

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TEMPÉRATURE DES RIVIÈRES

ÉTUDE DES CHANGEMENTS SURVENUS DURANT LES 50 DERNIÈRES ANNÉES ET ATTENDUS POUR LE FUTUR

La température des cours d'eau est l'une des variables les plus importantes pour les écosystèmes aquatiques et pour les activités humaines dépendantes des rivières. Dans le contexte actuel de changements climatiques, ces températures évoluent. Nous présentons ici les résultats de travaux portant sur l'évolution de la température des rivières en Suisse durant les 50 dernières années ainsi que sur des projections pour le XXI^e siècle.

Adrien Michel*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) & WSL Institut pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (SLF)
Jannis Epting, Université de Bâle; Bettina Schaeftli, Université de Berne
Michael Lehning; Hendrik Huwald, EPFL & SLF

ZUSAMMENFASSUNG

KLIMAWANDEL UND FLIESSGEWÄSSERTEMPERATUREN: ANALYSE DER VERÄNDERUNGEN IN DEN LETZTEN 50 JAHREN UND DER FÜR DIE ZUKUNFT ERWARTETEN VERÄNDERUNGEN

Die Wassertemperatur ist einer der Schlüsselparameter für aquatische Ökosysteme und flussbezogene Aktivitäten des Menschen. Im Zuge des Klimawandels verändern sich die Wassertemperaturen. Wir präsentieren hier die Ergebnisse von Analysen zur Entwicklung der Fließgewässertemperaturen in der Schweiz in den letzten 50 Jahren und Prognosen für das 21. Jahrhundert. Diese zeigen, dass die Wassertemperaturen in Schweizer Fließgewässern bereits deutlich angestiegen sind – mit einem Mittelwert von +0,33 °C pro Jahrzehnt seit 1979 und jeweils einer markanteren Erwärmung im Sommer. Dieser Anstieg wirkte sich bereits nachweisbar auf die Ausbreitung von Fischkrankheiten aus. Zudem wird der gesetzliche Grenzwert, der in der Schweiz für die Verwendung von Wasser zu Kühlzwecken gilt, immer häufiger erreicht. Auch mit den ambitioniertesten Klimaschutzszenarien ist ein durchschnittlicher Anstieg der Flusstemperaturen von knapp über 1 °C bis 2035 unvermeidbar. Ohne Klimaschutzmassnahmen könnte dieser Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts im Jahresdurchschnitt 3,5 °C und in den Alpenflüssen im Sommer bis zu 6 °C betragen. Dieser Artikel fasst die wichtigsten Ergebnisse des BAFU-Forschungsprojekts Hydro-CH2018 und des ergänzenden Moduls

INTRODUCTION

Les changements climatiques auront des impacts quantitatifs et qualitatifs sur les ressources en eaux de surface et souterraines [1]. Nous nous intéressons ici aux impacts présents et futures des changements climatiques sur la température des cours d'eau en Suisse. La température de l'eau est en effet l'une des variables les plus importantes pour les écosystèmes aquatiques, influençant à la fois les processus chimiques et biologiques [2, 3]. Certaines espèces de poissons sont très sensibles à l'eau chaude, ce qui peut favoriser certaines maladies ou nuire à leur reproduction [4, 5]. Des températures plus élevées pourraient être favorables à certaines espèces, favorisant ainsi leur invasion biologique. Dans les régions alpines, outre l'augmentation de la température de l'eau, le recul des glaciers contribuera également à accélérer les changements dans les écosystèmes [6, 7]. Dans ce contexte, il est nécessaire de souligner que les cours d'eau alpins offrent une hétérogénéité environnementale en accueillant une grande variété d'espèces avec une importante diversité génétique. En général, l'augmentation de la température des rivières devrait entraîner un déplacement de nombreuses espèces vers les hauteurs. Toutefois, des barrières artificielles ou naturelles peuvent empêcher une telle migration.

* Contact: adrien.michel@epfl.ch

(Foto: © Waleed Kurdi/123RF.com)

La température des rivières est également un facteur socio-économique important. Plusieurs secteurs vulnérables sont concernés: l'agriculture, le tourisme, l'approvisionnement et la qualité de l'eau potable, ou encore la production d'électricité [8-13]. Par exemple, pendant la vague de chaleur qui a touché l'Europe centrale et septentrionale d'avril à août 2018, la production locale d'électricité de la centrale nucléaire de Mühleberg, dans le canton de Berne, a dû être temporairement réduite en raison de la température anormalement élevée de l'Aar utilisée pour le refroidissement.

Dans le futur, la température des rivières sera affectée par les changements climatiques principalement par le biais de l'augmentation de la température de l'air, des changements dans les précipitations, des changements dans la fonte de la neige et de la glace, ainsi que les changements des chemins d'écoulement en surface et sous la surface qui y sont liés.

L'augmentation de la température des eaux de surface affectera également la température des eaux souterraines ali-

mentées par l'infiltration des rivières, ce qui aura des conséquences importantes sur la biochimie de ces réservoirs. Cependant, la dynamique de la température des eaux souterraines est complexe. Les changements dans la saisonnalité des précipitations et du ratio pluie/neige en hiver pourraient localement entraîner un refroidissement des eaux souterraines en raison du déplacement des périodes de recharge vers des saisons plus froides. Ceci est détaillé dans l'étude compagne (voir article p. 78).

Pour toutes ces raisons, il est essentiel et nécessaire de disposer d'informations quantitatives sur l'évolution passée et future de la température des rivières. Cette étude tente de fournir de telles informations et prédictions sur la base des mesures existantes et en utilisant différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et des modèles numériques pour le futur. Cet article résume les principaux résultats obtenus dans le cadre du projet de recherche Hydro-CH2018 de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) et du module complémentaire «Évolution de la

température de l'eau des cours d'eau et des lacs sous l'effet du changement climatique» [14, 15]. Ces résultats ont également été complétés et publiés dans des revues scientifiques [16-19].

OBJECTIFS ET MÉTHODES

TEMPÉRATURES PASSÉES ET PRÉSENTES

Une analyse complète de la température observée des cours d'eau, basée sur toutes les stations de mesure en Suisse disposant de séries temporelles suffisamment longues, a été réalisée [16]. Les données ont été fournies par l'OFEV, les cantons de Berne, Bâle et Zurich, ainsi que par *MétéoSuisse*. En plus de l'évolution de la température des rivières elles-mêmes, l'influence du débit, des précipitations, de la température de l'air et de la présence de lacs en amont sur les températures des cours d'eau, ainsi que leurs tendances temporelles, ont été analysées. L'analyse est effectuée sur 52 bassins versants en Suisse (*fig. 1*), divisés en quatre catégories: Les bassins du Plateau et du Jura, les bassins en aval de lacs, les bassins alpins,

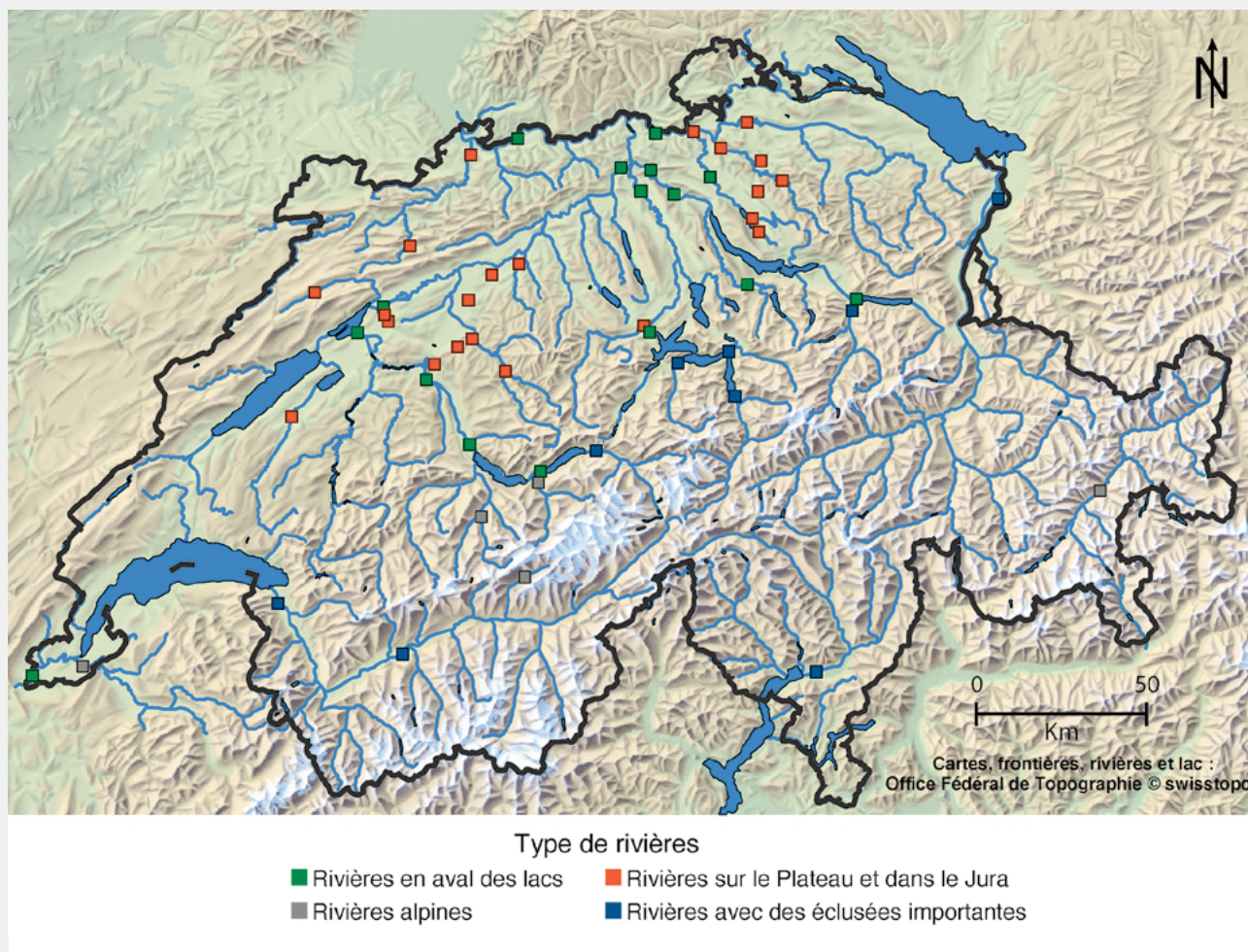


Fig. 1 Situation géographique des stations de mesures utilisées pour l'étude statistique des températures et débits passés.

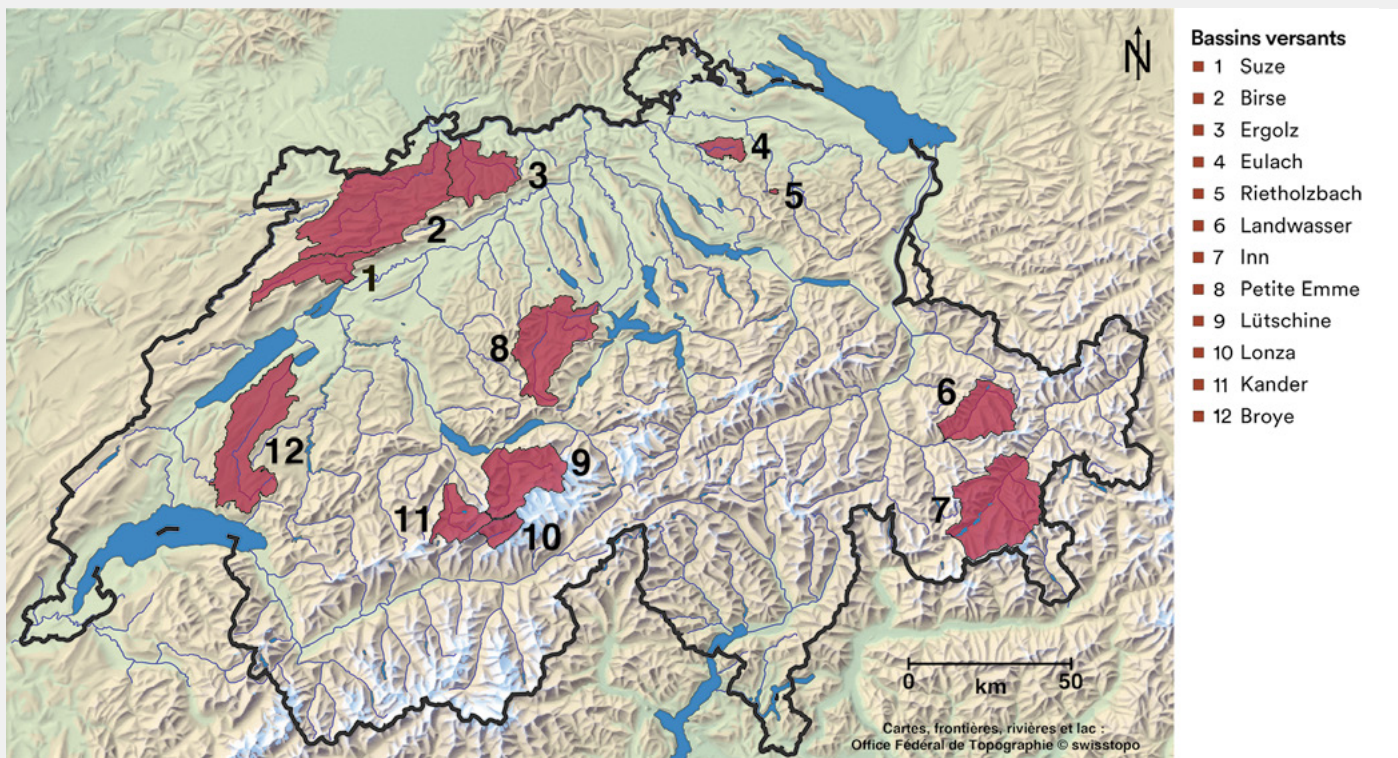


Fig. 2 Situation géographique des bassins versants modélisés pour l'étude des températures et débits futurs.

et les bassins avec des éclusées importantes, c'est-à-dire contenant d'importants barrages. Les tendances sont calculées par des régressions linéaires effectuées sur des séries temporelles désaisonnalisées pour les périodes 1979–2018 et 1999–2018.

TEMPÉRATURES DANS LE FUTUR

L'évolution future du débit et de la température des cours d'eau est simulée pour douze bassins versants en Suisse [19], divisés en deux catégories (fig. 2): les bassins versants du Plateau suisse (Birse, Broye, Ergolz, Eulach, Petite Emme, Rietholzbach et Suze) et les bassins versants alpins (Inn, Kander, Landwasser, Lonza et Lüttschine).

Les simulations sont effectuées avec la chaîne de modèles numériques *Alpine3D* et *StreamFlow* développés au SLF et à l'EPFL [20–22]. La couverture historique des glaciers ainsi que son évolution avec les changements climatiques, utilisée comme point de départ pour la simulation effectuée, ont été fournies par le modèle *GloGEMflow* de l'ETH de Zurich [23]. La topographie et la couverture du sol utilisées dans ces simulations sont extraites du jeu de données européen *Copernicus CORINE Land Cover*¹ et des données fournies par *SwissTopo*.

Les modèles sont calibrés à l'aide de mesures effectuées par l'OFEV, les cantons

de Berne, Bâle et Zurich, ainsi *Holinger SA*. Les modèles sont forcés en utilisant les données météorologiques des stations de *MétéoSuisse* et du réseau IMIS du SLF² pour les périodes de calibration et de validation, et avec une version des scénarios de changement climatique CH2018 [24] à résolution horaire pour les périodes futures [17]. Au total, 16 scénarios de changements climatiques sont utilisés, répartis équitablement entre basse (RCP2.6) et hautes (RCP8.5) émissions de gaz à effet de serre.

Les résultats produits avec ces modèles sont également utilisés dans l'étude compagne sur les eaux souterraines (voir article p. 78).

RÉSULTATS

TEMPÉRATURES PASSÉES ET PRÉSENTES

Les températures annuelles des cours d'eau étudiés sont montrées dans la figure 3. Parmi les 52 stations de mesures utilisées, 31 d'entre elles disposent de données remontant à 1979. Le réchauffement moyen des cours d'eau a été de 0,33 °C par décennie sur la période de 1979 à 2018, et de 0,37 °C par décennie en moyenne durant la période de 1998 à 2018. Cela correspond environ à 90% de la hausse de la température moyenne de l'air sur la période correspondante. Les cours d'eau se sont réchauffés de manière

plus importante en été qu'en hiver, créant une différence de température entre l'hiver et l'été qui augmente progressivement. La forte hausse estivale s'explique par le réchauffement atmosphérique plus marqué à cette saison ainsi que par la multiplication des vagues de chaleur estivales durant les dernières décennies. En effet, au cours des étés caniculaires 2003, 2015 et 2018, des records de température ont été battus dans de nombreuses stations. Durant l'été 2018, de nouvelles valeurs maximales ont été enregistrées pour presque un tiers des stations de mesure [25].

Nous montrons que ces tendances sont stables dans le temps depuis 1980, contrairement à ce qui était ressorti d'études antérieures menées en Suisse sur des périodes d'observation plus courtes [26, 27]. En effet, plutôt qu'un réchauffement progressif, ces études passées ont conclu à un réchauffement

¹ *CORINE Land Cover* fournit des informations sur les caractéristiques biophysiques de la surface de la Terre. Les images acquises par les satellites d'observation de la Terre sont utilisées comme principale source de données: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

² Le système intercantonal de mesure et d'information IMIS est un réseau de mesure météorologique nivo qui couvre les Alpes suisses et le Jura et comprend environ 180 stations.

abrupt d'environ 1 °C qui s'est produit en 1987/1988 et à une absence de tendance globale avant ou après ce réchauffement. Dans les cours d'eau alpins, malgré un changement des régimes thermiques et hydrologiques évident sur le long terme, l'augmentation de la température de l'eau est moins marquée (*fig. 3*). Les bassins versants alpins sont en effet mieux préservés des températures estivales extrêmes que les autres bassins versants. Par exemple, l'été caniculaire de 2003 n'a pas eu d'impact sur la température des cours d'eau alpins. Cette résilience est attribuée principalement à l'apport d'eau froide générée par la fonte estivale des glaciers et de la neige résiduelle. D'autres facteurs tels que la géologie, la topographie ou le permafrost ont également un impact sur la température des rivières alpines [28]. Cependant, les récents étés chauds comme ceux de 2015, 2017 et 2018 suggèrent que cette résilience tend à diminuer.

Les rivières fortement influencées par des prises d'eau pour la production hydroélectrique dans leur partie supérieure

présentent également un réchauffement moins prononcé que les rivières du Plateau suisse (*fig. 3*) ce qui s'explique par les rejets d'eaux froides à basse altitude lors du turbinage, eaux froides qui sont issues des réservoirs d'accumulation situés en altitude. Les rivières en aval des lacs naturels, au contraire, se réchauffent à une vitesse comparable aux rivières du Plateau, même si ces lacs sont principalement alimentés par des rivières alpines.

TEMPÉRATURES DANS LE FUTUR

Sur le Plateau et dans les Alpes, un net réchauffement des eaux fluviales est modélisé au cours du XXI^e siècle (*fig. 4*). Pour la période 2030–2040, le réchauffement médian annuel de la température de l'eau est de 1,1 °C pour les bassins versants du Plateau suisse et de 0,8 °C pour les bassins versants alpins par rapport à la période de référence 1990–2000. Ces valeurs sont similaires pour les 16 scénarios de changement climatique étudiés c'est-à-dire pour des scénarios avec ou sans mesures de protections du climat et s'inscrivent dans la

lignée des tendances observées au cours des décennies passées.

À la fin du siècle (2080–2090), l'augmentation annuelle médiane de la température de l'eau dans les bassins versants du Plateau suisse s'élève à 0,9 °C seulement pour les scénarios avec mesure de protection du climat, mais à 3,5 °C pour les scénarios à hautes émissions de gaz à effet de serre. Dans les bassins versants alpins, ces valeurs s'élèvent respectivement à 0,9 °C et à 3,2 °C.

En termes de températures saisonnières de l'eau, la différence entre les Alpes et le Plateau est plus marquée que pour les températures moyennes annuelles (*fig. 4*). En hiver, les cours d'eau du Plateau se réchaufferont considérablement, de plus de 3 °C d'ici la fin du siècle si aucune mesure de protection du climat n'est prise. Dans les Alpes, la température de l'eau en hiver n'augmentera que de 1 °C environ, bien que la température de l'air gagne 4 °C sans mesure de protection du climat.

En été, la réduction marquée du débit dans les bassins versants alpins pour les

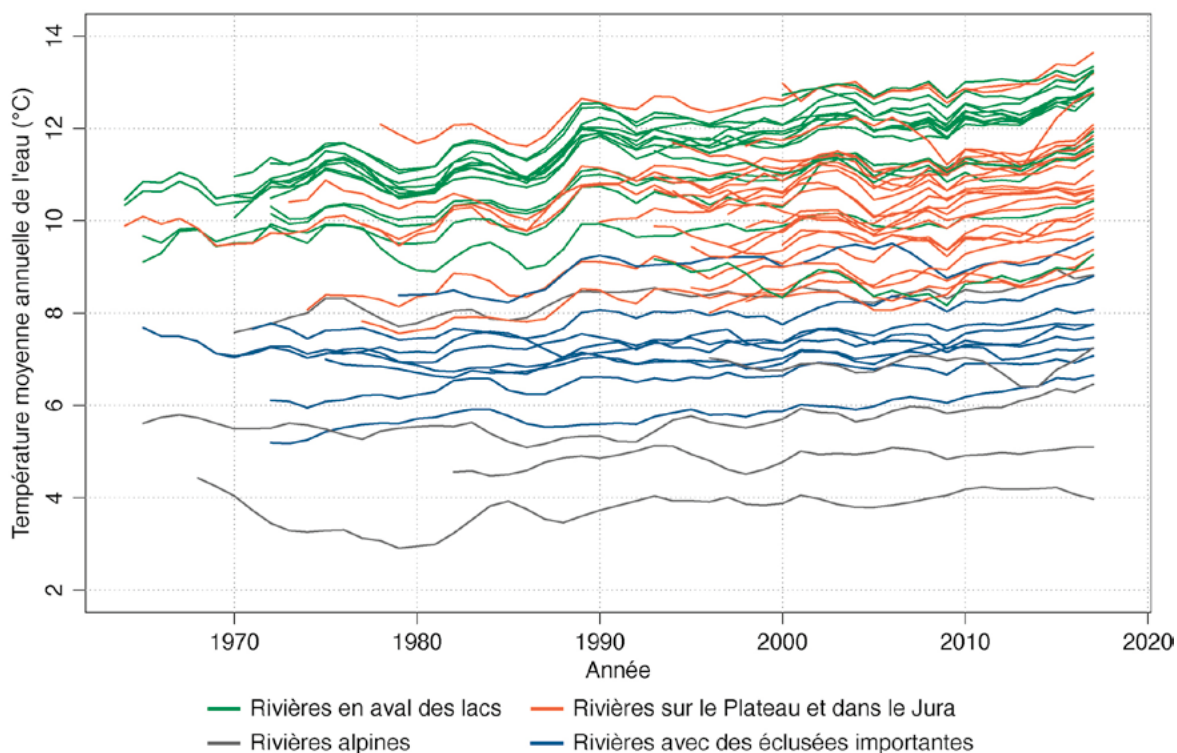


Fig. 3 Évolution passée des moyennes annuelles des températures mesurées en fonction du type de rivière. Un lissage centré de trois ans est appliqué afin de gommer la variabilité interannuelle.

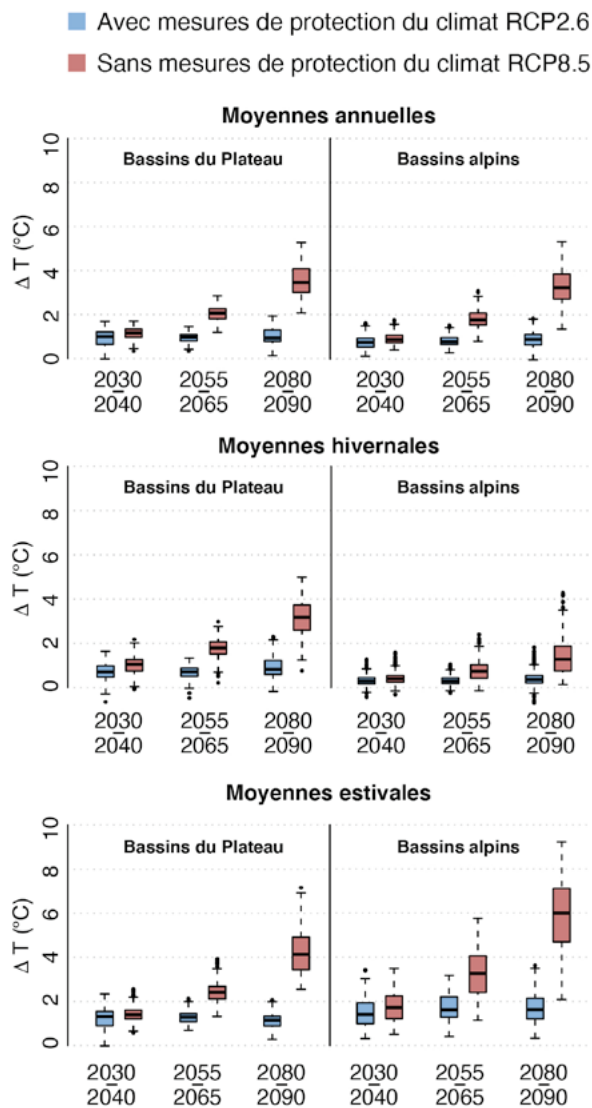


Fig. 4 Évolution des moyennes annuelles (haut), hivernales (milieu) et estival (bas) des températures pour les bassins modélisés et comparées à la période de référence 1990–2000. Les bassins du Plateau sont dans la colonne de gauche et les bassins alpins dans la colonne de droite. En bleu ce sont les résultats pour les scénarios avec mesures de protection du climat, en rouge sans mesures de protection du climat.

scénarios d'émissions élevées conduit à une augmentation de la sensibilité de la température de l'eau au faible débit, ce qui n'est pas observé dans les bassins versants du Plateau suisse. Cette différence de sensibilité de la température de l'eau au faible débit en été s'explique par le fait que les bassins versants du Plateau suisse connaissent déjà actuellement des conditions de faible débit en été, tandis que les bassins versants alpins connaîtront un changement important de la saisonnalité du débit. En effet, sans mesure de protection du climat, les modèles prédisent que la période de débit maximale dans les bassins alpins qui se produit actuellement au milieu de l'été sera avancée de deux mois. Dans un futur proche ou avec des scénarios de faibles émissions, le réchauffement estival de l'eau dans les bassins versants

alpins est similaire ou légèrement inférieur à celui observé sur le Plateau suisse. D'ici la fin du siècle et pour les scénarios à fortes émissions, la réduction de la couverture neigeuse au printemps et en été ainsi que le recul des glaciers entraîneront une diminution de l'albedo et par conséquent un réchauffement amplifié du sol. Avec la sensibilité accrue de la température de l'eau aux conditions de faible débit, cela conduira à un réchauffement des rivières en été de 6 °C dans les Alpes. Cette valeur est comparable au réchauffement de la température de l'air et bien supérieure à celle attendue dans les bassins du Plateau (4,2 °C). Les grandes rivières du Plateau situées directement en aval des grands lacs n'ont pas été prises en considération pour ces projections car les lacs ne sont pas considérés dans les modèles utilisés. Comme les moyennes annuelles des eaux superficielles lacustres augmenteront de 3 °C ou 4 °C sans mesures de protection du climat d'ici la fin du siècle [14, 15], un réchauffement similaire peut être attendu dans les rivières en aval de ces lacs. Tant avec les modèles qu'avec l'étude statistique utilisant les mesures passées, la taille des bassins versants étudiés n'a aucune incidence sur l'élévation de la température.

IMPACTS DE L'AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES

Comme expliqué en introduction, une température de l'eau élevée peut générer du stress chez de nombreux organismes aquatiques voire, dans des cas extrêmes, causer leur mort. La prévalence de certaines maladies est également liée à l'élévation de la température de l'eau. Lorsque la température de l'eau est élevée, il est aussi plus difficile de l'utiliser à des fins de refroidissement. D'une part, l'élévation de la température de l'eau fait que la quantité de chaleur absorbable est réduite, ce qui doit être compensé par des prélèvements d'eaux de refroidissement plus importants. Or, cela se produira en été alors que le débit est réduit. D'autre part, si la température des eaux de refroidissement réchauffées dépasse 25 °C, il est interdit en Suisse de les déverser à nouveau dans un cours d'eau (des exceptions peuvent être octroyées).

L'augmentation de la température des eaux de surface devrait également affecter la température des eaux souterraines et des réservoirs qui sont alimentés par l'infiltration des rivières, avec des conséquences importantes sur la biochimie de ces réservoirs.

Afin d'illustrer l'impact des changements passés, présents et à venir, le nombre de jours par an pendant lesquels la température des cours d'eau atteint ou dépasse la limite légale des 25 °C est calculé. Comme le montre la partie haute de la *figure 5*, on constate une augmentation notable des épisodes d'eau chaude au cours des dernières décennies; en particulier, les années 2003 et 2018, caractérisées par une température de l'air extrêmement élevée, ont un impact évident sur la température de l'eau. Dans les années 1970 et 1980, les pics supérieurs à 25 °C ne se produisaient qu'accompagnés d'une réduction significative du débit. Ce n'est plus le cas depuis plusieurs décennies.

La situation pour quatre bassins versants dans le futur est illustrée dans la partie basse de la *figure 5*. Les bassins versants tels que la Birse et l'Eulach, qui sont actuellement moins sujets aux températures élevées de l'eau, atteindront à l'avenir assez souvent le seuil légal de 25 °C. Pour les bassins versants avec des températures de l'eau relativement chaudes dans les conditions actuelles, comme la Broye et la Petite Emme, la limite légale de 25 °C sera atteinte presque chaque année déjà

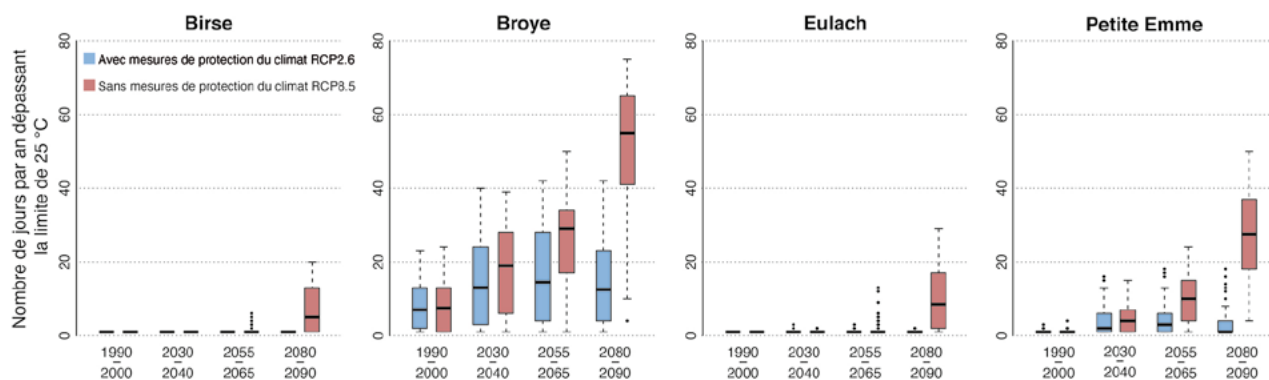
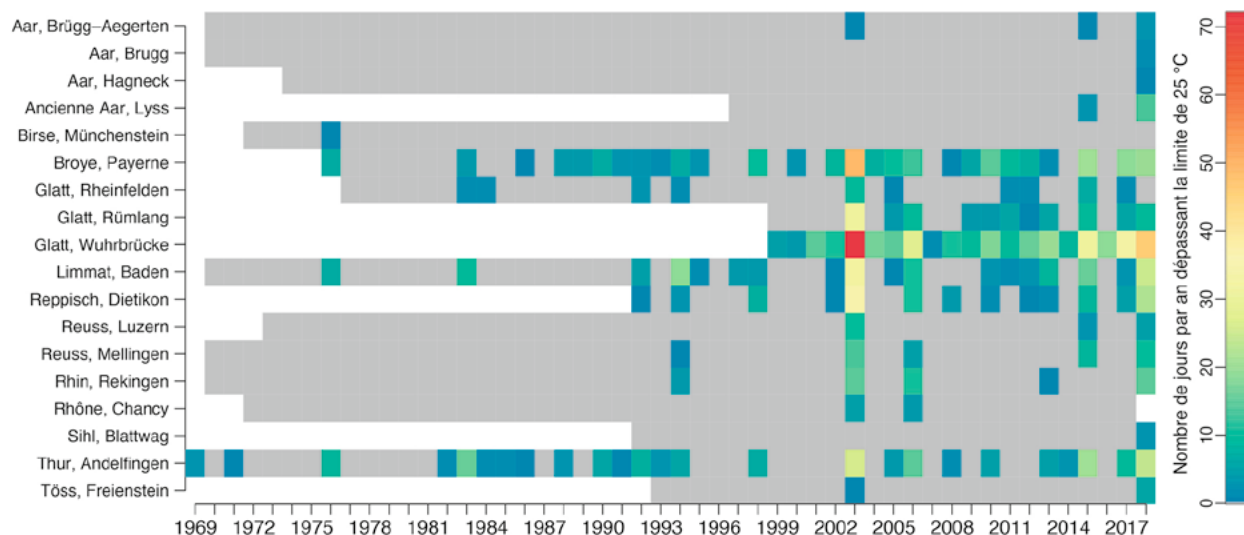


Fig. 5 En haut: Nombre de jours par an où la température journalière maximum a dépassé 25 °C pour les rivières où cela s'est produit (1969–2018). Le blanc représente l'absence de mesure et le gris les années où aucun événement ne s'est produit.

En bas: Nombre de jours modélisés où la température journalière maximum dépasse 25 °C pour quatre rivières, quatre périodes temporelles et avec (bleu) ou sans (rouge) mesure de protection du climat.

en 2030–2040, indépendamment des scénarios d'émission. À la fin du siècle et avec des scénarios d'émissions élevées, la température de l'eau sera supérieure à ce seuil pendant environ deux mois par an dans ces deux bassins versants. Cela impliquera soit l'arrêt de l'utilisation régulière de l'eau pour l'industrie et le refroidissement dans ces bassins versants ou des bassins aux conditions similaires, soit une adaptation de la réglementation actuelle, au risque de renforcer encore le stress et la pression sur ces systèmes écologiques.

La végétation le long des cours d'eau et les projets de renaturation sont actuellement considérés comme la seule stratégie d'atténuation efficace. À ce jour, il n'existe qu'un nombre limité d'études qui montre l'impact quantitatif des mesures de restauration sur la température de l'eau.

Plutôt qu'un réel refroidissement dû à la végétation (bilan d'énergie négatif), les mesures des flux d'énergie suggèrent que l'effet de refroidissement, qui peut attendre plusieurs degrés, résulte principalement d'une réduction du réchauffement [29–34].

Il est important de noter que ces mesures sont efficaces uniquement le long de petits cours d'eau car il est impossible d'ombrager un grand fleuve ou un lac avec de la végétation. De plus, l'effet obtenu est local, c'est-à-dire que quelques kilomètres en aval des zones ombragées l'effet est déjà perdu [33]. L'ajout de végétation le long des cours d'eau est donc une réponse possible afin d'offrir à la faune et la flore des habitats protégés du réchauffement, mais ne peut pas être vu comme une réponse globale au réchauffement en cours et à venir.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats montrent que les systèmes fluviaux en Suisse (et probablement dans l'ensemble des Alpes et des régions adjacentes), subissent des changements substantiels qui continueront quoi qu'il en soit dans un avenir proche, et ce à la fois en termes de température de l'eau et de disponibilité de l'eau. Même pour les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre les plus ambitieux, nous montrons que le réchauffement attendu aura un impact sur l'utilisation industrielle de l'eau et sur la faune aquatique, ce qui illustre le besoin urgent de stratégies d'atténuation du réchauffement de la température de l'eau et d'adaptation. Pour les scénarios sans mesure de protection du climat, les conditions extrêmes de la fin du siècle menaceront à la fois les

écosystèmes, les services écosystémiques et l'utilisation anthropique de l'eau. Ces effets seront bien plus marqués qu'avec des scénarios dans la lignée des accords de Paris. En particulier, les bassins alpins seront durement touchés en été. L'atténuation des changements climatiques est par conséquent primordiale malgré le fait que certains effets soient d'ores et déjà inévitables.

Afin de faire face aux changements à venir, les progrès rapides réalisés actuellement dans la modélisation de la température de l'eau se doivent de dépasser les limites des applications purement scientifiques et être mis à la disposition d'un public plus large pour une utilisation opérationnelle dans les systèmes de prévision et d'alerte. Le développement futur des systèmes de mesure sera également d'une grande importance pour améliorer la compréhension des processus liés à la température de l'eau et à la manière dont ils sont représentés dans les modèles [35]. Dans le cas précis de la Suisse, de nouvelles études évaluant l'impact des événements météorologiques extrêmes (par exemple vagues de chaleurs ou sécheresses) sur la température des rivières ainsi que l'influence des interactions avec les eaux souterraines seraient souhaitables. De plus, l'inclusion dans les modèles numériques du couplage des lacs et des rivières et des influences humaines sont des points importants à traiter dans le futur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [2] Benyahya, L. et al. (2007): A review of statistical water temperature models. *Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne des Ressources Hydriques* 32(3): 179–192. doi:10.4296/cwrj3203179
- [3] Temnerud, J.; Weyhenmeyer, G. (2008): Abrupt changes in air temperature and precipitation: Do they matter for water chemistry? *Global Biogeochemical Cycles* 22(2). doi:10.1029/2007GB003023
- [4] Caissie, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51(8): 1389–1406. doi:10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x
- [5] Carraro, L. et al. (2017): Integrated field, laboratory, and theoretical study of PKD spread in a Swiss pre-alpine river. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(45): 11992–11997. doi:10.1073/pnas.1713691114
- [6] Cauvy-Fraunié, S.; Dangles, O. (2019): A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution* 3(12): 1675–1685. doi:10.1038/s41559-019-1042-8
- [7] Fell, S. C. et al. (2021): Fungal decomposition of river organic matter accelerated by decreasing glacier cover. *Nature Climate Change*. doi:10.1038/s41558-021-01004-x
- [8] Hock, R. et al. (2005): Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming, pages 243–252. Springer Netherlands, Dordrecht. doi:10.1007/1-4020-3508-X_25
- [9] Barnett, T. P. et al. (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438: 303. doi:10.1038/nature04141
- [10] Bourqui, M. et al. (2011): Long-term forecasting of flow and water temperature for cooling systems: Case study of the Rhone river, France. *AHS Publication*, 348, 135–142
- [11] Viviroli, D. et al. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software* 24(10): 1209–1222. ISSN: 1364-8152, doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001
- [12] Beniston, M. (2012): Is snow in the Alps receding or disappearing? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 3(4): 349–358. doi:10.1002/wcc.179
- [13] Hannah, D. M.; Garner, G. (2015): River water temperature in the United Kingdom: Changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 39(1): 68–92. doi:10.1177/0309133314550669
- [14] 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 no. 2101, 134 pp.*
- [15] Michel, A. et al. (2021): Evolution of stream and lake water temperature under climate change. *Hydro-CH2018 Project. Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), 3003 Bern, Switzerland, 71 pp.* doi:10.16904/envidat.207
- [16] Michel, A. et al. (2020): Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(1): 115–142. doi:10.5194/hess-24-115-2020
- [17] Michel, A. et al. (2021): Climate change scenarios at hourly time-step over Switzerland from an enhanced temporal downscaling approach. *International Journal of Climatology* 41: 3503–3522. doi:10.1002/joc.7032
- [18] Epting, J. et al. (2021): Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology X* 11: 100071. doi:10.1016/j.hydroa.2020.100071
- [19] Michel, A. et al. (2021): Future water temperature of rivers in Switzerland under climate change investigated with physics-based models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2021: 1–45. doi:10.5194/hess-2021-194
- [20] Lehning, M. et al. (2006): Alpine3d: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Processes* 20(10): 2111–2128. doi:10.1002/hyp.6204
- [21] Gallice, A. et al. (2016): Streamflow1.0: an extension to the spatially distributed snow model Alpine3d for hydrological modelling and deterministic stream temperature prediction. *Geoscientific Model Development* 9(12): 4491–4519. doi:10.5194/gmd-9-4491-2016
- [22] Herold, T. et al. (2016): Fliessgewässertemperatur – zwei Modellansätze für zukünftige Prognosen. *Aqua & Gas* 12/2016: 60–67
- [23] Zekollari, H. et al. (2019): Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere* 13(4): 1125–1146. doi:10.5194/tc-13-1125-2019
- [24] CH2018 (2018): *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp., ISBN: 978-3-9525031-4-0*
- [25] OFEV (Ed.) (2019): *Zustand und Entwicklung Grundwasser Schweiz. Ergebnisse der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA, Stand 2016. State of the environment, 1901, Bern, 138 pp.*
- [26] Livingstone, H. et al. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12(1): 10–26. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x
- [27] OFEV (Ed.) (2012): *Effects of Climate Change on Water Resources and Waters. Synthesis report on «Climate Change and Hydrology in Switzerland» (CCHydro) project. Environmental studies, 1217, Bern, 74 pp.*
- [28] Küry, D. et al. (2017): Temperature patterns and factors governing thermal response in high elevation springs of the Swiss central Alps. *Hydrobiologia* 793(1): 185–197. doi:10.1007/s10750-016-2918-0
- [29] Imholt, C. et al. (2010): Influence of riparian cover on stream temperatures and the growth of the mayfly *Baetis Rhodani* in an upland stream. *Aquatic Ecology* 44(4): 669–678. doi:10.1007/s10452-009-9305-0
- [30] Imholt, C. et al. (2013): Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams. *Ecology* 94(3): 380–392. doi:10.1002/eco.1291
- [31] Garner, G. et al. (2014): What causes cooling water temperature gradients in a forested stream reach? *Hydrology and Earth System Sciences* 18(12): 5361–5376. doi:10.5194/hess-18-5361-2014
- [32] Garner, G. et al. (2015): Inter-annual variability in the effects of riparian woodland on micro-climate,

energy exchanges and water temperature of an upland Scottish stream. *Hydrological Processes* 29(6): 1080–1095. doi:10.1002/hyp.10223

- [33] Kalny, G. et al. (2017): The influence of riparian vegetation shading on water temperature during low flow conditions in a medium sized river. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 418: 5. doi:10.1051/kmae/2016037
- [34] Dugdale, S. J. et al. (2018): Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes. *Science of The Total Environment* 610–611: 1375–1389. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.198
- [35] Herold, T. et al. (2018): Temperaturmonitoring der Fließgewässer – Anpassung an zukünftige Herausforderungen, *Aqua & Gas* 12/2018: 54–59

> FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

«Veränderung der Wassertemperatur in Flüssen und Seen unter dem Einfluss des Klimawandels» [14, 15] zusammen. Ausgewählte Ergebnisse wurden ebenfalls in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht [16–19].

Die Ergebnisse einer zweiten Studie, die im Rahmen des BAFU-Forschungsprojekts Hydro-CH2018 im Zusatzmodul «Aktueller Stand und Temperaturentwicklung der Schweizer Lockergesteinsgrundwasservorkommen» durchgeführt wurde, sind im Artikel «Klimawandel und Grundwassertemperaturen» in dieser Ausgabe (S. 78) zusammengefasst.



Certificate of Advanced Studies (CAS)

Siedlungsentwässerung

Projektierung, Dimensionierung und Betrieb

Nächste Durchführung:
1. Oktober 2021 - 20. Mai 2022

Im CAS Siedlungsentwässerung lernen Sie Entwässerungsnetze und Kanalisationen zu planen, betreiben und zu unterhalten sowie Behandlungsanlagen für Regenwasser und Strassenabwasser (SABA) zu projektieren und dimensionieren.

Weitere Informationen unter:
bfh.ch/ahb/cassiedlungsentwaesserung

► Weiterbildung