6) Sensibilisation (p.ex. celle des consommateurs d'eau).