

Débits des grands bassins versants

Résumé

Les cartes illustrent l'évolution des débits moyens mensuels, saisonniers et annuels ainsi que les paramètres d'étiage NM7Q et Q_{347} , selon les trois scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 au cours des trois périodes 2020–2049, 2045–2074 et 2070–2099 par rapport à la période de référence 1981–2010. Pour le paramètre Q_{347} , ce sont les valeurs selon la convention (LEaux, [1]) qui sont indiquées, plus précisément une moyenne calculée sur une période de dix ans. Elles mettent l'accent sur les débits des grands bassins versants, dont la plupart couvrent une superficie supérieure à 1000 km². Les débits des bassins versants de taille moyenne sont illustrés dans la carte L01. Quant à la situation des bassins versants alpins très englacés, elle est décrite dans la carte L03. Rappelons toutefois que les trois cartes se fondent sur des méthodes différentes.

Auteurs: Massimiliano Zappa¹, Florian Lustenberger¹, Rolf Weingartner², Alain Bühlmann², Regula Mülchi³

¹ Institut fédéral de recherches WSL, Hydrologie de montagne et mouvements de masse, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

² Atlas hydrologique de la Suisse, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berne

³ Université de Berne, Institut de géographie, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berne

1 Introduction

Le climat mondial change. Sous l'effet des émissions causées par l'homme, les concentrations de gaz à effet de serre n'ont cessé de s'accroître au cours des dernières décennies. Cette évolution a entraîné une hausse globale de la température [2], avec d'inévitables conséquences sur la cryosphère. Elle a également modifié les conditions de précipitations [3]. On suppose que les précipitations augmenteront en hiver et diminueront en été ([2]; voir carte K01), et que ce changement se répercutera directement sur les débits. Dans divers bassins versants, les débits estivaux ont déjà fléchi ces quarante dernières années [4]. En Suisse, c'est surtout en été que les études prévoient un recul des débits, voire des pénuries d'eau, ces phénomènes allant probablement toucher davantage le Plateau que l'espace alpin [5]. Il importe d'élaborer des scénarios afin d'évaluer avec plus de précision l'évolution des ressources en eau que représentent les débits et, surtout, pour en fournir une appréciation quantitative.

2 Données et méthodologie

La carte L02 présente les débits moyens des grands bassins versants simulés à l'aide du modèle PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration-HRU related hydrological Model). Pour l'établir, nous avons utilisé la version spatialement explicite du modèle, avec une résolution de 200 m sur 200 m [6]. Dans le modèle, les paramètres propres à la Suisse ont déjà été calibrés, validés et régionalisés par les études de Viviroli et al. [7], de Viviroli et al. [8] et de Köplin et al. [9]. Nous avons ainsi obtenu un jeu complet de paramètres maillés, avec une résolution spatiale de 2 km sur 2 km, déjà utilisé par Bernhard et Zappa [10] et Speich et al. [6]. Pour l'interpolation spatiale, nous avons eu recours à la méthode de krigeage. Les paramètres PREVAH sont issus de ce jeu de paramètres. Le modèle météorologique se fonde sur les précipitations, la température, l'humidité relative de l'air, le

rayonnement global et le vent près du sol mesurés dans des stations représentatives de MétéoSuisse durant la période allant de 1975 à 2016. Les données météorologiques ont fait l'objet d'une interpolation spatiale par régression dépendant de l'altitude et pondération par l'inverse de la distance [7]. Pour l'utilisation du sol et le modèle numérique du terrain, nous avons utilisé les données de la statistique de la superficie (GEOSTAT) de l'Office fédéral de la statistique (version de 1992/1997). Les hauteurs de neige mesurées proviennent du Système intercantonal de mesure et d'information (IMIS) et de l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches (SFL) du WSL [11]. Enfin, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a fourni des mesures quotidiennes des débits, qui ont servi à calibrer et à valider le modèle. Avant d'être utilisées, les données météorologiques étaient interpolées spatialement au moyen d'une régression en fonction de l'altitude et d'une interpolation en fonction de la distance [7].

La taille future des glaciers a été calculée à l'aide de la méthode mise au point par Zekollari et al. [12] et déjà utilisée par Brunner et al. [5] pour la modélisation des débits (voir aussi la carte L04).

Pour modéliser les futurs débits moyens, nous sommes partis des données du scénario climatique CH2018 [3]. A cet effet, nous avons réduit les données issues du modèle climatique à l'échelle des stations (voir « Daily Local » dans CH2018). Au total, nous avons utilisé 39 chaînes de modèles fondées sur les scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 (voir tableau 1). Cette sélection de modèles est légèrement moins étendue que celle utilisée pour la carte L01, car il aurait fallu disposer d'autres variables (le vent, p. ex.) pour calculer l'évaporation. Or, ces variables ne figurent pas dans tous les modèles climatiques.

Les simulations des débits moyens portent sur quatre périodes : la période de la référence (1981–2010), l'avenir proche (2020–2049), le milieu du siècle (2045–2074) et la fin du siècle (2070–2099). A titre d'indicateurs d'étiage, on utilise une moyenne annuelle sur 30

GCM	init	RCM	RCP8.5		RCP4.5		RCP2.6	
			0.11°	0.44°	0.11°	0.44°	0.11°	0.44°
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E		☑		☑		
		DMI-HIRHAM5	☑		☑		☑	
		CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	SMHI-RCA4	☑		☑		☑	
		CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		ICTP-RegCM4-3						
		KNMI-RACMO22E		☑		☑		☑
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI-RCA4	☑		☑		☑	
		CLMcom-CCLM4-8-17		☑				
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
		MPI-CSC-REM02009						
		MPI-CSC-REM02009						
MIROC-MIROC5	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		☑
		CLMcom-CCLM5-0-6		☑				
CCCma-CanESM2	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	r1i1p1	SMHI-RCA4						
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	SMHI-RCA4						
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	SMHI-RCA4		☑		☑		☑
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	r1i1p1	SMHI-RCA4						

Tableau 1. Le modèle global des scénarios climatiques CH2018 résulte de diverses chaînes de modèles (simulations). Celles-ci sont constituées d'une succession de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM) et se fondent parfois sur des conditions initiales (init) différentes. Le texte qui accompagne les cartes K01 ou K02 donne un aperçu de tous les calculs modélisés disponibles dans tous les scénarios climatiques CH2018. Les calculs pris en compte pour établir la série statistique (médiane, minimum, maximum), répartis par scénario d'émissions (RCP) et leur résolution spatiale (0.11° ou 0.44°), sont spécifiés (☑) dans la moitié droite du tableau. La comparaison de ce tableau avec ceux correspondant à d'autres cartes (K01/K02, L01, L03 et L04) révèle les écarts entre les calculs modélisés pris en considération. Tableau obtenu à partir de [3].

ans, déterminée à partir des débits moyens les plus faibles d'une année ou d'une saison calculés sur sept jours consécutifs (NM7Q). Pour le paramètre Q_{347} , c'est le 5^e centile du débit journalier moyen sur dix ans qui est utilisé (LEaux, [1]). Les simulations des chaînes de modèles associées à chaque scénario RCP ont permis de déduire l'intervalle de confiance.

3 Résultats

Indépendamment de la région et du scénario d'émissions, les résultats révèlent une augmentation des débits en hiver et au printemps et une diminution des débits en été et en automne. Au cours des diverses périodes de trente ans et jusqu'à la fin du siècle, les débits annuels moyens tendent plutôt à diminuer dans les trois scénarios. Cette tendance est toutefois moins marquée que les changements saisonniers.

Dans les grands bassins versants alpins du Rhône et de l'Inn, la fonte des neiges et, surtout, des glaciers

perd de son influence au cours du XXI^e siècle. Associée au recul des précipitations en été (carte K01), cette perte d'influence entraîne une baisse des débits estivaux, qui se fait surtout sentir vers la fin du siècle dans le scénario RCP8.5. Les différents scénarios font en général état d'une augmentation des débits de décembre à mai.

Dans l'Aar, du cours supérieur de la rivière à son cours inférieur, les débits suivent en principe la même évolution jusqu'à la fin du siècle : une augmentation en hiver, due à une hausse des températures et à un léger accroissement des précipitations, et une diminution en été, engendrée par un déficit de précipitations (K01) et, vers la fin du siècle surtout, par une fonte très faible des glaciers. Compte tenu de ces modifications des débits, le cours inférieur de l'Aar continuera d'afficher son débit mensuel maximal au début de l'été, en principe jusqu'à la fin du siècle selon le scénario RCP8.5. L'année sera toutefois partagée en deux périodes distinctes, avec des débits mensuels d'im-

portance similaire de décembre à juin et des débits mensuels faibles de juillet à novembre. Soulignons que les débits mensuels les plus bas ne seront plus enregistrés en hiver, mais de plus en plus souvent en été (en fonction du scénario et de la période considérée). La même variabilité apparaît dans le cours supérieur de la rivière, davantage influencé par les conditions alpines. C'est par exemple le cas de l'Aar à Thoun. La fonte des glaciers exerçant une influence relativement grande sur ce tronçon, la diminution drastique de la fonte des glaciers y provoquera une forte diminution des débits de juillet à septembre, en particulier dans le scénario RCP8.5. La même observation vaut pour les cours supérieur et inférieur de la Reuss et de la Limmat. Les débits du Rhin suivent en principe la même évolution que ceux de l'Aar.

A Bâle, le Rhin, qui draine tout le versant nord des Alpes et dont le bassin versant englobe donc des zones situées dans les Alpes, dans les Préalpes et sur le Plateau, affiche très clairement les changements décrits plus haut : augmentation des débits en hiver, arrivée plus précoce des débits printaniers et diminution des débits en été. Relevons qu'à partir de la période 2020 à 2049, et dans tous les scénarios d'émissions, les valeurs minimales des débits mensuels se décalent de l'hiver vers l'été. Dans le cas des grands bassins versants qui s'étendent des Alpes au Plateau en passant par les Préalpes, les modifications des débits moyens mensuels et annuels sont moins marquées jusqu'à la fin du siècle – dans tous les scénarios et en termes de pourcentage – que dans les bassins versants de l'espace alpin. La différence s'explique avant tout par le fait que les régions alpines sont davantage affectées par la hausse des températures (K02) et l'influence de celle-ci sur la fonte des neiges et des glaciers (voir aussi L04). Cette corrélation avec l'altitude se retrouve également pour les situations d'étiage. Dans le Moyen-Pays et le Jura ainsi qu'au sud des Alpes, les débits d'étiage vont diminuer à l'avenir. Il y aura par conséquent moins d'eau à disposition et les périodes d'étiage vont se multiplier. Dans les Alpes, où les débits étaient jusqu'ici les plus faibles en hiver, ils vont en revanche augmenter pendant les situations d'étiage.

4 Interprétation et utilisation des résultats

Les projections hydrologiques sont basées sur une longue chaîne de différents modèles. Cette chaîne comprend les scénarios d'émissions, l'effet qui en résulte dans les modèles climatiques ainsi que les modèles hydrologiques. Chaque modèle de cette chaîne comporte des incertitudes. Celles-ci sont prises en considération dans la mesure où la modélisation hydrologique se fonde sur un grand nombre de modèles climatiques et sur trois scénarios d'émissions. Cependant, un seul modèle hydrologique a été utilisé et le recours à d'autres modèles hydrologiques aurait pu déboucher sur des résultats différents. Une comparaison avec d'autres études (voir carte L01) fait toutefois état

d'une bonne concordance des indices annonciateurs de changement.

Comme les simulations climatiques ne représentent que l'un des climats futurs possibles et que chaque modèle possède une structure légèrement différente, il faut se rappeler que les diverses simulations ne constituent qu'une seule possibilité parmi beaucoup d'autres. Nous recommandons dès lors de considérer le modèle dans son ensemble (intervalle de confiance) et d'utiliser des moyennes pluriannuelles (périodes de trente ans, p. ex.). Cette manière de procéder permet d'apprécier la robustesse des résultats et de réduire l'influence de la variabilité interne du climat. Outre la médiane de chaque modélisation (également appelée « estimation moyenne »), la carte illustre la valeur estimée minimale et maximale de l'ensemble. Ces valeurs sont un indicateur de la robustesse, dans la mesure où elles révèlent la concordance des différentes modélisations. Il est toutefois impossible de comparer directement les valeurs minimales et maximales de L02 avec celles des cartes des précipitations et des températures (K01 et K02), qui illustrent le 5^e et le 95^e centile des valeurs déterminées. Les modèles disponibles pour prévoir les débits étaient en effet moins nombreux, de sorte qu'il n'a pas été possible de calculer les centiles de manière fiable.

On peut affirmer que la fourchette de tous les scénarios établis pour les débits des grands bassins versants correspond aux ressources en eau qui seront potentiellement disponibles à l'avenir. Etant donné que les scénarios des débits établis pour la période de référence (simulations des débits à l'aide des données météorologiques de CH2018) s'écartent dans certains cas plus ou moins des calculs de vérification réalisés pour la période de référence (simulations des débits sur la base de données météorologiques mesurées) et que ces derniers résultats s'écartent à leur tour plus ou moins des valeurs mesurées pendant la période de référence, il importe de considérer les valeurs absolues des scénarios des débits [mm] avec prudence. Soulignons en effet que le modèle hydrologique n'inclut pas avec précision l'influence des lacs dans les grands bassins versants, dans la mesure où il les représente comme des réservoirs linéaires isolés, sans tenir compte des réglages des barrages de régulation. Par ailleurs, diverses incertitudes demeurent dans l'ensemble de la chaîne de modèles et elles entachent les données mesurées. Il vaut donc mieux considérer les écarts entre les scénarios.

5 Exemple d'application

La carte L02 montre 25 stations pour lesquelles des scénarios de débits ont été établis. Pour afficher les quatre graphiques présentant l'évolution potentielle des débits à l'avenir, il faut cliquer sur l'emplacement de l'une de ces stations, puis sur le lien « Scénarios de débits ».

Le premier onglet « Régime d'écoulement » montre les débits mensuels et permet de comparer le régime d'écoulement au cours des différentes périodes

dans les différents scénarios d'émissions. Pour obtenir l'aperçu souhaité, il est possible de masquer ou de faire apparaître certaines courbes ou l'intervalle de confiance en cochant les cases appropriées dans la légende. Il est également possible de modifier l'unité de l'axe des ordonnées, c'est-à-dire de remplacer les valeurs absolues [mm] par des valeurs relatives [%]. Enfin, au milieu au-dessus du graphique, une option permet de choisir la période ou le scénario d'émissions. La figure 1 illustre l'évolution des débits mensuels moyens jusqu'à la fin du XXI^e siècle en prenant le cas de l'Aar à Untersiggenthal dans le scénario d'émissions RCP8.5. Alors que les débits devraient diminuer durant l'été, ils devraient enregistrer une légère augmentation durant l'hiver.

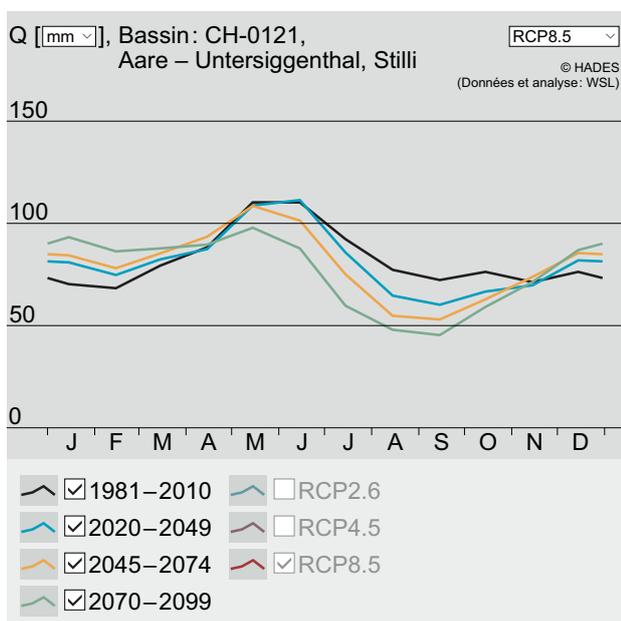


Figure 1. Aar–Untersiggenthal, Stilli : évolution du régime d'écoulement jusqu'à la fin du XXI^e siècle dans le scénario d'émissions RCP8.5. L'évolution commence par la courbe noire (période de référence) et se termine par la courbe verte (2085) en passant par les courbes bleue (2035) et jaune (2060).

Le deuxième onglet, « Débits moyens », permet de comparer l'évolution dans le temps des débits moyens de certains mois et de certaines saisons ou des débits annuels dans les trois scénarios d'émissions. La figure 2 révèle que le débit annuel moyen à la station considérée tend à diminuer légèrement. La diminution des débits estivaux et l'augmentation des débits hivernaux s'annulent presque complètement.

Les troisième et quatrième onglets montrent, de façon analogue au deuxième onglet, la future évolution des valeurs-clés de l'étiage, NM7Q et Q₃₄₇ respectivement.

Le cinquième onglet, « Données de base », comprend un résumé, pour le bassin versant considéré, des scénarios des précipitations, des températures et des glaciers qui ont été pris en considération pour modéliser les débits. Il est possible de consulter ces informations pour interpréter les scénarios de débits. Pour

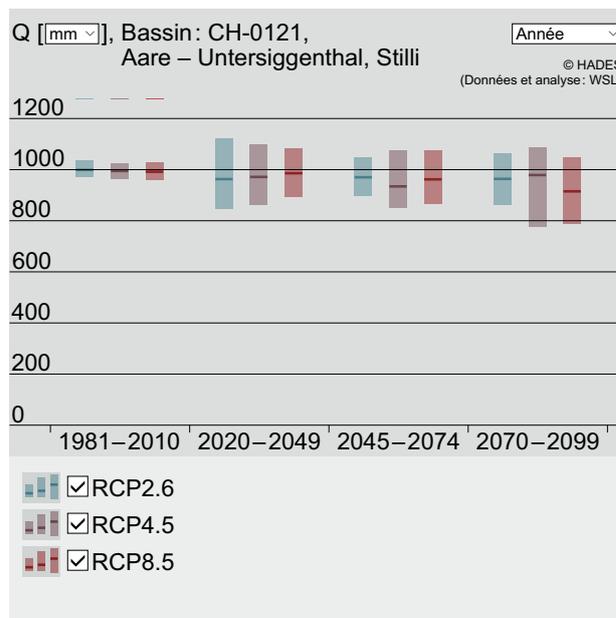


Figure 2. Aar–Untersiggenthal, Stilli : diminution des débits annuels jusqu'à la fin du XXI^e siècle dans les trois scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5

l'exemple ci-dessus, les illustrations font état d'une augmentation des précipitations en hiver, associée à une hausse des températures (débit accru en hiver) et à une diminution des précipitations en été (débit plus faible en été). La surface englacée ne représente d'ores et déjà plus que 1.5% environ de ce bassin versant et ne joue dès lors qu'un rôle secondaire.

Pour terminer, il est possible de comparer les répartitions spatiales des modifications de débits pour des bassins versants de taille similaire. A cet effet, sélectionnez « Bassins versants » dans le volet de gauche de la carte L02 et définissez la superficie du bassin versant à l'aide du menu déroulant. Dans le volet de droite, vous pouvez alors sélectionner le paramètre de débit souhaité (MQ, NM7Q, Q₃₄₇), le scénario d'émissions de votre choix, la période, etc. La figure 3 illustre les modifications relatives des débits printaniers jusqu'à la fin du XXI^e siècle dans le scénario RCP8.5 pour des bassins versants dont la superficie avoisine 3250 km². Dans les bassins versants entièrement alpins (Rhône et Rhin), il faut s'attendre à une augmentation des débits. Cette tendance n'apparaît pas dans les bassins versants de l'Aar et de la Reuss, car les régions de basse altitude y occupent une place plus grande, de sorte que l'évolution de la fonte des neiges au printemps y revêt moins d'importance.

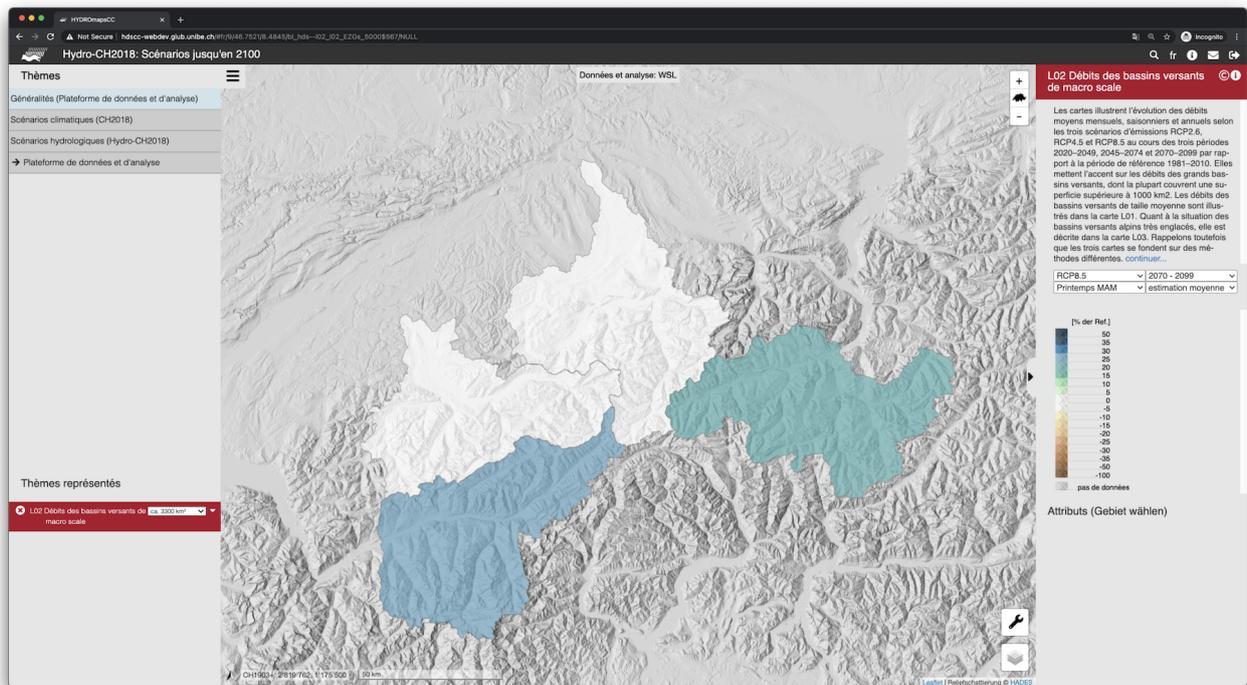


Figure 3. Modification relative des débits printaniers dans le scénario RCP8.5. Sont représentés ici des bassins versants d'une superficie d'environ 3250 km² : Rhône à la hauteur de Sion, Aar à la hauteur de Berne–Schönau, Reuss à la hauteur de Mellingen et Rhin à la hauteur de Domat/Ems (de gauche en bas à droite).

6 Versions

Tableau 2. Versions

Version	Description
v1.0 (2020)	Version du jeu de données : version 1.0, septembre 2018.
v2.0 (2022)	Extension des cartes pour inclure les valeurs-clés de l'étiage, NM7Q et Q ₃₄₇ . Adaptation du titre de la carte.

Références

- [1] L'Assemblée fédérale de la Confédération suisse (1991). Loi fédérale sur la protection des eaux, LEaux. In : https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/fr.
- [2] IPCC, Pachauri, R. et Meyer, L., eds. (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*. Geneva, Switzerland : IPCC.
- [3] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich : National Centre for Climate Services.
- [4] Michel, A., Brauchli, T., Lehning, M., Schaeffli, B. et Huwald, H. (2020). Stream temperature and discharge evolution in Switzerland over the last 50 years: annual and seasonal behaviour. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 24.1. <https://hess.copernicus.org/articles/24/115/2020/>, p. 115–142. ISSN : 1027-5606. DOI : 10.5194/hess-24-115-2020.
- [5] Brunner, M. I. et al. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. In : *Science of The Total Environment* 666. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719306576>, p. 1033–1047. ISSN : 00489697. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.
- [6] Speich, M. J., Bernhard, L., Teuling, A. J. et Zappa, M. (2015). Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. In : *Journal of Hydrology* 523. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415001055>, p. 804–821. ISSN : 00221694. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.
- [7] Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J. et Weingartner, R. (2009a). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. In : *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005186>, p. 208–225. ISSN : 00221694. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2009.08.022.
- [8] Viviroli, D., Zappa, M., Schwanbeck, J., Gurtz, J. et Weingartner, R. (2009b). Continuous si-

mulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. In : *Journal of Hydrology* 377.1-2. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169409005174>, p. 191–207. ISSN : 00221694. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.

- [9] Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B. et Weingartner, R. (2010). How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – a framework for a comprehensive assessment. In : *Advances in Geosciences* 27. <https://adgeo.copernicus.org/articles/27/111/2010/>, p. 111–119. ISSN : 1680-7359. DOI : 10.5194/adgeo-27-111-2010.
- [10] Bernhard, L. et Zappa, M. (2012). *Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH- CH-Hydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete*. Birnensdorf : Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- [11] Jörg-Hess, S., Fundel, F., Jonas, T. et Zappa, M. (2014). Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications. In : *The Cryosphere* 8.2. <https://tc.copernicus.org/articles/8/471/2014/>, p. 471–485. ISSN : 1994-0424. DOI : 10.5194/tc-8-471-2014.
- [12] Zekollari, H., Huss, M. et Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. In : *The Cryosphere* 13.4. <https://tc.copernicus.org/articles/13/1125/2019/>, p. 1125–1146. ISSN : 1994-0424. DOI : 10.5194/tc-13-1125-2019.