

Scénarios des précipitations et des températures jusqu'en 2100

Résumé

Les données matricielles issues des scénarios climatiques CH2018 concernant les précipitations et les températures montrent différents développements possibles jusqu'à la fin de ce siècle. Elles peuvent être affichées pour trois scénarios différents, pour un mois, une saison ou une année, avec indication des incertitudes. Des moyennes spatiales sont également disponibles pour des bassins versants, des bassins pour le calcul du bilan et des bassins fluviaux. Il est important de tenir compte des remarques limitatives lorsque les données sont interprétées ou utilisées.

Auteurs: Andreas Fischer¹, Sven Kotlarski¹, Alain Bühlmann²

¹ Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), Operation Center 1, CH-8058 Zurich-Aéroport

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

1 Introduction

Il est essentiel de disposer d'informations détaillées et fiables concernant l'évolution du climat pour planifier les mesures d'adaptation au changement climatique, tout comme pour mener des études et développer des applications dans le domaine des conséquences du changement climatique. Ces données sont mises à disposition à intervalles réguliers par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse). Les scénarios climatiques actuels CH2018 ont été publiés à la fin de 2018, sous la forme de six produits [1]. Ils tiennent compte des connaissances tirées du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [2] et reposent sur les plus récentes simulations climatiques pour l'Europe selon trois scénarios d'émissions. Pour la planification et les applications dans le domaine des conséquences du changement climatique, il est primordial de disposer de bonnes données sur l'évolution du climat à l'échelle locale et dans une résolution temporelle élevée. Les scénarios climatiques CH2018 ont permis de générer des données dans une résolution journalière (p. ex. précipitations ou températures), d'une part pour différentes stations de mesure réparties dans toute la Suisse et d'autre part pour une grille haute résolution de 2 · 2 km². Ces données sont disponibles à l'adresse www.klimaszenarien.ch pour toute simulation à l'aide de modèles climatiques. Elles sont utilisées pour estimer les conséquences du changement climatique et ont servi de base pour calculer les nouveaux scénarios hydrologiques qui sont représentés sur la plateforme de l'atlas (cartes L01, L02, L03).

Pour les applications pratiques dans les domaines de l'administration et de l'économie, les données CH2018 locales en résolution journalière ont été traitées plus avant, en faisant des moyennes spatiales et/ou temporelles. Ces jeux de données matricielles pour les températures et les précipitations sont représentés ici. Tous les jeux de données traités dans les scénarios climatiques sont accessibles par le biais de l'atlas web.

2 Données et méthodes

A la base des données des scénarios locaux de CH-2018, il y a un ensemble de simulations du climat pour la période 1981–2099. Des modèles climatiques planétaires (« GCM » de l'anglais general circulation model), qui fonctionnent à une vaste échelle, ont été affinés géographiquement pour obtenir des modèles climatiques régionaux (« RCM ») : ils portent sur un espace limité, mais leur définition géographique est plus haute et, à leurs confins, ils sont animés par la simulation globale [3]. Ce passage à une échelle inférieure (downscaling), l'Europe en l'occurrence, a été réalisé dans le cadre de l'initiative Euro-CORDEX (www.euro-cordex.net). Dans CH2018 enfin, un total de 68 chaînes de simulation GCM-RCM ont été intégrées pour calculer les scénarios climatiques¹. L'ensemble de modèles en comprend neuf planétaires et sept régionaux (voir les coches du tableau 1), dont la résolution horizontale est de 12 km (« haute résolution », HR) ou 50 km (« faible résolution », LR).

Différentes hypothèses concernant l'évolution future des émissions mondiales de gaz à effet de serre (les scénarios d'émissions) sont utilisées comme conditions marginales dans les simulations. Trois scénarios d'émissions ont été considérés dans les scénarios climatiques CH2018 :

- RCP8.5 : scénario sans mesures de protection du climat, dans lequel les émissions mondiales ne cessent d'augmenter.
- RCP4.5 : scénario intermédiaire, prévoyant un accroissement plus faible des émissions mondiales jusqu'au milieu de ce siècle environ, suivi d'un aplatissement de la courbe.
- RCP2.6 : scénario de protection du climat systématique, où les objectifs de réduction des émissions fixés dans l'accord de Paris sont atteints.

Etant donné que les modèles climatiques régionaux reposent encore sur une échelle spatiale relativement

¹Correspond à l'état en mai 2017. Depuis lors, Euro-CORDEX a procédé à d'autres simulations, qui n'ont toutefois pas pu être prises en compte pour les scénarios climatiques CH2018.

grossière, il a fallu traiter statistiquement les résultats produits afin de générer des prévisions locales pour le climat [4] [5]. Les conditions requises pour suivre une telle procédure sont l'existence, en sus des simulations climatiques régionales (« RCM »), de longues séries de mesures issues de différentes stations ou relatives à des grilles à haute définition spatiale. Ces informations ont été utilisées pour calibrer les modèles afin qu'ils reproduisent le plus fidèlement possible l'état actuel. Pour focaliser les simulations du modèle sur des stations précises et sur une grille de $2 \cdot 2 \text{ km}^2$, on a comparé les fonctions de distribution simulées pour différentes variables climatiques, en résolution journalière pour la période de calibration 1981–2010, à la fonction de répartition issue de mesures ; une fonction d'erreur par centile et par jour en a été dérivée. Les valeurs journalières individuelles de la simulation 1981–2009 ont ensuite été corrigées à l'aide de la fonction d'erreur spécifique du modèle. Cette opération a produit des séries chronologiques corrigées transitoires pour 1981–2009, dans une résolution journalière. Cette procédure de « quantile mapping » a été appliquée individuellement pour chaque simulation climatique et chaque variable. Il en a découlé 31 simulations corrigées selon le scénario RCP8.5, 25 selon RCP4.5 et 12 selon RCP2.6. Ces données locales sont à la base d'une série d'analyses ayant servi à calculer les nouveaux scénarios hydrologiques.

Une comparaison systématique des résultats par scénario d'émissions requiert une série cohérente de résultats modélisés. Vu que le nombre de simulations n'est pas le même pour les différents scénarios d'émissions, la grille de simulation a été élargie par une procédure de mise à l'échelle pour les endroits où la simulation faisait défaut (○ dans le tableau 1). Cette procédure s'appuie, aussi bien pour les températures que pour les précipitations, sur l'évolution mondiale des températures, laquelle découle du modèle planétaire correspondant (procédure dite de « pattern scaling ») [6]. En outre, les chaînes de simulation disponibles à double (même combinaison GCM-RCM pour des échelles spatiales différentes au départ ou des initialisations différentes) ont été réduites (✓ sans cercle). On obtient ainsi une série cohérente d'un total de 21 simulations par scénario d'émissions (combinaison des ○ et de ⊙ dans le tableau 1).

Enfin, pour représenter les résultats dans l'atlas et dériver des informations simples sur le climat permettant de générer des statistiques sur les séries chronologiques journalières et locales, différents paramètres et agrégations ont été appliqués :

- Agrégation temporelle
 - Moyenne mensuelle
 - Moyenne saisonnière
 - Moyenne annuelle
- Agrégations spatiales
 - Moyenne du bassin versant
 - Moyenne du bassin pour le calcul du bilan
 - Moyenne du bassin fluvial

- Périodes climatologiques (moyennes sur 30 ans)
 - 1995 (1981–2010)
 - 2035 (2020–2049)
 - 2060 (2045–2074)
 - 2085 (2070–2099)
- Informations concernant les incertitudes des 21 simulations climatiques (par scénario d'émissions)
 - 5^e centile (« estimation la plus basse »)
 - 50^e centile (« estimation moyenne »)
 - 95^e centile (« estimation la plus haute »)

3 Résultats

Le changement climatique va continuer à s'accroître en Suisse à l'avenir. Pour le scénario d'émissions sans protection du climat (RCP8.5), on escompte une hausse continue de la température annuelle moyenne en Suisse par rapport à la période de référence 1981–2010 : 0.9 à 1.9 °C d'ici à 2035, 2.0 à 3.3 °C d'ici à 2060 et 3.3 à 5.4 °C d'ici à la fin du siècle (figure 1a et b). Parallèlement, les précipitations deviendront plus fréquentes en hiver, mais plus rares en été (figure 1e et f). Les scénarios climatiques fondés sur RCP8.5 indiquent, en médiane pour les différents modèles de simulation, une augmentation des précipitations hivernales moyennes d'environ +8% d'ici au milieu de ce siècle, et de +15% d'ici à la fin du siècle ; en été, les valeurs devraient baisser de -11% d'ici à 2050 et de -21% d'ici à 2100 (figure 1e et f).

Les scénarios climatiques CH2018 mettent cependant aussi en évidence le potentiel que renferment les efforts en matière de protection du climat : une protection résolue du climat (RCP2.6) permettrait d'éviter en Suisse la moitié des effets possibles du changement climatique d'ici au milieu de ce siècle, par rapport au scénario RCP8.5, et de deux tiers environ d'ici à la fin du siècle (figure 1c et d) [1].

4 Remarques concernant l'interprétation et l'utilisation des données

Ces données fournissent des informations sur le futur climat en Suisse, localisées sur une grille de $2 \cdot 2 \text{ km}^2$. A titre de séries chronologiques locales corrigées et en résolution journalière, elles revêtent une importance particulière pour les applications dans le domaine des conséquences du changement climatique. L'application de la procédure du « quantile mapping » pour générer les données locales repose toutefois sur une série d'hypothèses et des étapes de mise en œuvre pragmatiques. Il en découle des restrictions d'utilisation des données pour les applications. Il convient en effet de tenir impérativement compte des points suivants :

- **Signal de changement climatique**
Les données de scénario locales peuvent aboutir à un signal de changement climatique légè-

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		✓		○		○
		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		✓		✓		○

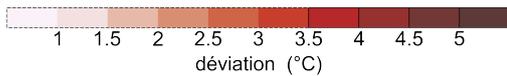
Tableau 1. L'ensemble de modèles des scénarios climatiques CH2018 découle des différents calculs modélisés (simulations). Il s'agit d'une série de modèles climatiques planétaires (GCM) et régionaux (RCM), qui sont initiés (init) sur la base de différentes conditions de départ. Dans la partie droite du tableau, les simulations CH2018 sont indiquées par une coche avec ou sans cercle (✓/○). En distinguant entre les différents scénarios d'émissions (RCP), on a travaillé avec des séries chronologiques de précipitations et de températures de 1981–2099, en résolution journalière et en résolution spatiale de 0.11° et/ou 0.44°. Lorsque des simulations identiques ont été réalisées pour une résolution spatiale basse (0.44°) et pour une résolution élevée (0.11°), on n'a retenu que la première (✓ sans cercle) afin de permettre une comparaison systématique des signaux climatiques ressortant des différents scénarios d'émissions. En outre, pour les simulations qui existent en double et qui ne se distinguent que par l'initialisation, seule l'une d'entre elles a été prise en compte (r2i1p1–MPI-CSC-REMO2009). Pour parvenir à un même nombre de simulations par scénario d'émissions, l'ensemble de modèles a été élargi à l'aide d'une procédure de mise à l'échelle (○). Les deux cartes K01 et K02 et les statistiques d'ensemble (médiane, minimum, maximum) utilisées à cet effet reposent par conséquent sur les simulations représentées par un cercle en ligne continue ou un cercle pointillé (○/○). Tableau tiré de [1].

Température (a)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
hiver

RCP8.5
estimation moyenne



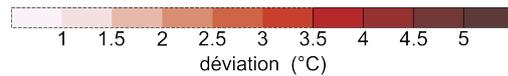
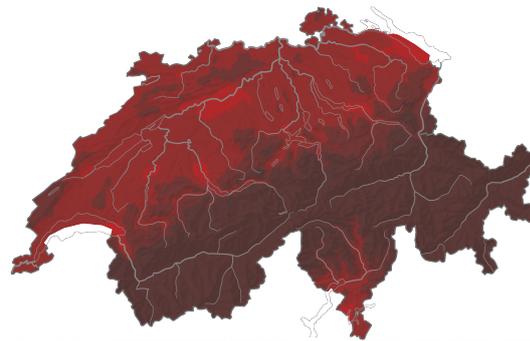
© scénarios climatiques CH2018

Température (b)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
été

RCP8.5
estimation moyenne



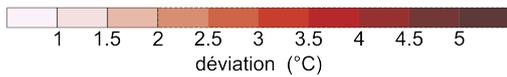
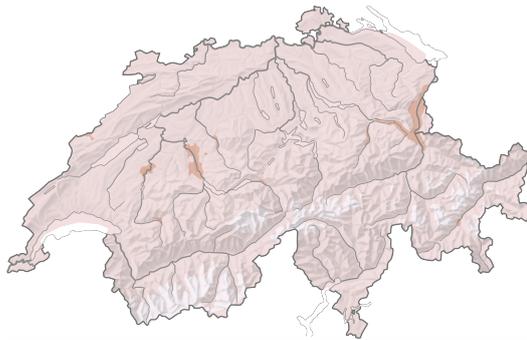
© scénarios climatiques CH2018

Température (c)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
hiver

RCP2.6
estimation moyenne



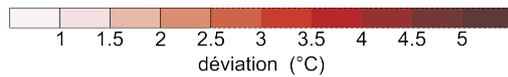
© scénarios climatiques CH2018

Température (d)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
été

RCP2.6
estimation moyenne



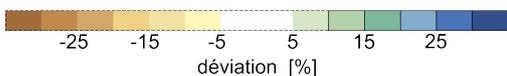
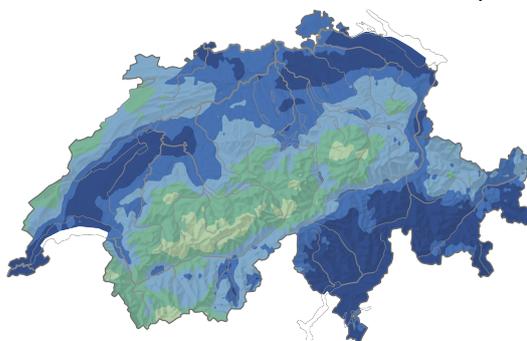
© scénarios climatiques CH2018

Précipitations (e)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
hiver

RCP8.5
estimation moyenne



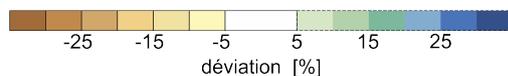
© scénarios climatiques CH2018

Précipitations (f)

déviatiun de la période standard 1981–2010

2085
été

RCP8.5
estimation moyenne



© scénarios climatiques CH2018

Figure 1. Modifications de la température (a à d) et des précipitations (e et f) en l'an 2085 environ, par rapport à la période 1981–2010. Les valeurs indiquées sont les médianes (estimation moyenne) des simulations des modèles climatiques analysées (figures tirées de l'atlas web).

rement différent de celui qui ressort des simulations modélisées à l'échelle régionale (définition moins haute), sur lesquelles ces données sont fondées. Ces différences peuvent déboucher également sur des déviations dans les gradients d'altitude en rapport avec le signal de changement de température. Il n'est pas clair pour l'heure si cette modification du signal est un artefact statistique ou une caractéristique réelle.

• Structure temporelle

Bien que la fonction de distribution des données de scénario locales corresponde à celle reprise d'observations, des erreurs systématiques peuvent néanmoins se produire dans la chaîne temporelle, par exemple des fluctuations trop faibles ou trop importantes d'une année à l'autre ou des erreurs dans la séquence des jours secs et des jours pluvieux. La chaîne temporelle n'est pas explicitement corrigée par la procédure statistique. Des travaux antérieurs indiquent cependant que ces séquences sont réalistes, du moins pour les précipitations[7] [8].

• Effet d'îlot de chaleur

Les données de la grille des températures ne contiennent pas d'informations sur l'effet d'îlot de chaleur dans les villes. Aux périodes de pic, ce dernier peut entraîner une température de plusieurs degrés supérieure dans les centres urbains par rapport à la périphérie [9].

Lors de l'utilisation des données en résolution journalière, il faut prendre en compte d'autres limitations encore. Elles concernent, outre les points susmentionnés, la structure spatiale, la cohérence entre les variables et les analyses des extrêmes. Un examen détaillé des données de la grille locale tirées des scénarios climatiques CH2018 est proposé dans le rapport technique CH2018 [4].

5 Exemple d'application

Les cartes « K01 Scénario des précipitations jusqu'en 2100 » et « K02 Scénario des températures jusqu'en 2100 » montrent l'évolution future des précipitations et des températures pour les trois scénarios d'émissions. Si l'une des deux cartes est ouverte, il est possible, en cliquant sur l'un des points bleus (agrandir la carte), d'analyser plus en détail l'évolution du paramètre correspondant pour le bassin versant en question. Pour ce faire, suivez le lien « Scénarios des précipitations » ou « Scénarios des températures », qui vous permettra d'accéder aux deux graphiques qui suivent.

Sur le premier onglet – intitulé « Régime des précipitations » ou « Régime des températures » – il est possible de comparer le développement des variations annuelles du paramètre choisi pour différentes périodes ou différents scénarios d'émissions. Pour une meilleure lisibilité, l'une des cases dans la légende peut être désactivée afin d'enlever les courbes correspondantes du graphique. En outre, l'unité de l'axe peut être modifiée, pour passer des valeurs absolues

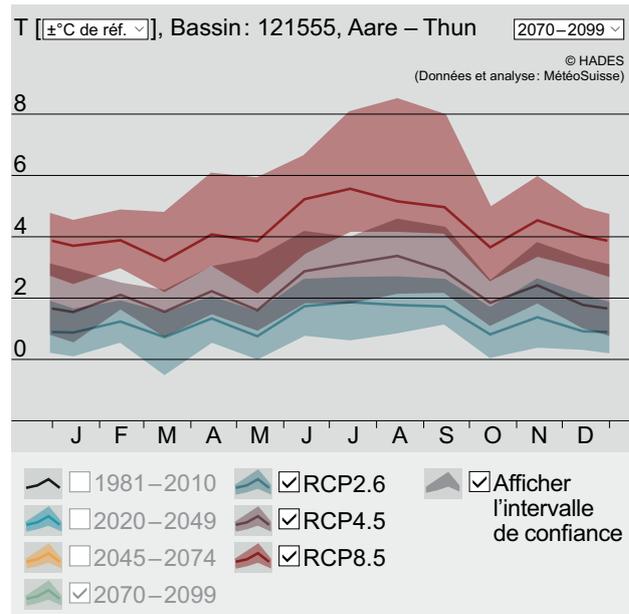


Figure 2. Modification relative de la température [°C] à l'intérieur du bassin versant de l'Aar près de Thoune, pour la période 2070–2099, par comparaison à la période de référence 1981–2010. Sont représentés les changements de température mensuels, y compris un intervalle de confiance (5% et 95%), pour les scénarios d'émissions RCP2.6 (bleu), RCP4.5 (violet) et RCP8.5 (rouge).

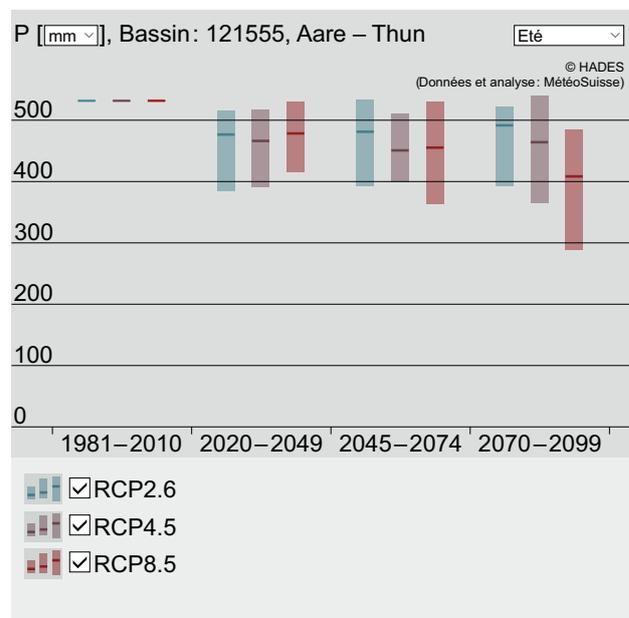


Figure 3. Précipitations prévues [mm] dans le bassin versant de l'Aar près de Thoune durant les mois d'été (juin, juillet, août). Sont représentés les quantités de pluie, y compris un intervalle de confiance (5% et 95%), pour les scénarios d'émissions RCP2.6 (bleu), RCP4.5 (violet) et RCP8.5 (rouge).

à des valeurs relatives à la période de référence ou à des valeurs de modification absolues. Enfin, il est possible de choisir, en haut au milieu du graphique, le scénario d'émissions ou la période à représenter. La figure 2 montre à titre d'exemple l'évolution des températures mensuelles moyennes jusqu'à la fin du XXI^e siècle, pour les trois scénarios d'émissions. Dans tous les scénarios, la température médiane de tous les mois augmente, cette croissance étant toutefois de plus en plus marquée, plus les émissions augmentent. Le graphique laisse présager également que les températures auront tendance à croître davantage en été que durant le reste de l'année.

Sur le deuxième onglet – intitulé respectivement « Précipitations moyennes » et « Températures moyennes » – il est possible d'examiner l'évolution temporelle des précipitations ou des températures pour des mois donnés, des saisons ou tout une année, et de les comparer pour les trois scénarios d'émissions. La figure 3 montre un exemple d'évolution des précipitations estivales jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Le signal est moins évident que pour l'évolution des températures. Tous les scénarios prévoient toutefois une baisse des précipitations, laquelle s'accroît surtout dans le cas de RCP8.5 vers la fin du siècle.

6 Versions

Tableau 2. Versions

Version	Description
v1.0 (2020)	CH2018 Project Team (2018) : CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services. doi : 10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0

Références

- [1] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. Zurich : National Centre for Climate Services.
- [2] IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Giorgi, F., Jones, C. et Asrar, G. R. (2009). Addressing Climate Information Needs at the Regional Level: the CORDEX Framework. In : t. 58. WMO Bulletin, p. 175–183.
- [4] Feigenwinter, I. et al. (2018). *Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland*. Sous la dir. de Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss. Technical Report MeteoSwiss 270.
- [5] Kotlarski, S. et Rajczak, J. (2018). CH2018 2018, Chapter 5: Localized projections. In : Zurich : National Centre for Climate Services. ISBN : 978-3-9525031-4-0.
- [6] Knutti, R. et Soerland, S. (2018). CH2018 2018, Chapter 4: Seasonal mean changes. In : Zurich : National Centre for Climate Services. ISBN : 978-3-9525031-4-0.
- [7] Rajczak, J., Kotlarski, S. et Schär, C. (2016). Does Quantile Mapping of Simulated Precipitation Correct for Biases in Transition Probabilities and Spell Lengths? en. In : *Journal of Climate* 29.5. <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/29/5/1605/35084/Does-Quantile-Mapping-of-Simulated-Precipitation>, p. 1605–1615. ISSN : 0894-8755, 1520-0442. DOI : 10.1175/JCLI-D-15-0162.1.
- [8] Ivanov, M. A. et Kotlarski, S. (2017). Assessing distribution-based climate model bias correction methods over an alpine domain: added value and limitations: ASSESSMENT OF DISTRIBUTION-BASED CLIMATE MODEL BIAS CORRECTION METHODS. en. In : *International Journal of Climatology* 37.5. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.4870>, p. 2633–2653. ISSN : 08998418. DOI : 10.1002/joc.4870.
- [9] Burgstall, A. (2019). *Representing the Urban Heat Island Effect in Future Climates*. MeteoSchweiz Scientific Report 105.