Débits des bassins versants de taille moyenne

Résumé
La carte montre les modifications que subissent les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels ainsi que les paramètres d'étiage NM7Q et Q_{347} sous l'effet du changement climatique, pour les trois scénarios d'émissions RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Ces projections sont basées sur l'ensemble de données sur les débits du projet « Hydro-CH2018 »; elles illustrent les changements pour trois périodes futures : 2035 (2020–2049), 2060 (2045–2074) et 2085 (2070–2099). 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. La carte présente des bassins versants de taille moyenne. Les débits des grands bassins versants sont représentés sur la carte L02. Quant à la situation des bassins versants alpins très englacés, elle est décrite dans la carte L03. Relevons toutefois qu'il y a des différences dans la méthodologie utilisée pour établir ces trois cartes.

Auteures et auteurs: Regula Mülchi[1], Ole Rössler[2], Jan Schwanbeck[1], Rolf Weingartner[1], Olivia Martius[1]
[1] *Université de Berne, Institut de géographie et Oeschger Centre for Climate Change Research, Hallerstrasse 12, CH-3012 Berne*
[2] *Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Coblence*

1 Introduction

Les projections des débits des cours d'eau sont un élément fondamental pour évaluer les répercussions hydrologiques du changement climatique. Elles constituent la base pour planifier et mettre en œuvre des mesures d'adaptation dans différents domaines, tels que l'agriculture, l'industrie, le tourisme ou l'écologie. Elles soulignent en outre la grande utilité des mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette carte repose sur l'ensemble de données sur les débits « Hydro-CH2018 » [2], qui a été créé dans le cadre du projet homonyme et financé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Elle indique les modifications prévues pour le régime d'écoulement de 91 bassins versants de taille moyenne, dont la surface se situe entre 14 et 1700 km^2. Ces bassins versants englobent les différents régimes d'écoulement : glacial, nival, pluvial [3]. La carte illustre l'évolution des valeurs moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles ainsi que les paramètres d'étiage NM7Q pour trois périodes de 30 ans, pour trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre : augmentation faible (RCP2.6), moyenne (RCP4.5) et forte (RCP8.5). Le paramètre Q_{347} est déterminé de manière analogue, mais les valeurs sont des moyennes sur dix ans selon la convention de la LEaux [1].

2 Données et méthodologie

L'ensemble de données sur les débits Hydro-CH2018 comprend des débits journaliers modélisés pour la période 1981 à 2099, pour chacun des trois scénarios d'émissions. Cet ensemble a été simulé à l'aide du modèle hydrologique PREVAH (Precipitation Runoff EVApotranspiration HRU related Model, [4]). Celui-ci a été mis au point pour la modélisation hydrologique dans des terrains complexes ; il est constitué de différents modèles partiels, qui intègrent des processus tels que des modifications de l'humidité du sol ou de la fonte des neiges et des glaciers. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle repose sur la formule de Hamon basée sur la température [5]. Cette dernière a été choisie en raison de sa simplicité ; en effet, la température y est l'unique variable d'entrée météorologique. PREVAH a été adéquatement calibré et validé pour chaque bassin versant. Il a été alimenté par des valeurs d'entrée météorologiques mesurées ; les débits simulés ont ensuite été comparés aux débits observés. La calibration a été réalisée en utilisant d'une part des jeux de données matricielles des précipitations (RhiresD ; [6]) et des températures (TabsD ; [7]) journalières, à titre d'intrants météorologiques ; d'autre part, des débits journaliers (OFEV [8]). Elle a été effectuée à l'aide de l'algorithme PEST [9], sur la base des années paires de la période 1985 à 2014. La validation consécutive s'est fondée sur les années impaires de la même période. Les résultats de la calibration et de la validation sont globalement satisfaisants : pour la période de calibration et de validation, on a obtenu une efficacité Nash-Sutcliffe moyenne de tous les bassins versants de 0.82 ; l'efficacité Kling-Gupta est de 0.89. Les modifications saisonnières du débit pendant la période de calibration et de validation concordent également avec les valeurs mesurées.

Pour simuler le débit pendant la période 1981–2099, on a utilisé les données météorologiques des nouveaux scénarios climatiques CH2018. Ces derniers fournissent des données matricielles journalières pour les précipitations et les températures, de 1981 à 2099, dans une résolution de 2 km · 2 km. Les chaînes de modèles climatiques utilisées, leur résolution et les scénarios d'émissions correspondants sont représentées dans le tableau 1 (voir cartes K01 et K02). Etant donné que l'ensemble de données sur les débits « Hydro-CH2018 » repose uniquement sur la température et les précipitations, le nombre de modèles disponibles par scénario d'émissions est légèrement supérieur à celui de la carte L02. Pour de plus amples informations concernant CH2018, les chaînes de modèles correspondantes et les hypothèses sur lesquelles les scénarios sont fondés, voir le texte explicatif de la carte K01. Les simulations reposent sur l'hypothèse

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		✓		✓		
	r3i1p1	DMI-HIRHAM5	✓		✓		✓	
	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	✓		✓			
		CLMcom-CCLM5-0-6		✓				
		SMHI-RCA4	✓		✓		✓	
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	✓		✓			
		CLMcom-CCLM5-0-6		✓				
		ICTP-RegCM4-3						
		KNMI-RACMO22E		✓		✓		✓
		SMHI-RCA4	✓		✓			✓
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	✓		✓			
		CLMcom-CCLM5-0-6		✓				
		MPI-CSC-REMO2009						
		SMHI-RCA4	✓		✓			✓
	r2i1p1	MPI-CSC-REMO2009	✓		✓		✓	
MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM5-0-6		✓				
		SMHI-RCA4		✓		✓		✓
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 et L02 à L04) révèle les écarts entre les calculs modélisés pris en considération. Tableau obtenu à partir de [11].

d'une utilisation inchangée des terres dans les bassins versants non englacés pendant la totalité du XXIe siècle. Dans les bassins versants englacés, les surfaces des glaciers ont été adaptées tous les cinq ans selon les projections de Zekollari et al. ([10], représentées dans la carte L04) afin de tenir compte du recul des glaciers. Vous trouverez des informations plus complètes sur les méthodes et l'évaluation modélisée dans Muelchi et al. [2]. A titre d'indicateurs d'étiage, on utilise une moyenne annuelle sur 30 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 5e centile du débit journalier moyen sur dix ans qui est utilisé.

3 Résultats

Les modifications des débits moyens mensuels dues au changement climatique suivent des schémas différents selon le régime hydrologique. Les bassins versants ci-après ont été sélectionnés pour illustrer représentativement les modifications des régimes d'écoulement en Suisse d'ici à 2085 pour les scénarios RCP8.5 et RCP2.6 (figure 1). Rosegbach–Pontresina (glaciaire, 22% englacés), Kander–Hondrich (glacio-nival, 5% englacés), Plessur–Coire (nival), Emme–Emmenmatt (pluvio-nival), Venoge–Ecublens (pluvial) et Verzasca–Lavertezzo (pluvial, sud des Alpes).

Les débits hivernaux augmentent d'une manière générale, en raison de l'accroissement d'abord des précipitations durant l'hiver et ensuite des pluies par rapport aux précipitations globales. Les débits estivaux, par contre, baissent. Deux motifs à cela : une évapotranspiration plus importante due à l'élévation des températures et une diminution des précipitations en été. Dans les bassins versants englacés, ce recul du débit estival s'accentuera à long terme, car la fonte des glaces diminuera au fur et à mesure de la baisse du volume des glaciers.

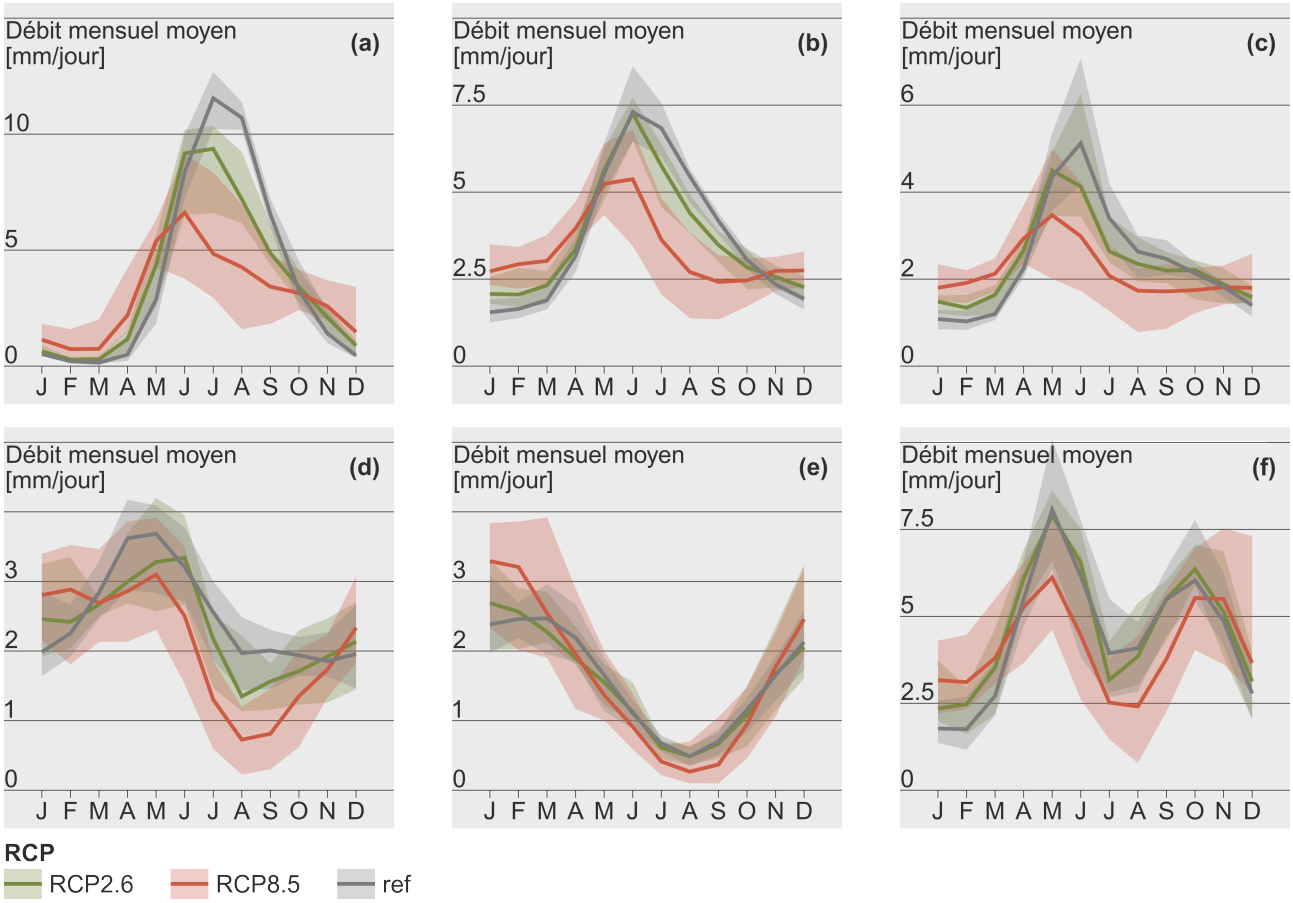

Figure 1. Régimes d'écoulement de Rosegbach (a), Kander (b), Plessur (c), Emme (d), Venoge (e) et Verzasca (f). Les lignes en gras indiquent la médiane de tous les modèles pour la période de référence (gris), pour RCP2.6 en 2085 (vert) et RCP8.5 en 2085 (rouge). La zone colorée indique la fourchette de tous les modèles [12].

Dans le scénario RCP8.5, le régime d'écoulement change d'ici à la fin du siècle dans le bassin versant fortement englacé du Rosegbach, passant d'un régime typiquement glaciaire à un écoulement à dominante nivale, les plus forts débits étant enregistrés à la fin du printemps / au début de l'été, au lieu de la fin de la période estivale. Le débit moyen entre juin et septembre diminue massivement, en raison du recul du glacier et d'une fonte des neiges plus faible, tandis que le débit hivernal augmente. La contribution du débit hivernal au volume annuel reste toutefois faible. Pour le régime du bassin versant de la Kander, moins englacé, on prévoit également une augmentation du débit en hiver et une forte diminution en été, tout comme un décalage des plus forts débits mensuels estivaux vers le printemps et le début de l'été. A la différence du bassin versant fortement englacé, le débit hivernal gagne ici en importance. Dans le bassin versant nival de la Plessur, le débit maximal du mois de juin est déplacé vers mai. Du fait de l'augmentation du débit en hiver et de sa diminution en été, la courbe s'aplatit, c'est-à-dire que la différence entre le maximum et le minimum du débit mensuel moyen devient plus petite pour RCP8.5. Dans le bassin versant pluvio-nival de l'Emme, le débit en été et au début de l'automne diminue considérablement et la pointe typique enregistrée au printemps disparaît progressivement, la fonte des neiges baissant. Le régime d'écoulement pluvial de la Venoge demeure ; l'amplitude du régime s'accentue toutefois par rapport à la période de référence, car les débits augmentent en hiver et diminuent en été. Pendant la période de référence, on note deux pointes de débit dans le bassin versant pluvial de la Verzasca, situé au sud des Alpes, l'une à la fin du printemps, l'autre en automne. Ce schéma se maintiendra jusqu'à la fin du siècle, mais les pointes seront moins prononcées.

Qualitativement parlant, les modifications (diminution / augmentation) prévues pour RCP2.6 correspondent au signal de RCP8.5 pour presque tous les mois et tous les bassins versants. Les écarts par rapport à la période de référence 1981–2010 sont toutefois bien inférieurs que pour RCP8.5. Il ressort en outre que les résultats dépendent dans une forte mesure de l'altitude. Dans les bassins versants alpins, les changements liés au climat sont très prononcés en hiver, au printemps et en été, tandis qu'à plus basse altitude, ils sont perceptibles surtout à la fin de l'été et en automne. 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 dé-

bits étaient jusqu'ici les plus faibles en hiver, ils vont en revanche augmenter pendant les situations d'étiage. Les simulations indiquent donc que le changement climatique aura des répercussions différentes sur les bassins versants, en fonction de leur situation et de leurs propriétés. Pour les résultats plus détaillés, voir Muelchi et al. [12] et Muelchi et al. [13].

4 Interprétation et utilisation des résultats

Lors de l'utilisation des résultats de l'ensemble de données sur les débits « Hydro-CH2018 », il convient de tenir compte des remarques suivantes :

- Les projections hydrologiques se fondent sur une longue chaîne de différents modèles, qui 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. Dans l'ensemble de données sur les débits « Hydro-CH2018 », 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. Par contre, un seul modèle hydrologique a été utilisé. Il faut donc noter que le recours à des modèles hydrologiques supplémentaires pourrait aboutir à des résultats (légèrement) différents. Cependant, une comparaison avec les résultats obtenus à l'aide d'autres modèles pour quelques bassins versants a montré une bonne concordance s'agissant des effets du changement climatique sur les débits (rapport final OFEV, [14]).
- Il est fortement recommandé de recourir à des moyennes pluriannuelles (p.ex. des périodes de 30 ans) et de prendre en compte l'ensemble de modèles (toutes les chaînes de modèles). Une telle approche réduit l'influence de la variabilité interne du climat et améliore la solidité des résultats. La médiane des analyses effectuées à l'aide des modèles produit ainsi la « meilleure estimation ». Il n'en reste pas moins que toute projection n'équivaut qu'à une évaluation probable du débit. En combinant la médiane, à titre de meilleure estimation, et la prise en compte de la distribution des valeurs de l'ensemble des données disponibles, on obtient une indication sur la solidité de la projection. Notons que les estimations « minimale » et « maximale » représentées sur la carte correspondent effectivement à la valeur respectivement minimum et maximum de tous les modèles. Il en découle que la présente carte se distingue des cartes des précipitations et des températures (K01 et K02), où la fourchette équivaut aux 5^{e} et 95^{e} centiles. Cette dernière n'aurait pas pu être raisonnablement déterminée pour la présente carte, vu que le nombre de modèles était nettement inférieur.
- Il convient en outre de considérer que le nombre de chaînes de modèles climatiques varie d'un scénario d'émissions à l'autre (tableau 1) : huit pour RCP2.6, seize pour RCP4.5 et vingt pour RCP8.5. Ces divergences dans la taille des ensembles peuvent influer sur certaines analyses (p.ex. la statistique de l'ensemble).

5 Exemple d'application

La carteL01 montre 91 stations pour lesquelles des simulations des débits ont été réalisées. Si vous cliquez sur une station, le lien « Scénarios de débits » donne accès, par le biais d'onglets, à la représentation de quatre paramètres illustrant l'évolution future calculée pour le débit ainsi qu'à une compilation des données de base.

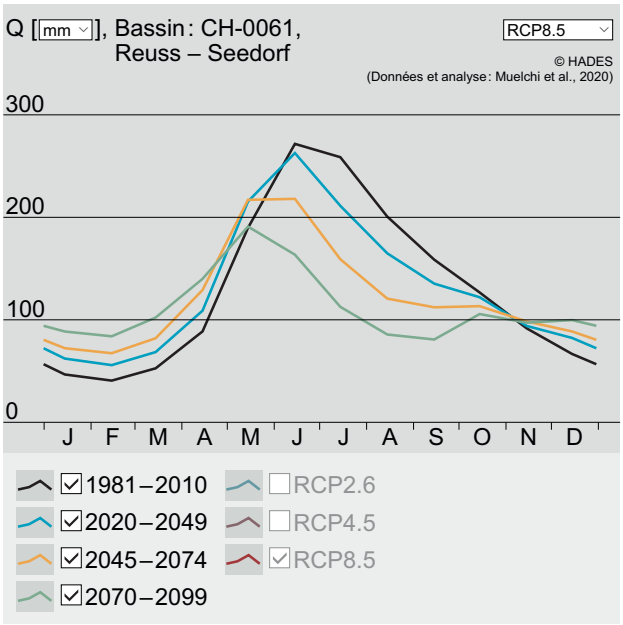

Figure 2. Reuss – Seedorf : modification du régime d'écoulement d'ici à la fin du XXI^{e} siècle

Le premier onglet, « Régime d'écoulement », montre les débits moyens mensuels. Il est possible d'y comparer le régime à différentes périodes et pour 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 [%]. Ces dernières se rapportent à la période de référence modélisée. Enfin, au milieu au-dessus du graphique, une option permet de choisir la période ou le scénario d'émissions. La figure 2 illustre l'évolution des débits mensuels moyens pour les différentes périodes, en prenant l'exemple de la Reuss à Seedorf dans le scénario d'émissions RCP8.5. On escompte une diminution des débits durant l'été et une augmentation durant l'hiver.
Le deuxième onglet, « Débits moyens », permet de comparer l'évolution dans le temps des débits moyens de certains mois, de saisons ou d'années, dans les trois scénarios d'émissions. La figure 3 révèle que le débit annuel moyen de la Reuss diminue. Ce constat

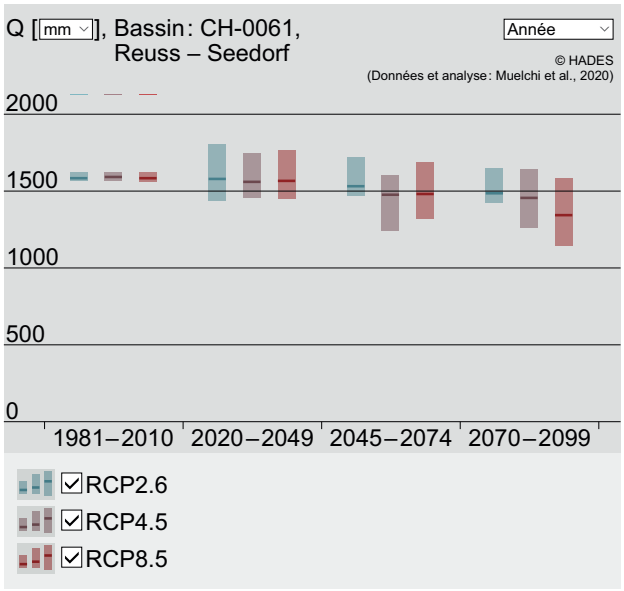

Figure 3. Reuss – Seedorf : diminution du débit annuel d'ici à la fin du XXI^{e} siècle, dans les scénarios RCP2.6 (bleu), RCP4.5 (violet) et RCP8.5 (rouge)

indique que la diminution des débits estivaux sera supérieure à l'augmentation des débits hivernaux.
Les troisième et quatrième onglets montrent, de façon analogue au deuxième onglet, la future évolution des valeurs-clés de l'étiage, NM7Q et Q_{347} respectivement.
Le cinquième onglet, « Données de base », comprend un résumé, pour le bassin versant en question, 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 une interprétation plus poussée des scénarios de débit. Dans le cas de la Reuss, ces informations indiquent qu'en hiver les précipitations et les températures augmenteront (débit accru en hiver), tandis que les précipitations diminueront en été et les surfaces englacées se rétréciront (débit réduit en été).
Pour terminer, il est possible de comparer les répartitions spatiales des modifications de débits pour des bassins versants de taille similaire. Dans la barre latérale gauche, il est possible, sous L01 « Bassins versants », de définir, à l'aide du menu déroulant, la surface des bassins versants à afficher. Dans la barre latérale droite, il est possible ensuite de sélectionner le paramètre de débit souhaité (MQ, NM7Q, Q_{347}), le scénario d'émissions de votre choix, le scénario d'émissions souhaité, la période, etc. La figure 4 montre les modifications relatives des débits printaniers jusqu'à la fin du XXI^{e} siècle dans le scénario d'émissions RCP8.5. Les débits baissent dans les bassins versants en altitude, alors qu'ils augmentent au printemps pour les bassins versants situés plus en altitude et englacés.

6 Versions

Tableau 2. Versions

Version	Description
v1.0 (2020)	Le jeu de données et les méthodes utilisées sont décrits dans Muelchi et. al. [2]. Les données sont disponibles à l'adresse : https://doi.org/10.5281/zenodo.3937485
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 fédéralesur la protection des eaux, LEaux. In : https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/fr.

[2] Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J. et Martius Rompainen, O. (2021a). An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climatechange conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). In : *Geoscience Data Journal*. DOI : 10.1002/gdj3.117.

[3] Weingartner, R. et Aschwanden, H. (1992). Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. In : *Atlas hydrologique de la Suisse*. Sous la dir. d'Office fédéral de l'environnement OFEV. T. 1. Planche 5.2. https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/cours-d-eau-et-lacs/planche-5-2. Berne : Office fédéral de topographie swisstopo.

[4] Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. et Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. In : *Environmental Modelling & Software* 24.10. https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815209000875, p. 1209–1222. ISSN : 13648152. DOI : 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

[5] Hamon, W. (1961). Estimating Potential Evapotranspiration. In : *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 87, p. 107–120.

[6] MeteoSwiss ed. (2019a). *Daily Precipitation (field analysis): RhiresD*. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-niederschlag/doc/ProdDoc_RhiresD.pdf.

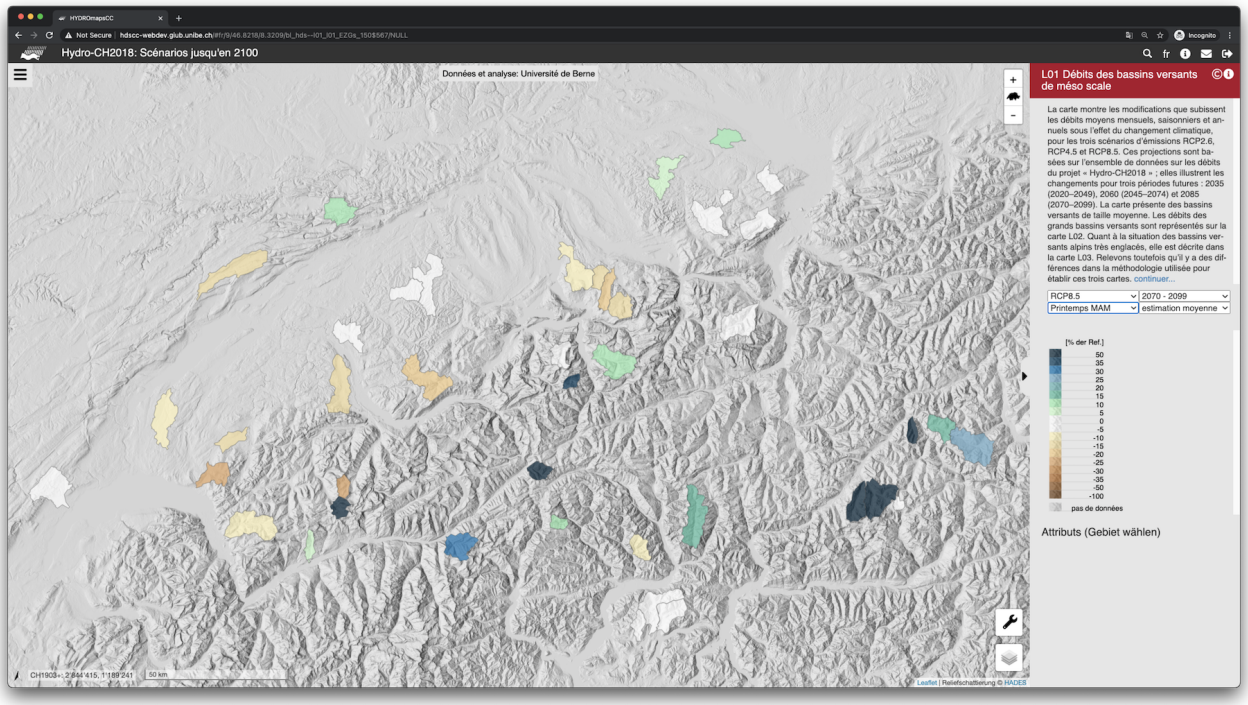

Figure 4. Modifications relatives des débits printaniers jusqu'à la fin du XXI^{e} siècle pour RCP 8.5

[7] MeteoSwiss ed. (2019b). *Daily Mean, Minimum and Maximum Temperature: TabsD, TminD, TmaxD*. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-temperatur/doc/ProdDoc_TabsD.pdf.

[8] Bundesamt für Umwelt BAFU (2021a). Datenservice Hydrologie für Fliessgewässer und Seen. In : https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/daten/messwerte-zum-thema-wasser-beziehen/datenservice-hydrologie-fuer-fliessgewaesser-und-seen.html.

[9] Dorthey, J. (2005). *PEST: Model-Independent Parameter Estimation, User Manual*. Brisbane, Australia : Watermark Numerical Computing.

[10] 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.

[11] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich : National Centre for Climate Services.

[12] Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. et Martius, O. (2021b). River runoff in Switzerland in a changing climate–runoff regime changes and their time of emergence. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 25.6, p. 3071–3086. DOI : 10.5194/hess-25-3071-2021.

[13] Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. et Martius Rompainen, O. (2021c). River runoff in Switzerland in a changing climate – changes in moderate extremes and their seasonality. In : *Hydrology and Earth System Sciences* 25.6, p. 1209–2021. DOI : 10.5194/hess-25-3577-2021.

[14] Bundesamt für Umwelt BAFU (2021b). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft*. Umwelt-Wissen. https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-hydroszenarien/synthesebericht.html. Bern : Bundesamt für Umwelt BAFU.