

Effets des changements climatiques sur les eaux suisses

Hydrologie, écologie et gestion des eaux



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Effets des changements climatiques sur les eaux suisses

Hydrologie, écologie et gestion des eaux

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Groupe de projet

Petra Schmocker-Fackel (direction de projet), Fabia Hüslér, Carlo Scapozza (président), Michael Sinreich, Roland Hohmann, Sabine Kleppek, Bänz Lundsgaard-Hansen, Adrian Jakob, Carolin Schärfp, Olivier Overney † (OFEV)
Andreas Fischer (MétéoSuisse)
Irene Roth, Jan Béguin (OFAG)

Auteurs et rédaction

Petra Schmocker-Fackel, Fabia Hüslér, Edith Oosenbrug (OFEV)
Klaus Lanz (international water affairs)
Samuel Zahner, Eva Wieser (Ecoplan)

Groupe d'experts (Confédération)

OFEV: Martin Barben, Gian Reto Bezzola, Emmanuel Brocard, Therese Bürgi, Damian Dominguez, Katharina Edmaier, Daniel Hefti, Andreas Helbling, Susanne Haertel-Borer, Christian Holzgang, Andreas Inderwildi, Caroline Kan, Sybille Kilchmann, Andreas Knutti, Ronald Kozel, Manuel Kunz, Christian Leu, Roberto Loat, Stephan Müller, Reto Muralt, Martin Pfaundler, Michael Schärer, Marc Schürch, Ueli Sieber, David Siffert, Michael Sinreich, Florian Storck, Markus Thommen
MétéoSuisse: Sven Kotlarski, Cornelia Schwierz, Michiko Hama
OFAG: Ruth Badertscher, Daniel Felder, Michael Zimmermann
OFEN: Guido Federer

Groupe d'experts (projets de recherche et rapports de base)

Agroscope: Annelie Holzkämper
Eawag – Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau: Florian Altermatt, Simon Benateau, Damien Bouffard, Adrien Gaudard †, Love Råman Vinnå, Martin Schmid, Christian Stamm, Alfred Johny Wüest
EPF de Lausanne: Hendrik Huwald, Adrien Michel
EPF de Zurich: Paolo Burlando, Edouard L. Davin, Daniel Farinotti, Lukas Gudmundsson, Martin Hirschi, Ronny Meier, Peter Molnar, Nadav Peleg, Clemens Schwingshackl, Sonia I. Seneviratne, Richard Wartenburger
Haute école technique de Rapperswil: Andrea-Kristin Bachmann, Sara Bieler, Sami Gysin, Susanne Kytzia, Aurelian Schumacher, Dominik Schwere, Jürg Speerli
Institut suisse de spéléologie et de karstologie: Pierre-Yves Jeannin
Université de Bâle: Annette Affolter Kast, Jannis Epting, Peter Huggenberger
Université de Berne: Flavio Anselmetti, Regula Mülchi, Olivia Martius, Ole Rössler, Bettina Schaefli, Jan Schwanbeck, Rolf Weingartner, Oliver Wetter, Andreas Zischg
Université de Fribourg: Matthias Huss
Université Albert-Ludwig de Fribourg-en-Brisgau: Irene Kohn, Kerstin Stahl, Michael Stoelze
Université de Genève: Virginia Ruiz-Villanueva, Markus Stoffel
Université de Lausanne: Emmanuel Reynard
Université de Neuchâtel: Marie Arnoux, Philipp Brunner, Daniel Hunkeler
Université de Zurich: Daphné Freudiger, Jan Seibert, Illja van Meerveld, Daniel Vivioli
Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage: Norina Andres, Konrad Bogner, Manuela Brunner, Astrid Björnsen Gurung, Käthi Liechti, Elke Kellner, Bettina Matti, Heike Lischke, Tobias Jonas, Christoph Marty, Jeannette Nötzli, Marcia Phillips, Matthias Speich, Manfred Stähli, Tobias Wechsler, Massimiliano Zappa

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2021: Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 2101: 134 p.

Traduction

Service linguistique de l'OFEV

Graphiques

Zeichenfabrik, Zurich

Mise en page

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Photo de couverture

Areuabach

© WWF Schweiz / Eduardo Soteras

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-2101-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

La présente publication est également disponible en allemand, en italien et en anglais. La langue originale est l'allemand.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des experts mentionnés pour leurs contributions techniques et les précieuses discussions que nous avons pu mener avec eux. Nos remerciements vont également à toutes les autres personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration du présent rapport.

Table des matières

Abstracts	6	
Avant-propos	7	
Résumé	8	
1 Introduction	10	
2 Méthodologie	12	
2.1 Modèles et incertitudes	12	
2.2 Scénarios climatiques	13	
2.3 Scénarios hydrologiques	14	
3 Le régime hydrique dans le contexte des changements climatiques	20	
4 Facteurs climatologiques exerçant une influence	23	
4.1 Température de l'air	23	
4.2 Précipitations	24	
4.3 Évapotranspiration et humidité du sol	26	
5 Cryosphère	30	
5.1 Neige	30	
5.2 Glaciers et pergélisol	31	
6 Eaux	33	
6.1 Débits annuels	33	
6.2 Débits saisonniers	36	
6.3 Lacs	44	
6.4 Eaux souterraines	47	
6.5 Crues	51	
6.6 Étiage	55	
6.7 Température de l'eau	59	
6.7.1 Cours d'eau	59	
6.7.2 Lacs	63	
6.7.3 Eaux souterraines	68	
6.8 Substances contenues dans l'eau	70	
6.8.1 Polluants et nutriments	70	
6.8.2 Sédiments	72	
6.9 Écologie des eaux	73	
6.9.1 Conséquences sur les biotopes et l'écosystème	73	
6.9.2 Conséquences sur les différentes espèces et sur la biodiversité	77	
7 Gestion des eaux	80	
7.1 Utilisation de l'eau	80	
7.1.1 Approvisionnement en eau potable	80	
7.1.2 Irrigation des terres agricoles et eau d'usage pour l'industrie et l'artisanat	83	
7.1.3 Force hydraulique	87	
7.1.4 Utilisation thermique des eaux	89	
7.1.5 Loisirs, détente et tourisme	91	
7.2 Protection contre les dangers naturels liés aux eaux	93	
7.2.1 Protection contre les crues	93	
7.2.2 Protection contre le ruissellement	95	
7.3 Protection des eaux	96	
7.3.1 Changements climatiques et protection d'eaux en pleine mutation	96	
7.3.2 Réduire la charge en diverses substances	97	
7.3.3 Renaturalisation des eaux	99	
7.3.4 Protection des ressources en eau et des eaux souterraines	103	
7.4 Importance internationale des eaux suisses	107	
8 Amélioration des bases de connaissances	110	
9 Conclusion : mesures de protection du climat et adaptation aux changements climatiques nécessaires	115	
10 Références bibliographiques	117	
11 Glossaire	129	
12 Annexes	130	

Abstracts

The Hydro-CH2018 project analysed the effects of climate change on Swiss water bodies. Climate change is altering the entire water balance, especially the seasonal distribution of water resources in the water bodies and groundwater. Low flow is becoming more frequent and the water temperature is increasing. This has a serious effect on water ecology, flood protection and water use. The report "Effects of climate change on Swiss water bodies" gives a concise overview of the results and is a gateway to further technical information and data. The project was treated as a priority theme within the National Centre for Climate Services (NCCS).

Le projet Hydro-CH2018 s'est penché sur les effets des changements climatiques sur les eaux suisses, lesquels modifient l'ensemble du régime des eaux, mais plus particulièrement la répartition saisonnière des ressources en eau dans les eaux superficielles et souterraines. Les étiages deviennent plus fréquents et les eaux se réchauffent, entraînant d'importantes répercussions sur l'écologie des eaux, la protection contre les crues et l'utilisation de l'eau. Le rapport «Effets des changements climatiques sur les eaux suisses» propose une vue d'ensemble synthétique des résultats du projet Hydro-CH2018, mené au *National Centre for Climate Services* en tant que thème prioritaire. Il sert également de base à d'autres données et informations spécialisées.

Das Projekt Hydro-CH2018 hat die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer in der Schweiz untersucht. Mit dem Klimawandel verändert sich der gesamte Wasseraushalt, besonders aber die jahreszeitliche Verteilung der Wasserressourcen in Oberflächengewässern und im Grundwasser. Niedrigwasser wird häufiger und die Gewässer werden wärmer. Dies hat grosse Auswirkungen auf die Gewässerökologie, den Hochwasserschutz und die Wassernutzung. Der Bericht «Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer» bietet eine kompakte Übersicht über die Ergebnisse und ist ein Einstieg zu weiteren Fachinformationen und Daten. Das Projekt wurde als Themenhauptpunkt im National Centre for Climate Services (NCCS) durchgeführt.

Il progetto Hydro-CH2018 ha esaminato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera. Con i cambiamenti climatici si modifica il regime idrico nel suo complesso, ma in particolare la distribuzione stagionale delle risorse idriche nelle acque superficiali e sotterranee. Le magre diventano più frequenti e le acque si riscaldano. Ciò ha conseguenze importanti sull'ecologia delle acque, sulla protezione contro le piene e sull'utilizzazione delle acque. Il rapporto «Effetti dei cambiamenti climatici sulle acque della Svizzera» offre un compendio dei risultati e costituisce il presupposto per l'accesso a ulteriori dati e informazioni specialistiche. Il progetto è stato condotto come tematica prioritaria nel National Centre for Climate Services (NCCS).

Keywords:

Hydrology, Climate change, Watercourses, Lakes, Groundwater, Water temperature, Water quality, Water ecology

Mots-clés:

hydrologie, changements climatiques, cours d'eau, lac, eaux souterraines, température de l'eau, qualité de l'eau, écologie des eaux, gestion des eaux

Stichwörter:

Hydrologie, Klimawandel, Fliessgewässer, Seen, Grundwasser, Wassertemperatur, Wasserqualität, Gewässerökologie, Wasserwirtschaft

Parole chiave:

Idrologia, cambiamento climatico, corsi d'acqua, laghi, acque sotterranee, temperatura delle acque, qualità delle acque, ecologia delle acque, gestione delle acque

Avant-propos

La Suisse est le pays des glaciers, de la neige, des rivières et des lacs. Néanmoins, elle soumet une grande partie de ses terres à une exploitation intensive et cela vaut aussi pour l'utilisation de ses eaux. Ces dernières subissent à la fois les prélèvements, les apports de polluants ainsi que l'assèchement et le bétonnage d'anciens paysages aquatiques. Sans oublier que les changements climatiques modifient les constantes hydrologiques de base des eaux helvétiques : la disponibilité saisonnière de l'eau n'est plus la même et les milieux humides et aquatiques doivent s'adapter à des températures plus élevées et à un débit différent.

Afin de contenir l'élévation de la température mondiale en dessous de 2 °C, la communauté internationale a adopté l'Accord de Paris en 2015. En le ratifiant, la Suisse s'est engagée à réduire de moitié d'ici à 2030 ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990. La réalisation de cet objectif appelle des efforts concertés de la part des acteurs économiques, des responsables politiques et de la société civile. Aussi les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique sont-elles encouragées et les secteurs des transports, du bâtiment, de l'industrie et de l'agriculture, invités à diminuer leurs émissions.

La Suisse est durement affectée. Les scénarios climatiques CH2018 pour la Suisse conçus sous l'égide du *National Centre for Climate Services* (NCCS) montrent que l'absence de mesures significatives de protection du climat se traduira d'ici la fin du XXI^e siècle par une hausse de la température moyenne annuelle de l'air allant jusqu'à 4 °C par rapport à aujourd'hui. Ce réchauffement peut être limité à 1,5 °C avec la mise en œuvre de mesures de protection du climat.

Quelles sont les répercussions sur le régime hydrique, l'écologie des eaux, la protection contre les crues, l'utilisation de l'eau et la protection des eaux ? Afin de répondre à cette question, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a collaboré avec la communauté scientifique pour élaborer les bases et scénarios hydrologiques de demain («Hydro-CH2018») d'après les scénarios climatiques CH2018. C'est en s'appuyant sur ces fondements et en travaillant avec les autres services fédéraux spécialisés concernés que l'OFEV a analysé, sous la houlette du NCCS, les conséquences sur la gestion des eaux et défini les actions à entreprendre à l'avenir.

Associés aux séries de données pluriannuelles et à l'infrastructure de mesure moderne dont dispose la Confédération, les nouveaux scénarios hydrologiques constituent une base essentielle pour les mesures d'adaptation aux changements climatiques en Suisse. Ils permettent de s'engager à temps sur la voie de la future gestion des eaux et de la bonne santé de celles-ci. Ils mettent aussi en lumière les limites de l'adaptation – dans un contexte international également – et les résultats qui peuvent être obtenus grâce à la mise en œuvre de mesures significatives de protection du climat.

Résumé

La Suisse est l'un des pays européens les plus riches en eau. Elle possède également d'importants réservoirs d'eau sous forme de lacs, de glaciers, de neige et d'eaux souterraines. De grands fleuves tels que le Rhin et le Rhône ainsi que les principaux affluents du Pô et du Danube prennent leur source sur son territoire. C'est pourquoi les modifications du régime hydrique qui surviennent en Suisse se répercutent directement sur les États situés en aval.

Selon MétéoSuisse, la température moyenne annuelle de la Suisse a déjà augmenté de 2 °C depuis 1864, soit deux fois plus que la moyenne mondiale. Les nouveaux scénarios climatiques CH2018 prévoient une élévation supplémentaire de quelque 4 °C d'ici à la fin du siècle en l'absence de mesures de protection du climat, alors que ce réchauffement pourrait être limité à 1,5 °C environ si des mesures significatives de protection du climat étaient appliquées. Si rien n'est fait, le changement au niveau des précipitations sera lui aussi encore plus prononcé : leur augmentation hivernale et leur baisse estivale seront plus fortement accentuées.

Sans mesures de protection du climat, les glaciers alpins perdront approximativement 95 % de leur volume actuel d'ici à la fin du siècle. En hiver, il tombera plus de pluie que de neige. L'eau de fonte des neiges et des glaciers ne viendra donc pas gonfler en été les débits des cours d'eau. On observera ainsi une baisse des débits estivaux et une hausse des débits hivernaux. Dans un scénario sans mesures de protection du climat, le débit global des cours d'eau suisses afficherait un léger recul d'ici à la fin du siècle. La quantité totale d'eaux souterraines restera stable, mais le renouvellement des eaux souterraines sera accru en hiver et réduit en été.

Dans le futur également, la Suisse disposera donc encore de suffisamment d'eau si l'on considère l'ensemble de l'année. Toutefois, des déficits au niveau régional pourraient se multiplier en été si des mesures d'adaptation ne sont pas prises. Aux débits généralement moindres en été et à l'automne s'ajoutent des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues, précisément au moment où les besoins en eau, en particulier dans l'agriculture, sont

en forte augmentation du fait de l'élévation des températures. À l'avenir se posera avec de plus en plus d'acuité la question d'une gestion intégrée des ressources en eau qui prend en considération tous les besoins et l'intégralité d'un bassin versant, tout en mettant l'accent sur la qualité de l'eau et sur la réduction des apports de polluants. Mais la production d'énergie hydraulique et le tourisme doivent eux aussi s'adapter aux modifications induites par les changements climatiques. Comme une atmosphère plus chaude est capable d'absorber plus d'eau, les fortes précipitations ont déjà nettement gagné en fréquence et en intensité en Suisse depuis le début des relevés, et cette tendance devrait se poursuivre d'après les scénarios climatiques. Cela se traduira alors par un ruissellement plus intense et par la multiplication des crues localisées.

Au cours des dernières décennies, les températures moyennes annuelles des cours d'eau et des lacs ont déjà connu un fort réchauffement. Les scénarios hydrologiques indiquent une nouvelle augmentation significative d'ici la fin du siècle. La hausse est particulièrement marquée en été et le dépassement des températures critiques pour les organismes aquatiques est plus fréquent. En outre, l'élévation de la température des eaux lacustres modifie le brassage de celles-ci, ce qui peut avoir de graves répercussions sur les écosystèmes des lacs. Les eaux souterraines réagissent plus lentement aux changements climatiques, mais elles vont elles aussi se réchauffer.

Aujourd'hui, les écosystèmes aquatiques sont déjà soumis à une forte pression induite par une multitude de facteurs de stress anthropiques : endiguements, impuretés chimiques ou modifications des dynamiques d'écoulement par la force hydraulique. À cela s'ajoutent les conséquences des changements climatiques : les poissons et autres organismes poikilothermes ne sont pas capables de s'adapter facilement à l'élévation de la température de l'eau. D'autres transformations liées au climat telles que l'exondation de tronçons de cours d'eau ou la modification de la stratification lacustre sont susceptibles de perturber sensiblement l'équilibre des écosystèmes. Les eaux proches de l'état naturel ont une meilleure capacité de résistance et d'adaptation aux effets des changements climatiques. Dans ce contexte, il y a urgence à mettre en

œuvre au plus vite des mesures de protection des eaux : renaturation, réduction des pollutions chimiques et sécurisation de quantités d'eau suffisantes.

Outre ces mesures, il est indispensable non seulement de posséder une solide infrastructure de mesure permettant d'assurer le monitoring des eaux et de garantir des séries de données pluriannuelles, mais aussi de perfectionner les prévisions hydrologiques en tenant compte des nouvelles technologies et méthodes. Ce socle de connaissances conférera à la Suisse une base de décision fiable pour prendre des mesures d'adaptation aux changements climatiques.

1 Introduction

Le thème prioritaire «Cycle hydrologique» du National Centre for Climate Services (NCCS), abrégé en «Hydro-CH2018», a servi de cadre à l'analyse des effets des changements climatiques sur les eaux ainsi que sur le régime et sur la gestion de celles-ci. Fondées sur les nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse, les études ainsi réalisées montrent que les conséquences des changements climatiques, comme l'ampleur des sécheresses estivales, seront encore plus marquées que prévu. Les résultats sont mis à la disposition du public dans diverses publications ainsi que sur le site Internet du NCCS et dans l'Atlas hydrologique de la Suisse (HADES).

Pour s'adapter de façon ciblée aux changements climatiques, il est essentiel de disposer d'informations concernant les répercussions de ces derniers sur les eaux et leur régime. Le Conseil fédéral a par conséquent chargé l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) d'élaborer des bases de données hydrologiques fiables (Confédération suisse 2014, mesure sc2). Cela implique l'établissement régulier de scénarios hydrologiques, l'amélioration des connaissances sur les processus hydrologiques ainsi que l'observation et la documentation des modifications déjà induites par les changements climatiques.

L'OFEV a réalisé ce mandat dans le cadre du thème prioritaire «Cycle hydrologique» du NCCS, abrégé en «Hydro-CH2018» en écho aux scénarios climatiques CH2018 publiés fin 2018 par le NCCS (www.scenarios-climatiques.ch). Ces scénarios ont jeté les bases pour étudier, en collaboration avec de nombreux instituts de recherche suisses, les impacts des changements climatiques en matière d'hydrologie, d'écologie et de gestion des eaux. Les principaux résultats sont résumés dans ce rapport.

Synthèse et référence d'autres produits

Le présent rapport fournit une vue d'ensemble et sert également base à d'autres produits et possibilités d'approfondissement issus du projet Hydro-CH2018. Sauf indication contraire, ceux-ci peuvent être consultés sur le site Internet du NCCS (www.nccs.admin.ch).

Autres produits disponibles émanant du projet Hydro-CH2018

- Brochure NCCS «Eaux suisses et changements climatiques» (www.nccs.admin.ch/hydro_brochure_fr)
- Site Internet du NCCS : informations générales sur le thème prioritaire «Cycle hydrologique», sur les scénarios climatiques et sur les autres thèmes prioritaires du NCCS. Accès centralisé à l'ensemble des produits et publications issus du projet Hydro-CH2018 (www.nccs.admin.ch/hydro_fr)
- Atlas web du NCCS, avec de nombreux graphiques extraits du présent rapport et d'autres représentations graphiques provenant d'Hydro-CH2018 (www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/bibliothque-de-donnees-et-de-medias/daten.html)
- Rapports techniques Hydro-CH2018 sur les différents thèmes et projets de recherche ; publications scientifiques (liste de liens sur www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/cycle-hydrologique.html)
- Données : graphiques, cartes et indicateurs dans l'Atlas hydrologique de la Suisse (www.hydro-mapscch.ch) et sur le portail de cartes de la Confédération.

Hydro-CH2018 : quelles nouveautés ?

De nouveaux scénarios climatiques élaborés dans le cadre du thème prioritaire CH2018 ont pu être utilisés pour le projet Hydro-CH2018. Ils renferment une série d'améliorations par rapport aux scénarios CH2011 (www.ch2011.ch/fr), notamment la prise en compte de scénarios d'émissions plus récents et d'un nombre accru de modèles climatiques de plus haute résolution, ainsi que l'application de meilleurs procédés statistiques pour la transposition des données des modèles climatiques à la Suisse. Cela a permis d'obtenir des données climatiques sans interruption de 1981 à 2099, assorties d'une résolution spatiale plus fine (voir le Rapport technique CH2018 pour des informations complémentaires).

Ainsi, pour la première fois, il a été possible d'établir et d'analyser dans le cadre d'Hydro-CH2018 des séries temporelles hydrologiques ininterrompues de 1981 à

2099. Les résultats issus d'Hydro-CH2018 confirment en grande partie les précédentes observations tirées des projets «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (OFEV 2012) et «Coup de projecteur sur le climat suisse» (SCNAT 2016) ou du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau» (www.nfp61.ch/fr). Dans certains domaines, les changements climatiques sont toutefois encore plus marqués que ne le prévoient les précédentes études, par exemple concernant l'ampleur des sécheresses estivales. Hydro-CH2018 a mis l'accent également sur des thèmes moins étudiés dans les rapports réalisés jusqu'ici. Des tendances déjà mesurables quant aux mesures de débit ou à la température des eaux ont ainsi été revues à la lumière des évolutions futures. De même, des thèmes centraux tels que les eaux souterraines, les étiages (sécheresse), la

température des eaux et les répercussions sur l'écologie et la gestion des eaux ont été analysés de manière plus approfondie. Le rapport fournit une vue d'ensemble complète, mais concise des effets futurs des changements climatiques sur les eaux ainsi que le régime et la gestion de celles-ci en Suisse, et en déduit des axes pour l'adaptation. Il présente les résultats de onze projets de recherche menés dans le cadre d'Hydro-CH2018 par des instituts de recherche suisses experts dans le domaine de l'eau (tableau 1-1). Parallèlement, l'OFEV a chargé divers instituts de recherche de rédiger des rapports de base sur les thèmes traités dans le présent document. Trois ateliers sur les thèmes «Adaptation dans le domaine de l'eau», «Les besoins de recherche» et «Bases indispensables» ont permis de consolider le projet (point 8).

Tableau 1-1 : Vue d'ensemble des projets de recherche Hydro-CH2018

Contenu du projet	Instituts de recherche	Point du rapport
Scénarios hydrologiques basés sur des données climatiques stochastiques à haute résolution : quelles sont les conséquences de la variabilité naturelle des données climatiques sur les scénarios hydrologiques ?	EPF Zurich	4.2
Bilan hydrique et sécheresse : quel est l'impact des changements climatiques sur la sécheresse, sur la régulation de la transpiration par la physiologie végétale et sur les futurs besoins en irrigation ?	EPF Zurich	4.3
Dynamique forestière, utilisation du sol et régime hydrique : quelles sont les conséquences des futurs changements de la dynamique forestière sur l'évapotranspiration et sur les débits ?	WSL	4.3
Quantification des parts du débit provenant de la fonte des neiges et des glaciers : quelles conséquences la fonte des glaciers et la diminution du manteau neigeux ont-elles sur le débit ?	Université de Zurich	6.1
Actualisation des scénarios hydrologiques d'après les nouveaux scénarios climatiques : quelle est l'évolution des débits dans différents scénarios climatiques ?	Université de Berne	6.2
Réservoirs d'eau : les lacs naturels et les réservoirs artificiels peuvent-ils contribuer à maîtriser la pénurie d'eau en été ?	WSL et Haute école technique de Rapperswil	6.3
Comment les ressources en eaux souterraines évoluent-elles dans les bassins versants alpins avec les changements climatiques et quelles influences ont-elles sur la formation des débits ?	Université de Neuchâtel	6.4
Influence des changements climatiques sur les températures des cours d'eau et des lacs : comment la température de l'eau dans les cours d'eau et lacs suisses évoluera-t-elle à l'avenir ?	EPF Lausanne, Eawag et Université de Lausanne	6.7.1
Évolution de la température dans les eaux souterraines en roches meubles en Suisse : quels sont les principaux facteurs ayant une influence sur l'évolution de la température des eaux souterraines et comment la température des eaux souterraines va-t-elle évoluer à l'avenir ?	Université de Bâle	6.7.3
AgriAdapt : comment le besoin d'irrigation évolue-t-il face aux changements climatiques et quelles sont les répercussions sur le niveau des eaux souterraines ?	Agroscope	7.1.2

2 Méthodologie

2.1 Modèles et incertitudes

Pour pouvoir établir des prévisions concernant l'évolution future du régime hydrique, toute une chaîne de modèles climatiques et de modèles de régime hydrique est nécessaire. Si les différentes phases de la modélisation permettent de mieux représenter certains processus, elles font également ressortir des incertitudes supplémentaires.

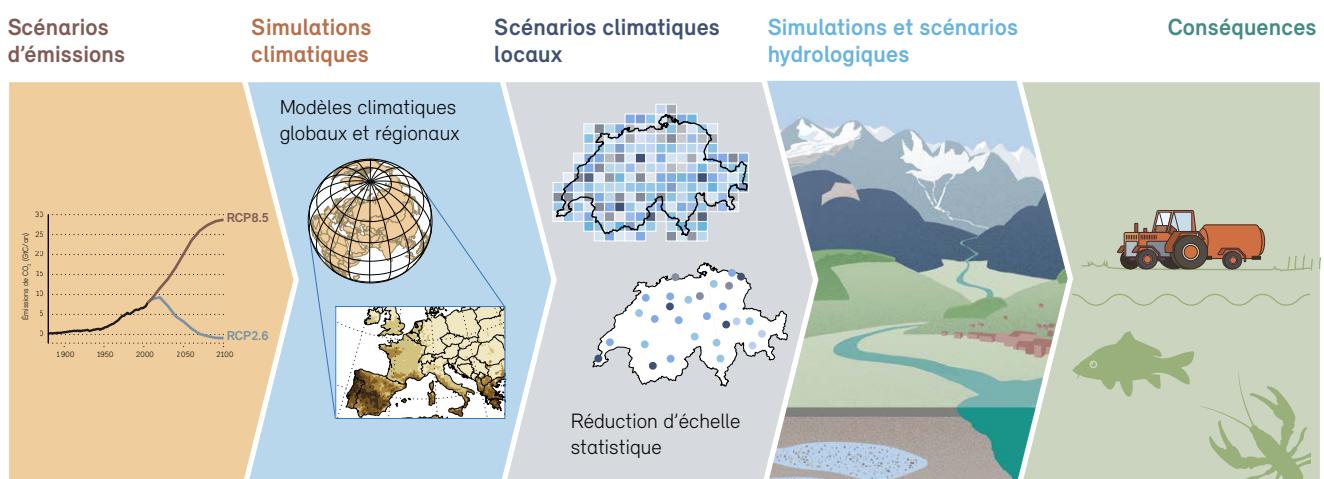
Déduire les conséquences des changements climatiques sur l'hydrologie et la gestion des eaux en Suisse à partir de scénarios portant sur les futures émissions mondiales de gaz à effet de serre est un long processus. Pour ce faire, une multitude de modèles, d'étapes de traitement et d'hypothèses sont nécessaires (Figure 2-1). Ainsi, il faut formuler des hypothèses concernant les futures émissions

mondiales de gaz à effet de serre pour qu'elles servent ensuite de fondement aux modèles climatiques globaux et régionaux et donc aux scénarios climatiques CH2018. C'est sur cette base et à l'aide de modèles hydrologiques qu'ont été élaborés les scénarios hydrologiques Hydro-CH2018 qui montrent les répercussions des changements climatiques sur le régime hydrique suisse. Les scénarios hydrologiques ont parfois été utilisés pour d'autres modèles (p. ex. modèles de végétation) dans l'étude de l'impact sur la croissance des cultures ou sur les besoins en irrigation agricole.

Les modèles ne pouvant représenter les conditions réelles que de manière simplifiée, les résultats de modélisation sont inévitablement entachés d'incertitudes. À chaque étape de la chaîne, les combinaisons possibles se multiplient et les calculs sont de plus en plus complexes. Afin

Figure 2-1 : Chaîne de modèles permettant d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur la gestion des eaux

Des incertitudes apparaissent à chaque étape de traitement : du choix des scénarios d'émissions servant de base aux modèles climatiques globaux, à l'analyse des conséquences sur l'écologie ou la gestion des eaux, en passant par le processus de régionalisation (amélioration de la résolution) en tant que condition préalable à la modélisation hydrologique.



Sources d'incertitudes :

- Évolution future des émissions de gaz à effet de serre
- Choix et structure du modèle
- Mise à l'échelle et correction des résultats de modélisation
- Données d'entrée

- Conditions initiales
- Paramètres de modélisation
- Données utilisées pour le calibrage et la validation

- Variabilité naturelle
- Compréhension du processus
- Événements imprévisibles qui font basculer les systèmes

que le traitement ne soit pas interminable, il convient de limiter le nombre de scénarios étudiés et de variables à chacune des phases de la modélisation.

Certes l'incertitude croît à chaque phase de la modélisation, mais les prévisions spécifiques et régionales gagnent en précision étant donné que les modèles peuvent être calibrés et validés avec des valeurs observées. Par exemple, la combinaison de modèles climatiques et hydrologiques permet d'émettre des pronostics fiables quant à l'évolution future des débits d'un bassin versant.

Les scénarios climatiques tiennent compte des incertitudes des modèles climatiques en indiquant toute une gamme d'évolutions futures possibles grâce à différentes chaînes de modèles. Cet éventail de possibilités et la marge d'incertitude des modèles climatiques se reflètent donc également dans les modèles hydrologiques. Il est possible d'évaluer le degré effectif d'incertitude de la modélisation hydrologique en comparant plusieurs modèles hydrologiques.

2.2 Scénarios climatiques

Comment le climat va-t-il évoluer en Suisse si des mesures significatives de protection du climat sont mises en œuvre ou si, au contraire, aucune mesure n'est prise ? Les scénarios d'émissions et les scénarios climatiques révèlent la disparité des évolutions. Dans un petit pays comme la Suisse, il faut affiner les résultats des modèles climatiques globaux et régionaux à l'aide de méthodes statistiques.

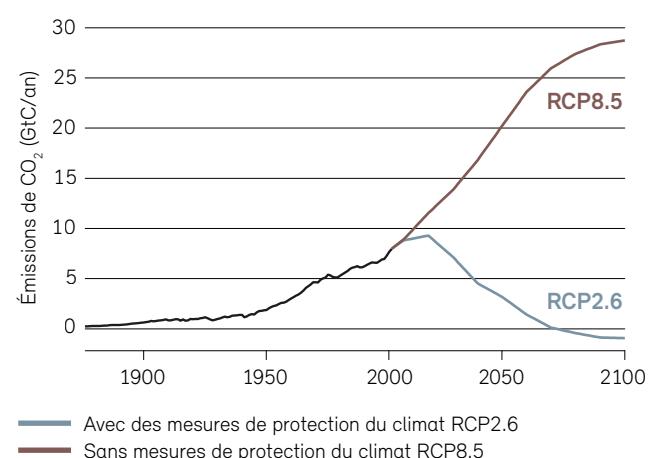
Les futures émissions mondiales de gaz à effet de serre constituent la plus grande source d'incertitude pour les prévisions à long terme. Afin de représenter l'éventail des évolutions possibles, les scénarios climatiques comme les scénarios hydrologiques CH2018 indiquent toujours les résultats de deux trajectoires d'émissions potentielles (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, 2013) (Figure 2-2) :

- «Avec des mesures significatives de protection du climat» (RCP¹2.6) : une baisse immédiate et drastique des émissions de gaz à effet de serre limite le réchauffement mondial à moins de 2 °C, ce qui est conforme à l'Accord de Paris de 2015, souvent appelé Accord sur la protection du climat.
- «Sans mesures de protection du climat» (RCP8.5) : aucune mesure d'atténuation n'est prise, les émissions continuent d'augmenter, et, avec elles, le réchauffement.

Dans le thème prioritaire Hydro-CH2018, les deux scénarios sont toujours juxtaposés, le scénario «sans mesures de protection du climat» revêtant une importance particulière car il sert de référence pour les mesures d'adaptation. Par souci de lisibilité, certains graphiques du présent rapport ne montrent que ce scénario. Les résultats des deux scénarios figurent dans les autres produits d'Hydro-CH2018.

Figure 2-2 : Scénarios d'émissions étudiés

Émissions mondiales nettes de CO₂ d'origines fossile et industrielle. Les deux évolutions possibles sont représentées.



Source : Adaptation d'après GIEC 2013/WG1/Box 1.1/Figure 3b.

¹ Representative Concentration Pathway (RCP) signifie trajectoire représentative de concentration. Les scénarios sont fondés sur des hypothèses concernant les futures concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols.

Modélisation du climat et scénarios climatiques

CH2018

Les modèles climatiques globaux permettent de calculer les conséquences des différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sur le climat de la planète. Afin que leur résolution spatiale soit moins grossière, les résultats des modèles climatiques globaux servent de conditions limites aux simulations de modèles climatiques régionaux pour l'Europe.

S'agissant du scénario d'émissions RCP8.5, les scénarios climatiques CH2018 utilisent les résultats de 31 simulations de modèles climatiques réalisées dans le cadre du projet européen EURO-CORDEX (www.euro-cordex.net). Chaque simulation résulte d'une combinaison d'un des neuf modèles climatiques globaux avec l'un des sept modèles climatiques régionaux. Ces derniers ont une résolution spatiale de 12 ou 50 km. Quant au scénario RCP2.6, le nombre de simulations disponibles est nettement inférieur puisqu'il n'y en a que douze. La comparaison des différentes simulations de modèles climatiques permet d'évaluer les incertitudes qui grèvent les scénarios climatiques.

Pour les petits pays montagneux comme la Suisse, la résolution spatiale des modèles climatiques régionaux demeure trop grossière pour qu'ils soient utilisés directement pour les modèles hydrologiques. La méthode statistique empirique quantile-quantile (ou « quantile mapping ») a permis de corriger les données des modèles climatiques régionaux à basse résolution grâce aux mesures réalisées et de les adapter aux échelles locales. Ces données climatiques de CH2018 sont disponibles pour sept paramètres climatiques, en tant que séries historiques relevées aux stations météorologiques existantes. Par ailleurs, des cartes couvrant l'ensemble du territoire ont été établies avec un maillage de 214 km pour les températures et la somme quotidienne des précipitations. Toutes les séries historiques et les données tramées journalières sont disponibles sans interruption pour la période de 1981 à 2099 (www.nccs.admin.ch).

2.3 Scénarios hydrologiques

Une fois corrigés, les résultats des modèles climatiques servent de bases aux modélisations hydrologiques.

Dans le projet Hydro-CH2018, différents modèles hydrologiques spécialisés ont été utilisés selon la problématique. Il en résulte des scénarios hydrologiques qui montrent l'évolution future des eaux suisses.

Le périmètre étudié dans le cadre de la modélisation hydrologique comprend toute la Suisse, la Principauté de Liechtenstein et d'autres régions limitrophes dont les cours d'eau se déversent sur le territoire suisse. Cet ensemble forme la « Suisse hydrologique ». Le Tableau 2-1 répertorie les modèles hydrologiques utilisés dans Hydro-CH2018 ainsi que leur sujet d'étude. Les scénarios relatifs au régime hydrique de la Suisse hydrologique ont été conçus à l'aide du modèle PREVAH de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (PREVAH-WSL). Les scénarios hydrologiques qui portent sur 93 bassins versants ont été élaborés avec le modèle PREVAH de l'Université de Berne (PREVAH-Unibe), tandis que ceux qui concernent 190 régions de glaciers s'appuient sur le modèle HBV Light de l'Université de Zurich (HBV Light-UniZH). Certaines questions spécifiques n'ont été traitées que pour une sélection de bassins versants en Suisse. Ainsi, en raison des longs temps de calcul par exemple pour les modélisations de la température des eaux et du renouvellement des eaux souterraines, seules quelques régions et eaux ont pu être prises en considération (voir le Tableau 2-1 et le Tableau A1 en annexe).

Tableau 2-1 : Modèles utilisés dans le projet Hydro-CH2018

Sujet d'étude	Modèle	Résultats spécifiques pour	Nombre de chaînes de modèles RCP2.6	Nombre de chaînes de modèles RCP8.5
Régime hydrique, en particulier débit	PREVAH-WSL	<ul style="list-style-type: none"> Prévisions générales sur le régime hydrique de la Suisse hydrologique 30 grands bassins versants de 700 à 35 900 km² avec des mesures du débit 	7	14
	PREVAH-UniBE	<ul style="list-style-type: none"> Prévisions concernant différents paramètres de débit de bassins versants spécifiques 93 bassins versants de 10 à 1700 km² avec des mesures du débit Pluralité de caractéristiques de bassins versants et d'altitudes 	8	20
	HBV Light-UniZH	<ul style="list-style-type: none"> 190 têtes de bassins versants de glaciers Accent mis sur la modélisation de la fonte des neiges et des glaciers 	8	21
Humidité du sol et évapotranspiration	Modèle climatique régional couplé COSMO-CLM ² de l'EPFZ	Europe dans une grille 0,44 × 0,44 ° (50 km). Trois scénarios RCP8.5 ont été réalisés sur la base du modèle de circulation générale MPI-ESM-LR.	0	3
Température de l'eau	Simstrat (v. 2.1.2) de l'Eawag	29 lacs	7	17
	Alpine3D de l'EPFL	10 cours d'eau	4	7
Renouvellement et niveaux des eaux souterraines	HydroGeoSphere et HBV Light de l'Université de Neuchâtel	<ul style="list-style-type: none"> 11 bassins versants alpins Région de test dans le Seeland (Broye) 3 sites pour le calcul du renouvellement provenant des précipitations 	0 1 0	3 1 6
	Feflow: ArcMap de l'Université de Bâle Alpine3D de l'EPFL	<ul style="list-style-type: none"> 5 régions suisses et 35 aquifères Déduction de l'évolution des températures d'après les changements des processus de renouvellement des eaux souterraines 	1	1
Études des processus	PREVAH-WSL couplé avec le modèle de développement forestier	6 bassins versants	8	18
	Topkapi-ETH de l'EPFZ, entraîné par le générateur de conditions météorologiques AWE-GEN-2d	Thur, Petite Emme et Maggia	0	9
	Modèle de croissance des cultures CropSyst	Région de test dans le Seeland	4	6

Données de base utilisées

Le Tableau 2-2 présente les principales données utilisées pour la modélisation hydrologique ainsi que leur origine. D'autres données ayant servi aux projets de recherche Hydro-CH2018 figurent dans les rapports de projet spécifiques.

Tableau 2-2 : Données utilisées pour la modélisation hydrologique

Données	Origine des données
Débit, niveau d'eau, niveaux des eaux souterraines, températures des eaux	OFEV, cantons, producteurs d'énergie et institutions de recherche
Données climatiques telles que la température, les précipitations, le rayonnement, le vent et l'humidité de l'air	Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse)
Scénarios climatiques CH2018 Données des modèles climatiques d'EURO-CORDEX et de la 5 ^e phase du projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5)	NCCS Earth System Grid Federation
Modèle numérique de terrain, informations concernant la géologie et les sols, bases de cartes topographiques	Office fédéral de topographie (swisstopo) et programme Copernic de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE)
État des glaciers et scénarios les concernant	Glacier monitoring Switzerland (GLAMOS), Zekollari H. et al. 2019
Données en lien avec la neige Produit de couverture neigeuse MODIS MOD10A1 et MYD10A1	WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) National Snow and Ice Data Center (NSIDC)
Utilisation du sol	Office fédéral de la statistique (OFS), Office fédéral de l'agriculture (OFAG) (système d'information sur la politique agricole), programme Copernic de l'AEE

Périodes considérées

Sauf indication contraire, la période de 1981 à 2010, période de référence de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), est la période de référence utilisée dans le présent rapport. Elle a servi de point de départ au calcul des scénarios. Ainsi, lorsqu'il est question du climat actuel dans le rapport, il s'agit du climat de la période de référence.

Les scénarios décrivent les conditions climatiques moyennes attendues sur une période de 30 ans, articulées autour des années 2060 et 2085. Dans le texte, les prévisions relatives au «milieu du siècle» renvoient à 2060 (c.-à-d. à la période de 2045 à 2074) et celles concernant la «fin du siècle» ou le «long terme», à 2085 (c.-à-d. à la période de 2070 à 2099). Pour pouvoir établir des prévisions fiables sur les changements malgré la grande variabilité d'année en année, les valeurs moyennes sur trois décennies sont utilisées. Lorsque d'autres périodes sont considérées, cela est mentionné dans le rapport.

Simulations de modèles climatiques considérées

L'élaboration des modélisations hydrologiques n'a pu reposer que sur une sélection de simulations de modèles climatiques possibles provenant des scénarios climatiques CH2018, étant donné que tous les paramètres climatiques nécessaires aux modèles hydrologiques ne sont pas disponibles pour l'ensemble des modèles climatiques. Les chaînes de modèles utilisées par les trois modèles hydrologiques PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL et HBV Light-UniZH ne sont pas les mêmes. Entre PREVAH-UniBE et HBV Light-UniZH, la différence en termes de chaînes utilisées est minime, mais avec le modèle PREVAH-WSL, nettement moins de chaînes ont été calculées pour RCP8.5. Lorsque, pour la même chaîne de modèles climatiques, les résultats existaient en deux résolutions, seule la résolution 12 km a été prise en compte. La longueur des calculs à effectuer pour des modèles hydrologiques spécifiques, comme ceux relatifs aux eaux souterraines ou à la température des eaux, est telle que, dans certains projets, seules quelques simulations de modèles climatiques ont pu être réalisées (Tableau 3-1). Ici, une présélection avait été faite afin de représenter dans la mesure du possible tout l'éventail et l'incertitude des modèles climatiques. Plus le nombre de projections à considérer est bas, moins la marge d'incertitude est suffisamment étayée. Les projections climatiques utilisées dans les études sont répertoriées en annexe (Tableau A2).

Incertitudes liées à la modélisation hydrologique

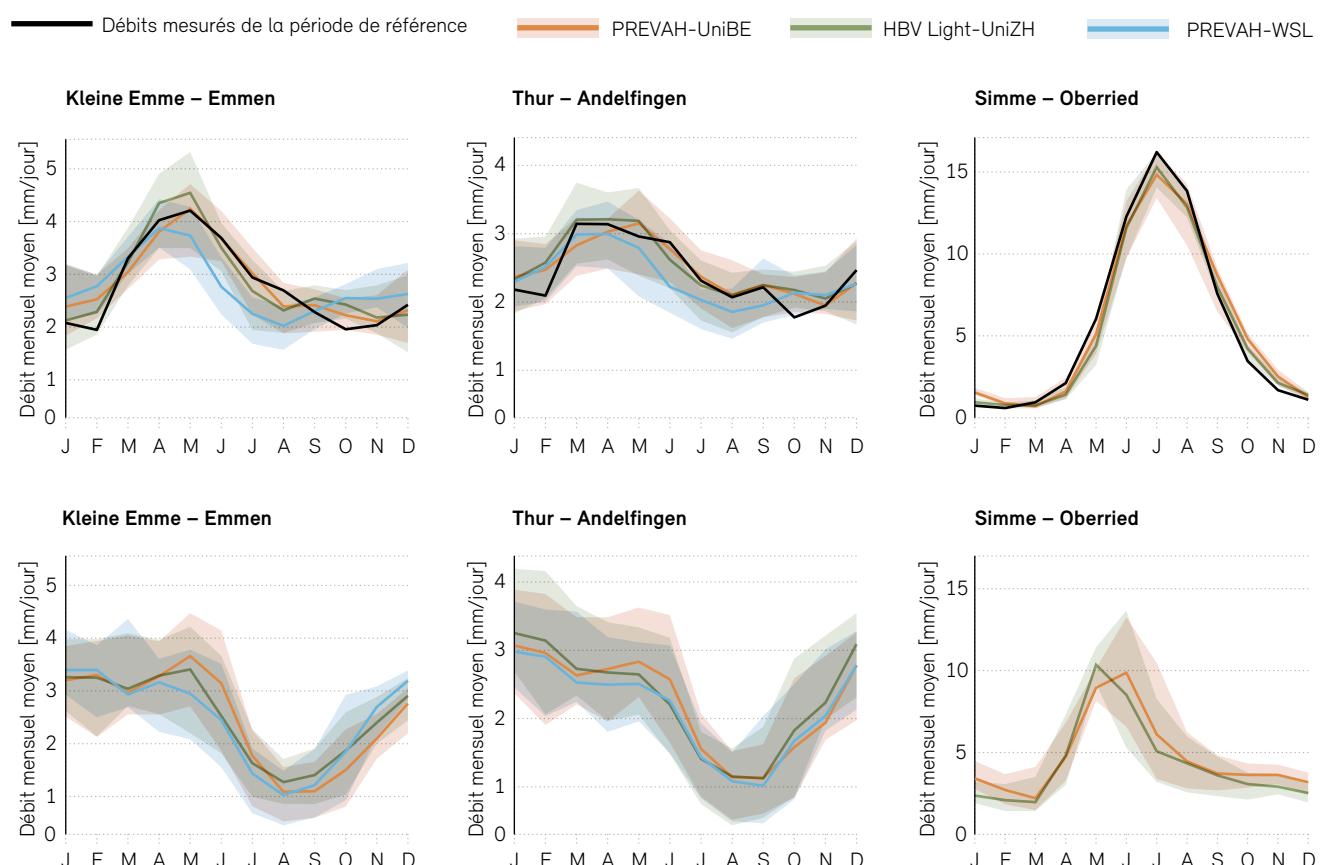
Les scénarios climatiques CH2018 servent de données d'entrée à la modélisation hydrologique et comportent déjà des incertitudes. De surcroît, pour divers paramètres climatiques, ils ne fournissent que des valeurs journalières alors que de nombreux modèles hydrologiques requièrent

des valeurs horaires comme variables d'entrée. Aussi des méthodes complémentaires sont-elles adoptées afin d'affiner la résolution temporelle, par exemple pour les précipitations ou la température. D'autres modèles utilisent directement des valeurs journalières, rendant la représentation des processus variant durant la journée comme celui de la fonte des neiges ou des processus se déroulant en quelques heures tels que les crues, mauvaise voire impossible sur des territoires peu étendus. D'autres incertitudes proviennent du choix du modèle hydrologique et de l'appréhension de calcul des processus comme la formation des débits, l'évapotranspiration et la fonte des neiges ou des glaciers. La fixation des paramètres de modélisation constitue une autre source d'incertitude. Si possible, ils

sont déterminés au moyen d'un calibrage effectué avec des mesures réalisées (débit ou couverture neigeuse). Si des zones n'ont pas fait l'objet de mesures, celles-ci doivent être reprises des zones où des mesures hydrologiques ont été relevées en utilisant les caractéristiques régionales, ce qui accroît encore l'incertitude. Pour éviter cela, seules les régions avec des débits mesurés ont été modélisées à l'aide du modèle PREVAH-UniBE. En outre, tous les modèles supposent que les paramètres calibrés pour les conditions actuelles s'appliqueront également à l'avenir. Cela est un facteur d'incertitude notamment pour la modélisation d'événements hydrologiques extrêmes au cours desquels les processus dominants sont susceptibles de changer (Matti B. et al., en cours d'élaboration).

Figure 2-3 : Comparaison des débits calculés au cours de l'année avec trois modèles hydrologiques pour les bassins versants de la Petite Emme, de la Thur et de la Simme

La ligne du haut présente les débits mensuels moyens mesurés et les débits mensuels moyens calculés pour la période de référence (1981-2010) (médiane et marge d'incertitude). La ligne du bas présente les valeurs calculées pour la fin du siècle sans mesures de protection du climat (RCP8.5). De manière générale, les régimes et leurs modifications coïncident bien entre les différents modèles et avec les valeurs mesurées.



Comparaison des scénarios hydrologiques

Afin d'évaluer les conséquences des facteurs d'incertitude sur les résultats, les débits saisonniers calculés pour la période de référence ont été comparés à ceux calculés dans le scénario RCP8.5 avec les trois modèles PREVAH-WSL, PREVAH-UniBE et HBV Light-UniZH (Figure 2-3). Seules les chaînes de modèles climatiques utilisées par tous les modèles ont été prises en considération. Les trois modèles reproduisent fidèlement l'évolution sur l'année des débits mesurés pour la période de référence, et les médianes des moyennes mensuelles comme les marges d'incertitude coïncident bien. Tous les modèles montrent que la Thur et la Petite Emme connaîtront une évolution similaire de leur débit à l'avenir également. Concernant la Simme qui prend sa source dans des régions englacées, le débit maximal annuel présente un décalage dans le temps entre les modèles

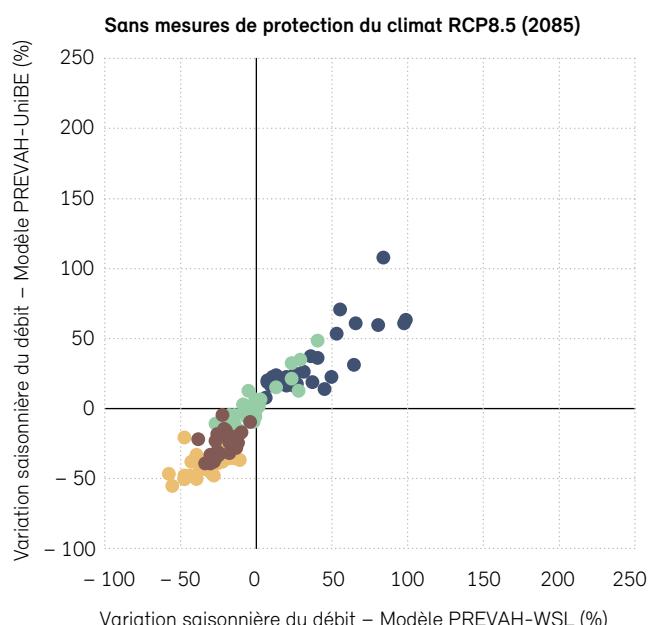
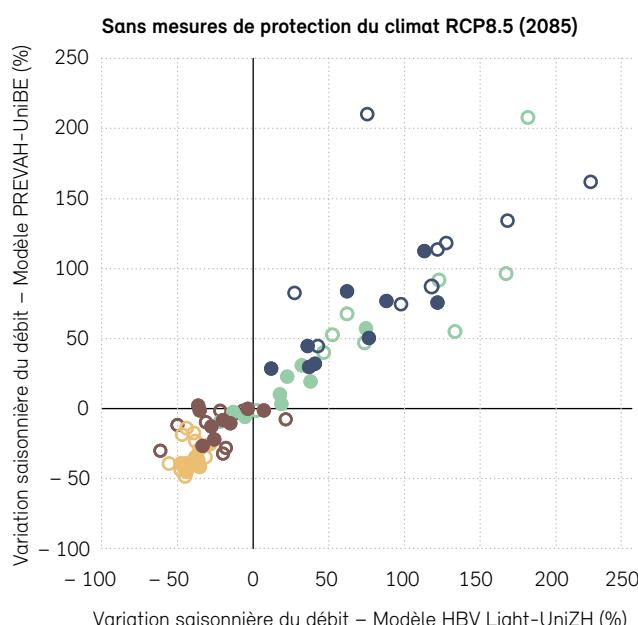
PREVAH-UniBE et HBV Light-UniZH. Généralement, l'incertitude liée à la modélisation hydrologique est plus grande dans les régions glaciaires que dans les régions sans glacier. Tandis que les modèles PREVAH adoptent une approche de calcul de la fonte des glaciers plutôt simple, le modèle HBV Light-UniZH a été spécialement développé et calibré pour calculer la fonte des neiges et des glaciers. C'est la raison pour laquelle le présent rapport reprend les résultats du modèle HBV Light-UniZH pour les bassins versants ayant une surface englacée supérieure à 10 %. Des précisions sur les modèles figurent en annexe (Tableau A1).

À des fins de comparaison statistique des résultats, pour chaque modèle hydrologique et chaque bassin versant, le signal de changement entre la période de référence et la période de 2070 à 2099 a été déterminé dans le scéna-

Figure 2-4: Comparaison du signal de changement pour les débits saisonniers

Les graphiques montrent les variations relatives des débits saisonniers vers la fin du siècle dans le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5) en comparaison avec la période de référence (1981-2010) pour les trois modèles de régime hydrique utilisés dans Hydro-CH2018, à savoir PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL et HBV Light-UniZH. De manière générale, les variations entre les différents modèles coïncident. Les plus grands écarts concernent les régions englacées en hiver et au printemps lorsque les débits sont très faibles et que des différences même minimales entraînent d'importantes variations en pourcentage.

● Hiver ● Été ● Part englacée < 10 %
 ● Printemps ● Automne ○ Part englacée > 10 %



rio sans mesures de protection du climat (RCP8.5), une fois pour les débits annuels et une fois pour les débits saisonniers (Figure 2-4 et Tableau 2-3).

Le Tableau 2-3 montre la part de régions pour lesquelles les signaux de changement entre deux modèles divergent l'un de l'autre de moins de 10 %. Les modèles HBV Light-UniZH et PREVAH-WSL n'ont que trois régions en commun, ce qui ne permet pas une bonne comparaison. Globalement, les trois modèles présentent une bonne concordance des résultats et, même dans les régions affichant de plus grands écarts en pourcentage entre les modèles, la tendance du changement (haussière ou baissière) correspond pour l'ensemble des saisons.

Tableau 2-3: Comparaison des résultats de modélisation

A été prise en compte ici la différence de signal de changement climatique entre la période de référence (1981-2010) et la période 2070-2099 dans le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5) concernant le débit annuel et les débits saisonniers des modèles PREVAH-UniBE, PREVAH-WSL et HBV Light-UniZH.

	PREVAH-WSL	HBV Light-UniZH
Nombre de régions en commun	29	18
Part de régions avec une différence de signal de changement climatique <10 % pour le débit annuel	95 %	83 %
Part de régions avec une différence de signal de changement climatique <10 % pour les débits saisonniers	60 %	55 %

Les principaux écarts en pourcentage entre les modèles concernent l'hiver et le printemps et particulièrement les régions fortement englacées ou de haute altitude. Cela s'explique par le fait que les débits sont généralement très faibles à ces saisons et que des différences même minimales se traduisent par un grand écart une fois exprimé en pourcentage. En valeurs absolues, les différences de débits les plus marquées entre les modèles apparaissent en été, dans les régions englacées également.

Comme les trois modèles n'ont que peu de régions en commun, la marge d'incertitude hydrologique ne peut pas être systématiquement indiquée comme elle peut l'être pour les modèles climatiques. Aussi l'incertitude liée aux scénarios climatiques est-elle reprise en tant que marge d'incertitude pour la modélisation hydrologique. De manière générale, dans tous les résultats, c'est le signal de changement par rapport à la période de référence qui devrait être considéré et non pas les valeurs absolues. Pour chaque bassin versant, le rapport ne présente que les résultats d'un modèle, et ce, dans l'ordre de sélection suivant :

- PREVAH-UniBE: 93 bassins versants de petite taille ou de taille moyenne, sans ou avec moins de 10 % de surface englacée
- PREVAH-WSL: régime hydrique suisse et 30 grands bassins versants
- HBV Light-UniZH : têtes de bassins versants de glaciers

Autres informations et références sur le thème

« Méthodes et incertitudes »

- Matti B. et al., en cours d'élaboration : Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report.

3 Le régime hydrique dans le contexte des changements climatiques

Les changements climatiques influencent le régime hydrique dans son ensemble : les précipitations et les débits évoluent, les températures et l'évapotranspiration augmentent, les glaciers fondent toujours plus vite. Comme il tombe moins de neige en hiver, l'eau issue de la fonte des neiges se fait plus rare en été.

Avec plus de 1400 mm de précipitations annuelles, la Suisse est l'un des pays européens les plus riches en eau. Elle possède également d'importants réservoirs d'eau : lacs naturels et artificiels, glaciers, manteau neigeux, sol et eaux souterraines (Figure 3-1). De grands fleuves tels que le Rhin et le Rhône ainsi que les principaux affluents du Pô et du Danube prennent leur source dans les Alpes suisses. La moindre modification des différents éléments du régime hydrique suisse se répercute directement sur les riverains en aval.

L'équation de bilan hydrique, c.-à-d. le rapport entre le débit (Q), les précipitations (P), l'évapotranspiration (E) et la variation des réserves (dR) par unité de temps (dt), constitue la base de l'ensemble des modélisations et scénarios hydrologiques.

$$Q = P - E + dR/dt$$

Chacune des variables de cette équation subit l'influence plus ou moins forte des changements climatiques (Figure 3-1). Cela s'explique principalement par l'évolution des précipitations et par l'élévation de la température. Sous l'effet du réchauffement, l'évapotranspiration est plus intense et le débit provenant de la fonte des glaciers diminue durablement. En hiver, les précipitations tombent de plus en plus sous forme pluvieuse plutôt que neigeuse, entraînant une fonte des neiges moins importante durant la saison estivale. Dans de nombreuses régions de Suisse, cela se traduit par une baisse des débits en été et à l'automne. À l'inverse, ils ont tendance à augmenter en hiver et au printemps. Mais, si l'on considère l'année entière, ils évoluent peu dans bien des bassins versants, tout au plus sont-ils en léger recul (point 6.1).

Les réservoirs d'eau réagissent aux changements climatiques à des rythmes différents

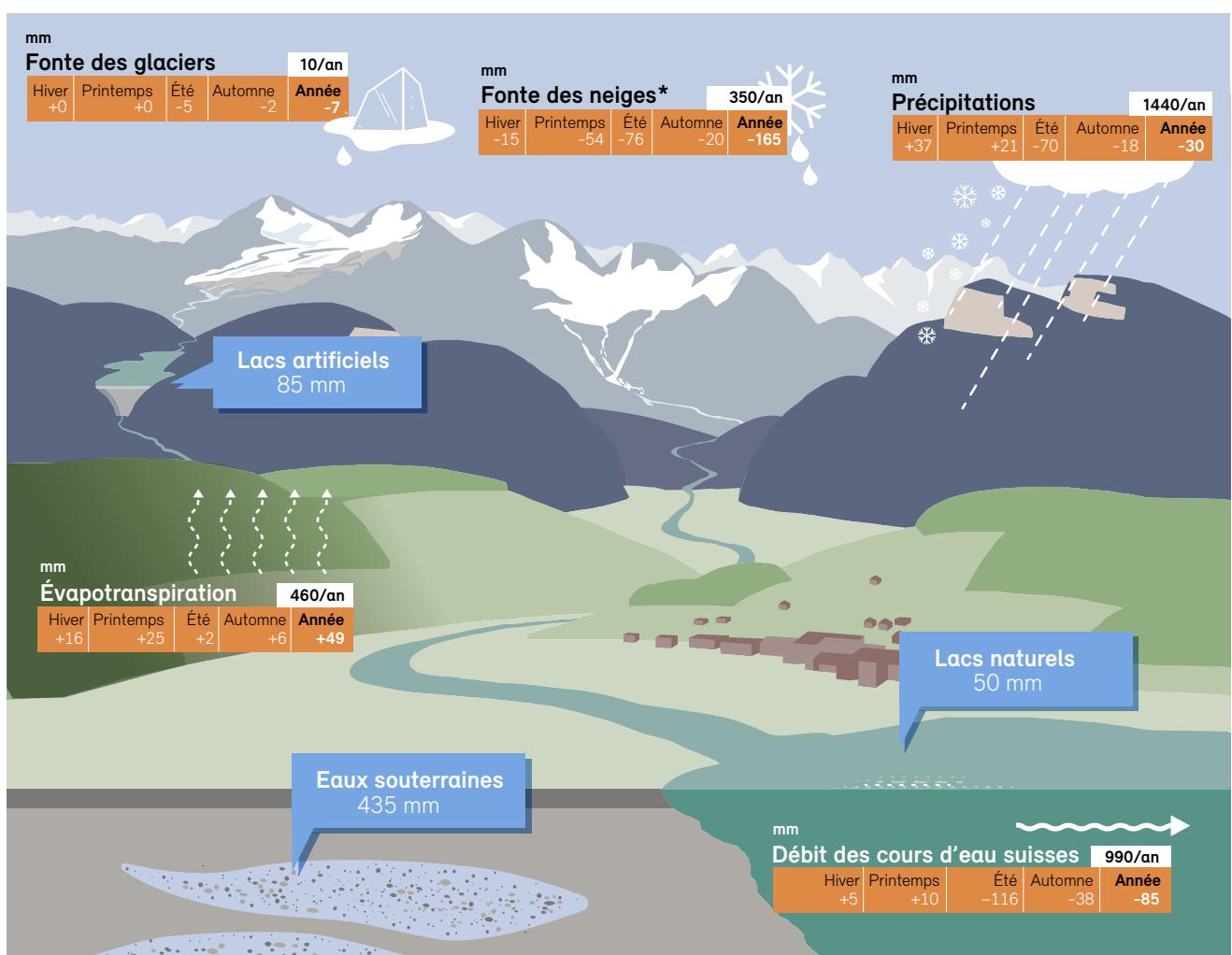
Sous l'effet des changements climatiques, le niveau de remplissage des réservoirs fluctue durant l'année, et les réservoirs que sont la neige et les glaciers affichent une diminution générale. À court terme, les conditions météorologiques et les prélèvements par l'homme s'ajoutent aux variations des réserves d'eau liées au climat.

Les réservoirs réagissent selon des échelles de temps différentes. Le plus rapide est le sol: en fonction de ses propriétés, il ne lui faut que quelques minutes à plusieurs mois pour restituer dans les eaux ou dans l'atmosphère, par évapotranspiration, l'eau accumulée durant un épisode pluvieux. À l'inverse, les glaciers et les eaux souterraines profondes peuvent stocker l'eau pendant des années, des décennies, voire des siècles (Tableau 3-1). Plus un réservoir agit à long terme, plus il réagit lentement aux changements climatiques.

Les réservoirs d'eau sont des facteurs déterminants dans le système hydrologique : leur modification peut avoir des conséquences sur la formation des débits, sur la température de l'eau, sur le transport de matériaux et enfin sur les écosystèmes aquatiques. Le Tableau 2-4 donne une vue d'ensemble non seulement de l'action dans le temps, mais aussi des volumes des différents réservoirs.

Figure 3-1 : Effets des changements climatiques sur le régime hydrique

Les changements climatiques ont un impact sur toutes les composantes du régime hydrique. Le graphique montre les variables modélisées débit, précipitations, évapotranspiration et fonte des glaciers et des neiges pour la période de référence (1981-2010) (en blanc) et pour le long terme (2070-2099) (en orange) sans mesures de protection du climat (RCP8.5), calculées pour la Suisse hydrologique avec le modèle PREVAH-WSL (données de Brunner M. et al. 2019c). Le volume d'eau disponible dans les réservoirs pouvant être utilisé par an (en bleu) ne peut être indiqué que pour la période de référence. Pour les lacs artificiels et naturels, il a été calculé à partir des variations moyennes annuelles du niveau d'eau ou d'après les règlements de barrage des lacs (Brunner M. et al. 2019a). Quant aux chiffres relatifs aux eaux souterraines, ils sont tirés de la publication de Sinreich M. et al. parue en 2012. Les données sur les lacs et les eaux souterraines concernent le territoire suisse en sachant que, dans le cas des lacs frontaliers, la totalité du lac est considérée.



350 Cumuls annuels en mm pour la période de référence (1981–2010)

+21 Housse et baisse en mm par saison et par an pour la période 2070–2099 sans mesures de protection du climat (RCP8.5) par rapport à la période de référence

85 Eau disponible dans les réservoirs utilisable, par an en mm

* La fonte des neiges est comprise dans les précipitations.

Tableau 3-1 : Principaux réservoirs d'eau en Suisse

Volume des principaux réservoirs d'eau en Suisse et indication de la durée potentielle de stockage de l'eau (temps de séjour). Le volume du sol ne peut pas être estimé, la notion de ressources utilisables durablement ne s'applique qu'aux lacs et aux eaux souterraines étant donné que c'est uniquement à partir de ces réservoirs que l'eau est activement prélevée pour être utilisée.

	Volume total km ³	Ressources utili- sables durablement km ³ par an	Temps de séjour de l'eau dans le réservoir						Plus d'informations au point	Référence pour les indications de volumes
			minutes	heures	jours	semaines	mois	années		
Sol	–	–							4.3	
Neige	22 ¹	–							5.1	Brunner et al. 2019c
Glaciers	53 ²	–							5.2	Langhammer et al. 2019
Lacs naturels	130 ³	2							6.3	Indicateurs de l'OFEV sur les lacs Brunner et al. 2019a
Lacs artificiels (réservoirs)	3,5 ²	3,5							6.3	Office fédéral de l'énergie
Eaux souterraines	150	18							6.4	Sinreich et al. 2012

¹ Moyenne 1981-2010² État en 2019³ Volume total avec les lacs frontaliers

4 Facteurs climatologiques exerçant une influence

La température de l'air, les précipitations et l'évapotranspiration exercent une grande influence sur le régime hydrique et sur les eaux. En raison des changements climatiques, la température s'élève, l'évapotranspiration s'intensifie et les volumes de précipitations évoluent avec une hausse hivernale et une baisse estivale.

4.1 Température de l'air

Au cours des 150 dernières années, la température moyenne annuelle de l'air en Suisse a déjà augmenté de 2°C environ, soit deux fois plus que la moyenne mondiale. À l'avenir également, la tendance au réchauffement demeurera soutenue. De même, les vagues de chaleur seront plus fréquentes, plus longues et plus intenses.

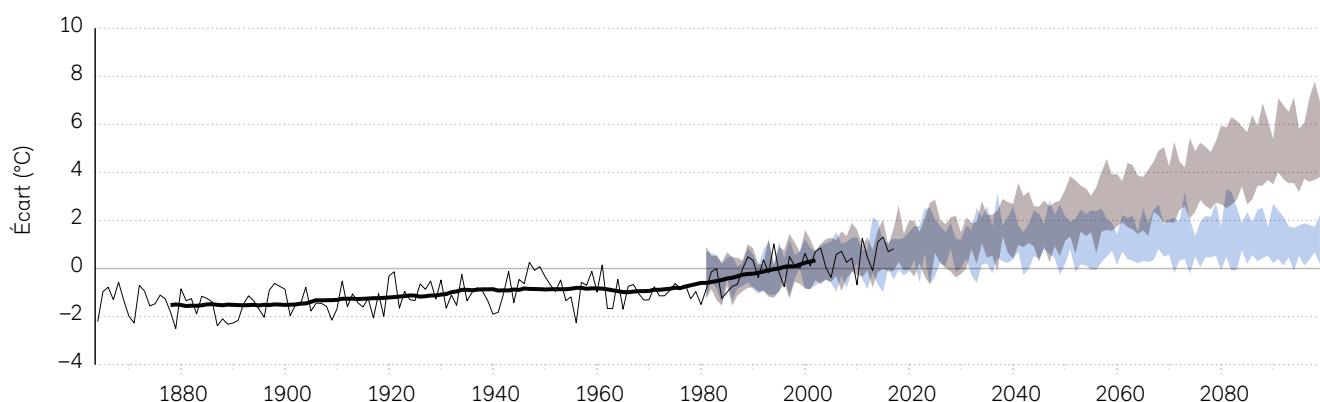
Depuis le début des relevés en 1864, la température moyenne de l'air en Suisse a augmenté de près de 2°C (Figure 4-1), ce qui correspond à une élévation deux fois supérieure à la moyenne mondiale (Begert M. et al. 2018). On observe une accélération depuis les années 1980 : neuf des dix années les plus chaudes sont postérieures à 2000. Le réchauffement entraîne des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses : à basse altitude, les jours de canicule (avec des maximales dépassant 30°C) se sont multipliés tandis que le nombre de jours de gel (avec des températures négatives) a diminué. Depuis 1961, l'isotherme zéro degré en hiver est monté en moyenne de 300 à 400 m (Rapport technique CH2018). Cet indicateur revêt une grande importance hydrologique au cours de l'année puisqu'il détermine si les précipitations tombent sous forme de neige qui est stockée temporairement ou sous forme de pluie qui va immédiatement alimenter les cours d'eau. En outre, il définit l'altitude au-dessous de laquelle la fonte des neiges et des glaciers peut avoir lieu.

Figure 4-1 : Évolution de la température moyenne annuelle de l'air au sol dans le passé et dans le futur

Le graphique montre les écarts escomptés par rapport à la période de référence (1981-2010) avec des mesures significatives de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5).

Suisse ————— Observations
Moyenne annuelle ————— Moyenne glissante sur 30 ans

■ Avec des mesures de protection du climat (RCP2.6)
■ Sans mesures de protection du climat (RCP8.5)



Source: NCCS 2018

Poursuite de l'élévation de la température

Les scénarios climatiques CH2018 montrent une nette hausse continue de la température sur l'ensemble des saisons. Dans le scénario avec des mesures significatives de protection du climat (RCP2.6), la Suisse doit s'attendre à ce que la température moyenne annuelle s'élève encore d'environ 0,6 à 1,9 °C d'ici la fin du siècle (Figure 4-1). Dans le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5), le réchauffement sera de l'ordre de 3,3 à 5,4 °C d'ici la fin du siècle. Les températures maximales estivales augmentent de manière particulièrement forte. Les vagues de chaleur et les jours et nuits caniculaires sont non seulement plus extrêmes, mais également nettement plus fréquents. En hiver, l'isotherme zéro degré passe, d'ici 2085, de 850 m d'altitude environ aujourd'hui à quelque 1700 m d'altitude sans mesures de protection du climat.

4.2 Précipitations

Depuis le début des relevés, les précipitations moyennes annuelles sont restées stables en Suisse, et aucun changement significatif n'est attendu à l'avenir. En revanche, leur distribution saisonnière sera radicalement différente, avec une baisse estivale et une hausse hivernale. L'augmentation des fortes précipitations que l'on observe déjà devrait se poursuivre.

La Suisse mesure les sommes journalières des précipitations depuis 1864, elle effectue même des relevés toutes les dix minutes depuis 1978. Les cumuls annuels de précipitations varient fortement selon les endroits, allant de moins de 600 mm dans les vallées sèches du Valais à plus de 3000 mm dans les régions alpines de haute altitude.

Changements observés jusqu'à présent

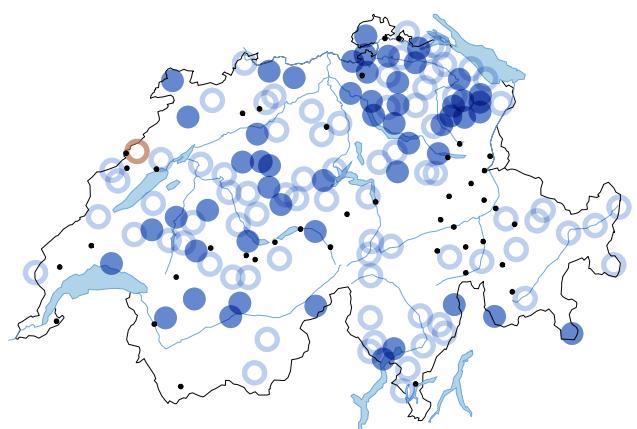
Depuis le début des relevés, les précipitations annuelles et saisonnières n'ont guère évolué, exception faite des précipitations hivernales au nord des Alpes qui ont augmenté de 20% au cours des 100 dernières années. En revanche, les pluies extrêmes n'ont plus ni la même fréquence ni la même intensité. Ainsi, dans toutes les stations de mesure, l'intensité des plus fortes précipitations journalières d'une année s'est accrue en moyenne de près de 10,4% en un siècle, soit 7,7% par degré Celsius de réchauffement. Cela correspond approximativement à la

valeur prévue par les physiciens en cas de hausse des températures (relation de Clausius-Clapeyron). Concernant la période de 1961 à 1990, les précipitations journalières d'une période de retour de 100 ans ont été calculées pour chaque station. La fréquence de tels événements extrêmes a progressé de 26,5% en un siècle (Scherrer S.C. et al. 2016). En Suisse, les fortes précipitations localisées qui durent quelques minutes à quelques heures sont principalement dues aux orages estivaux. Quant aux fortes précipitations de grande ampleur qui durent une journée ou plus, elles peuvent résulter de diverses conditions météorologiques ; elles varient en intensité selon la région et se multiplient à d'autres saisons.

Figure 4-2 : Tendances observées concernant les plus fortes précipitations tombées en une journée au cours de l'année

Les points bleus indiquent une nette hausse, les cercles bleu clair, une légère augmentation, et le cercle marron, une baisse du cumul de précipitations mesuré sur la période de 1901 à 2014. Les points noirs correspondent à une modification mineure de la quantité de précipitations.

- Légère hausse
- Nette hausse
- Légère baisse
- Modification mineure



Source: NCCS 2018 et Scherrer S.C. et al. 2016

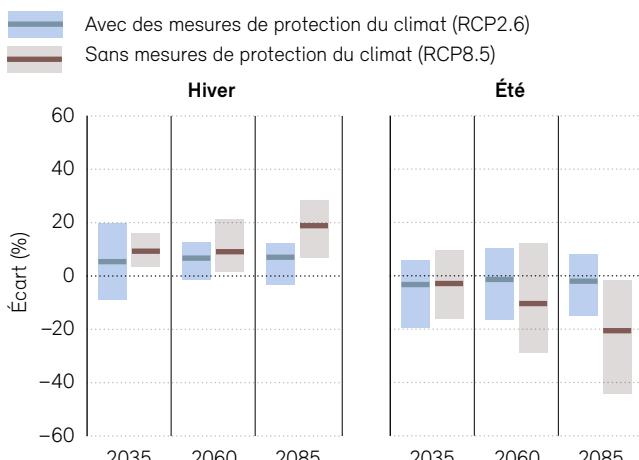
Décalages saisonniers futurs

Les scénarios climatiques CH2018 n'indiquent guère de modifications des futures précipitations annuelles. Le scénario sans mesures de protection du climat est le seul à tabler sur une légère baisse à long terme. Toutefois, la distribution saisonnière des précipitations va se décaler

(Figure 4-3). En hiver, les précipitations augmentent de près de 20 % d'ici la fin du siècle dans un scénario sans mesures de protection du climat, et elles diminuent dans la même proportion en été. L'incertitude entourant l'évolution des précipitations estivales est néanmoins relativement grande. À cela s'ajoute le fait qu'en raison de l'élévation de l'isotherme zéro degré en hiver, les précipitations tomberont davantage sous forme pluvieuse que neigeuse.

Figure 4-3 : Futures précipitations estivales et hivernales moyennes à trois horizons en Suisse

Les graphiques montrent les écarts escomptés (médiane et marge d'incertitude) par rapport à la période de référence (1981-2010) en hiver (gauche) et en été (droite) dans deux scénarios d'émissions et sur trois périodes futures (2035, 2060 et 2085) allant jusqu'à la fin du siècle.



Source: NCCS 2018

À l'avenir, allongement des périodes de sécheresse et augmentation des fortes précipitations

Si aucune mesure de protection du climat n'est prise, d'ici la fin du XXI^e siècle, presque toute la Suisse connaîtra des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus longues en été. Ainsi, dans ce scénario, les phases où se succèdent des journées sans pluie en été s'allongeront à long terme d'un à neuf jours (Rapport technique CH2018).

Les scénarios climatiques CH2018 laissent également supposer qu'à l'avenir, les fortes précipitations seront plus intenses et plus fréquentes quelle que soit leur durée.

L'accroissement de l'intensité est le même sur l'ensemble des saisons, de l'ordre de 20 % d'ici la fin du siècle si aucune mesure de protection du climat n'est mise en œuvre. C'est concernant les fortes précipitations estivales que l'incertitude et les différences entre les modèles climatiques sont les plus importantes. De manière générale, ces derniers ne peuvent pas encore suffisamment bien reproduire les processus météorologiques complexes et localisés qui accompagnent les fortes précipitations convectives dans les montagnes suisses.

Incertitudes liées aux conditions météorologiques

L'intensité et la fréquence des fortes précipitations et des périodes de sécheresse marquées sont influencées par l'élévation de la température (thermodynamique) et par les modifications de la circulation atmosphérique et de la stratification de l'atmosphère (Rapport technique CH2018). Par le passé, il y a toujours eu des variations décennales de la périodicité des schémas de circulation atmosphérique et des phénomènes météorologiques qui en résultent (Weusthoff T. 2011), d'où par exemple la multiplication des situations d'étiage ou de crue d'ampleur durant certaines décennies.

Les scénarios climatiques CH2018 montrent également des variations décennales dans la périodicité future des phénomènes météorologiques. Pour les situations météorologiques fréquentes, ces variations futures ne s'écartent cependant guère des variations observées dans le passé. Il n'est pas possible pour l'heure d'émettre des pronostics fiables quant aux conditions météorologiques rares et durables (persistantes) à l'origine d'événements hydrologiques extrêmes tels que des crues d'ampleur ou une sécheresse extrême. Différents modèles climatiques donnent des résultats divergents concernant la fréquence et la persistance. En outre, en raison de la rareté de ces événements hydrologiques extrêmes, aucune analyse statistique n'est possible (Huguenin M.F. et al. 2020). Ainsi leur évolution future demeure grevée d'une certaine incertitude.

Scénarios hydrologiques basés sur des données climatiques stochastiques à haute résolution : quelles sont les conséquences de la variabilité naturelle des données climatiques sur les scénarios hydrologiques ?

Démarche

Dans neuf projections climatiques CH2018, la variabilité naturelle de l'atmosphère a été simulée au moyen d'un générateur de conditions météorologiques. Ainsi, pour les trois bassins versants de la Thur, de la Petite Emme et de la Maggia, des paramètres météorologiques ont pu être calculés en haute résolution spatiotemporelle (p. ex. valeurs horaires des précipitations) tels qu'ils sont à prévoir compte tenu des futures conditions climatiques. Sur la base de ces données climatiques, des scénarios hydrologiques ont alors été conçus avec le modèle hydrologique Topkapi-ETH. Les résultats ont été comparés à la variabilité naturelle actuelle.

Principaux résultats

- Pour la période de 2020 à 2049, les modèles montrent déjà des changements concernant les précipitations annuelles. Cela dit, ceux-ci sont plus importants que la variabilité naturelle actuelle uniquement dans un scénario sans mesures de protection du climat et à la fin du siècle.
- Les changements concernant les fortes précipitations peuvent varier considérablement sur une petite zone, au sein même des bassins versants. Ainsi, elles sont en hausse jusqu'à la fin du siècle sur des sections du bassin de la Petite Emme et de la Thur situés à basse altitude tandis qu'elles ont tendance à diminuer à plus haute altitude.
- Les valeurs horaires des fortes précipitations augmentent sans mesures de protection du climat jusqu'à la fin du siècle (hausse de la médiane de 5 % pour la Thur et la Petite Emme, et de 20 % pour la Maggia). Mais d'un point de vue statistique, cette progression, calculée pour les épisodes de fortes précipitations avec une probabilité d'occurrence de deux ans et de 30 ans, n'est pas significative et se situe dans la plage de la variabilité naturelle actuelle.
- Les changements concernant les débits de crue annuels n'ont pas de significativité statistique et coïncident également avec la variabilité naturelle actuelle.

Projet Hydro-CH2018 de l'Institut d'ingénierie de l'environnement de l'EPFZ

4.3 Évapotranspiration et humidité du sol

Lien entre l'atmosphère et les eaux, la surface terrestre revêt une importance centrale dans le système hydrologique. Sous l'effet de l'élévation de la température de l'air, l'évapotranspiration s'accroît et l'humidité du sol diminue, ce qui a de nouveau un impact sur le climat par rétroaction.

Pour la végétation, le sol est le principal réservoir d'eau. En effet, même durant des périodes prolongées sans précipitations, il conserve l'humidité nécessaire à la croissance. Le sol est également essentiel pour l'hydrologie. En fonction de sa constitution, de sa structure et de son taux d'humidité, les précipitations s'écoulent rapidement

sous forme de ruissellement, restent stockées dans le sol ou le traversent pour alimenter lentement les eaux superficielles ou souterraines. Le sol et l'humidité qu'il renferme influencent donc les processus d'écoulement et de rétention dans leur ensemble (p. ex. renouvellement des eaux souterraines, genèse des crues).

Du fait de l'évapotranspiration, l'eau stockée dans le sol rejoint l'atmosphère, ce qui réduit l'humidité de celui-ci. L'évapotranspiration peut se produire directement à la surface des eaux et des sols (évaporation), mais aussi par le métabolisme des plantes (transpiration). Elle influe alors sur la formation des précipitations, sur la température de l'air et sur la circulation atmosphérique (p. ex. persistance des conditions météorologiques).

Aucune augmentation de l'évapotranspiration jusqu'à présent

La plus longue série de mesures de l'évapotranspiration en Suisse remonte à 1976 et a été enregistrée par le lysimètre que l'EPFZ a installé dans le bassin versant du Rietholzbach à Toggenburg. Au cours des 40 dernières années, aucune tendance significative n'a pu être observée sur ces prairies (Hirschi M. et al. 2017). La plupart du temps, l'évapotranspiration est calculée en tant que paramètre météorologique et n'est pas mesurée directement.

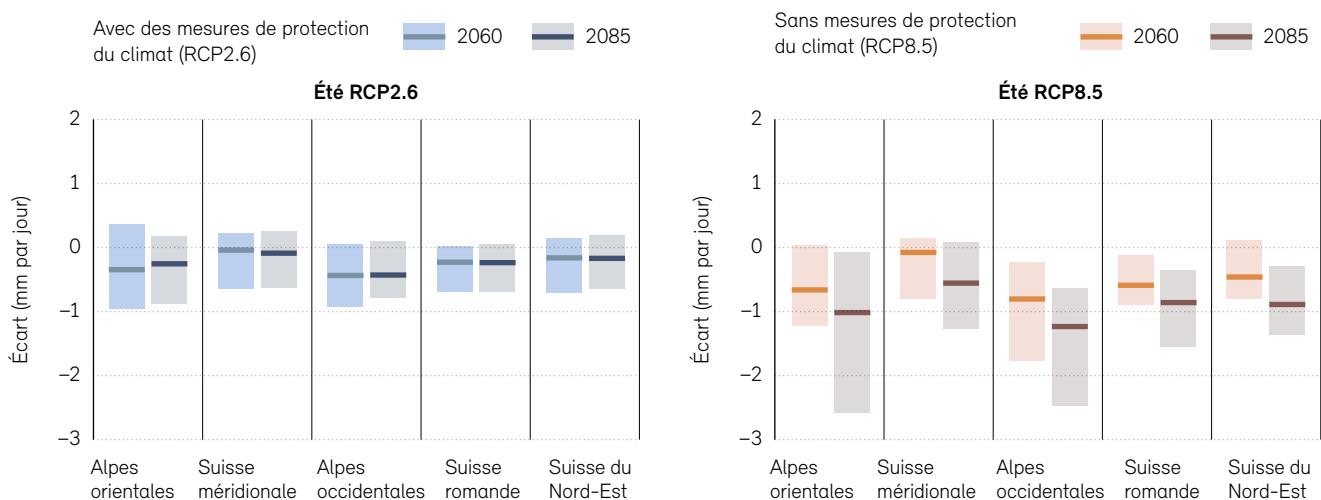
La Suisse ne possède pas de réseau national de mesure de l'humidité du sol. Certes de nombreux cantons et instituts de recherche effectuent de tels relevés, mais en poursuivant souvent des objectifs différents. Le projet scientifique SwissSMEX fournit par exemple des données sur l'humidité du sol recueillies dans 19 stations. Néanmoins, les séries de mesures sont trop courtes pour pouvoir déjà prévoir des tendances à long terme. La Suisse manque par ailleurs de cartes des sols couvrant l'ensemble du territoire avec une résolution spatiale suffisante pour les problématiques hydrologiques.

Évapotranspiration en hausse à l'avenir

L'élévation des températures induite par les changements climatiques entraîne une augmentation de l'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire de l'évapotranspiration maximale possible en présence d'eau disponible de manière illimitée, ce qui est par exemple le cas au-dessus d'un lac. L'évolution de l'évapotranspiration (effective) à un endroit donné en cas de hausse des températures dépend de la disponibilité locale de l'eau. Ainsi, l'évapotranspiration peut même diminuer malgré le réchauffement si les réserves d'eau dans le sol sont épuisées. D'ici la fin du siècle, les scénarios hydrologiques montrent un accroissement de l'évapotranspiration moyenne en Suisse de 5 % avec des mesures significatives de protection du climat et de 10 % sans mesures de protection du climat (Brunner M. et al. 2019c). Jusqu'à présent, les scénarios climatiques n'avaient pas pris en considération, ou seulement partiellement, les futures modifications de l'utilisation du sol susceptibles d'augmenter ou de réduire l'évapotranspiration.

Figure 4-4: Modification saisonnière de l'indicateur «Précipitations moins évapotranspiration» ($d[P-E]$) pour la Suisse

Les graphiques montrent les futurs écarts (médiane et marge d'incertitude) pour les mois d'été juin, juillet et août par rapport à la période de référence (1981-2010) dans différentes régions suisses dans deux scénarios d'émissions : avec des mesures significatives de protection du climat et sans mesures de protection du climat. Cet indicateur permet de faire des prévisions concernant les modifications de l'eau stockée dans le sol. Sans mesures de protection du climat, l'écart diminuera d'environ 1 mm par jour d'ici la fin du siècle.



Les changements climatiques peuvent avoir des incidences diverses sur l'évapotranspiration. Une fonte des neiges précoce dans les Alpes et une élévation de la limite forestière sont synonymes d'augmentation. En effet, le sol et la végétation réverbèrent moins de rayonnements que la neige, ils se réchauffent davantage et plus d'eau s'en évapore. À l'inverse, une baisse peut se produire en cas de sécheresse prolongée lorsque les plantes flétrissent et qu'elles perdent leurs feuilles, réduisant ainsi la transpiration. On sait également que de nombreuses plantes sont capables d'utiliser l'eau de manière plus efficiente si l'atmosphère contient plus de CO₂, ce qui réduit l'évapotranspiration (Bernacchi C.J., Van Loocke A. 2015).

Dessèchement des sols en été

Durant les mois d'été, la combinaison des précipitations plus faibles et de l'évapotranspiration accrue entraîne un

dessèchement des sols. La Figure 4-4 montre l'évolution du bilan des précipitations et de l'évapotranspiration dans différentes régions suisses, au fur et à mesure que les changements climatiques se font sentir. D'ici la fin du siècle, dans un scénario sans mesures de protection du climat, la plupart des régions doivent s'attendre à perdre en moyenne un millimètre d'eau par jour dans le sol et les débits pendant l'été. Cela correspond à environ 20 % des précipitations estivales moyennes actuelles en Suisse. Pendant les périodes de sécheresse extraordinaires avec un déficit durable de précipitations, le recul de la disponibilité de l'eau peut être encore plus marqué.

En cas de sécheresse et de vagues de chaleur, les rétroactions avec la surface terrestre jouent également un rôle important. Du fait de l'évapotranspiration, la teneur en eau de l'atmosphère est en hausse : les plantes, les sols

Bilan hydrique et sécheresse : quel est l'impact des changements climatiques sur la sécheresse, sur la régulation de la transpiration par la physiologie végétale et sur les futurs besoins en irrigation ?

Démarche

Avec le modèle climatique régional couplé COSMO-CLM², les conséquences des changements climatiques sur le bilan hydrique et sur les périodes de sécheresse en Europe ont été calculées sur un maillage de 50 km (scénario RCP8.5). Les recherches ont notamment porté sur les futurs besoins en irrigation et sur les adaptations de la physiologie végétale aux concentrations accrues en CO₂. De plus, les chaînes de modèles de CH2018 ont fait l'objet d'analyses approfondies en ce qui concerne la sécheresse future.

Principaux résultats

- Sans mesures de protection du climat, la Suisse doit s'attendre à l'avenir à ce que les périodes de sécheresse soient plus longues, le sol, moins humide, et les débits, réduits. Le niveau exact du dessèchement estival est encore incertain.
- Du fait des changements climatiques, les besoins en irrigation doublent d'ici la fin du siècle pour les terres actuellement cultivées et en supposant que la surface agricole utile reste la même.
- Les plantes réagissent aux concentrations accrues en CO₂ en refermant leurs pores (stomates) et en laissant moins d'eau s'échapper. Cela entraîne une diminution générale de l'évapotranspiration qui pourrait également accentuer la hausse de la température de l'air et générer des températures extrêmes dans de vastes régions d'Europe centrale et septentrionale.
- Tandis que les modèles climatiques globaux tiennent compte de cet effet de la physiologie végétale, il est absent des projections climatiques régionales qui ont été utilisées pour les scénarios climatiques CH2018. Une fois que ce processus est pris en considération, la température maximale projetée en été est alors encore plus élevée que dans CH2018 (Schwingshackl C. et al. 2019).

Dynamique forestière, utilisation du sol et régime hydrique : quelles sont les conséquences des futurs changements de la dynamique forestière sur l'évapotranspiration et sur les débits ?

Démarche

Le modèle de régime hydrique PREVAH-WSL a été couplé à un modèle de développement forestier. Les conséquences sur le développement forestier et sur le régime hydrique ont été calculées dans six bassins versants d'après les scénarios climatiques CH2018.

Principaux résultats

- Sur le Plateau et dans les Préalpes, les débits ne devraient pas évoluer de manière importante du fait des modifications de la dynamique forestière.
- Les changements climatiques favorisent le renforcement du boisement alpin. L'extension des surfaces forestières dépend aussi de l'évolution de l'économie alpestre étant donné que la forêt ne peut pas conquérir des surfaces pâturées.
- Un boisement plus important dans les Alpes aurait une influence considérable sur l'évapotranspiration et sur les débits. Dans un avenir lointain, cela pourrait se traduire dans les bassins versants alpins par une hausse de l'évapotranspiration et donc par une réduction du débit annuel allant jusqu'à 10 %. En raison de la plus grande profondeur d'enracinement, c'est à l'automne que cet effet est le plus prononcé, aggravant encore le débit minimal dû au climat durant cette saison (Speich M.J.R. et al. 2020).

Projet Hydro-CH2018 de l'unité de recherche Hydrologique de montagne et mouvements de masse du WSL

et l'air se refroidissent. La transpiration protège donc les végétaux contre une chaleur excessive, tandis que des sols humides ralentissent l'élévation de la température durant les canicules grâce à l'évaporation (Vogel M.M. et al. 2017). Mais si les sols sont desséchés, ils peuvent aussi allonger les périodes de sécheresse et les vagues de chaleur (Lorenz R. et al. 2010), voire renforcer les anticyclones stationnaires (Merrifield A.L. et al. 2019). Avec la progression des changements climatiques, cet effet de rétroaction pourrait intensifier les périodes de sécheresse.

Autres informations et références sur le thème

«Évapotranspiration et humidité du sol»

- Hirschi M. et al. 2020 : Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 report.
- Speich M.J.R. et al., en cours d'élaboration : Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht.

5 Cryosphère

Depuis longtemps déjà, on peut observer en Suisse les effets de la hausse de la température de l'air: fonte des glaciers, élévation de l'isotherme zéro degré et dégel du pergélisol. Ces tendances seront accentuées à l'avenir par les changements climatiques. Les dangers naturels augmenteront en haute montagne et la gestion des eaux devra s'adapter à l'évolution du volume d'eau disponible.

5.1 Neige

Aujourd'hui, la fonte des neiges contribue de manière décisive aux débits en Suisse. En raison des changements climatiques, l'isotherme zéro degré continuera de s'elever en hiver. Ainsi, moins de précipitations seront stockées dans le manteau neigeux et la neige fondera plus tôt dans l'année.

Réservoir d'eau naturel, le manteau neigeux revêt une importance remarquable pour le régime hydrique saisonnier en Suisse. Selon les modélisations, près de 40 % (22 km³) du débit annuel total provenaient de la couverture neigeuse durant la période de référence (1981-2010). Le manteau neigeux se forme dans les Alpes tout au long de l'hiver (tandis que les débits sont faibles, surtout dans les cours d'eau alpins) pour atteindre son épaisseur maximale en mars normalement. Dans de nombreux bassins versants, c'est la fonte des neiges qui détermine les débits au printemps et au début de l'été.

La diminution du manteau neigeux est déjà visible

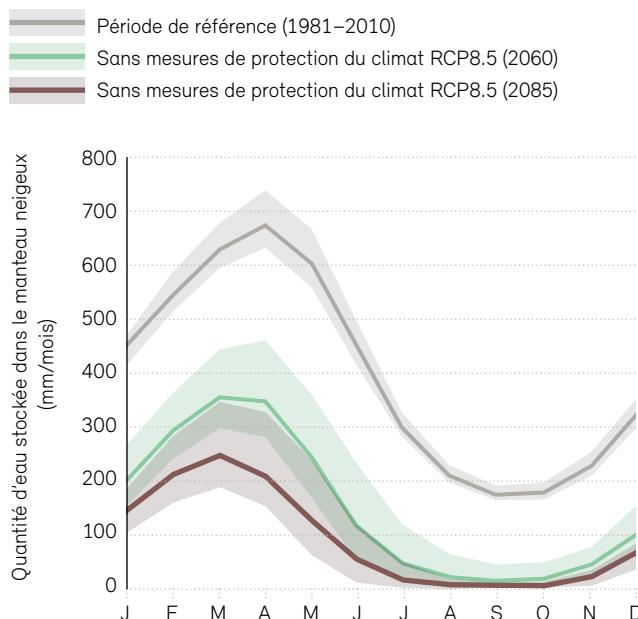
Tributaire de la température de l'air, la part des précipitations tombant sous forme neigeuse a déjà fortement chuté en raison du réchauffement. Jusqu'à présent, les basses et moyennes altitudes étaient les principales concernées. Depuis 1961, la part de jours de neige dans les régions situées à moins de 500 m d'altitude a ainsi reculé de près de 40 %, et la quantité d'eau stockée dans la neige au printemps (équivalent en eau de la couche de neige) dans les régions situées au-dessous de 1000 m d'altitude a même baissé de 75 % environ (Marty C. et al. 2017).

Les volumes de neige vont continuer de s'amenuiser

Tout comme les températures hivernales, l'isotherme zéro degré s'élève, et ce, de quelque 150 mètres par degré Celsius de réchauffement (CH2018), ce qui a pour effet de réduire encore la part de la neige dans le total des précipitations. La formation d'un manteau neigeux permanent débute plus tard dans l'année et reste limitée aux hautes altitudes. Au printemps, la neige commence à fondre plus tôt. Les scénarios hydrologiques laissent supposer que la quantité d'eau moyenne annuelle stockée dans le manteau neigeux va diminuer d'ici la fin du siècle de l'ordre de 42 % avec des mesures significatives de protection du climat et de 78 % sans mesures de protection du climat (Figure 5-1). En parallèle, l'épaisseur maximale du manteau neigeux est atteinte non plus en mars, mais en février. Du fait de l'élévation simultanée de la température, l'augmentation attendue des précipitations hivernales n'a un impact positif sur le manteau neigeux qu'à de très hautes altitudes, ce qui ne permet pas de compenser la baisse générale de la quantité de neige. Ces changements concernant le manteau neigeux ont de profondes répercussions sur la distribution saisonnière des débits (point 6.2).

Figure 5-1 : Variation moyenne de la quantité d'eau stockée dans le manteau neigeux sans mesures de protection du climat d'ici la moitié et la fin du siècle à des altitudes supérieures à 1500 m

La part de l'eau stockée sous forme neigeuse (médiane et marge d'incertitude) diminue à toutes les saisons d'ici la fin du XXI^e siècle. Les changements par rapport à la période de référence (1981–2010) dans un scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5) montrent que la quantité d'eau stockée dans la neige est très limitée en fin d'été, même en haute altitude. Le manque de neige implique aussi un débit plus faible provenant de la fonte des neiges. Par ailleurs, il y a moins de neige à disposition pour les glaciers.



Source: adaptation d'après les données de Brunner M. et al. 2019c

Autres informations et références sur le thème

« Neige »

- Marty C. et al. 2020: Snow. Hydro-CH2018 report.

5.2 Glaciers et pergélisol

Depuis 1850, les glaciers suisses ont déjà perdu 60 % de leur volume. D'ici la fin du XXI^e siècle, des restes de grands glaciers ne subsisteront plus qu'à de très hautes altitudes. Les débits estivaux alimentés par la fonte des glaciers s'en trouvent fortement réduits. Le pergélisol dégèle lui aussi, accroissant le risque de dangers naturels.

La glace des glaciers se forme quand, à des altitudes élevées (zone d'accumulation), la neige tombée pendant l'année ne fond pas complètement et se transforme en glace. La glace s'écoule peu à peu vers la vallée sous l'effet de la pesanteur et fond en été à des altitudes plus basses (zone d'ablation). En raison de l'élévation de la température, d'une part la fonte des glaciers est accentuée et d'autre part les zones d'accumulation rétrécissent, ce qui réduit la croissance. Il en résulte une perte du volume des glaciers. Plus un glacier est petit, plus il réagit vite aux changements climatiques.

Fonte des glaciers massive depuis 1850

À la fin du petit âge glaciaire vers 1850, le volume de glace dans les Alpes suisses était estimé à environ 130 km³. En 2010, il avoisinait encore 60 km³ (Fischer M. et al. 2015) avant d'atteindre 53 km³ en 2019 (Langhammer L. et al. 2019). Au total, les glaciers ont ainsi perdu près de 60 % de leur volume depuis 1850. Rien qu'au cours des cinq dernières années (2015–2019), le volume des glaciers a diminué de 10 % (www.gamos.ch).

Les glaciers ont une grande importance pour le régime hydrique car ils stockent les précipitations pendant plusieurs saisons, années ou décennies, voire plusieurs siècles. C'est notamment pendant les périodes estivales chaudes et sèches que les glaciers apportent une précieuse contribution au débit de nombreux cours d'eau alpins, mais aussi de grands fleuves tels que le Rhin et le Rhône.

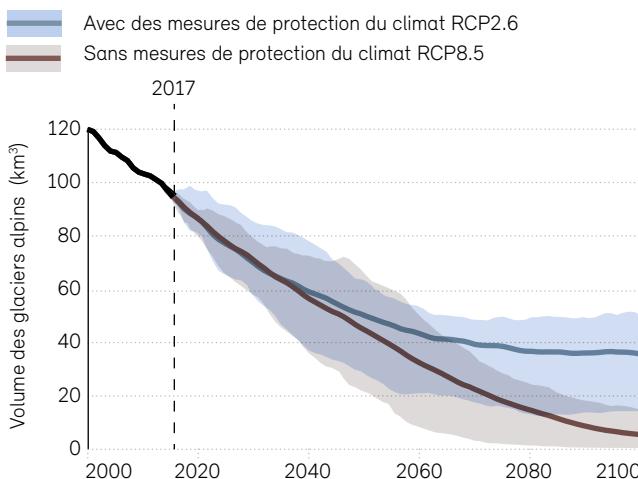
Plus que quelques glaciers d'ici la fin du siècle

Les scénarios concernant les glaciers montrent qu'une grande partie de la masse glaciaire des Alpes aura disparu d'ici la fin du siècle (Figure 5-2). Avec des mesures significatives de protection du climat, il restera encore

quelque 37 % du volume des glaciers de 2017, contre environ 5 % seulement sans mesures de protection du climat. Les glaciers ayant souvent besoin de dizaines d'années pour s'adapter à un nouveau climat, une partie de la fonte des glaciers ne peut plus être empêchée malgré des mesures significatives de protection du climat, puisque leur volume demeure « trop gros », même pour le climat actuel (Zekollari H. et al. 2019).

Figure 5-2: Modifications du volume de glace de tous les glaciers alpins d'ici la fin du siècle

Le graphique montre le volume de glace restant des glaciers alpins (valeur moyenne et marge d'incertitude) dans différents scénarios climatiques régionaux. Avant 2017, le calcul a été réalisé avec des données climatiques observées. Sans mesures de protection du climat, 95 % du volume actuel des glaciers auront fondu d'ici 2100.



Source: d'après Zekollari H. et al. 2019

Dégel du pergélisol, dangers naturels accrus

On appelle pergélisol le sous-sol dont la température est négative tout au long de l'année. Dans les Alpes, il est largement répandu au-delà de 2500 m d'altitude, dissimulé dans les éboulis et moraines riches en glace, dans les glaciers rocheux et dans les parois rocheuses abruptes dont les pores et les fissures sont remplis de glace. Les observations du pergélisol réalisées au cours des 20 dernières années dans les Alpes suisses montrent une hausse générale de sa température, une réduction de la teneur en glace et une accélération des vitesses d'écoulement des glaciers rocheux (PERMOS 2019). En raison

du volume de glace comparativement faible (environ un quart du volume des glaciers), l'eau de fonte du pergélisol alpin contribue moins au débit global. En revanche, le réchauffement du pergélisol peut avoir de lourdes conséquences sur les dangers naturels et sur les biotopes. Les changements qu'il subit influent sur la stabilité des flancs de montagne raides et de l'infrastructure en haute montagne. Le nombre et l'ampleur des laves torrentielles et des éboulements sont susceptibles de s'accroître.

Autres informations et références sur le thème « Glaciers et pergélisol »

- Ayala A. et al. 2020 : Glaciers. Hydro-CH2018 report.
- Nötzli J., Phillips M. 2019 : Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report.

6 Eaux

Les scénarios hydrologiques montrent comment les changements climatiques vont modifier les débits des eaux superficielles, le renouvellement des eaux souterraines et la température des eaux. La qualité de l'eau et l'écologie des eaux en pâtiront et les situations de crue et d'étiage s'intensifieront.

6.1 Débits annuels

Les débits annuels moyens ne sont que faiblement impactés par les changements climatiques. Ce n'est que dans le scénario sans mesures de protection du climat qu'ils affichent un léger recul d'ici la fin du siècle. La baisse la plus forte concerne les régions encore englacées aujourd'hui. Il n'en demeure pas moins que les débits saisonniers vont changer considérablement, avec de lourdes conséquences en termes d'utilisation de l'eau (point 6.2).

Certes les débits annuels des cours d'eau suisses varient fortement d'une année sur l'autre, mais leur moyenne pluriannuelle n'a guère évolué depuis que l'on a commencé à effectuer des mesures du débit au début du XX^e siècle. Par exemple, pour le Rhin à proximité de Bâle, la série de mesures remontant à 1871 ne permet pas d'identifier une tendance haussière ou baissière des débits annuels (Weingartner R. 2018). Cela s'explique par la stabilité des précipitations annuelles sur plusieurs années. Seuls les bassins versants influencés par le débit provenant de la fonte des glaciers affichent une hausse des débits annuels puisque les glaciers fondent.

Débits annuels partiellement en baisse dans un contexte de changements climatiques effrénés

Au cours des prochaines décennies aussi, les débits resteront relativement stables en moyenne pluriannuelle dans la plupart des bassins versants (Figure 6-1). Dans un scénario avec des mesures significatives de protection du climat, les scénarios hydrologiques ne font ressortir aucun signal de changement clair d'ici la fin du siècle dans la majorité des bassins versants. C'est uniquement dans un scénario sans mesures de protection du climat qu'est attendue une légère baisse des débits

annuels moyens vers la fin du siècle, de l'ordre de 9 % en moyenne en Suisse. Mais dans près de 25 % des régions, les débits annuels ne varient guère même sans mesures de protection du climat (signal de changement de +/– 5 % d'ici la fin du siècle). Pour 65 %, le signal de changement oscille entre – 5 et – 20 %. La diminution des débits annuels s'explique par une légère réduction des précipitations annuelles, par l'élévation de la température de l'air et par les processus subséquents connexes tels qu'un allongement de la période de végétation et une évapotranspiration accrue. À cela s'ajoute le fait que, dans les Alpes, les glaciers auront disparu ou nettement reculé d'ici la fin du siècle et que la part de l'eau de fonte sera donc bien plus faible qu'aujourd'hui (Freudiger D. et al. 2020). Dans de telles régions, la chute des débits annuels peut même être significative. Au cours d'une année moyenne néanmoins, la Suisse aura, à l'avenir également, autant d'eau qu'aujourd'hui si l'on considère l'ensemble de l'année.

Contribution de l'eau de fonte en net recul à l'avenir

Dans les bassins versants fortement englacés, le débit annuel peut continuer d'augmenter jusqu'en 2050 (+/– 15 ans) dans le scénario sans mesures de protection du climat en raison de la fonte des glaciers. Cependant, la part maximale de l'eau de fonte glaciaire dans le débit annuel («peak water») a déjà été atteinte dans plus de 90 % de tous les bassins versants englacés et elle va poursuivre sa diminution dans la plupart des têtes de bassins versants. Par exemple, la part de l'eau de fonte des glaciers dans le débit annuel du Rhône à proximité de Gletsch passera des 27 % actuels à 10 % (avec des mesures de protection du climat) voire à 4 % (sans mesures de protection du climat) d'ici la fin du siècle (Figure 6-2).

La neige contribue de manière encore plus décisive au débit dans les têtes de bassins versants, de l'ordre de 40 % pour le Rhône à Gletsch et pour la Lütschine blanche à Zweilütschinen. Dans la majorité des têtes de bassins versants, la part de la fonte des neiges dans le débit annuel sera plus faible à l'avenir, et ce, dans tous les scénarios. Ce n'est que dans quelques bassins versants de très haute altitude que la part du débit provenant du manteau neigeux augmente de manière telle que la part de la fonte des neiges en hausse peut compenser par-

tiellement la part de la fonte des glaciers en baisse dans certains cas – du moins avec des mesures significatives de protection du climat – (Freudiger D. et al. 2020).

Figure 6-1: Évolution du débit annuel selon le bassin versant et le scénario

Les graphiques montrent les médianes, calculées dans les scénarios hydrologiques, de l'évolution en pourcentage des débits annuels par rapport à la période de référence (1981-2010) dans les scénarios avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) à court et long termes. Les variations des débits annuels sont faibles. Sans mesures de protection du climat, elles diminuent légèrement d'ici la fin du siècle.

Écart en pourcentage par rapport à la période de référence

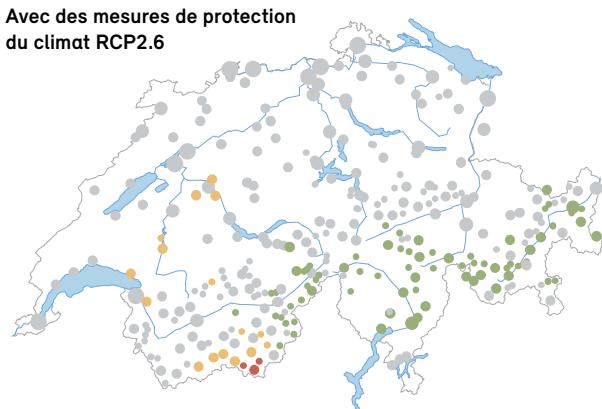
- -60 à -40
- -40 à -20
- -20 à -5
- -5 à 5
- 5 à 20
- 20 à 40

Taille du bassin versant en km²

- < 50
- 50 à 1000
- > 1000
- > 5000

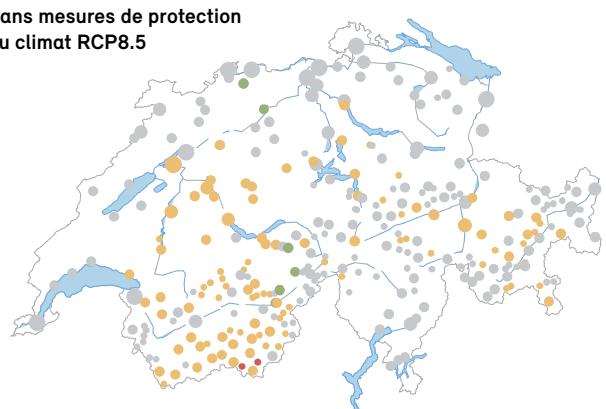
2060

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



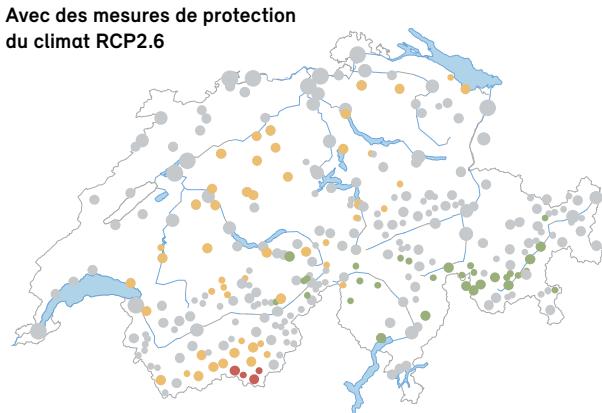
2060

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5



2085

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



2085

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5

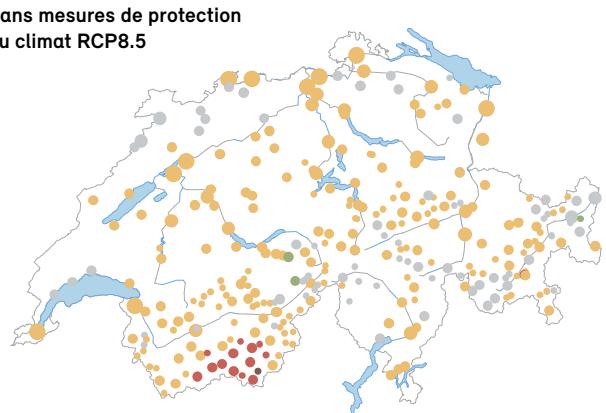
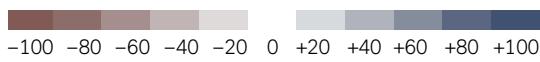
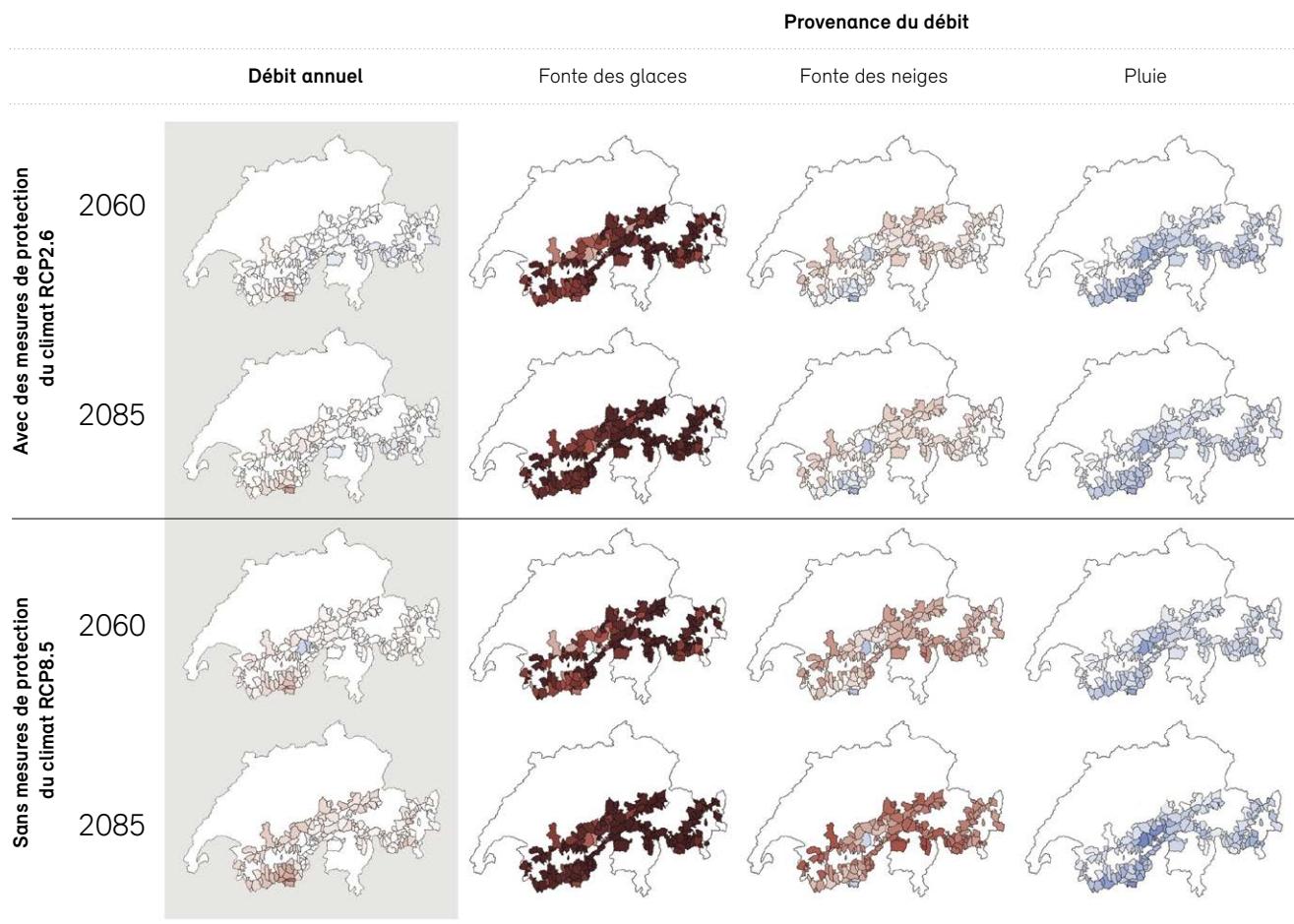


Figure 6-2 : Évolution de la part des débits provenant respectivement de la pluie, de la fonte des neiges et des glaces, et du débit global
Les graphiques montrent les changements dans 190 têtes de bassins versants englacés de Suisse par rapport à la période de référence (1981–2010) avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5). Un pourcentage nul signifie aucun changement par rapport à la période de référence, – 100 %, la disparition totale de la part et + 100 %, son doublement. Dans tous les scénarios, la fonte des glaces diminue de manière particulièrement forte. Dans le scénario sans mesures de protection du climat, elle ne contribuera plus au débit dans de nombreuses régions d'ici la fin du siècle, et la part de la fonte des neiges aura elle aussi diminué considérablement.



Écart en pourcentage par rapport à la période de référence (1981–2010)



Source: Freudiger D. et al. 2020

Quantification des parts du débit provenant de la fonte des neiges et des glaciers : quelles conséquences la fonte des glaciers et la diminution du manteau neigeux ont-elles sur le débit ?

Démarche

Les parts du débit provenant de la pluie, de la fonte des neiges et des glaciers ont été calculées pour 190 têtes de bassins versants englacés des Alpes suisses à l'aide du modèle hydrologique HBV Light-UniZH. Ses modules dédiés à la neige et aux glaciers ont été spécialement adaptés pour représenter au mieux le manteau neigeux et les glaciers. Le modèle a été calibré avec les données relatives au débit, à la couverture neigeuse et aux glaciers. Cela a permis de calculer les parts du débit même dans les régions pour lesquelles il n'existe aucune donnée de débit, puisque les données sur le manteau neigeux et sur la superficie des glaciers sont disponibles pour l'ensemble du territoire.

Principaux résultats

Les prévisions sur la fonte des neiges et des glaciers formulées au point 6.1 et dans des sections des points 6.2 et 6.4 du présent rapport reposent sur les résultats de ce projet. La contribution totale de la fonte des glaciers des 190 têtes de bassins versants représente actuellement 8 % du débit annuel et diminue sans mesures de protection du climat pour atteindre moins de 2 % vers la fin du siècle. Sans mesures de protection du climat (RCP8.5), la contribution de la neige au débit annuel passe de 34 % aujourd'hui à 25 % d'ici la fin du siècle.

Projet Hydro-CH2018 de l'Institut de géographie de l'Université de Zurich

6.2 Débits saisonniers

Au cours des dernières décennies, la distribution saisonnière des débits a déjà connu une évolution marquée par une baisse estivale et une hausse hivernale. Cette tendance se poursuivra avec les changements climatiques et peut entraîner des restrictions quant à l'utilisation de l'eau.

Les débits des cours d'eau suisses évoluent différemment selon les saisons. Les régimes d'écoulement sont caractérisés par la distribution saisonnière des précipitations, par l'évapotranspiration et par la contribution de la fonte des neiges et des glaciers. Dans le régime pluvial, le débit est principalement déterminé par la répartition des précipitations et par l'évapotranspiration. Les régions situées à basse altitude au nord des Alpes ont ce type de régime. Les débits restent relativement équilibrés tout au long de l'année (Figure 6-1). Dans le régime nival, les chutes de neige et la fonte des neiges s'ajoutent à la distribution des précipitations. Les débits sont donc faibles en hiver (décembre à février) lorsque la neige couvre le sol, avant de s'amplifier au printemps (mars à mai) lorsque la neige fond. Les régions alpines sans glacier ont un régime

nival. Dans le régime glaciaire, il faut également ajouter la fonte des glaciers en été (juin à août), ce qui accroît fortement les débits. Au sud des Alpes, la plupart des régimes d'écoulement sont caractérisés par des maxima au printemps et à l'automne (septembre à novembre) lorsque les précipitations sont les plus importantes. Il s'agit du régime subalpin. Outre ces principaux régimes, il existe des régimes transitoires et des sous-types régionaux (Weingartner R., Aschwanden H. 1992).

Changement des régimes d'écoulement

Les régimes d'écoulement ont changé au cours de la période d'observation de 1961 à 2015 (Weingartner R. 2018). Durant les mois d'hiver, les débits ont augmenté dans la plupart des bassins versants (Figure 6-3) puisque la température de l'air s'est élevée et que les précipitations hivernales sont davantage tombées sous forme pluvieuse que neigeuse. En revanche, en été, on observe généralement une baisse des débits moyens, sauf dans les bassins versants fortement englacés. Au printemps, les débits ont suivi une tendance haussière dans les Alpes en raison de la fonte des neiges plus précoce, mais une tendance baissière sur le Plateau et dans le Jura. C'est dans la région alpine que les change-

ments sont les plus prononcés. De manière générale, on constate un déplacement des régimes d'écoulement du glaciaire vers le nival et du nival vers le pluvial.

Dans les bassins versants fortement englacés tels que celui de la Massa (Figure 6-3b) ayant un régime glaciaire, les débits saisonniers ont augmenté en hiver, au printemps et en été, la hausse du débit estival s'expliquant par la fonte des glaciers. C'est au printemps que les régimes nivaux ont les débits moyens les plus importants en raison de la fonte des neiges. Comme elle est toujours plus précoce, les débits de mars et d'avril ont augmenté dans la majorité des bassins versants. Par ailleurs, le fait que le manteau neigeux fonde plus tôt signifie que l'on observe souvent (p. ex. pour le Plessur) une baisse estivale du débit moyen.

Dans les bassins versants pluviaux du Plateau et du Jura, les débits ont tendance à diminuer au printemps et en été. Mais les variations observées sont globalement faibles comme le montre l'exemple de l'Aach. Les régions subalpines enregistrent une baisse des débits annuels, avec une diminution particulièrement forte des débits estivaux. Mais il convient de noter que cette déclaration s'appuie sur des moyennes saisonnières pluriannuelles. Il peut arriver que les débits saisonniers moyens diffèrent fortement certaines années.

Hausse continue des débits hivernaux

Les scénarios hydrologiques laissent supposer une augmentation continue des débits hivernaux dans toute la Suisse. Cela s'explique par la hausse prévue des précipitations hivernales et par leur passage de la forme nei-

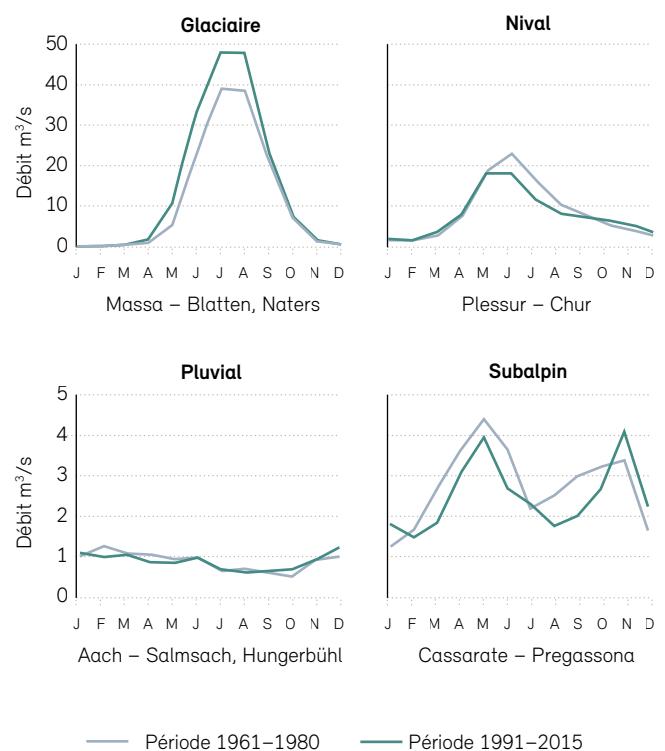
Figure 6-3: Modifications observées des débits et des régimes d'écoulement en Suisse

Les graphiques montrent l'évolution des débits dans les diverses régions (a) et dans quatre bassins versants sélectionnés (b) ayant des régimes d'écoulement différents. On peut déjà observer une hausse des débits en hiver et une baisse en été.

a Évolution des débits saisonniers et annuels dans diverses régions de Suisse de 1961 à 2015

Région	Année	Hiver (DJF)	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	
Zones <1000 km²						
Bassins versants alpins avec glacier		↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑↑	→
Bassins versants alpins sans glacier		→	↑↑	↑	↓↓	↑
Plateau/Jura		→	↑	↓	↓	↑
Sud des Alpes		↓	↑	→	↓	↑
Zones >1000 km²						
	→	↑	↓	↓	↑	
Tendance à la hausse du débit		↑	↓	Moyenne		
		↑↑	↓↓	Moyenne		
		↑↑↑	→	Forte		
Tendance à la baisse du débit		↓	↑	Faible		
		↑↑	↓↓	Moyenne		
		↑↑↑	Aucun changement			

b Débits mensuels moyens pour les périodes 1961–1980 et 1991–2015 dans quatre bassins versants ayant les types de régime d'écoulement glaciaire, nival, pluvial et subalpin



geuse à la forme pluvieuse. La Figure 6-4 montre, pour les bassins versants et régimes d'écoulement typiques, l'évolution des débits saisonniers tout au long de l'année jusqu'à la fin du siècle. La Figure 6-5 donne un aperçu des changements dans toutes les stations modélisées.

À la fin du siècle, la Suisse hydrologique doit s'attendre en moyenne à une hausse des débits hivernaux d'environ 10 % avec des mesures de protection du climat et de quelque 30 % sans mesures de protection du climat (Brunner M. et al. 2019c). Ils augmentent de manière particulièrement forte dans les régimes nivaux actuels. Les changements les plus faibles concernent les bassins versants du Plateau dans lesquels le manteau neigeux contribue déjà peu au débit, ainsi que les bassins versants situés à très haute altitude dans lesquels, à l'avenir également, les précipitations tomberont principalement sous forme de neige en raison des faibles températures hivernales (Mülchi R. et al. 2021a).

Hausse ou baisse des débits printaniers selon l'altitude
Au printemps, l'évolution sur le Plateau et dans le Jura diffère de celle des régions situées à plus haute altitude. Les débits printaniers diminuent à basse et moyenne altitudes, comme le montrent les exemples du Plessur et de la Thur (Figure 6-4). Cela s'explique par un manteau neigeux moins épais et par une évapotranspiration accrue dus à la précocité de la période de végétation et à l'élévation des températures. En revanche, la région alpine affiche une augmentation des débits printaniers du fait de la fonte des neiges qui commence plus tôt. Le débit des grands bassins versants comme le Rhône et le Rhin est plus équilibré en raison des évolutions contraires, avec une hausse en mars et une baisse en mai. Dans l'ensemble, les débits des cours d'eau suisses vers les pays en aval ne varient guère.

Baisse des débits en été et à l'automne

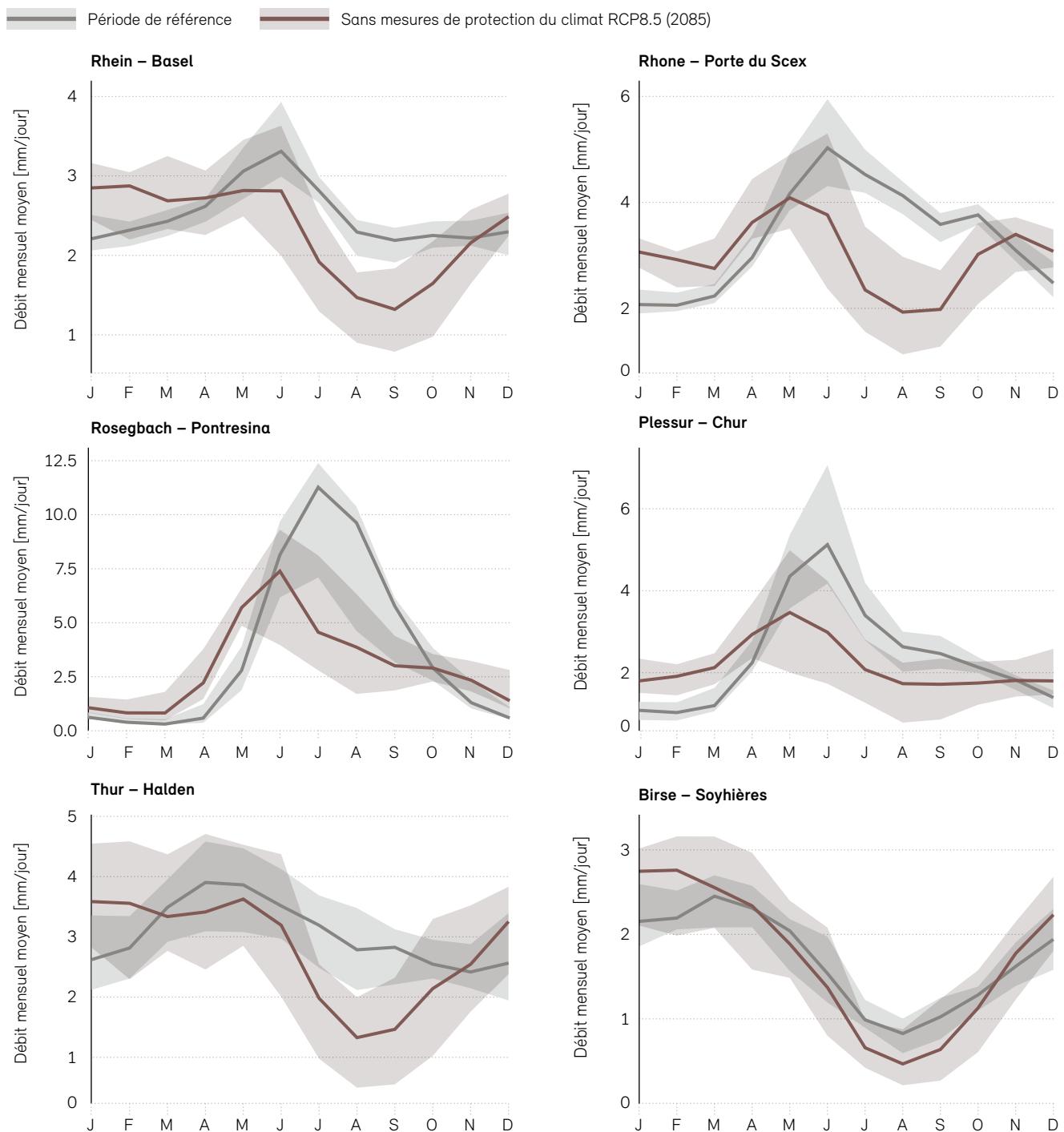
En été, les scénarios concernant la Suisse hydrologique montrent une baisse moyenne des débits d'ici la fin du siècle d'environ 10 % avec des mesures de protection du climat et de 40 % sans mesures de protection du climat. Ce recul est imputable aux précipitations estivales plus faibles, à l'évapotranspiration accrue et à une quantité réduite d'eau de fonte des glaciers et des neiges (Figure 6-2). Toutes les altitudes et toutes les régions sont concernées par la baisse des débits en été. Il faut escom-

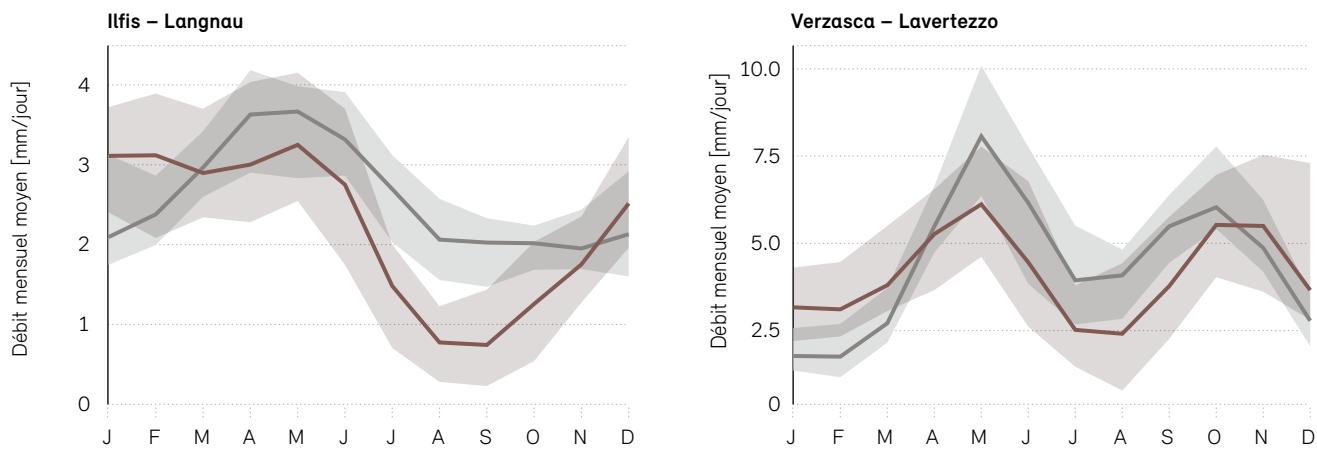
ter une forte réduction sur le Plateau, dans le Jura et dans les Préalpes, en particulier à la fin de l'été (exemples de la Birse, de la Thur et de l'Illfis). Le Tessin doit également tabler sur une nette diminution (exemple de la Verzasca). Les débits estivaux enregistreront aussi un repli marqué dans les régions encore englacées aujourd'hui (exemple de l'Ova da Roseg).

À l'automne, le débit va également baisser d'ici la fin du siècle, touchant toutes les altitudes et toutes les régions. Le recul à l'échelle de la Suisse hydrologique est d'environ 5 % avec des mesures de protection du climat et de 20 % sans mesures de protection du climat. La baisse des débits en été et à l'automne est claire également dans les grands bassins fluviaux tels que le Rhin et le Rhône, qui sont la somme des petits bassins versants (Figure 6-4). Il ressort de cette vue d'ensemble qu'il y aura à l'avenir une distribution saisonnière des débits parfois marquée. Les baisses estivales constitueront un défi pour la gestion et l'écologie des eaux lorsqu'aux faibles débits s'ajouteront une température de l'eau élevée et des besoins en eau considérables.

Figure 6-4: Évolution des débits mensuels moyens dans huit bassins versants caractéristiques

C'est à l'aide du modèle PREVAH-Unibe et PREVAH-WSL (Rhein et Rhône) qu'ont été calculés les scénarios hydrologiques (médiane et marge d'incertitude) pour la période de référence (1981-2010) (gris) et les scénarios sans mesures de protection du climat (RCP8.5) pour la fin du siècle (rouge). Dans toutes les régions, une nette baisse des débits est attendue en été, et une hausse en hiver.



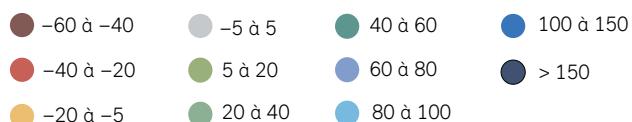


Source: Mühlchi R. et al. 2020

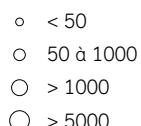
Figure 6-5: Variation du débit en hiver, au printemps, en été et à l'automne

Les graphiques montrent les médianes, calculées dans les scénarios hydrologiques, de l'évolution en pourcentage des débits saisonniers par rapport à la période de référence (1981-2010) dans les scénarios avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) à court et long termes. Les débits augmentent en hiver dans toute la Suisse et diminuent en été et à l'automne. Au printemps, la réaction varie selon l'altitude basse ou haute.

Écart en pourcentage par rapport à la période de référence



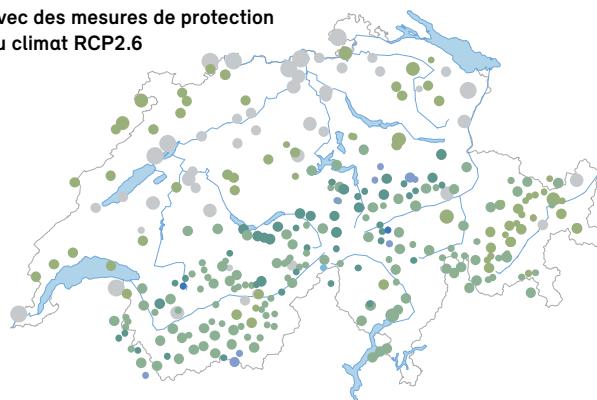
Taille du bassin versant en km²



Hiver

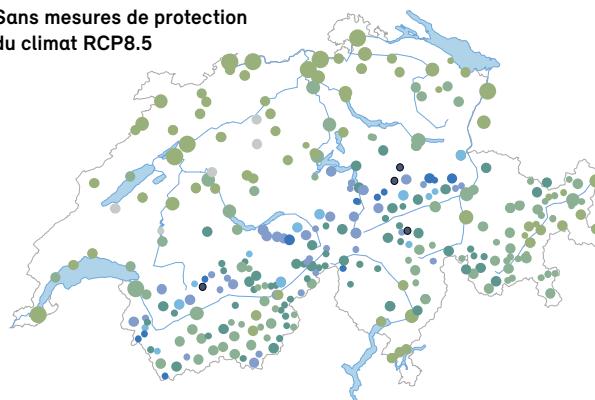
2060

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



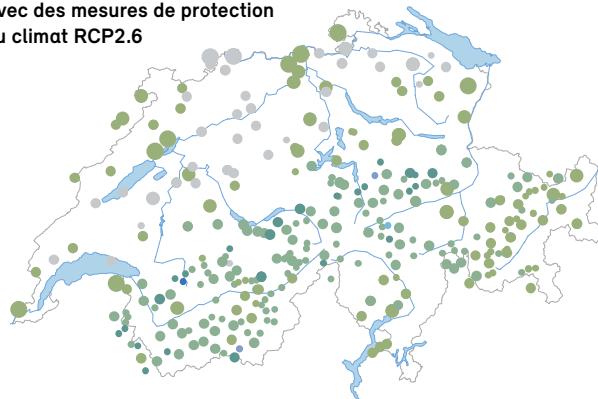
2060

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5



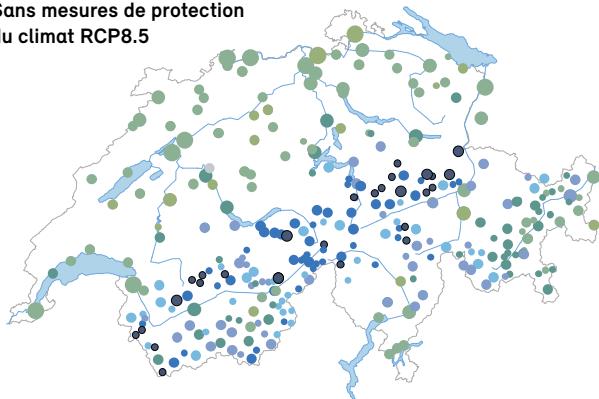
2085

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



2085

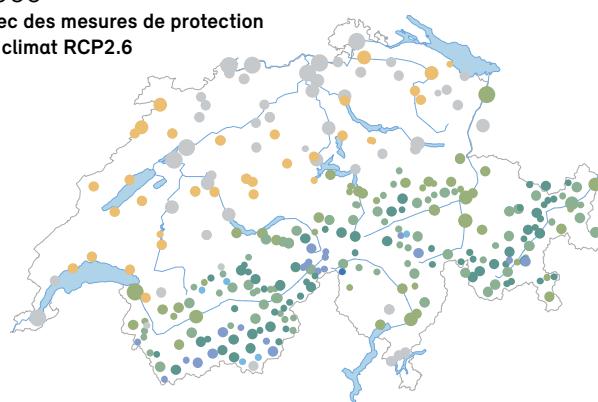
Sans mesures de protection
du climat RCP8.5



Printemps

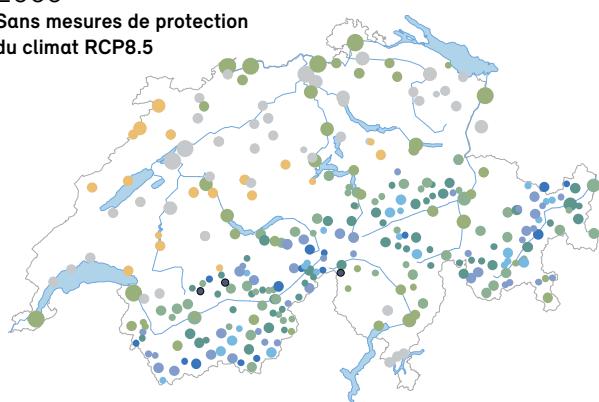
2060

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



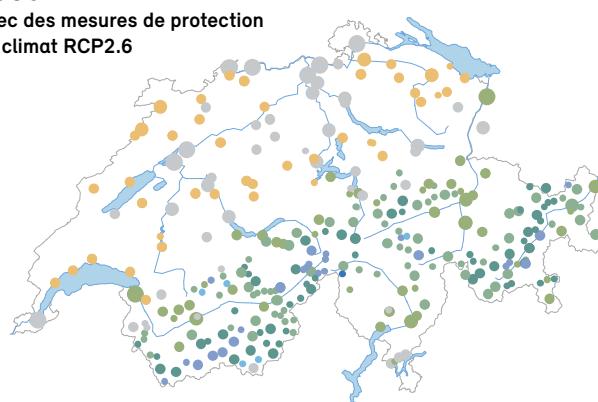
2060

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5



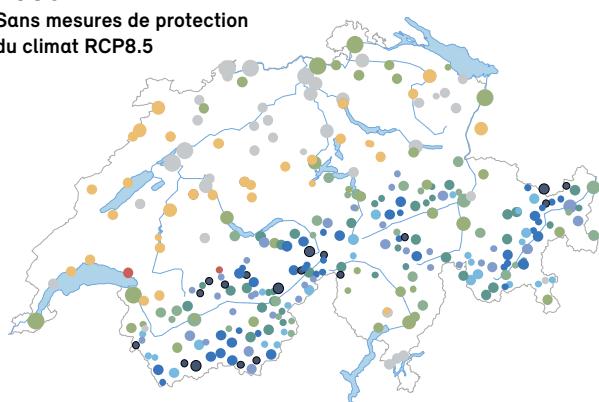
2085

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6



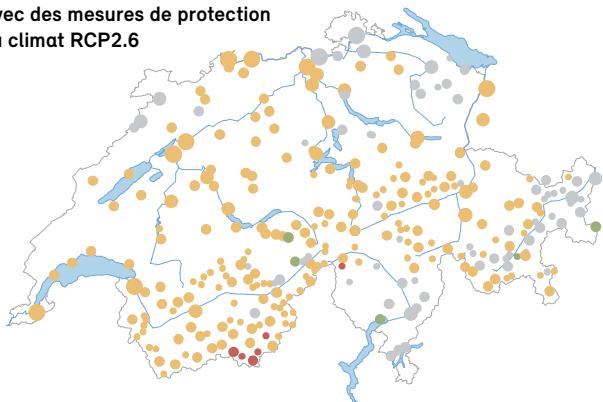
2085

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5

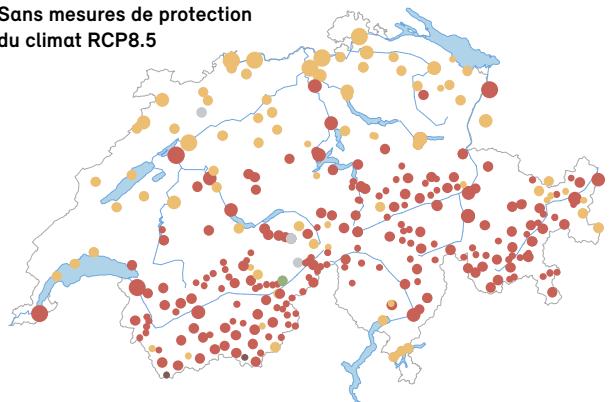


Été

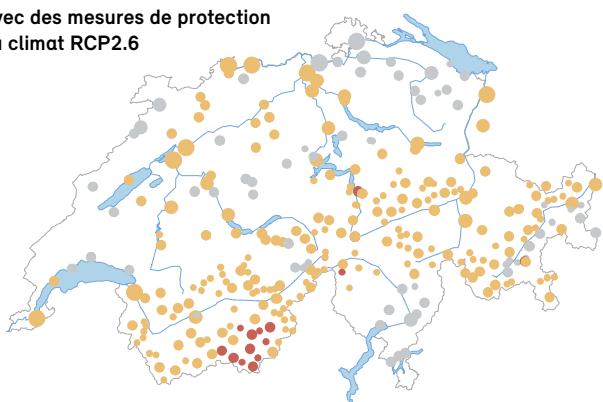
2060

**Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6**

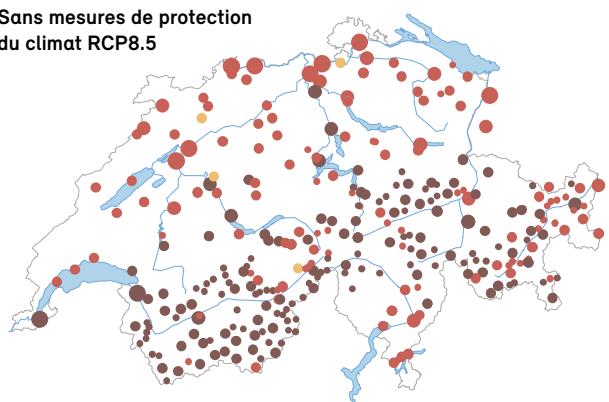
2060

**Sans mesures de protection
du climat RCP8.5**

2085

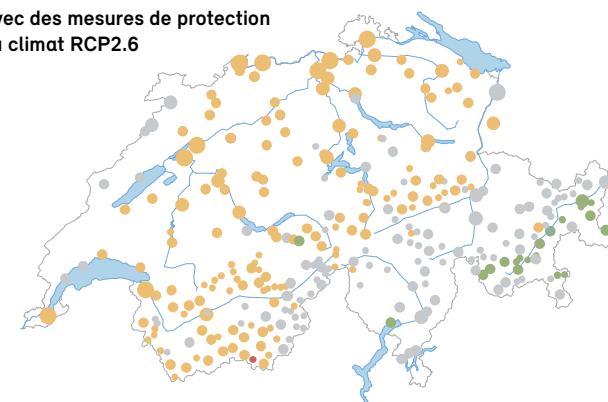
**Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6**

2085

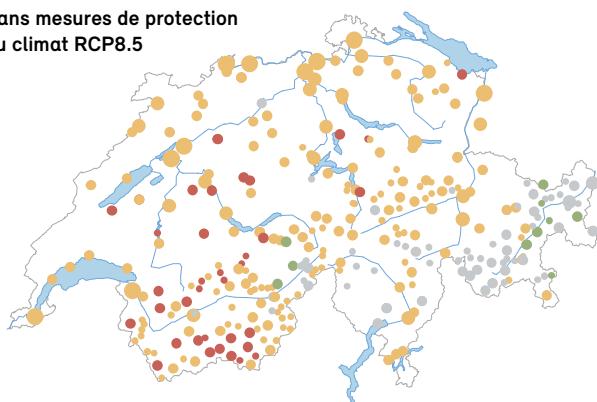
**Sans mesures de protection
du climat RCP8.5**

Automne

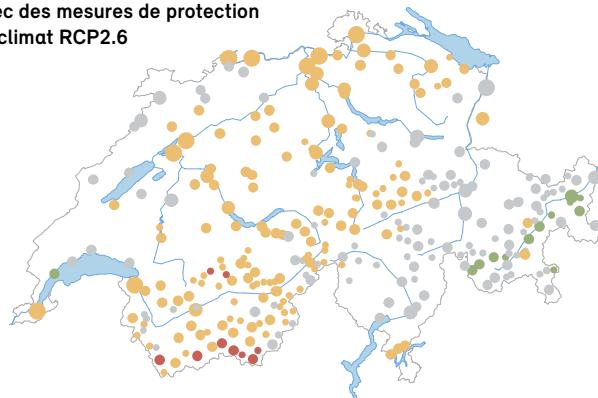
2060

**Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6**

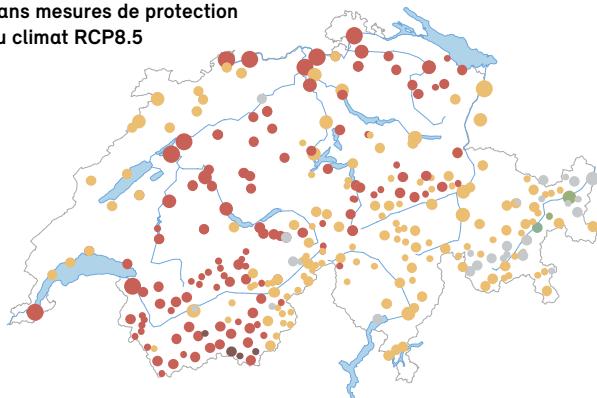
2060

**Sans mesures de protection
du climat RCP8.5**

2085

Avec des mesures de protection
du climat RCP2.6

2085

Sans mesures de protection
du climat RCP8.5

Source: données de Mülchi R. et al. 2020, Freudiger D. et al. 2020, Brunner M. et al. 2019c

Actualisation des scénarios hydrologiques d'après les nouveaux scénarios climatiques : quelle est l'évolution des débits dans différents scénarios climatiques ?

Démarche

Au total, 93 bassins versants (stations OFEV) ont été calibrés et validés avec le modèle PREVAH-UniBE. Ils couvrent divers régimes d'écoulement (pluvial, nival, glaciaire, subalpin) et surfaces (de 10 à 1700 km²). Pour chaque bassin versant, des séries journalières de débit ont été générées pour différents scénarios d'émissions (RCP2.6, 4.5, 8.5). Les débits quotidiens obtenus ont été analysés pour divers indicateurs à un niveau d'eau moyen, en situation de crue et en situation d'étiage. Comme les nouveaux scénarios climatiques sont disponibles en continu sur 120 ans, il est possible pour la première fois de déterminer le moment où surviennent les changements de débit significatifs.

Principaux résultats

- Le moment où surviennent les changements de débit significatifs a tendance à être plus précoce dans les bassins versants situés en altitude que dans les régions du Plateau.
- Les points 6.1, 6.2 et 6.4 du présent rapport reposent en grande partie sur les résultats de ce projet. D'autres résultats figurent dans l'atlas web du NCCS et dans l'HADES (atlashydrologique.ch).

Projet Hydro-CH2018 de l'Institut de géographie de l'Université de Berne

Autres informations et références sur le thème « Variations des débits »

- Freudiger D. et al. 2020: Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Weingartner R. 2018: Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht.

6.3 Lacs

Les lacs naturels et les retenues artificielles sont des réservoirs d'eau importants pour la gestion des eaux. Les apports d'eau évoluent sous l'effet des changements climatiques. L'impact sur les niveaux d'eau et sur les débits dépend de la régulation des lacs et du contrôle des réservoirs. Dans les régions alpines, de nouvelles eaux apparaissent dans les marges proglaciaires du fait du retrait des glaciers.

Avec un volume avoisinant 130 km^3 , les lacs naturels sont le second plus grand réservoir d'eau de la Suisse (derrière les eaux souterraines). De nombreux lacs sont régulés, ce qui signifie que leurs émissaires sont contrôlés au moyen d'un barrage et que leur niveau d'eau est commandé conformément au règlement de barrage. Dans bien des cas, les régulations ont été mises en place pour assurer une meilleure protection contre les crues, mais désormais elles tiennent aussi compte par exemple de l'écologie, de la production d'énergie hydroélectrique ou du tourisme (navigation touristique, accessibilité des rives). Seuls quelques grands lacs ne sont pas régulés, à savoir les lacs de Constance, de Walenstadt, de Greifen et de Baldegg. Leur niveau d'eau évolue selon les affluents avec un décalage dans le temps. Naturellement, ces variations sont la plupart du temps plus importantes dans les lacs non régulés que dans les lacs régulés. La quantité d'eau potentiellement utilisable peut être évaluée grossièrement d'après la différence entre les niveaux d'eau maximum et minimum selon le règlement. Concernant les lacs non régulés, cette estimation se fonde sur la différence moyenne entre les niveaux d'eau le plus haut et le plus bas de l'année. Le volume effectivement utilisable à un moment donné dépend du niveau d'eau alors atteint et peut être quasiment nul, par exemple pendant les périodes de sécheresse, lorsque le niveau d'eau dans le lac est faible. Par le passé (p.ex. en 2018), le niveau d'eau de certains lacs comme le lac de Zurich et le lac des Quatre-Cantons a même été abaissé sous le minimum prévu par le règlement afin de conserver un débit suffisant dans les cours d'eau en aval. Ainsi, les conséquences néfastes de la sécheresse sur l'écologie des eaux de la Limmat et de la Reuss ont pu être atténues.

En revanche, dans les lacs artificiels, presque tout le volume peut être utilisé (Brunner M. et al. 2019a). Ici, il s'agit essentiellement de réservoirs alpins créés grâce à la construction d'un barrage. Selon l'Office fédéral de l'énergie, leur volume de stockage utilisable avoisine $3,5 \text{ km}^3$. Le but principal de la plupart des réservoirs est la production d'électricité, mais il arrive aussi qu'ils servent à la protection contre les crues, à l'enneigement artificiel ou à l'alimentation en eau potable.

Variations observées des niveaux d'eau dans les lacs

Au cours des dernières décennies, des variations des niveaux d'eau ont pu être observées dans le lac de Constance et dans le lac de Walenstadt, les deux plus grands lacs non régulés de Suisse. Les niveaux d'eau moyens ont nettement baissé en été et légèrement augmenté en hiver (Figure 6-6). Ainsi, les niveaux d'eau dans les lacs évoluent selon les régimes d'écoulement des affluents qui sont modifiés par les changements climatiques (point 6.2).

Futurs niveaux d'eau dans les lacs

Les changements climatiques vont influer fortement sur les affluents des lacs et des réservoirs (point 6.1). Dans les lacs non régulés, cela se répercute directement sur les niveaux d'eau et se traduira notamment par des baisses en été et à l'automne. Dans les lacs régulés, une partie des conséquences peut être amortie, mais les règlements de barrage n'ont pas été édictés avec cet objectif. Aussi s'agit-il d'étudier comment la variation des affluents impactera les niveaux des lacs et s'il convient de modifier les prescriptions de régulation (Confédération suisse 2014), par exemple en maintenant au printemps les niveaux d'eau à des valeurs supérieures à celles définies jusqu'à présent afin qu'il y ait davantage d'eau disponible en été. On peut prévoir que la demande de prélèvements d'eau dans les lacs augmentera particulièrement en été et qu'elle est susceptible d'entrer en conflit avec la disponibilité réduite de l'eau. Dans les réservoirs artificiels se pose la question d'une utilisation permettant de pallier les périodes de manque d'eau. Le projet Hydro-CH2018 portant sur les réservoirs d'eau a étudié si et dans quelle mesure les lacs naturels et artificiels peuvent contribuer à maîtriser la future pénurie d'eau estivale.

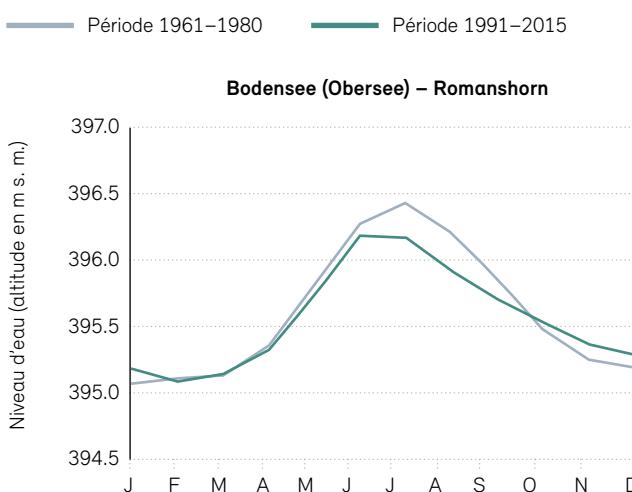
Émergence de nouvelles eaux dans les marges proglaciaires

Dans les Alpes, la fonte des glaciers fait apparaître de nouveaux lacs, ruisseaux et paysages alluviaux. Des chercheurs de l'Université de Zurich estiment que jusqu'à 500 lacs d'une surface de 50 km² pour un volume de 2 km³ pourraient ainsi émerger (Haeberli W. et al. 2012). Mais les

petits lacs se combleront relativement vite. Certains nouveaux lacs et anciennes vallées glaciaires pourraient être utilisés comme des réservoirs – si nécessaire en construisant des barrages – (Farinotti D. et al. 2016). Concernant ces nouveaux lacs et paysages de haute montagne, la société doit encore répondre à des questions fondamentales liées à la protection et à l'utilisation.

Figure 6-6 : Niveaux d'eau moyens dans les lacs non régulés de Constance et de Walenstadt

Sur la période de 1991 à 2015, les niveaux d'eau ont nettement baissé en été par rapport à la période de référence (1961-1980), tandis qu'ils ont légèrement augmenté en hiver.



Source: mesures de l'OFEV

Figure 6-7 : Retrait du glacier de Trift de 1984 à 2019

Le glacier de Trift illustre de manière impressionnante la fonte progressive des glaciers de ces dernières décennies: un nouveau lac s'est formé dans les marges proglaciaires. Les images montrent l'état du glacier en 1984, en 2011 et en 2019.



1984

2011

2019

Crédit photographique : Kraftwerke Oberhasli AG (à gauche et au centre : association de promotion culturelle de Gadmen, à droite : Françoise Funk-Salami)

Réservoirs d'eau : les lacs naturels et les réservoirs artificiels peuvent-ils contribuer à maîtriser la pénurie d'eau en été ?

Démarche

Des scénarios hydrologiques ont été élaborés pour toute la Suisse avec le modèle hydrologique PREVAH-WSL. Au total, huit chaînes de modèles climatiques avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et 18 chaînes de modèles climatiques sans mesures de protection du climat (RCP8.5) ont été utilisées. Sur la base de ces résultats, les variations du volume d'eau global disponible en Suisse peuvent être déterminées. Les futurs besoins en eau ont également été estimés d'après les scénarios hydrologiques.

Principaux résultats

- Presque tout le volume de stockage des réservoirs artificiels est effectivement utilisable, mais il est aujourd'hui généralement réservé à la production d'énergie hydroélectrique. Dans les lacs naturels, seule une faible part est utilisable durablement étant donné qu'il n'est pas possible d'aller en dessous d'un niveau d'eau minimum. Tous les lacs doivent aussi respecter les débits résiduels dans les eaux en aval.
- Il faut s'attendre à une pénurie d'eau en été principalement sur le Plateau, et seulement à certaines conditions dans les régions alpines. Les réservoirs artificiels se trouvent surtout dans les Alpes, bien loin des zones susceptibles de souffrir d'un manque d'eau. C'est la raison pour laquelle la contribution que les lacs de retenue alpins peuvent apporter à la réduction de la pénurie de l'eau en été sur le Plateau est plutôt faible. Des réservoirs locaux auraient un plus gros potentiel, mais le Plateau est confronté à un manque général de place.

Projet Hydro-CH2018 des unités de recherche Hydrologique de montagne et mouvements de masse et Sciences économiques et sociales du WSL et de l'Institut pour la construction et l'environnement de la Haute école technique de Rapperswil (HSR)

Autres informations et références sur le thème

« Réservoirs d'eau »

- Brunner M. et al. 2019a: Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Brunner M. et al. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes.

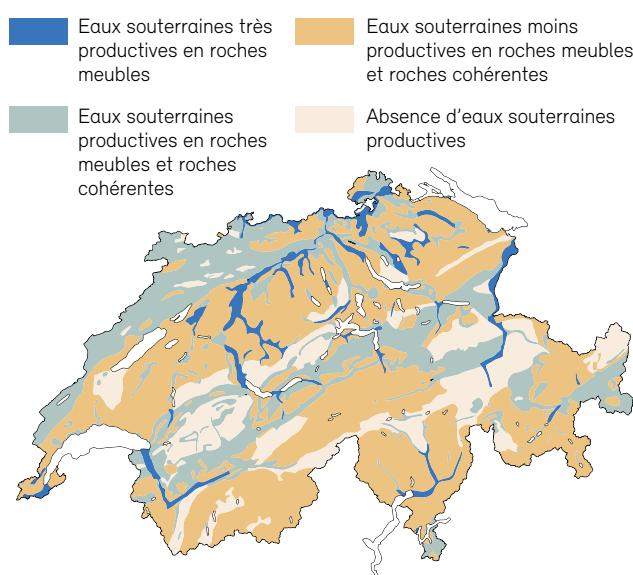
6.4 Eaux souterraines

La Suisse possède des eaux souterraines certes en très grandes quantités, mais inégalement réparties sur son territoire. C'est pourquoi, en cas de sécheresse, des déficits temporaires d'eaux souterraines se multiplient aujourd'hui déjà au niveau local. Cette tendance va s'accentuer sous l'effet des changements climatiques. Le renouvellement des eaux souterraines sera accru en hiver et au printemps et réduit en été et à l'automne.

Les eaux souterraines constituent le principal réservoir d'eau de la Suisse. Il convient de distinguer les eaux souterraines en roches meubles, dans les fissures de roches cohérentes et dans le karst. Le volume total des eaux souterraines est estimé à 150 km³, mais elles n'ont pas toutes la même productivité (Figure 6-8) : environ 120 km³ dans les aquifères karstiques, 20 km³ dans les fissures de roches cohérentes et 10 km³ dans les aquifères en roches meubles. Chaque année, la Suisse compte quelque 18 km³ d'eau utilisable durablement, une grande partie provenant des aquifères en roches meubles très productifs des vallées fluviales (Sinreich M. et al. 2012).

Figure 6-8: Productivité des eaux souterraines en Suisse

Les eaux souterraines très productives se situent avant tout dans les aquifères en roches meubles des vallées fluviales.



Source: Sinreich M. et al. 2012

Est considérée comme utilisable durablement la quantité d'eaux souterraines pouvant être prélevée en moyenne dans une année normale sans provoquer un abaissement durable du niveau des eaux souterraines ou avoir d'autres impacts négatifs sur l'environnement. En situation d'étiage notamment, le débit des petits et moyens cours d'eau provient principalement des eaux souterraines. Même les écosystèmes humides sensibles ont besoin d'un niveau d'eaux souterraines suffisamment élevé (point 7.3.4). C'est la raison pour laquelle, durant les années de sécheresse, l'utilisation durable des eaux souterraines est nettement limitée. Mais en pratique, la quantité effectivement utilisable est souvent encore plus faible, d'une part en raison des conflits d'utilisation et des atteintes portées à la qualité de l'eau, et d'autre part, du fait que la répartition spatiale des ressources en eaux souterraines soit très hétérogène et qu'elles ne se trouvent pas toujours là où elles sont requises.

Variation observée des volumes d'eaux souterraines

Les changements de niveau des eaux souterraines ne concernent en général qu'une faible part du volume global des eaux souterraines suisses. Ainsi, des fluctuations naturelles centimétriques à métriques sont observées dans les eaux souterraines en roches meubles dont la taille totale atteint souvent quelques décamètres. Il n'en va pas de même pour les aquifères karstiques : de fortes variations de débit à la source ou le tarissement complet indiquent que le niveau de remplissage oscille grandement durant l'année. En fonction du temps de séjour de l'eau dans les eaux souterraines, c'est-à-dire du temps qu'une eau souterraine met pour réagir à la sécheresse ou aux périodes pluvieuses, cela peut avoir des conséquences sur le niveau des eaux souterraines et sur les débits des sources pendant des mois, voire l'année suivante. La réaction est particulièrement rapide dans les petites eaux souterraines proches de la surface qui connaissent souvent des problèmes localisés de pénurie d'eau en périodes de sécheresse.

L'Observation nationale des eaux souterraines (NAQUA) montre que, sur l'ensemble du territoire suisse, les ressources en eaux souterraines sont renouvelées régulièrement et complètement. Même s'il y a sans cesse des épisodes avec des niveaux d'eaux souterraines plutôt élevés ou faibles pendant plusieurs années, aucune

tendance générale n'est apparente sur l'ensemble de la période de mesure qui s'étend sur une vingtaine d'années actuellement. Du point de vue quantitatif, au moins dans le bilan pluriannuel, on peut s'attendre à un état globalement stable de la ressource eaux souterraines en Suisse (OFEV 2019b).

Le renouvellement des eaux souterraines, un processus clé

Le renouvellement des eaux souterraines est un processus clé pour comprendre les effets des changements climatiques sur leur quantité et leur température. Il convient de faire la distinction entre les eaux souterraines dont le renouvellement par infiltration des précipitations est diffus et les eaux souterraines dans lesquelles s'infiltraient, de manière concentrée, les eaux superficielles. Normalement, la quantité d'eaux souterraines renouvelée n'est pas directement mesurée, mais évaluée d'après les précipi-

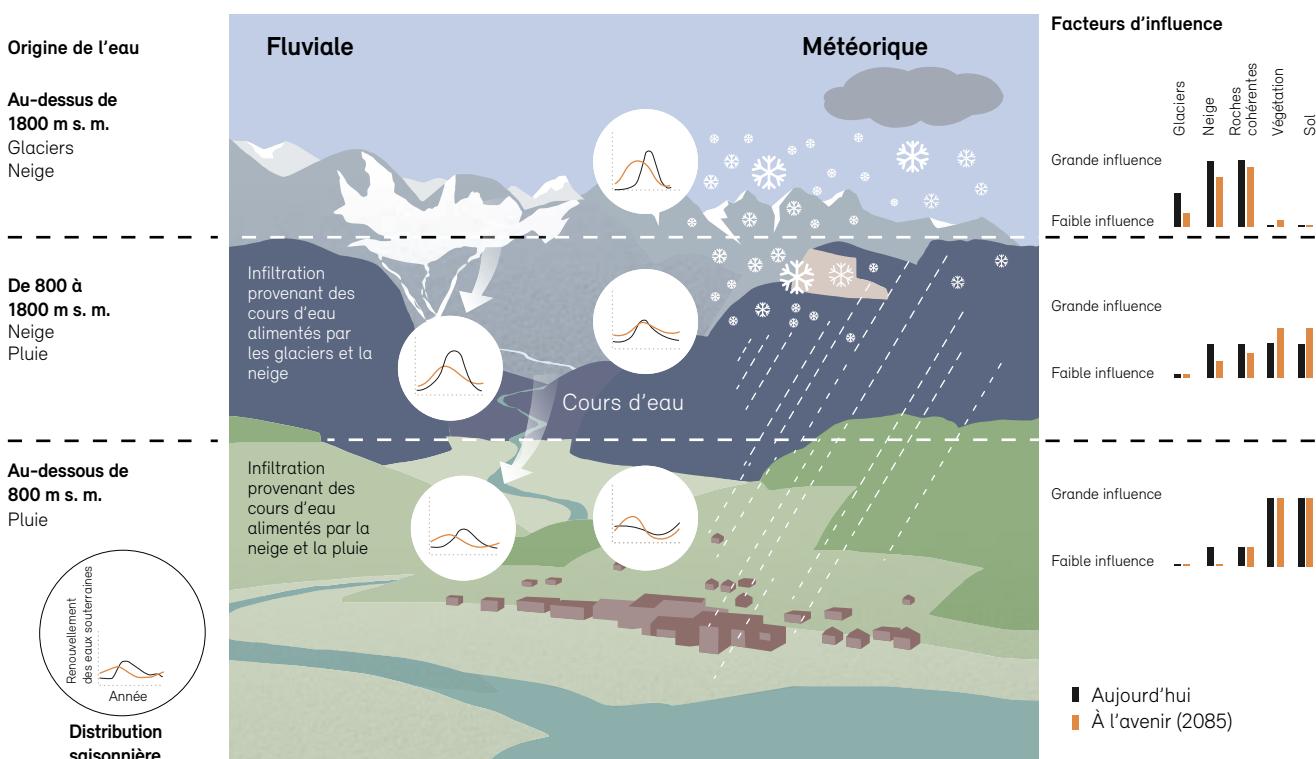
tations, l'évapotranspiration et le débit. Elle varie considérablement dans l'espace et dans le temps et correspond, en moyenne sur toute la Suisse, à environ un tiers des précipitations annuelles.

Renouvellement accru des eaux souterraines à partir des précipitations hivernales et printanières

Dans les zones où le renouvellement est assuré par les précipitations, les eaux souterraines sont principalement alimentées par l'infiltration de la pluie et de l'eau de fonte. En général, les sols et couches géologiques perméables facilitent l'infiltration de l'eau. Néanmoins, toute l'eau infiltrée ne se retrouve pas dans les eaux souterraines : elle couvre les besoins en eau de la végétation, s'évapore de nouveau ou rejoint les eaux superficielles. C'est la raison pour laquelle le renouvellement des eaux souterraines varie en fonction de la saison et l'altitude (Figure 6-9).

Figure 6-9 : Renouvellement des eaux souterraines et facteurs d'influence des changements climatiques

La quantité d'eaux souterraines renouvelée à partir de l'eau fluviale ou météorique dépend des propriétés du bassin versant, de la saison et de l'altitude. Dans le sillage des changements climatiques, le renouvellement des eaux souterraines à toutes les altitudes augmentera en hiver et au début du printemps et diminuera en été et à l'automne.



À cause de la hausse attendue des précipitations hivernales, de l'augmentation de la part de pluie et de la fonte des neiges plus précoce, le renouvellement des eaux souterraines sera accru à toutes les altitudes en hiver et au début du printemps. Dans les régions situées en altitude, cela est accentué par le fait que les sols seront moins longtemps gelés ou recouverts de neige durant le semestre hivernal. Sur trois sites du Plateau, l'évolution du renouvellement à partir des précipitations a été calculée (Figure 6-10). Dans un scénario sans mesures de protection du climat, il augmente légèrement en hiver et au printemps jusqu'à la fin du siècle.

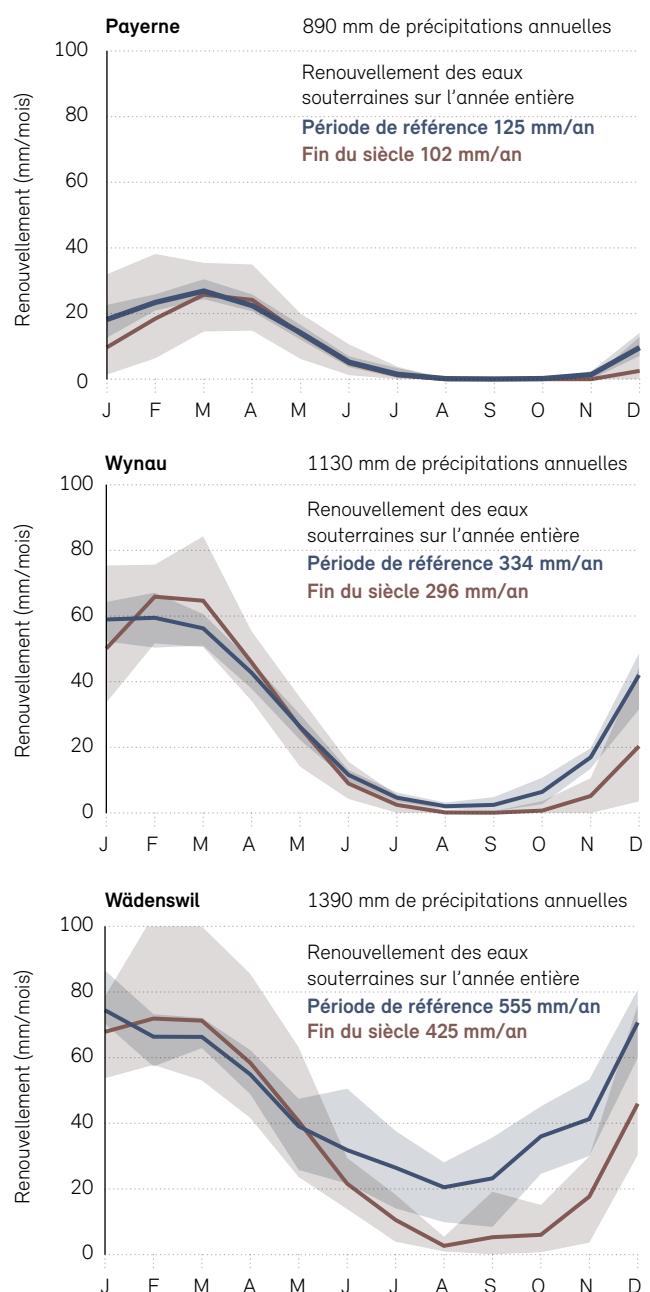
Diminution du renouvellement des eaux souterraines en été et à l'automne

Dans les contrées peu arrosées (p.ex. site de Payerne), les eaux souterraines ne se renouvellent guère en été. Dans les régions plus humides (p.ex. sites de Wynau et de Wädenswil), le renouvellement des eaux souterraines diminuera en été, sous l'effet combiné des précipitations plus faibles et des températures plus élevées, facteur d'accroissement de l'évapotranspiration (Figure 6-10). Dans des zones du Plateau, la reconstitution des réservoirs d'eaux souterraines débutera plus tard dans l'année étant donné que l'eau doit combler le déficit estival d'humidité du sol avant de rejoindre les eaux souterraines par infiltration. En outre, l'évapotranspiration augmente du fait de l'allongement de la période de végétation et de l'élévation des températures. À l'inverse, dans les régions alpines, le renouvellement des eaux souterraines peut durer plus longtemps en automne puisque l'enneigement intervient plus tard dans l'année.

De la même manière, le renouvellement des eaux souterraines par infiltration des eaux superficielles diminuera fortement en été. Typiquement, ce phénomène se produit en Suisse le long des vallées fluviales dotées d'une épaisse couche de graviers (p.ex. grandes vallées du Plateau, vallée du Rhône, vallée du Haut-Rhin). Il dépend alors non seulement des conditions climatiques locales, mais aussi du débit des eaux superficielles. Dans le cas d'une rivière alpine, il a lieu au printemps ou en été lorsque le débit est maximal. Ainsi, le renouvellement des eaux souterraines par infiltration se décale dans le temps du fait des changements, liés au climat, du régime des eaux superficielles qui alimentent les aquifères.

Figure 6-10 : Évolution du renouvellement des eaux souterraines à partir des précipitations

Évolution du renouvellement des eaux souterraines à partir des précipitations en % (médiane et marge d'incertitude) sur trois sites du Plateau dont les sols présentent des coefficients de perméabilité moyens. Les graphiques montrent le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5) dans un avenir lointain par rapport à la période de référence (1981-2010). Le renouvellement des eaux souterraines augmentera en hiver et diminuera en été, mais le bilan annuel sera négatif.



Source: Hunkeler D. et al. 2020

Comment les ressources en eaux souterraines évoluent-elles dans les bassins versants alpins avec les changements climatiques et quelles influences ont-elles sur la formation des débits ?

Démarche

La relation entre la dynamique des eaux souterraines et la dynamique des débits a été étudiée dans onze bassins versants alpins. Les mesures et les informations géologiques ont été intégrées aux modèles à base physique. Grâce à ces simulations, l'influence des changements climatiques sur les réservoirs d'eaux souterraines et sur la réaction des bassins versants peut être quantifiée.

Principaux résultats

- Dans les Alpes, les réservoirs d'eaux souterraines en roches meubles et ceux en roches cohérentes réagissent différemment aux changements climatiques. Dans les roches meubles, c'est surtout la dynamique saisonnière qui change, tandis que, considérée sur toute l'année, la quantité demeure inchangée. Contrairement aux sites du Plateau, la dynamique saisonnière des eaux souterraines diminue dans les roches meubles alpines.
- Dans les roches cohérentes alpines, des tendances baissières à long terme peuvent également apparaître dans la quantité d'eaux souterraines stockée.
- Malgré la fonte des neiges précoce et l'évapotranspiration accrue en été, la quantité d'eaux souterraines stockée et l'écoulement dans les régions alpines restent bien plus élevés en été qu'en hiver. Les vastes terrains sédimentaires meubles ont pour effet de réguler le débit car ils sont à même de stocker puis de libérer d'importantes quantités d'eaux souterraines de manière saisonnière.

Projet Hydro-CH2018 du Centre d'hydrogéologie et de géothermie de l'Université de Neuchâtel

Bilan annuel négatif sans mesures de protection du climat

Sur l'ensemble de l'année, la quantité d'eaux souterraines renouvelée est réduite sur les trois sites étudiés (Figure 6-10) puisque la perte automnale (et estivale dans les zones plus humides) n'est pas complètement compensée en hiver. Sur les sites aujourd'hui très arrosés, la baisse est supérieure car, là aussi, le renouvellement diminue en été. Elle est également plus importante sur les sites présentant des sols peu perméables car ceux-ci peuvent moins bien absorber les volumes supplémentaires en hiver et au printemps, raison pour laquelle davantage d'eau de pluie s'écoule en surface. Tant que, sur plusieurs années, le renouvellement des eaux souterraines suffit à remplir les réservoirs d'eaux souterraines, leur volume total ne variera guère même avec les changements climatiques. Toutefois, les modifications du renouvellement des eaux souterraines se répercutent sur la distribution saisonnière des niveaux d'eaux souterraines et, partant, sur le volume d'eaux souterraines utilisables durablement.

Autres informations et références sur le thème « Eaux souterraines »

- Epting J. et al. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht.
- Hunkeler D. et al. 2020: Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Arnoux M. et al. 2020a: Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants alpins face aux changements climatiques. Rapport Hydro-CH2018.

6.5 Crues

Les scénarios hydrologiques ne permettent pas encore d'établir des prévisions quantitatives fiables sur l'évolution de la fréquence des crues et de leurs débits. Néanmoins, divers processus liés au climat indiquent que les crues et le ruissellement s'intensifieront au fur et à mesure que les changements climatiques se feront sentir.

Lors d'une crue, le niveau d'eau d'un cours d'eau dépasse nettement sa moyenne pluriannuelle. On classe les débits de crue HQx en fonction de la probabilité selon laquelle ils se reproduiront ou seront dépassés dans x années. Les paramètres HQ30, HQ100 et HQ300 sont utilisés pour dimensionner des mesures de protection contre les crues et pour définir des données de base sur les dangers.

Les fortes précipitations de grande ampleur qui durent des heures ou des jours, parfois combinées à la fonte des neiges, peuvent provoquer des crues qui s'étendent sur des surfaces importantes. De grands bassins versants ou des régions entières sont alors touchés, ce qui entraîne également une élévation des niveaux d'eau dans les lacs et les eaux souterraines. Les fortes précipitations localisées, surtout en été, qui ne durent que quelques minutes ou quelques heures, causent des crues locales dans de petits cours d'eau et des torrents ou un ruissellement hors du lit des cours d'eau.

Évolution de la fréquence des crues

Il est en partie possible de déduire à partir des analyses sédimentaires et des relevés historiques les crues d'ampleur qui se sont produites par le passé. De telles reconstructions montrent qu'au cours des 10 000 dernières années, la Suisse a toujours vu s'alterner des phases riches en crues et des périodes pauvres en crues (Ruiz-Villanueva V., Molnar P. 2020). Durant les 500 dernières années, ces fluctuations se sont typiquement répétées à des intervalles de 30 à 100 ans (Schmocke-Fackel P., Naef F. 2010) et ont été provoquées par des modifications de la circulation atmosphérique à grande échelle en Europe centrale (Stucki P. et al. 2012). Cela signifie que les paramètres de crue ne sont pas constants dans le temps et qu'ils varient avec le climat. Cela constitue un défi s'agissant de protection contre les crues.

Il y a eu une période avec de très nombreuses crues d'ampleur dans toute la Suisse après la fin du petit âge glaciaire dans la seconde moitié du XIX^e siècle. Elle a été le déclencheur de multiples projets de protection contre les crues et de corrections de cours d'eau. En revanche, la Suisse a connu exceptionnellement peu de crues d'ampleur entre 1940 et 1970 («absence d'événements»). Au cours des dernières décennies, on a pu observer une nouvelle augmentation du nombre de crues d'ampleur, ce qui a entraîné des adaptations en matière de protection contre les crues et l'introduction de la gestion intégrée des risques (point 7.2).

Figure 6-11 : Crue et ruissellement

L'image de gauche montre la crue de la Lütschine le 25 août 2005 à Lütschental, tandis que celle de droite présente un épisode de ruissellement localisé dans le canton de Schaffhouse en mai 2013.



La multiplication récente des crues a été constatée dans de nombreuses autres régions d'Europe. Sur ce continent, les 30 dernières années ont ainsi été les plus riches en crues depuis 500 ans. Cela est d'autant plus remarquable que les précédentes périodes riches en crues y avaient plutôt été observées durant les phases climatiques froides, alors que les trois décennies écoulées ont été plus chaudes que la moyenne. Du point de vue climatique, la période riche en crues que nous vivons actuellement est donc unique (Blöschl G. et al. 2020).

Évolution des facteurs ayant une influence sur les crues

La survenance d'une crue et ses débits de pointe dépendent d'une combinaison de nombreux facteurs d'influence. Certes les fortes précipitations déclenchent la crue, mais dans un cas, ces précipitations pourront provoquer une crue importante tandis que, dans un autre, le débit sera nettement plus faible par exemple en raison d'un isotherme zéro degré plus bas ou d'un sol auparavant moins humide. Les changements climatiques modifient non seulement les fortes précipitations, mais aussi d'autres facteurs exerçant une influence sur les crues (Figure 6-12).

Plus d'énergie et d'humidité dans l'atmosphère

Avec la progression des changements climatiques, le potentiel de précipitations s'accroît. En effet, l'air peut absorber 6 à 7 % d'eau en plus par degré Celsius de réchauffement. En outre, les modèles climatiques globaux montrent que, sans mesures de protection du climat, davantage d'humidité atmosphérique sera transportée vers les Alpes et que le potentiel de précipitations et de crues plus intenses sera par conséquent accru (Brönnimann S. et al. 2018). Les répercussions de cet impact climatique sur les crues ont été étudiées dans le cadre d'une expérience théorique (Wernli H. et al. 2016). À l'aide d'un modèle météorologique et d'un modèle hydrologique, diverses crues survenues par le passé ont été recalculées avec des conditions initiales modifiées. Ainsi, une humidité jusqu'à 10 % supérieure et une température allant jusqu'à 3 °C de plus au-dessus de l'Atlantique ont été supposées. Les expériences montrent que les débits de crue peuvent augmenter dans la même proportion que l'humidité de l'air.

De manière générale, les changements climatiques accroissent donc la pluviosité potentielle, ce qui peut avoir des conséquences tant sur les brefs épisodes de fortes précipitations que sur les précipitations persistantes. D'un point de vue physique, on tablerait au moins sur des crues locales et des ruissellements plus fréquents et plus intenses. On s'attendrait également à une augmentation des débits en cas de crues d'ampleur. Néanmoins, les scénarios hydrologiques ne sont pas en mesure de représenter ces changements dans le détail : sans mesures de protection du climat, ils montrent une légère hausse de la fréquence et de l'intensité des crues d'ici la fin du siècle, mais elle n'est pas significative (Mülchi R. et al. 2020). Une grande incertitude demeure notamment quant à la fréquence plus élevée des rares crues d'ampleur.

Incertitudes autour de la circulation atmosphérique

Le fait que le signal ne ressorte pas clairement des scénarios hydrologiques peut aussi avoir des explications d'ordre méthodologique. Premièrement, il se peut que les scénarios climatiques CH2018 sous-estiment les précipitations extrêmes d'ampleur qui déclenchent des crues ou leur variabilité naturelle. De même, les modifications de la circulation atmosphérique observées par le passé et les précipitations extrêmes d'ampleur qui en découlent n'ont pu être représentées que partiellement à l'aide des modèles climatiques (Brönnimann S. et al. 2019).

Deuxièmement, des méthodes statistiques doivent être appliquées pour la modélisation hydrologique afin d'améliorer la résolution spatiotemporelle des données relatives aux précipitations. Les modèles climatiques régionaux donnent des résultats dans une résolution spatiale de 12 × 12 km ou de 50 × 50 km, et en général uniquement dans une résolution temporelle quotidienne. Ces résolutions sont insuffisantes pour bien représenter avec des modèles hydrologiques les crues dans les petits bassins versants des montagnes suisses. C'est la raison pour laquelle les résultats des modèles climatiques sont ensuite affinés à l'aide de méthodes statistiques (point 2). On ne peut exclure que celles-ci atténuent les précipitations extrêmes.

Figure 6-12 : Facteurs ayant une influence sur les crues et leur évolution avec les changements climatiques

Conséquence spatiale sur les crues Hausse attendue Baisse attendue Hausse ou baisse possible Aucune modification



Impact climatique – Plus d'énergie et d'humidité dans l'atmosphère

- Accroissement du potentiel de précipitations, mais réaction différente en fonction des caractéristiques des zones concernées.
- Augmentation de la fréquence et de l'intensité des fortes précipitations et des crues locales qu'elles provoquent.

Impact climatique – Modifications de la circulation atmosphérique

- Variabilité atmosphérique élevée à l'avenir également.
- Actuellement, les modèles climatiques ne peuvent évaluer les conséquences sur les précipitations extrêmes qu'à certaines conditions.
- La circulation atmosphérique a notamment des effets sur les fortes précipitations d'ampleur et de longue durée et donc sur les crues d'ampleur.

Impact climatique – Élévation de l'isotherme zéro degré

- Davantage de précipitations sous forme pluvieuse qui alimentent directement les cours d'eau.
- De vastes bassins versants arrosés par la pluie, en particulier dans les Alpes.
- La saison des crues se prolonge, d'où une multiplication possible des épisodes pluvieux susceptibles de provoquer des crues.



Impact climatique – Diminution du manteau neigeux, fonte des neiges

- L'influence de la fonte des neiges dans le Jura et les Préalpes diminue.
- Sur le Plateau, le manteau neigeux n'a d'ore et déjà guère d'influence sur les crues.
- Influence éventuellement supérieure de la neige sur les crues dans les régions alpines (<< événements de pluie sur neige >>).

Impact climatique – Modification de l'humidité du sol

- La diminution de l'humidité moyenne du sol sur le Plateau peut à court terme augmenter la capacité de rétention des eaux en cas de précipitations. Mais l'effet est faible si celles-ci durent longtemps.
- Lorsque les sols sont desséchés, en particulier s'ils sont compactés, des effets hydrofuges peuvent apparaître, ce qui fait qu'une quantité d'eau moins importante peut s'infiltrer en cas de fortes précipitations en périodes de sécheresse. → Baisse de la capacité de rétention des eaux et augmentation du risque de ruissellement.

Impact climatique – Disponibilité accrue des sédiments

- Accroissement du potentiel de dommages causés par davantage de matériaux charriés mobilisables dans les Alpes.
- Changement du transport des matériaux solides en raison des débits modifiés.

Changements concernant la neige et l'humidité du sol

Du fait de l'élévation de la limite pluie/neige et de l'isotherme zéro degré dans les Alpes, les précipitations tombent plus souvent sous forme pluvieuse que neigeuse jusqu'à une haute altitude. Cela prolonge la saison des crues au printemps et à l'automne. Dans le Jura, les crues se produisent actuellement surtout en hiver, lorsque les fortes précipitations coïncident avec la fonte des neiges dans l'ensemble du bassin versant (« événements de pluie sur neige »). Avec les changements climatiques, cela sera moins fréquent car le manteau neigeux y sera nettement moins épais et persistant. De tels événements seront plus rares dans les Préalpes également. En octobre 2011, un événement de pluie sur neige a provoqué une crue importante dans la vallée de la Kander et dans celle de Lötschen. Ce phénomène n'avait encore jamais été observé sous cette forme (Badoux A. et al. 2013). On ne sait cependant pas encore si ce type d'événement sera plus fréquent dans les Alpes en raison des changements climatiques. Les modifications attendues du manteau neigeux peuvent aussi bien favoriser que freiner les crues selon la région et la saison considérées. Il en va de même pour l'humidité du sol. D'une part, les sols peu humides peuvent absorber et stocker plus de précipitations et ainsi réduire les débits de crue. D'autre part, les sols très secs peuvent aussi développer des propriétés hydrofuges de sorte que les précipitations ne peuvent pas s'infiltrer et que les eaux ruissellent en surface. Ce phénomène concerne notamment les terres agricoles peu recouvertes par la végétation et fortement compactées, et peut entraîner une érosion du sol.

Disponibilité accrue des sédiments

En raison du dégel du pergélisol et du retrait des glaciers, il y aura en montagne de plus en plus de sédiments mobilisables en cas de fortes précipitations. C'est surtout dans les torrents raides que les sédiments sont transportés durant les crues, et que d'autres matériaux sortant du lit peuvent être érodés. Lors d'une crue, une lave torrentielle peut ainsi se former dans un torrent, entraînant les sédiments érodés. Dans les tronçons de rivière et de ruisseau moins abrupts en aval des torrents, l'eau s'écoule moins vite et les sédiments se redéposent. Ce dépôt réduit la capacité d'écoulement du lit, ce qui peut causer des inondations, des épandages d'alluvions et donc de gros dégâts (Speerli J. et al. 2020).

Réaction aux fortes précipitations différente selon les régions

Selon les régions, l'augmentation des fortes précipitations attendue avec les changements climatiques aura un impact plus ou moins important sur le débit. En effet, les sols, les roches cohérentes, la végétation, la topographie et la surface d'habitat exercent une influence sur la part des précipitations qui peut être retenue dans un bassin versant et sur celle qui gonfle le débit de crue. Si la capacité d'absorption du bassin versant est grande, le débit augmente dans des proportions inférieures aux précipitations. En revanche, si la capacité d'absorption est éprouvée, l'ensemble des précipitations peuvent s'écouler et le débit augmente de manière disproportionnée. L'association complexe de nombreux facteurs d'influence, parfois contraires, complique l'élaboration de prévisions quantitatives fiables concernant la survenance future de crues d'ampleur.

Autres informations et références sur le thème « Crues »

- Burlando P. et al. 2020 : Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020 : Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Ruiz-Villanueva V., Molnar P. 2020 : Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020 : Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.6 Étiage

Sur le Plateau, dans le Jura et au sud des Alpes, les eaux superficielles connaîtront à l'avenir des situations d'étiage plus fréquentes et plus intenses en été et à l'automne, qui s'accompagneront de conséquences négatives pour l'écologie des eaux et l'utilisation de l'eau. En revanche, dans les Alpes, les débits augmenteront en hiver pendant l'actuelle saison des étiages.

On entend par étiage des débits exceptionnellement faibles des eaux superficielles. En général, les situations d'étiage sont caractérisées par les paramètres Q_{347} et NM7Q. Q_{347} est le débit d'un cours d'eau au moins atteint ou dépassé 95 % du temps, c.-à-d. pendant 347 jours d'une année moyenne (calcul sur dix ans). Le débit Q_{347} est défini comme le débit résiduel minimal dans la loi fédérale sur la protection des eaux (art. 31, al. 1, L'Eaux). Il joue un rôle central en tant qu'indicateur d'étiage. Le second indicateur est NM7Q, à savoir le plus faible débit moyen sur sept jours consécutifs durant une période considérée. Fiable, il est peu sensible aux erreurs de mesure et aux influences à court terme.

Augmentation des débits d'étiage dans les Alpes

Dans les bassins versants alpins situés en altitude, les étiages sont causés par des périodes froides lorsque toutes les précipitations tombent sous forme de neige et ne peuvent pas s'écouler directement. Normalement, les étiages annuels les plus sévères apparaissent entre janvier et mars. Dans la majorité des bassins versants glaciaires et nivaux, les débits (et donc l'indicateur NM7Q) étaient en nette hausse entre 1961 et 2018. Les débits minimaux Q_{347} se sont accrus eux aussi (Figure 6-13). Dans l'ensemble, les débits dans les Alpes pendant la saison typique des étiages, en hiver, ont donc augmenté, essentiellement parce que les précipitations hivernales tombent davantage sous forme pluvieuse que neigeuse du fait des changements climatiques.

Les étiages hivernaux prononcés sont eux aussi devenus plus rares sur le Rhin depuis le XIX^e siècle (Pfister C. et al. 2006). Cela n'est pas uniquement imputable aux changements climatiques. Les réservoirs des centrales hydroélectriques et la régulation des lacs naturels jouent également un rôle primordial. Une partie du débit estival est stockée dans les réservoirs alpins avant d'être utilisée en hiver pour produire de l'électricité. Cela entraîne une nette augmentation du débit durant la période hivernale.

Figure 6-13 : Évolution observée des débits d'étiage depuis 1961

Pour divers régimes d'écoulement, des calculs de tendance ont été effectués pour les valeurs d'étiage NM7Q (saisonniers et annuelles) et Q_{347} (annuelles uniquement) sur la période de 1961 à 2018. Une hausse de ces indicateurs correspond à une augmentation des débits d'étiage, et une baisse de ces indicateurs, à une réduction des débits d'étiage. Dans presque tous les bassins versants, les débits d'étiage sont en net recul en été. On observe des hausses hivernale et printanière dans les régions de haute altitude. Dans les zones présentant des situations d'étiage en hiver, les valeurs annuelles de Q_{347} et de NM7Q ont déjà augmenté.

Régime	NM7Q					Q_{347} Année
	Hiver (DJF)	Printemps (MAM)	Été (JJA)	Automne (SON)	Année	
Glaciaire et glacio-nival	↑ [] ↑	↑	↑	→	↑	↑
Nivo-glaciaire	↑ [] →	↓	↑	↑	↑	↑
Nival	→ [] ↑	↓	→	→	→	↑
Préalpin-nival	[] →	↑	↓	[] ↑	→	→
Pluvial	→	→	↓	→	→	→
Jurassique	→	↓	↓	[] →	→	→
Subalpin	↑ [] →	↓	→	→	→	↑

↑ Housse nette ou significative

↓ Baisse nette ou significative

→ Aucun changement

[] Date moyenne d'apparition du NM7Q et écart-type de cette date moyenne d'apparition

Débits d'étiage déjà plus faibles en été

Dans les régions non alpines, les étiages sont provoqués par un manque de précipitations, souvent associé à une forte évapotranspiration. La période typique des étiages se situe entre la fin de l'été et la fin de l'automne, sachant que la variabilité d'une année sur l'autre est considérable. Ainsi, il peut y avoir des jours avec des débits inférieurs à Q_{347} à tous les mois de l'année sauf de mars à mai. Sur la période allant de 1961 à 2018, aucun changement significatif concernant Q_{347} et les valeurs annuelles de NM7Q n'est identifiable dans la majorité des bassins versants non alpins.

Il en va autrement lorsque l'on considère les débits estivaux les plus faibles (NM7Q). Ils ont nettement diminué dans la plupart des bassins versants nord-alpins étudiés, même dans les bassins versants peu ou pas englacés des Alpes (Figure 6-13). La fonte des neiges toujours plus précoce, l'accroissement de l'évapotranspiration et le manque de précipitations peuvent constituer ici les processus décisifs.

En raison de séries de mesures trop courtes, aucune analyse de tendance ne peut être effectuée pour les situations d'étiage très rares et extrêmes qui se produisent statistiquement tous les 50 ou 100 ans. Les analyses historiques montrent cependant que, par le passé, des périodes estivales exceptionnellement sèches et chaudes ont été récurrentes en Suisse et en Europe centrale, par exemple dans les années 1940 et 1960 (Kohn I. et al. 2019). Au cours des 20 dernières années, on a recensé un nombre extraordinaire d'ététs chauds et secs établissant de nouveaux records concernant les débits d'étiage et la température (comme en 2003, 2015 et 2018). La tendance à des étés caniculaires est clairement établie (Rapport technique CH2018), de sorte que cette multiplication des situations d'étiage extrêmes ne s'explique très probablement pas uniquement par la variabilité naturelle.

Jusqu'à présent, aucune tendance à long terme ne se dessine concernant les faibles niveaux des eaux souterraines et débits des sources. Néanmoins, durant les années 2003, 2011 et 2018, les niveaux des eaux souterraines étaient particulièrement bas et de nombreuses petites sources se sont asséchées, par exemple dans le Jura, dans la région des collines et dans les Préalpes

(indicateur de l'OFEV «Niveaux des eaux souterraines et débits des sources»²).

Poursuite de la tendance à des étiages plus prononcés en été

Les scénarios climatiques CH2018 montrent que les cumuls moyens de précipitations baisseront durant les mois d'été et que les périodes de sécheresse auront tendance à être plus longues (point 4.2). Conséquence de l'élévation des températures, l'évapotranspiration s'accroît également tant qu'il y a suffisamment d'eau dans le sol et la végétation. Les scénarios hydrologiques d'étiage laissent supposer une baisse du débit d'étiage en été et à l'automne sur le Plateau, dans le Jura et en Suisse méridionale. Étant donné que c'est généralement à cette période qu'apparaissent les débits d'étiage les plus faibles d'une année, ces changements se reflètent aussi dans le NM7Q annuel et dans le Q_{347} (Figure 6-14 et Figure 6-15, exemple de Thur).

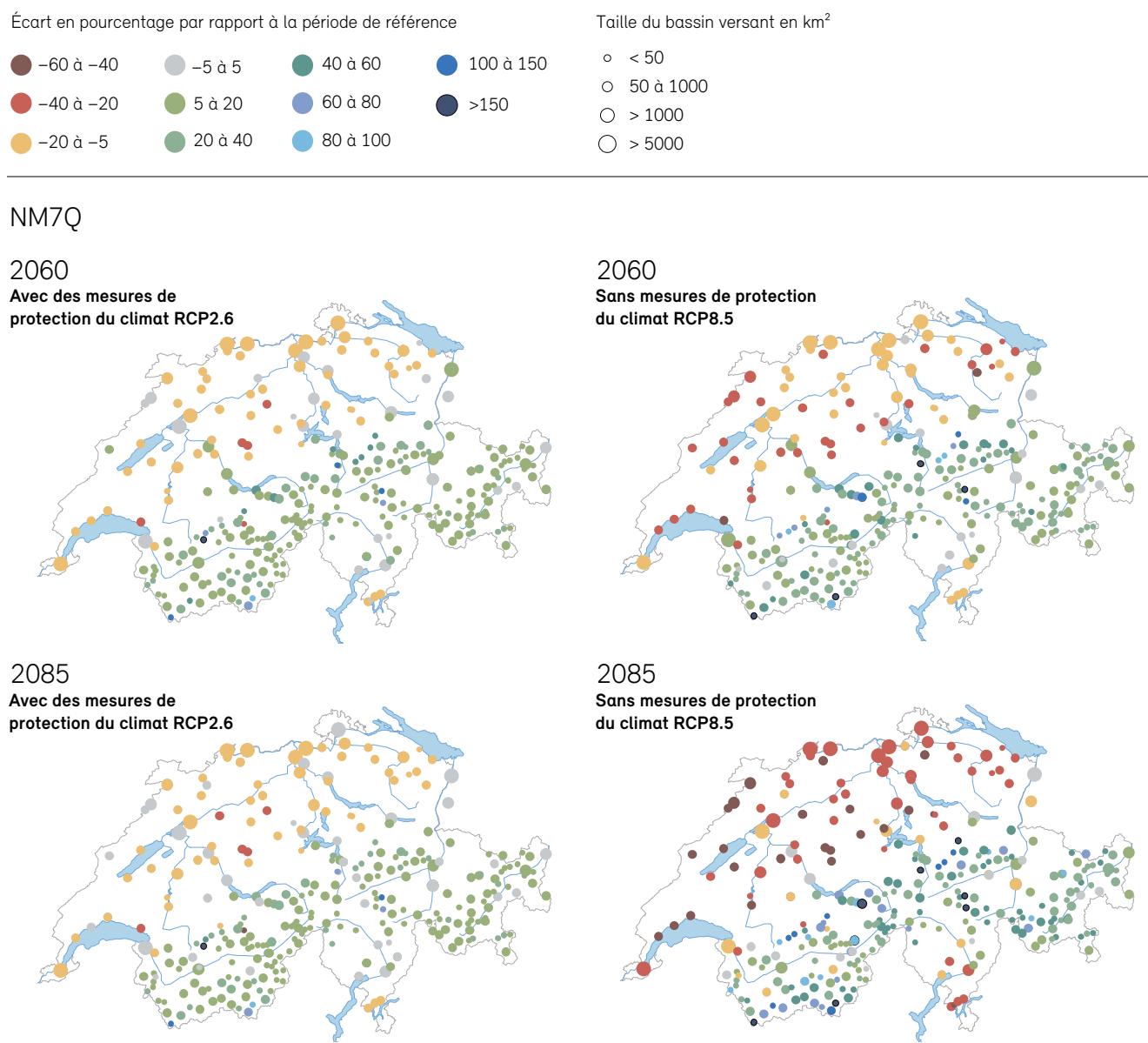
Décalage de la saison des étiages dans les Alpes et les Préalpes

Dans les Alpes et les Préalpes, les scénarios hydrologiques brossent un tableau plus nuancé. Entre 1500 et 2000 m d'altitude, les débits d'étiage hivernaux augmenteront dans un avenir proche en raison du temps plus doux et plus humide. Mais sans mesures de protection du climat, les débits estivaux diminuent si fortement en raison de la quantité réduite d'eau de fonte que la saison des étiages se décale de l'hiver à l'automne ou à l'été dans certaines régions. L'étiage n'y est alors causé non plus par les basses températures, mais par le manque de précipitations. Tandis que toutes les régions situées à moins de 1500 m d'altitude affichent une nette baisse du Q_{347} d'ici la fin du siècle sans mesures de protection du climat, les zones comprises entre 1500 et 2000 m d'altitude ne connaissent que des changements mineurs (Figure 6-15, exemples du Plessur et de la Verzasca) et le Q_{347} peut y être en légère baisse comme en légère hausse. Au-delà de 2000 m d'altitude, tous les scénarios indiquent également une augmentation des débits d'étiage Q_{347} dans un avenir lointain et donc des situations d'étiage moins prononcées en hiver (Figure 6-15, exemple de l'Ova da Roseg).

² www.bafu.admin.ch > Thème Eaux > Données, indicateurs, cartes > Indicateurs > Indicateur eau

Figure 6-14 : Scénarios d'étiage

Changements par rapport à la période de référence (1981-2010) pour la valeur d'étiage NM7Q avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) (à gauche) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) (à droite), au milieu et à la fin du siècle. Une baisse des valeurs annuelles signifie une diminution des débits d'étiage. À basse altitude, les débits d'étiage apparaissent en été et diminuent sous l'effet des changements climatiques. Dans les Alpes, l'étiage est un phénomène hivernal et les débits augmentent.

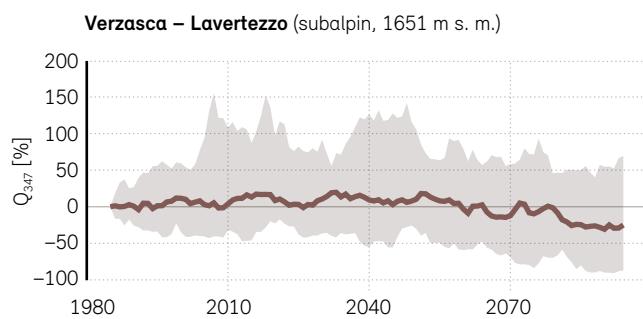
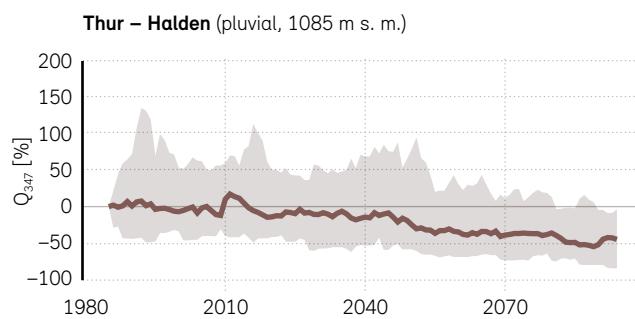
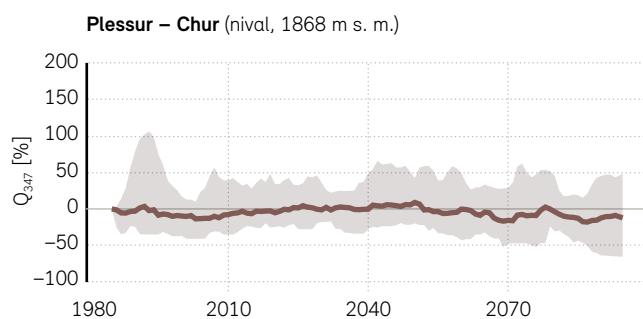
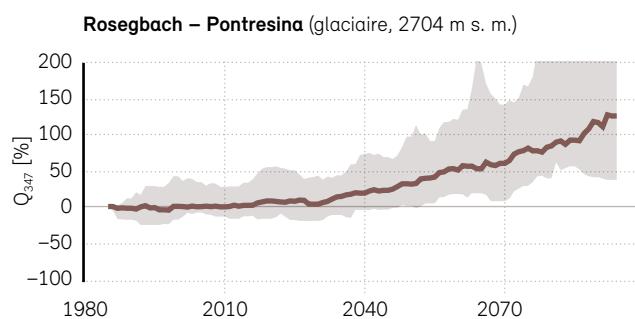


Source: données de Mülchi R. et al. 2020 et 2021b, Freudiger D. et al. 2020, Brunner M. et al. 2019c

Figure 6-15 : Évolution de Q_{347} dans le temps

Évolution en pourcentage du débit Q_{347} (médiane et marge d'incertitude) par rapport à la période de référence (1981-2010) sur des périodes glissantes de dix ans de 2010 à 2099, pour le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5). Dans la région glaciaire de l'Ova da Roseg, le débit Q_{347} augmente fortement d'ici la fin du siècle, tandis qu'il diminue dans la Thur (région pluviale) et dans la Verzasca (région subalpine). Dans le Plessur, l'indicateur Q_{347} ne varie guère.

Sans mesures de protection du climat RCP8.5 (2085)



Source: données de Mülchi R. et al. 2021b

Incertitudes autour de l'évolution future en cas de situations d'étiage extrême

Lorsque surviennent des conditions météorologiques extrêmes de sécheresse et d'étiage, c.-à-d. des événements très rares, les régimes de circulation atmosphérique spécifiques à grande échelle jouent un rôle crucial. Par exemple, les zones de haute pression qui persistent jusqu'à des altitudes élevées entraînent un blocage atmosphérique de la zone des vents d'ouest et donc une nette diminution des précipitations. Les modèles climatiques présentent encore des incertitudes quant à l'évolution de ces régimes atmosphériques spécifiques au fur et à mesure que les changements climatiques se feront sentir. Il est également difficile de prévoir dans quelle mesure les situations extrêmes de sécheresse et d'étiage seront plus fréquentes et intenses (Woollings T. et al. 2018).

Vulnérabilité différente à l'exondation

Durant les périodes d'étiage, de nombreux cours d'eau sont essentiellement alimentés par les eaux souterraines. Hormis les conditions météorologiques, la végétation et la qualité du sol, le débit d'étiage dépend donc fortement des conditions hydrogéologiques du bassin versant concerné (Carlier C. et al. 2018). Ainsi, de vastes eaux souterraines en roches cohérentes et/ou dans les terrains sédimentaires meubles atténuent la vulnérabilité à la sécheresse. Ces processus hydrogéologiques subsistent malgré les changements climatiques.

Des conditions hydrogéologiques spéciales peuvent avoir pour conséquence le tarissement complet et localisé d'un cours d'eau du fait de l'infiltration dans les eaux souterraines. Pour que tout le débit puisse s'infiltrer dans le sous-sol, il faut que les terrains sédimentaires meubles

soient suffisamment épais pour absorber la quantité d'eau totale et lui permettre de s'écouler sous terre. De même, le lit du cours d'eau doit présenter une perméabilité suffisante. Un tarissement complet dû à l'infiltration n'est observé que dans les petits et moyens cours d'eau. Dans les grands cours d'eau, le débit d'étiage est trop important pour pouvoir s'infilttrer complètement et s'écouler sous terre. En régions karstiques, une exondation des cours d'eau est fréquemment constatée. Les situations d'étiage peuvent être plus sévères si des prélèvements sont directement effectués dans les eaux superficielles ou dans les eaux souterraines à proximité. À l'inverse, les apports d'eau, par exemple à partir de stations d'épuration, augmentent les débits d'étiage. Lorsque ceux-ci sont plus faibles en été, en particulier s'ils sont associés à une élévation de la température de l'eau ou à une exondation des eaux, ils sont très problématiques pour l'écologie des eaux (point 6.9) et peuvent entraîner des restrictions quant à l'utilisation de l'eau (point 7.1).

Autres informations et références sur le thème

«Étiages»

- Kohn I. et al. 2019: Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report.
- Mülchi R. et al. 2020: Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht.
- Weingartner R., Schwanbeck J. 2020: Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961–2018. Hydro-CH2018 Bericht.

6.7 Température de l'eau

Les changements climatiques augmentent la température de l'eau des cours d'eau, des lacs et des eaux souterraines. Le réchauffement de ces dernières est moins marqué que celui des eaux superficielles, qui est d'ores et déjà clairement mesurable. Des températures de l'eau plus élevées, notamment en été, ont des effets négatifs sur la qualité de l'eau et sur l'écologie des eaux.

6.7.1 Cours d'eau

Au cours des dernières décennies, la température moyenne des cours d'eau s'est déjà nettement accrue. Les scénarios hydrologiques montrent que cette hausse va se poursuivre en particulier en été et dans les régions alpines.

À la source d'un cours d'eau, la température de l'eau sortant du sous-sol est proche de la température moyenne annuelle de l'air, exception faite des ruisseaux glaciaires alimentés par l'eau de fonte avoisinant 0 °C. En aval, la température du cours d'eau est surtout influencée par le rayonnement solaire et par la température de l'air. En été, le rafraîchissement vient de l'ombrage par la végétation et des apports d'eaux de fonte et d'eaux souterraines. Les cours d'eau qui ont un débit important ou qui sont très profonds se réchauffent également plus lentement. La température des émissaires lacustres correspond à celle de la surface des lacs durant l'année et peut donc être élevée en été. En hiver, les apports d'eaux souterraines et les forts débits contrecurrent le refroidissement.

L'utilisation des eaux à des fins de refroidissement des centrales et des installations industrielles fait monter la température de l'eau, tandis que le prélèvement de chaleur pour le chauffage la fait chuter. L'utilisation de la force hydraulique influe également sur la température. Dans le cas des centrales à accumulation, l'eau froide des lacs d'accumulation situés en altitude alimente les eaux à plus basse altitude et les refroidit en été. Comme cet apport est irrégulier selon la production d'électricité, cela entraîne non seulement de fortes variations de débit (éclusées), mais aussi d'importantes modifications artificielles de température (pics thermiques). En aval des lacs d'accumulation, la température des eaux peut donc varier durant la journée, voire durant l'année. Dans les tronçons

à débit résiduel, la température est également influencée par le débit réduit. Selon la saison et les conditions locales, un cours d'eau peut être plus chaud ou plus froid qu'avec un débit naturel (Schmid M. 2019).

Température de l'eau en forte hausse notamment en été

La température de l'eau mesurée dans 52 cours d'eau suisses au cours des dernières décennies a été étudiée. Pour 31 stations, les mesures disponibles remontent à 1970. Le réchauffement moyen des cours d'eau a été de 0,33 °C par décennie sur la période de 1979 à 2018 (Figure 6-16), voire de 0,37 °C par décennie en moyenne durant les 20 dernières années. Cela correspond environ à 90 % de la hausse de la température moyenne de l'air sur la période correspondante (Michel A. et al. 2019). L'augmentation de la température de l'eau a été atténuée par l'effet rafraîchissant de l'eau de fonte en provenance des Alpes.

Les cours d'eau se sont réchauffés de manière particulièrement importante en été (0,58 °C par décennie), mais nettement moindre en hiver (0,22 °C par décennie). La forte hausse estivale s'explique par le réchauffement atmosphérique plus marqué à cette saison. Mais, dans le même temps, les débits estivaux ont également diminué sur le Plateau (point 6.2), et les vagues de chaleur se sont multipliées.

Dépassement plus fréquent des seuils de température critiques

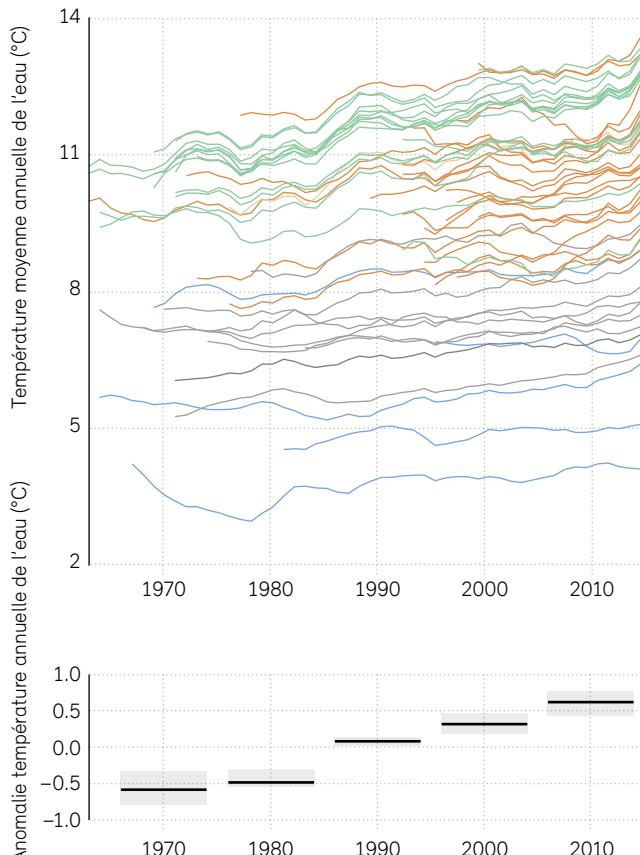
Au cours des étés caniculaires 2003, 2015 et 2018, des records de température ont été battus dans de nombreuses stations. Durant l'été 2018, de nouvelles valeurs maximales ont été enregistrées dans 25 des 83 stations de mesure (OFEV 2019a). Des températures bien supérieures à 25 °C ont été observées entre autres dans le Haut-Rhin, la Limmat, la Thur et le Rhône en aval du lac Léman.

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 (point 6.9.2). Comme le montre la Figure 6-17, depuis les années 1980, de plus en plus

d'eaux atteignent des températures qui sont critiques pour l'apparition de la maladie rénale proliférative (PKD) chez les truites par exemple. De surcroît, ces périodes chaudes ne cessent de se prolonger. Ainsi, le nombre de jours dans l'année où la température dépasse 15 °C a augmenté en moyenne de 20 jours sur quatre décennies. Dans certaines régions, le réchauffement observé est encore plus marqué (Michel A. et al. 2019).

Figure 6-16 : Évolution observée de la température des cours d'eau
Les courbes du premier graphique indiquent la moyenne glissante sur cinq ans de la température moyenne annuelle de l'eau, mesurée dans 52 stations. Chaque type de cours d'eau a une couleur différente (voir la légende). Le second graphique montre les anomalies de température de l'eau par décennie par rapport au milieu de la période de 1970 à 2018. Dans la plupart des cours d'eau, les températures ont nettement augmenté depuis les années 1970.

— Rivières en aval des lacs du Plateau et péréalpins
— Rivières et ruisseaux sur le Plateau et dans le Jura
— Rivières avec un bassin versant alpin
— Rivières avec des éclusées importantes



Source: Michel A. et al. 2019

Figure 6-17 : Dépassement plus fréquent d'une température de l'eau de 15 °C

Le nombre de jours où la barre des 15 °C est dépassée dans un cours d'eau sert d'indicateur pour l'apparition de la PKD chez les truites.



Source: Michel A. et al. 2019, données de base: OFEV, cantons de Berne et de Zurich

Figure 6-18 : Évolution de la température de l'eau dans les cours d'eau du Plateau, du Jura et des Alpes

Changements moyens de la température de l'eau (valeur moyenne et marge d'incertitude) pour toute l'année ainsi que pour l'hiver et l'été, dans les scénarios avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5), au milieu du siècle (2055-2065) et vers la fin du siècle (2080-2090) par rapport à la période de référence (1990-2000). L'étude a porté sur des rivières alpines (Inn, Kander, Landwasser et Lonza) et sur des rivières du Plateau et du Jura (Birse, Broye, Eulach, Ergolz, Rietholzbach et Suze). La température de l'eau va continuer d'augmenter dans toutes les rivières.

Avec des mesures de protection du climat RCP2.6

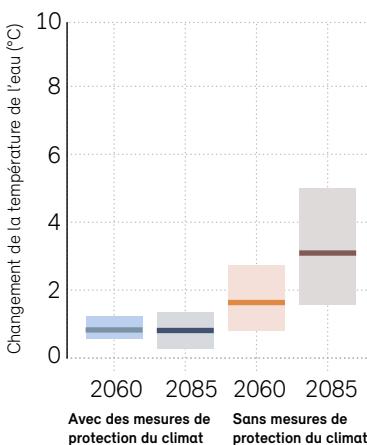
2060 2085

Sans mesures de protection du climat RCP8.5

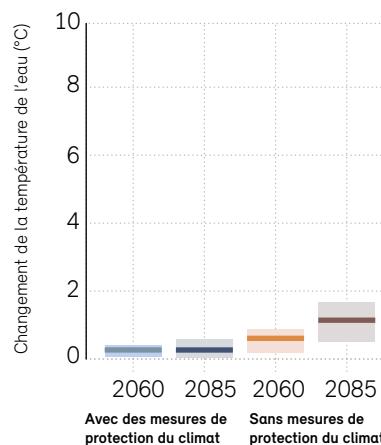
2060 2085

Bassins versants alpins

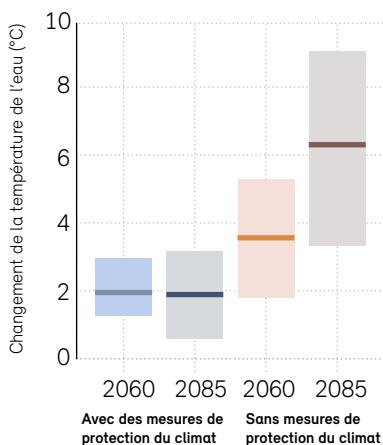
Température moyenne annuelle de l'eau



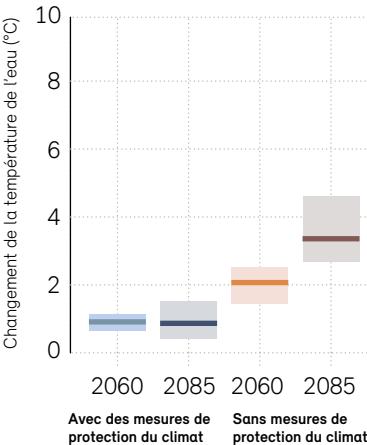
Hiver



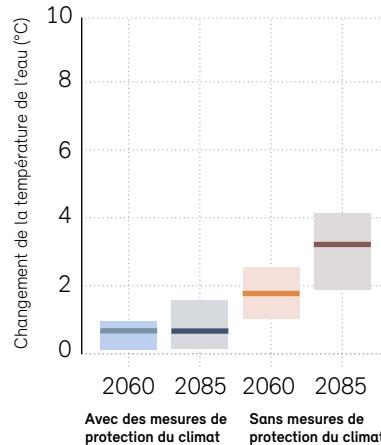
Été

**Bassins versants du Plateau et du Jura**

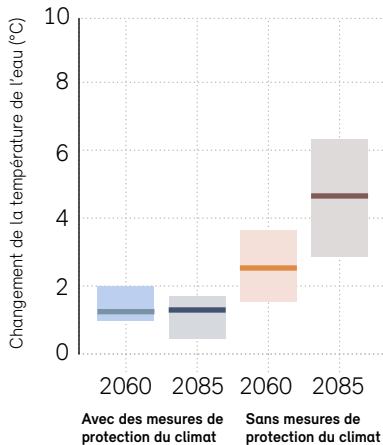
Température moyenne annuelle de l'eau



Hiver



Été



Lorsque la température de l'eau est élevée, il est plus difficile de l'utiliser à des fins de refroidissement. D'une part, l'élévation de la température de l'eau fait que la différence de température utilisable est réduite, ce qui doit être compensé par des prélèvements d'eaux de refroidissement plus importants. D'autre part, si la température des eaux de refroidissement réchauffées dépasse 25 °C, il est interdit de les déverser à nouveau dans un cours d'eau.³

À l'avenir, nouvelle forte hausse de la température de l'eau

Sur le Plateau et dans les Alpes, la température moyenne annuelle des cours d'eau continuera d'augmenter. Dans un scénario avec des mesures significatives de protection du climat, les modèles calculent un nouveau réchauffement de 0,85 °C d'ici le milieu du siècle et il ne faut plus s'attendre à une hausse notable supplémentaire des températures dans la seconde moitié du siècle (Michel A. et al. 2019). Il en va autrement dans un scénario sans mesures de protection du climat. D'ici le milieu du siècle, les modèles prévoient un réchauffement de 2,1 °C sur le Plateau et de 1,6 °C dans les eaux alpines, et une hausse de ces valeurs de 3,2 °C dans tous les cours d'eau d'ici la fin du siècle (Figure 6-18). Ce réchauffement s'inscrit dans la lignée des tendances observées au cours des décennies passées (Michel A. et al., en cours d'élaboration).

S'agissant des températures saisonnières de l'eau, la différence entre les Alpes et le Plateau/Jura est plus marquée que pour les températures moyennes annuelles. 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 gagnera 4 °C sans mesures de protection du climat. Là, les débits hivernaux proviennent principalement des eaux souterraines ou de la fonte des neiges accrue, qui ont un effet rafraîchissant.

En été, les cours d'eau continueront de se réchauffer : sans mesures de protection du climat, de l'ordre de quelque 2,5 °C sur le Plateau et de 3,6 °C dans les Alpes d'ici le milieu du siècle voire de 3,1 à 6,1 °C sur le Plateau

et de 4,1 à 8,1 °C dans les Alpes d'ici la fin du siècle. Outre la hausse de la température de l'air, la diminution des précipitations et des débits estivaux et la réduction de la part de l'eau de fonte rafraîchissante notamment dans les régions alpines sont déterminantes. De plus, le sol alpin se réchauffera davantage sous l'effet de la fonte plus précoce du manteau neigeux. C'est la raison pour laquelle la température de l'eau dans les eaux alpines augmente encore plus nettement que la température de l'air.

La taille du bassin versant des eaux étudiées n'a aucune incidence sur l'élévation de la température calculée. Cela dit, pour les très petits cours d'eau, il n'y a ni relevé de températures ni scénario pour le futur. Il ne peut donc pas être exclu que le réchauffement y soit différent et éventuellement encore plus important. De même, les grandes rivières du Plateau situées directement en aval des grands lacs n'ont pas été prises en considération, la température y étant fortement influencée par l'eau s'écoulant des lacs. Comme les eaux superficielles lacustres auront 3 ou 4 °C de plus en été sans mesures de protection du climat d'ici la fin du siècle (point 6.7.2), le réchauffement devrait être similaire dans les émissaires.

6.7.2 Lacs

Au cours des dernières décennies, les eaux superficielles et profondes des lacs se sont réchauffées, la couverture de glace en hiver s'est amincie et la durée de la stratification de l'eau, stable en été, s'est allongée. Avec les changements climatiques, cette évolution va se poursuivre. Importants du point de vue écologique, les brassages dans les lacs s'en trouveront par conséquent modifiés eux aussi.

La température de l'eau dans un lac dépend du rayonnement solaire, de la température locale de l'air, de la température de l'eau des affluents et de la fréquence des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, les tempêtes ou les crues, tout en étant influencée par la morphologie et la turbidité du lac. La température n'y est pas répartie de manière homogène. En été, la stratification thermique des lacs est stable, avec une couche superficielle de quelques mètres d'eau plus chaude et des eaux profondes plus froides (stagnation estivale).

³ Des dérogations peuvent être accordées à certaines conditions (annexe 3.3, ch. 21, al. 4, let. B, de l'ordonnance sur la protection des eaux).

Influence des changements climatiques sur les températures des cours d'eau et des lacs : comment la température de l'eau dans les cours d'eau et lacs suisses évoluera-t-elle ?

Démarche

À l'aide des modèles Snowpack/Alpine3D (Lehning M. et al. 2006) et StreamFlow (Gallice A. et al. 2016), des scénarios relatifs à la température de six cours d'eau sur le Plateau (Birse, Broye, Eulach, Ergolz, Rietholzbach et Suze) et de quatre dans les Alpes (Inn, Kander, Landwasser et Lonza) ont été élaborés à titre d'exemple. Les résultats sont résumés dans la Figure 6-18. En raison des longs temps de calcul, sept projections climatiques RCP8.5 et quatre RCP2.6 ont pu être considérées pour une période de référence raccourcie (1990-2000) et deux décennies futures (2055-2065 et 2080-2090).

Les températures et les processus de brassage dans 29 lacs ont été calculés en continu sur la période de 1981 à 2099 dans les trois scénarios – avec des mesures significatives de protection du climat (RCP2.6), avec des mesures moyennes de protection du climat (RCP4.5) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) – avec Simstrat, le modèle de lac unidimensionnel à base physique. Les lacs sélectionnés sont situés entre 200 m et 1800 m d'altitude, pour des volumes allant de 0,004 à 89 km³.

Les points 6.7.1 et 6.7.2 s'appuient principalement sur les résultats du projet.

Projet Hydro-CH2018 du Laboratoire des sciences cryosphériques de l'EPFL, du groupe de recherche Analyse de systèmes appliquée de l'Eawag et de l'Institut des dynamiques de la surface terrestre de l'Université de Lausanne

Les deux couches d'eau ne peuvent se mélanger que si la température et donc l'épaisseur des eaux superficielles et des eaux profondes sont harmonisées. Cette circulation influe sur la répartition de la chaleur et des matières au sein d'un lac. La fréquence et l'intensité du brassage de la masse d'eau sont décisives pour l'écologie lacustre car c'est à ces conditions seulement que les concentrations de substances (nutriments, oxygène et polluants) peuvent s'équilibrer entre les eaux profondes et les eaux superficielles (point 6.9.1).

L'anomalie dilatométrique de l'eau fait qu'il existe des stagnations thermiques en hiver également. Une stagnation hivernale se produit lorsque la température des eaux superficielles chute sous la barre des 4 °C, que cette couche s'affine et que les eaux superficielles froides ne peuvent pas descendre plus bas. La couche des eaux profondes est alors constituée d'eau à 4 °C au maximum. Cette répartition inverse des températures est la condition indispensable à la formation de la glace.

Une couche d'eaux superficielles déjà plus chaude

Au cours des dernières décennies, le réchauffement moyen de la couche d'eaux superficielles des lacs suisses a avoisiné 0,4 °C par décennie, soit environ 2 °C de 1960 à 2010 (Råman Vinnå L. et al. 2021), et des changements ont été observés en termes de brassage. Par exemple, les vagues de chaleur comme celle de l'été 2003 ont renforcé et prolongé la stagnation estivale. Dans certains lacs, les hivers doux comme en 2006 et 2007 ont empêché le brassage saisonnier incluant les eaux profondes. Depuis les années 1960, le gel complet des lacs suisses est en net recul, surtout sur le Plateau (Hendricks Franssen H.-J., Scherrer S.C. 2008).

Nouveau réchauffement important

La future évolution de la température et de la stratification a été modélisée pour 29 lacs (Figure 6-19). Dans tous les lacs, une nouvelle élévation de la température de la couche d'eaux superficielles (jusqu'à 1 m de profondeur) est attendue : de l'ordre de 3 à 4 °C d'ici la fin du siècle dans la plupart des lacs dans un scénario sans mesures de protection du climat, et d'à peine 1 °C avec des mesures significatives de protection du climat. Concernant la tem-

pérature des eaux superficielles, la différence entre les lacs étudiés est minime. L'évolution est très similaire à celle observée dans les cours d'eau.

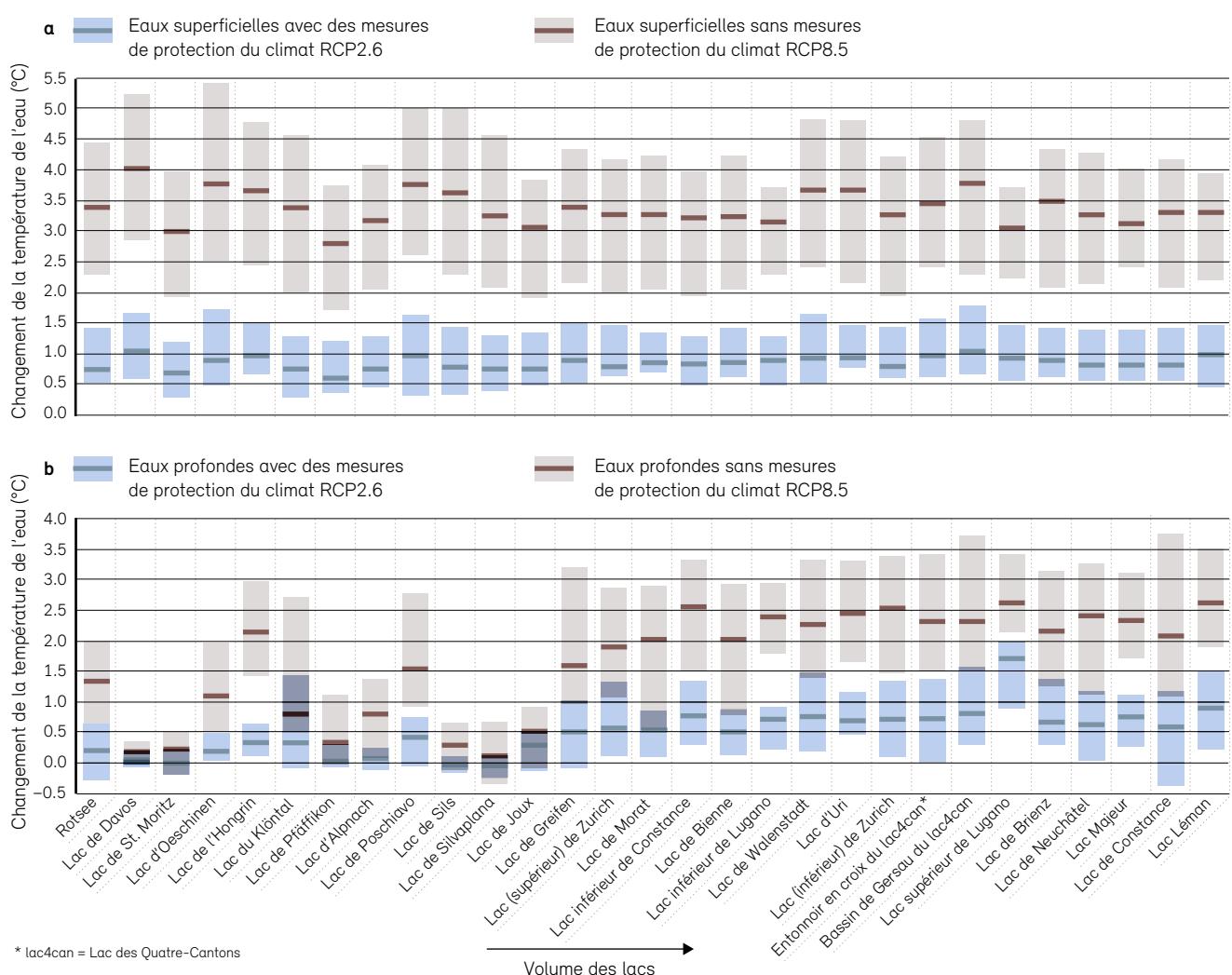
C'est au niveau du réchauffement des eaux profondes que des écarts plus importants entre les lacs sont à attendre. Tant que la température en profondeur des lacs de petite taille ou situés en altitude descend à 4°C en hiver, seule

une faible hausse de la température des eaux profondes est escomptée. Concernant les lacs de plus grande taille, les modèles montrent un réchauffement des eaux profondes de 1,5 à 2,5°C d'ici la fin du siècle sans mesures de protection du climat. Ce réchauffement hétérogène des eaux profondes peut s'expliquer par les différentes répercussions des changements climatiques sur les caractéristiques du brassage (voir ci-après).

Figure 6-19 : Scénarios sur la température de l'eau dans 29 lacs suisses

Les graphiques montrent les changements modélisés de la température de l'eau (médiane et marge d'incertitude) à la surface (jusqu'à 1 m de profondeur, a) et au fond du lac (1 m au-dessus du fond, b) à la fin du siècle (2071-2099) par rapport à la période de référence (1981-2010).

Les scénarios avec mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) ont été pris en compte. Les lacs sont classés selon leur volume. La température des eaux superficielles augmentera dans tous les lacs. S'agissant des eaux profondes, le réchauffement dépend des caractéristiques du brassage des lacs.



Modification du brassage des lacs

La température de l'eau n'étant plus la même, le brassage des lacs est modifié à plusieurs égards. Les stratifications stables en été durent plus longtemps. En revanche, les stagnations hivernales sont moins fréquentes, et la formation et la durée des couvertures de glace régressent (Figure 6-20).

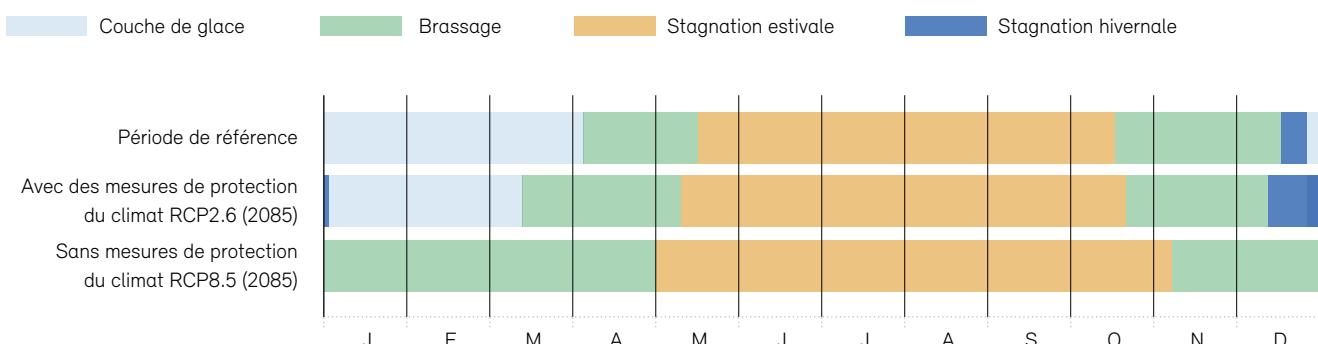
Les lacs dont les eaux superficielles et profondes se mélangent deux fois par an (à l'automne et au printemps) et qui connaissent des stagnations hivernale et estivale entretempo sont soumis à un régime dimictique. Dans un premier temps, de tels lacs, aujourd'hui recouverts de glace en hiver, n'auront plus de couverture de glace si le réchauffement du climat se poursuit. Ensuite, la stagnation hivernale disparaîtra et les lacs deviendront monomictiques, c.-à-d. que leurs eaux ne se mélangeront plus qu'une seule fois par an. Si les lacs continuent de se réchauffer – selon leurs propriétés telles que leur profondeur et leur exposition au vent –, un mélange complet peut se maintenir à un rythme annuel, n'intervenir qu'avec une fréquence de quelques années (lacs oligomictiques) ou disparaître totalement dans le cas extrême où les colonnes d'eau se stabilisent sous l'effet des substances dissoutes (lacs méromictiques).

La modification du brassage des lacs dépend non seulement de leur altitude, mais aussi d'autres propriétés telles que leur morphologie ou leur exposition au vent. Dans tous les scénarios climatiques, les lacs en altitude (p. ex. lac de Silvaplana) comme les petits lacs à basse altitude (p. ex. lac d'Alpnach) demeurent dimictiques avec toutefois une stagnation hivernale nettement raccourcie et une couverture de glace réduite ou manquante. Leur régime de mélange étant inchangé, ces lacs ne connaissent qu'une faible élévation de la température des eaux profondes. Toutefois, du fait de la perte de glace dans de tels lacs, la prolongation de la stratification estivale et le réchauffement de la couche superficielle peuvent être supérieurs à ce à quoi l'on pourrait s'attendre avec une simple hausse de la température de l'air.

Les lacs de taille moyenne et à moyenne altitude, aujourd'hui régulièrement recouverts de glace, tels que le lac de Joux (Figure 6-20) ou le lac du Klöntal, deviennent totalement ou partiellement monomictiques selon le scénario climatique ou, au moins, perdent largement leur couverture de glace dans le scénario sans mesures de protection du climat. Il en va de même pour des lacs de taille moyenne à basse altitude comme le lac de Pfäffikon qui, d'ores et déjà, ne sont jamais ou rare-

Figure 6-20 : Évolution de la stratification saisonnière et de la couverture de glace dans le lac de Joux

Le graphique montre les médianes modélisées de l'apparition de la couverture de glace, du brassage et des stagnations estivale et hivernale au cours de l'année sur la période de référence (1981-2010) et dans les scénarios avec mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) d'ici la fin du siècle (2071-2099). Si des mesures de protection du climat sont appliquées, le lac est recouvert de glace pendant une durée réduite. En l'absence de mesures de protection du climat, le lac n'est plus glacé en hiver. La stagnation estivale est allongée d'une quarantaine de jours en particulier dans le scénario sans mesures de protection du climat. Si aucune mesure de protection du climat n'est prise, le lac passe d'un régime dimictique avec un mélange au printemps et à l'automne à un régime monomictique avec un mélange en hiver.



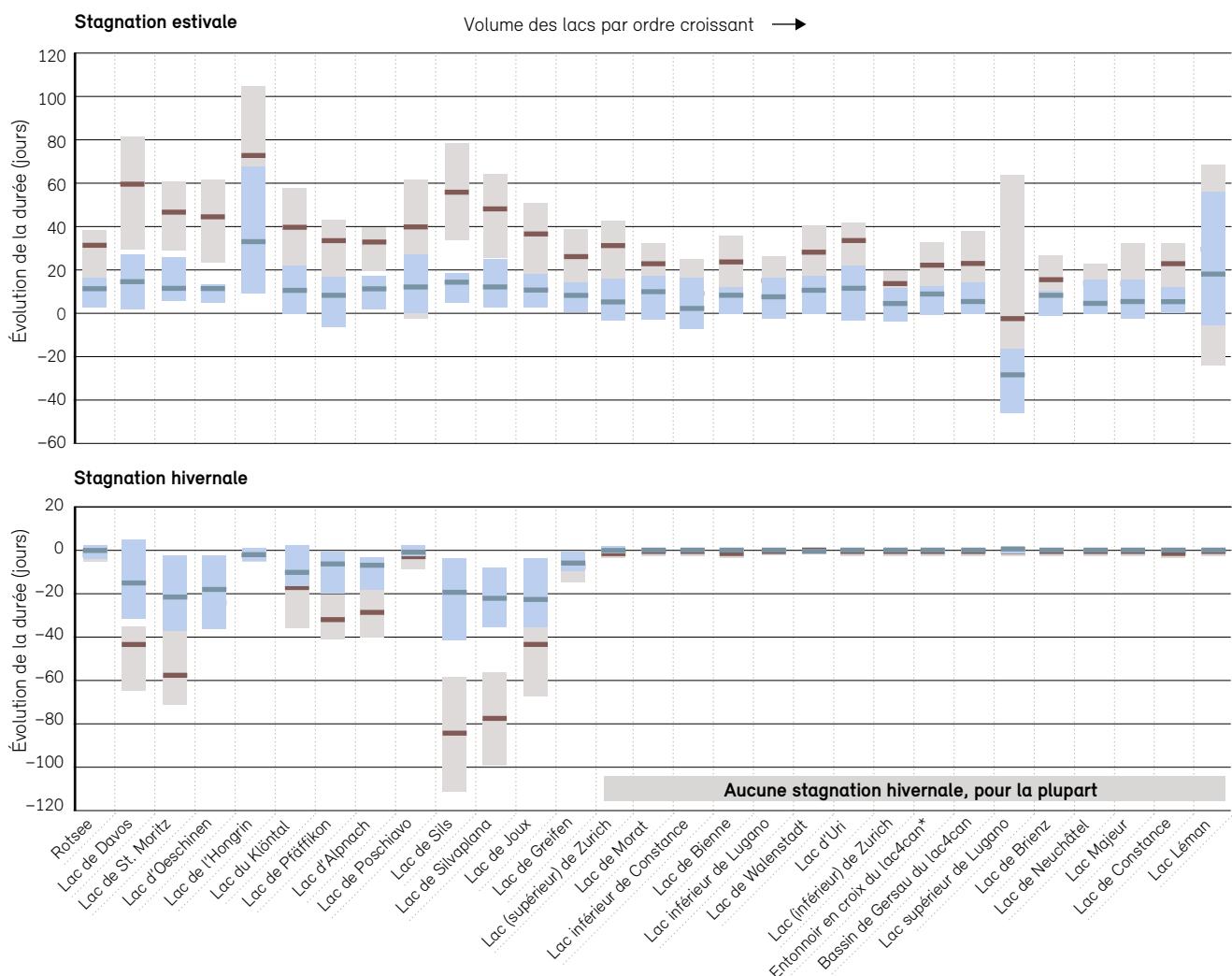
ment seulement recouverts de glace. Dans le scénario sans mesures de protection du climat (RCP8.5), les modélisations indiquent à long terme un passage à un régime monomictique pour sept lacs dimictiques sur huit. Dans le scénario avec des mesures significatives de protection du climat (RCP2.6), seuls trois lacs sur huit sont concernés.

Aujourd’hui déjà, des grands lacs à basse altitude sont monomictiques ou oligomictiques et le resteront dans une large mesure. Mais la température de leurs eaux profondes augmentera plus fortement que dans les lacs dimictiques. Il est intéressant de noter que les modélisations n’indiquent aucun changement notable de la fréquence du brassage pour la plupart de ces lacs. Toutefois,

Figure 6-21 : Modification de la durée des stagnations estivale et hivernale dans 29 lacs suisses

Les graphiques montrent la médiane et la marge d’incertitude concernant la modification de la durée des stagnations estivale (haut) et hivernale (bas) dans 29 lacs étudiés (classés selon leur volume). Les scénarios avec mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5) pour la fin du siècle (2071-2099) ont été comparés à la période de référence (1981-2010). Tandis que la stagnation estivale s’allonge généralement, la stagnation hivernale est plus courte. Les modifications simulées dans les petits lacs sont plus importantes. Aucune évolution future n’est attendue pour les lacs qui, pour la plupart, ne connaissent pas de stagnation hivernale selon le modèle, et ce, dès la période de référence.

■ Avec des mesures de protection du climat RCP2.6 (2085) ■ Sans mesures de protection du climat RCP8.5 (2085)



l'incertitude concernant la prévision de la profondeur et de la fréquence du brassage est relativement grande s'agissant des lacs allant de monomictiques à oligomictiques. Dans certains lacs, une baisse du brassage a déjà été observée au cours des dernières décennies (p. ex. lac de Zurich; North R.P. et al. 2014), tandis que cela n'a pas été le cas pour d'autres lacs (p. ex. lac Léman; Schewefel R. et al. 2016). Dans le lac de Constance, certes un brassage réduit a été observé durant des hivers particulièrement chauds (Straile D. et al. 2010), mais aucune tendance claire ne se dessine sur 30 ans (Rhodes J. et al. 2017). Un brassage moins fréquent empêche l'oxygénéation des eaux profondes, ce qui a de lourdes consé-

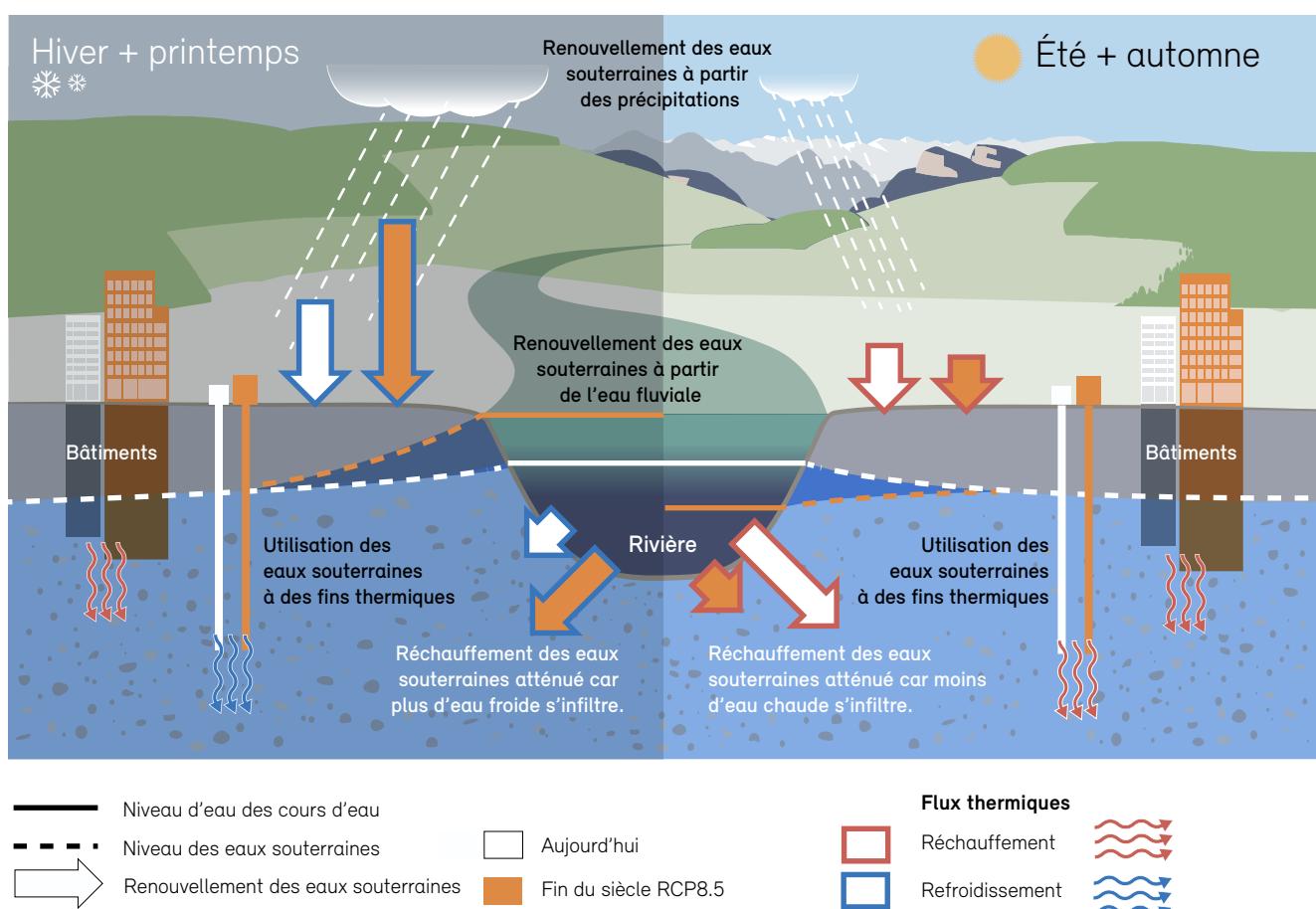
quences écologiques (point 6.9.1). Aussi est-il important de suivre attentivement l'évolution de la profondeur et de la fréquence des brassages dans ces lacs (Gaudard A. et al. 2019).

6.7.3 Eaux souterraines

La Suisse n'a pas encore constaté de réchauffement clair de ses eaux souterraines, contrairement aux eaux superficielles. En revanche, la température des eaux souterraines en zones urbaines a déjà fortement augmenté en raison de l'influence humaine. À l'avenir également, les eaux souterraines afficheront localement de grandes différences de température.

Figure 6-22 : Flux chauds et froids dans les eaux souterraines

L'illustration montre les flux chauds et froids dans le cadre du renouvellement des eaux souterraines pour des aquifères de petite et de moyenne taille dans les vallées suisses situées à basse altitude, par exemple de la Birse, de la Suze ou de l'Eulach. Le renouvellement des eaux souterraines à partir d'eau froide augmentera en hiver, celui à partir d'eau chaude diminuera en été. Ces effets de rétroaction négatifs retarderont l'élévation de la température des eaux souterraines due aux changements climatiques. En revanche, l'apport de chaleur anthropique augmentera.



La température des eaux souterraines réagit beaucoup plus lentement aux changements climatiques que celle des eaux superficielles. Elle diffère dans l'espace et dans le temps et dépend de la température moyenne annuelle de l'air, des conditions hydrogéologiques, des processus de renouvellement des eaux souterraines et des influences anthropiques. Si les eaux souterraines proches de la surface sont alimentées par les précipitations, la température de l'air, des précipitations et du sol détermine celle des eaux souterraines. Si elles sont alimentées par de l'eau fluviale qui s'infiltra, c'est la température de cette dernière qui est déterminante. En outre, la température

des eaux souterraines est largement soumise aux influences anthropiques dans les régions urbanisées, du fait de l'utilisation thermique (*extraction d'énergie pour réchauffer ou refroidir*) et du rayonnement thermique des constructions proches des eaux souterraines (Epting J. et al. 2017)

Hausse retardée par rapport à la température de l'air

Au cours de la période de 2000 à 2016, près de la moitié des 65 stations de mesure NAQUA réparties dans toute la Suisse ont enregistré une élévation de la température des eaux souterraines. Seules quelques stations ont relevé

Évolution de la température dans les eaux souterraines en roches meubles en Suisse : quels sont les principaux facteurs ayant une influence sur l'évolution de la température des eaux souterraines et comment la température des eaux souterraines évoluera-t-elle ?

Démarche

Les conséquences des changements climatiques sur le renouvellement des eaux souterraines et sur la température ont été étudiées de manière plus approfondie pour 35 aquifères situés dans cinq régions suisses (Bâle-Ville, Bâle-Campagne, Biel, Winterthour et Davos) et des paramètres-clés représentatifs ont été déduits (p. ex. géométries des aquifères, propriétés des réservoirs, taux de renouvellement et temps de séjour des eaux souterraines). D'une part, les eaux souterraines présentes dans l'espace urbain ont été modélisées avec des modèles 3D de transfert thermique à haute résolution spatiotemporelle. D'autre part, en coopération avec l'EPFL et à l'aide du modèle Alpine3D, l'évolution des précipitations, des débits et des températures a été évaluée pour les 35 aquifères dans les trois scénarios d'émissions : avec des mesures significatives de protection du climat (RCP2.6), avec des mesures moyennes de protection du climat (RCP4.5) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5). Les évaluations ont permis de décrire la sensibilité de la température des eaux souterraines dans le cadre des principaux processus de renouvellement des eaux souterraines dans les différents scénarios d'émissions futures.

Principaux résultats

- Les conséquences sur la température des eaux souterraines sont avant tout liées aux décalages saisonniers du renouvellement de celles-ci. Ainsi, un déplacement des épisodes de précipitations et de crues de l'été à l'hiver va de pair avec une augmentation du renouvellement des eaux souterraines durant les saisons relativement « froides ».
- Concernant les eaux souterraines souterraines urbaines, peu profondes et peu importantes comme celle de Davos, il faut s'attendre à ce que la température des eaux souterraines soit soumise à une influence plus forte. Par contre, des changements de température des eaux souterraines dans des aquifères profonds comme à Biel, ou parfois très profonds comme à Winterthour, ne sont escomptés que de manière très atténuée et sur de longues périodes d'observation.

Les prévisions formulées aux points 6.4 et 6.7.3 s'appuient sur les résultats du projet.

un refroidissement (Schürch M. et al. 2018). Cela dit, la période d'analyse qui s'étend sur 15 ans est courte. La hausse de la température moyenne annuelle de l'air prévue par les scénarios climatiques se répercute avec du retard sur la température des eaux souterraines. Plus une eau souterraine est profonde et importante, plus elle réagit lentement. La tendance au réchauffement est toutefois atténuée par le fait que le renouvellement des eaux souterraines aura davantage lieu durant les saisons plus fraîches. Il en va de même pour le renouvellement des eaux souterraines à partir des cours d'eau. En effet, une plus grande partie de l'infiltration se produira en hiver en raison de la baisse attendue du débit estival. À cela s'ajoute une proportion d'eau de fonte initialement plus élevée (Epting J. et al. 2020). La façon dont ces effets de rétroaction négatifs peuvent contrer ou atténuer le réchauffement dépend surtout des conditions locales telles que l'altitude, le mode de renouvellement des eaux souterraines, etc. (Figure 6-22).

Forte hausse de la température des eaux souterraines en zone urbaine

À l'avenir également, les influences anthropiques directes détermineront la température des eaux souterraines en zones urbaines (Epting J., Huggenberger P. 2013). Ainsi, les données des différentes stations de mesure bâloises montrent que celle-ci a augmenté en moyenne de 3,0 à environ 0,7 °C rien que sur la période de 1993 à 2016. Dans les zones fortement urbanisées, les eaux souterraines ont atteint des températures allant jusqu'à 18 °C (Epting J. et al. 2020 et 2021). Sous l'effet des changements climatiques, les besoins de refroidissement des ménages, de l'industrie et de l'artisanat croissent surtout dans les milieux urbains, c'est pourquoi il faut s'attendre à une utilisation accrue du sous-sol à des fins thermiques, en particulier pour le refroidissement. À cela s'ajoute la chaleur qui est rejetée par les structures souterraines et qui va également devenir plus importante avec l'extension de la surface d'habitat. Cela entraînera une nouvelle élévation de la température des eaux souterraines dans les villes.

Autres informations et références sur le thème « Température des eaux »

- Epting J. et al. 2020: Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht.
- Michel A. et al., en cours d'élaboration: Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report.
- Michel A. et al. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years.
- Råman Vinnå L. et al. 2021: The vulnerability of lakes along an altitudinal gradient to climate change.

6.8 Substances contenues dans l'eau

Les changements climatiques modifient le transport des polluants et des nutriments ainsi que leur concentration dans les eaux. La disponibilité et le transport des sédiments s'accroissent avant tout en haute montagne.

6.8.1 Polluants et nutriments

Le réchauffement accélère les réactions biochimiques, ce qui fait que, de manière générale, les polluants se dégradent plus rapidement. Néanmoins, l'augmentation des fortes précipitations et de la sécheresse peut aussi induire des apports plus importants de polluants et de nutriments dans les eaux ainsi que des concentrations plus élevées.

Les eaux superficielles et souterraines contiennent des substances dissoutes ou en suspension. Aujourd'hui, les polluants et nutriments susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'eau sont surtout les apports ponctuels provenant de l'évacuation des eaux usées urbaines ainsi que les apports diffus issus de l'agriculture, des habitations et des transports. Les changements climatiques influencent aussi bien les sources anthropiques que les processus de transport et de transformation biologiques, chimiques et physiques qui se déroulent dans l'environnement et dans les eaux.

Changement de sources de polluants et de nutriments
 Concernant les sources de polluants et de nutriments, il faut s'attendre à ce que les changements climatiques les influencent surtout indirectement, par des mesures d'adaptation de l'agriculture. La période de végétation

s'allonge, d'autres cultures et variétés sont plantées, l'irrigation va gagner en importance, et les organismes nuisibles et les maladies végétales vont muter. Cela a aussi des conséquences sur l'utilisation des produits phytosanitaires et des engrains. Les sources de polluants et de nutriments sont aussi fortement influencées par les mesures réglementaires comme l'autorisation de substances, les conditions économiques et la politique agricole.

Accélération des réactions biochimiques

Les polluants et nutriments se dégradent et se transforment sur la plante, dans le sol et dans les eaux souterraines. Ces processus sont assurés biologiquement par des micro-organismes ou par des réactions chimiques. Les réactions biochimiques dépendent de la température et de la disponibilité de l'eau et de l'oxygène. Une élévation de la température de 2 à 4 °C accélère les réactions, généralement de 10 à 40 % (Davidson E.A., Janssens I.A. 2006), tant que la température optimale des micro-organismes concernés n'est pas dépassée. Une augmentation de l'humidité du sol favorise également des réactions plus rapides dans le sol, dans la mesure où celui-ci n'est pas trop mouillé et qu'il est suffisamment oxygéné (Schlesinger W.H. et al. 2015). Le réchauffement et la concentration plus élevée de CO₂ dans l'atmosphère accélèrent aussi la croissance des plantes, améliorent l'absorption de nutriments et favorisent l'activité des bactéries présentes dans le sol (Hagedorn F. et al. 2018).

Les changements climatiques vont aussi avoir tendance à accélérer la dégradation et la transformation des polluants et des nutriments dans le sol et dans les eaux souterraines. De manière générale, une dégradation plus rapide des polluants est positive pour l'écologie des eaux, sauf qu'ils laissent leur place à des produits de dégradation problématiques et extrêmement mobiles qui rejoignent plus vite les eaux. Tandis que l'accélération des processus de dégradation est évidente pendant la saison froide, elle est freinée en été par la diminution attendue de l'humidité du sol et par des périodes de sécheresse et de chaleur plus fréquentes (Schlesinger W.H. et al. 2015). Cette atténuation varie fortement en fonction des régions, des sols et de l'utilisation du sol (Benateau S. et al. 2019).

Transport de substances dans les eaux accru par les changements climatiques

La hausse attendue des fortes précipitations en raison des changements climatiques va accentuer le ruissellement, favoriser l'écoulement préférentiel de l'eau dans le sol et entraîner l'érosion du sol. Ces processus hydrologiques augmentent les apports dans les eaux de nombreux produits phytosanitaires ou du phosphore issus de l'agriculture, tout comme des particules du sol érodées, des microplastiques provenant de l'usure des pneus et d'autres polluants présents sur les routes et sur les surfaces imperméabilisées. Les changements climatiques accroissent donc le transport non seulement de particules naturelles, mais aussi de polluants et de nutriments.

Le nitrate est une autre substance problématique, en particulier pour l'eau potable. L'excédent de nitrate que les plantes n'absorbent pas pendant la période de végétation passe du sol aux eaux souterraines, surtout en hiver lors du renouvellement des eaux souterraines. Ce processus devenant plus important en cette saison, le nitrate peut être plus facilement transporté. Par exemple, dans la région de la Broye, on s'attend à une hausse hivernale de la lixiviation du nitrate dans les eaux souterraines de l'ordre de 44 % dans un scénario sans mesures de protection du climat et, à l'inverse, à une baisse estivale de 25 % (Zarrineh N. et al. 2020). Alors que la lixiviation accrue est incontestable en hiver, elle est moins claire en été. Tant que les cultures agricoles sont capables d'absorber tout le nitrate, celui-ci n'est pas lixivié. Mais en fonction de l'exploitation, la lixiviation du nitrate pourrait aussi augmenter en été par exemple si une sécheresse croissante raccourcit la période de culture ou fait chuter la productivité, ne permettant pas aux plantes d'absorber autant de nitrate. Ainsi il y aurait, durant les mois estivaux également, un excédent de nitrate dans le sol, qui pourrait être lixivié par les fortes précipitations dès l'été ou, plus tard, à l'automne et à l'hiver suivants (Hunkeler D. et al. 2020).

Dilution moindre en situation d'étiage

Comme les débits sont nettement moindres à la fin de l'été et à l'automne, les apports d'eaux usées en provenance des industries et des habitations sont moins dilués durant ces saisons. Cela se traduit par des cours d'eau présentant des concentrations élevées d'impuretés, par exemple des micropolluants provenant des médicaments et des

produits cosmétiques, ce qui peut se révéler problématique pour de nombreux organismes aquatiques. C'est la raison pour laquelle plus un cours d'eau est petit, plus le déversement des eaux polluées communales est critique pour la qualité chimique de l'eau. L'effet des micro-polluants peut être contrecarré par l'ajout d'une étape de traitement supplémentaire dans quelque 140 stations d'épuration. Dans le même temps, ces introductions augmentent le débit, ce qui peut avoir des impacts positifs sur l'écologie des eaux en périodes de sécheresse.

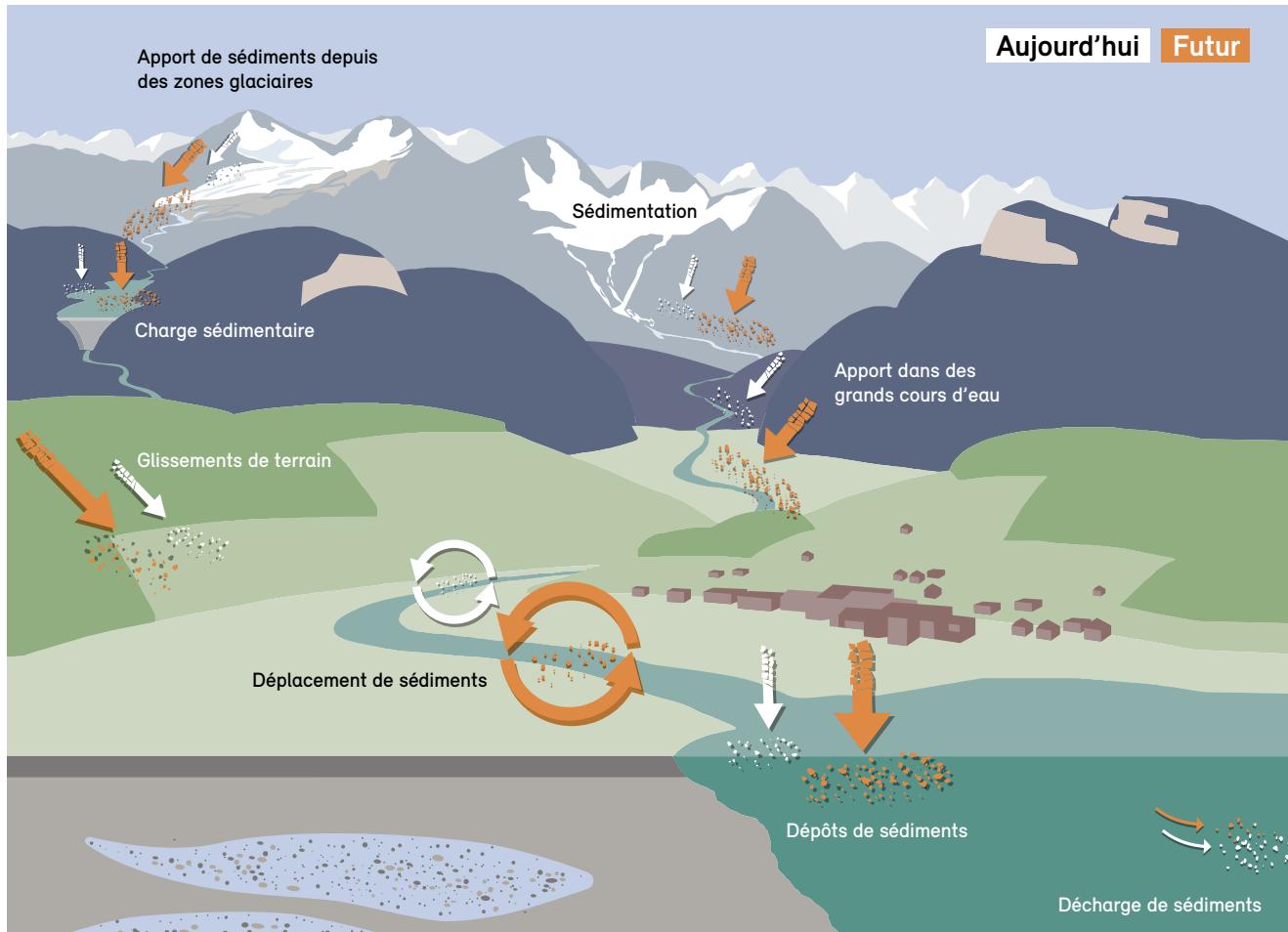
6.8.2 Sédiments

Avec le dégel du pergélisol et l'augmentation des fortes précipitations, davantage de sédiments sont mobilisés dans les Alpes. Toute la lumière n'a pas encore pu être faite sur la manière dont le transport sédimentaire change ensuite dans les grands cours d'eau car cela dépend avant tout de l'évolution des débits de crue.

On entend par sédiments les cailloux, le gravier, le sable, le limon et l'argile transportés dans les eaux superficielles lorsque le débit est important. En raison du dégel du pergélisol et de la fonte des glaciers, il y a en montagne davantage de sédiments mobilisables en cas de fortes précipitations. L'augmentation des fortes précipitations conduit à une multiplication des mouvements de

Figure 6-23: Représentation schématique des changements du transport sédimentaire dans un système hydrologique de montagne

Sous l'effet des changements climatiques, la sédimentation et le transport de sédiments vont s'accroître.



masse, à une hausse des débits dans les torrents et donc à une érosion accrue. En outre, avec les changements climatiques, davantage de sédiments des torrents sont déchargés dans les rivières, et les dépôts de sédiments augmentent dans les cours d'eau peu profonds, les deltas et les lacs (Figure 6-23). Comme les sédiments sont retenus par les lacs, les changements climatiques n'impactent guère les quantités de sédiments présents dans les rivières en aval des lacs. En revanche, l'apport de sédiments peut créer des phénomènes d'atterrissement dans les lacs, ce qui peut se révéler problématique surtout pour les lacs de retenue.

Un débit minimal est nécessaire au transport sédimentaire dans le lit. Plus les sédiments sont gros et lourds, plus ce débit minimum doit être important. Du fait de l'évolution de la distribution saisonnière des débits, les périodes propices au transport de sédiments vont changer elles aussi et auront tendance à se multiplier en hiver. Cela peut avoir des répercussions négatives sur les populations piscicoles (point 6.9.2). Il y aura également de plus en plus de déplacements de sédiments dans les eaux (Speerli J. et al. 2020). Toutefois, de grandes quantités de sédiments sont transportées lors des crues, et l'évolution future de ce phénomène est entourée d'incertitudes. Il existe toutefois des signes qui laissent entrevoir une augmentation (point 6.5).

La concentration dans les eaux des matières en suspension (p. ex. limon et argile) sera plus élevée et leur transport sera plus fréquent. Des polluants tels que des métaux lourds ou des composés organiques peuvent être liés aux matières en suspension et transportés par celles-ci. Mais même sans polluants, des concentrations trop élevées de matières en suspension peuvent avoir des conséquences néfastes sur les organismes aquatiques. C'est la raison pour laquelle les changements du transport des matières en suspension ont une influence directe sur la qualité de l'eau et sur l'écologie des eaux (Binderheim E., Göggel W. 2007).

Le transport sédimentaire détermine la création de biotopes dans et le long des eaux. Par exemple, les sédiments fins dans le lit majeur constituent un sol nutritif optimal pour les forêts alluviales à bois dur. Les déplacements de bancs de gravier augmentent leur perméabilité

à l'eau et à l'air et créent de nouveaux biotopes aquatiques (OFEV 2017b). Les échanges d'eau entre les eaux souterraines et fluviales sont également influencés par le transport sédimentaire. L'atterrissement ou les dépôts de sédiments fins entraînant l'étanchéification du fond du lit peuvent réduire les échanges d'eau tandis que l'érosion du lit ou le déplacement du fond du lit pendant les crues peuvent les accentuer. Les changements climatiques et les modifications du transport sédimentaire qui en découlent se répercutent de manière tant positive que négative sur la qualité de l'eau et sur l'écologie des eaux (OFEV 2017b).

Autres informations et références sur le thème « Sédiments »

- Benateau S. et al. 2019 : Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.
- Speerli J. et al. 2020 : Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht.

6.9 Écologie des eaux

Les changements climatiques renforcent le stress auquel les écosystèmes aquatiques sont d'ores et déjà exposés. De nombreuses espèces ne peuvent pas s'adapter à l'élévation de la température de l'eau, ou seulement de façon limitée. D'autres transformations telles que l'exondation de tronçons de cours d'eau ou la modification de la stratification lacustre sont susceptibles de perturber l'équilibre des écosystèmes. De plus, la propagation des espèces envahissantes est favorisée.

6.9.1 Conséquences sur les biotopes et l'écosystème

Les conditions météorologiques extrêmes à court terme et les changements climatiques à long terme modifient les habitats et les écosystèmes aquatiques. Par exemple, la connectivité des eaux se détériore et la diversité des milieux naturels a tendance à diminuer.

Les sources, les cours d'eau, les lacs et les zones alluviales ou humides abritent un grand nombre de milieux naturels et d'espèces (OFEV 2017a). À l'échelle mondiale, on observe une perte massive de biodiversité en eau douce (Plateforme intergouvernementale scientifique

et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, IPBES, 2019). Cela s'explique par la destruction des eaux, les corrections de cours d'eau et les endiguements, la pollution des eaux, la surexploitation, la pêche et la chasse d'espèces menacées, la propagation d'espèces envahissantes et les conséquences des changements climatiques. La Suisse connaît des développements comparables.

Les organismes aquatiques sont adaptés à certaines conditions de vie: température et profondeur de l'eau, vitesse d'écoulement, morphologie des eaux, hydrochimie, etc. Des espèces spécialisées ne tolèrent que de faibles variations de leurs conditions de vie et vivent dans des niches écologiques. Les espèces généralistes sont moins exigeantes et peuvent survivre dans une large diversité de milieux naturels. Les organismes aquatiques ici considérés sont des poissons, des macroinvertébrés (c.-à-d. des invertébrés qui mesurent plus d'un millimètre tels que les écrevisses, les insectes et les mollusques), ainsi que le phytoplancton (diatomées, algues ou cyanobactéries) et

le zooplancton (petits organismes d'origine animale flottant dans l'eau).

Modification des conditions de vie locales

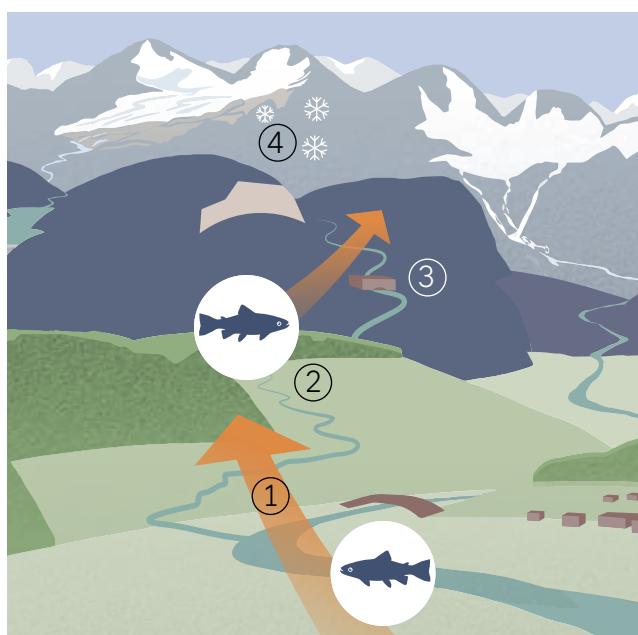
À plusieurs égards, les changements climatiques influencent les milieux naturels et les écosystèmes dans les eaux suisses. Ils bouleversent directement les conditions de vie locales, notamment du fait de l'élévation de la température de l'eau, du changement de la distribution saisonnière des débits ou de la modification du brassage des lacs. Ainsi, ils ôtent aux organismes la possibilité de survivre localement si par exemple les nouvelles conditions locales ne leur offrent plus aucune niche écologique (Benateau S. et al. 2019).

Perturbations accrues

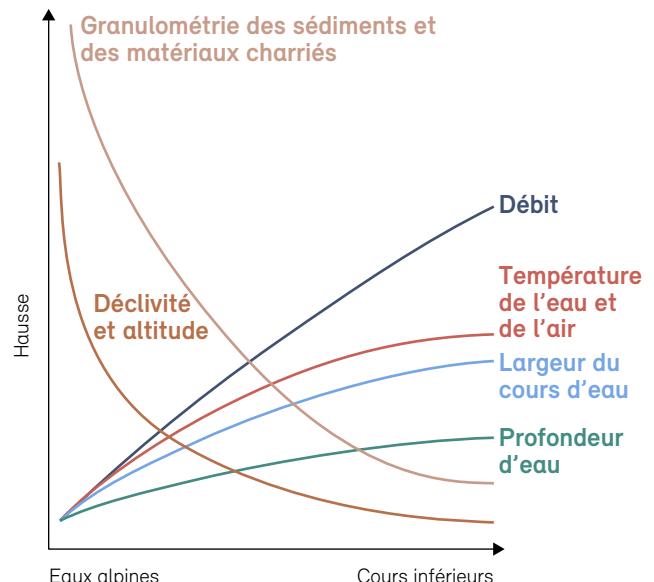
Les changements climatiques peuvent aussi déséquilibrer l'écosystème aquatique en raison de la multiplication des perturbations à court terme comme les vagues de chaleur et la sécheresse. En cas de dépassement de certaines valeurs de tolérance, des changements drastiques

Figure 6-24 : Mise en réseau dans un contexte de conditions de vie modifiées

Pour que le déplacement des espèces et des milieux naturels soit possible, le trajet (1) vers un biotope situé à plus haute altitude (2) doit être surmontable et dépourvu d'obstacles à la migration (3). Le déplacement est limité car les conditions de vie changent considérablement avec l'altitude (4 et droite).



Conséquences sur les conditions de vie



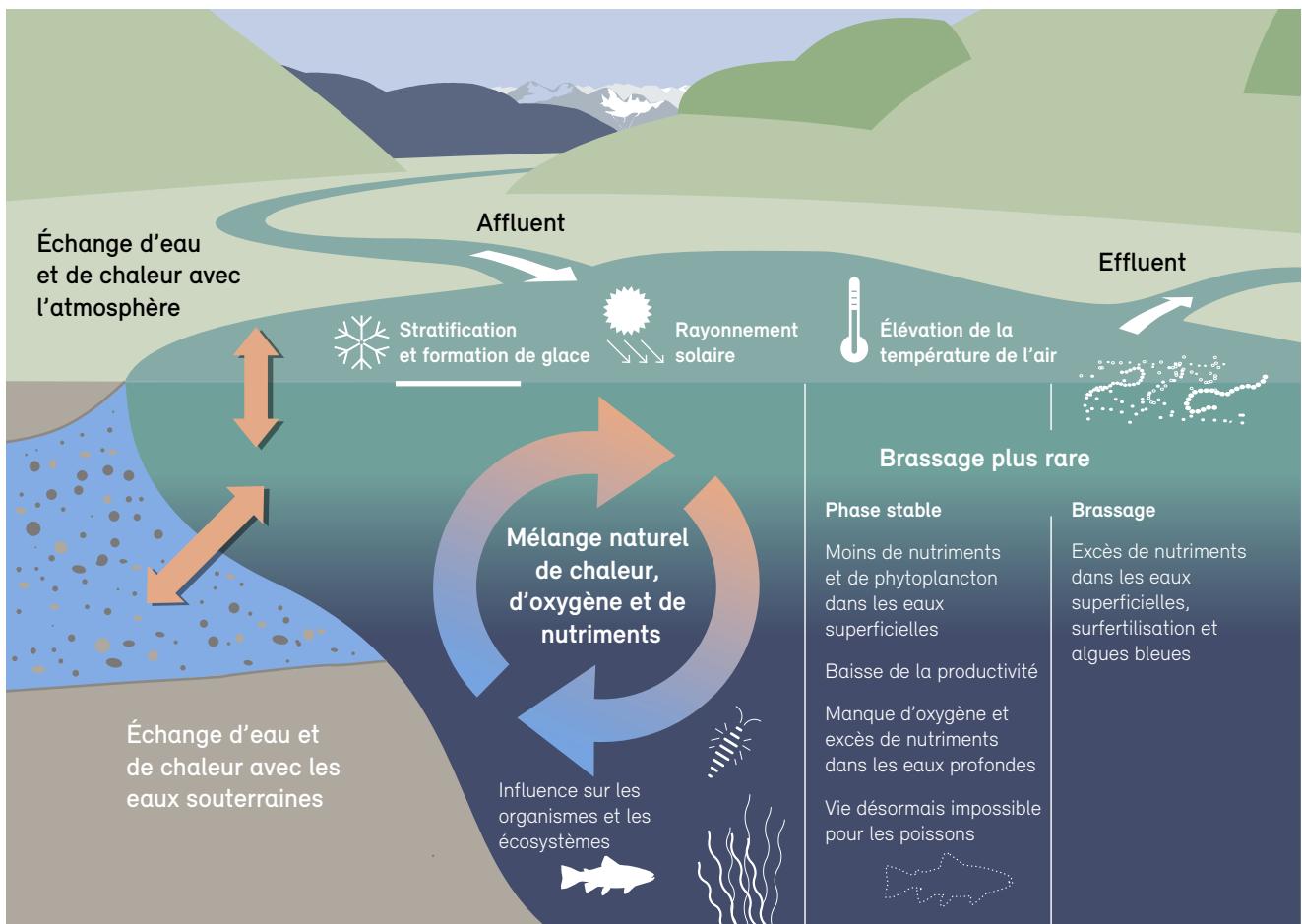
peuvent survenir, parfois rapidement. Ainsi, de nombreux tronçons de cours d'eau ont été exondés durant les périodes de canicule de ces dernières années ou la température de l'eau a dépassé le seuil de tolérance des espèces de poissons cryophiles (voir aussi la Figure 6-26). Pendant l'été 2003, la barre des 25 °C a été franchie pour la première fois dans le Rhin sur une période prolongée, ce qui a causé la mort d'une grande partie de la population d'ombres. De même, durant l'été 2018, de nombreux cantons ont signalé la mort de poissons et d'écrevisses. Comme pour les poissons, l'exondation de tronçons de cours d'eau peut être fatale pour les macroinvertébrés.

Mise en réseau réduite

Les changements climatiques réduisent la mise en réseau écologique le long des cours d'eau, en particulier si les eaux sont dorénavant ou plus fréquemment exondées, ou se réchauffent. Or une bonne mise en réseau est cruciale pour la survie de nombreuses espèces dans le contexte des changements climatiques (Altermatt F. et al. 2013). Par exemple, si les eaux se réchauffent, certaines espèces déplaceront leur aire de répartition dans des eaux plus froides, tendanciellement à plus haute altitude, dans la mesure où les eaux sont mises en réseau. Cela dit, un déplacement n'est possible que si ces milieux natu-

Figure 6-25 : Processus majeurs dans les écosystèmes lacustres pouvant être modifiés par les changements climatiques

Les changements du brassage des lacs (brassage moins fréquent, moins profond, voire absent) sont particulièrement lourds de conséquences pour les écosystèmes lacustres.



rels satisfont non seulement aux exigences thermiques, mais aussi à la somme de toutes les autres exigences en matière d'habitat (Figure 6-24). Ainsi, les ombres qui préfèrent le froid ne peuvent pas déplacer n'importe où leur milieu naturel en altitude, car elles ne sont pas adaptées aux conditions d'écoulement des torrents rapides. De même, les poissons des lacs ne peuvent rejoindre les eaux profondes plus froides qu'à certaines conditions, par exemple parce que la quantité de nourriture y est insuffisante. Même si une espèce dispose d'un biotope alternatif, celui-ci n'est pas toujours accessible. D'une part, le trajet peut être trop long et éprouvant et, d'autre part, des obstacles à la migration naturels et artificiels peuvent entraver le passage (point 7.3.3).

Modification de la phénologie

Les changements climatiques modifient considérablement la phénologie, c'est-à-dire l'apparition ponctuelle de certains processus de développement au cours de l'année (Altermatt F. 2010). Par exemple, avec le réchauffement, on observe dès aujourd'hui une éclosion des insectes aquatiques et une floraison printanière du phytoplancton et du zooplancton plus précoces (Everall N.C. et al. 2015). Mais cela peut perturber les interactions entre les différentes espèces au sein d'un écosystème. Si des animaux situés à des échelons plus élevés de la chaîne alimentaire (poissons, oiseaux et mammifères) ne peuvent pas adapter à temps leurs processus de développement à la nouvelle offre alimentaire, ils ne trouveront pas la nourriture nécessaire pour élever leurs petits. De tels effets des changements climatiques à plusieurs niveaux de la pyramide alimentaire sont complexes et se répercutent sur des échelles temporelles à plus long terme (Van Asch M. et al. 2013).

Conséquences pour les écosystèmes des cours d'eau

Sous l'effet de l'élévation de la température des eaux et de la quantité réduite d'eau de fonte, la diversité des conditions de vie diminue de manière générale dans les cours d'eau alpins. Elle peut aussi augmenter localement, par exemple aux anciens emplacements des glaciers (Beneau S. et al. 2019). L'harmonisation des milieux naturels permet éventuellement aux espèces généralistes à basse altitude de coloniser ces eaux, alors que les espèces spécialisées qui y vivaient jusqu'à présent sont évincées. Localement, cela peut entraîner un accroisse-

ment du nombre d'espèces, mais, à l'échelle régionale, on s'attend à un appauvrissement de la biodiversité et à une homogénéisation des biotopes du fait de la disparition de nombreuses niches écologiques et espèces spécialisées (Brown L.E. et al. 2007). Toutefois, si les glaciers continuent de fondre sous l'effet des changements climatiques et que les tronçons des cours d'eau alpins s'assèchent plus fréquemment, les espèces généralistes seront elles aussi atteintes (Rolls R.J. et al. 2017).

À basse altitude, il faut opérer une distinction entre les petits et les grands cours d'eau. Les petits cours d'eau devraient être plus souvent touchés par l'exondation estivale et, de manière générale, par la perte de biodiversité (Soria M. et al. 2017). On ignore à ce jour l'évolution de la biodiversité dans les grands cours d'eau car les conséquences sur les différentes espèces sont très variables.

Conséquences pour l'écosystème lacustre

L'écosystème lacustre est fortement caractérisé par la stratification saisonnière de l'eau en fonction de la température. Dans certains lacs, les changements climatiques stabilisent cette stratification et réduit le brassage saisonnier (point 6.7.2), limitant ainsi les échanges de nutriments et d'oxygène entre les eaux profondes et superficielles. Comme on a déjà pu l'observer dans les grands lacs (lac Léman, lac de Constance, lac de Zurich, lac de Lugano, lac Majeur), la concentration en oxygène peut donc chuter dans les eaux profondes. Dans les cas extrêmes, les organismes comme les poissons ne peuvent plus y vivre. Le manque de brassage enrichit les eaux profondes en nutriments qui ne sont plus transférés aux eaux superficielles. Ainsi, dans les lacs dont les eaux superficielles sont pauvres en éléments nutritifs, la croissance du phytoplancton et du zooplancton peut être affectée.

Si un brassage intervient après une stagnation prolongée, les eaux profondes riches en nutriments sont rapidement ramenées en surface, ce qui favorise fortement la croissance du phytoplancton et du zooplancton. Les modifications, induites par le climat, du bilan nutritif, de la teneur en oxygène et du plancton ont des conséquences sur toute la chaîne alimentaire et sur l'écologie lacustre. Les cyanobactéries, appelées familièrement algues bleues, font partie du phytoplancton et profitent notamment de la température élevée de l'eau et des eaux riches en nutri-

ments. Elles peuvent proliférer en cas d'excès de nutriments dans l'eau et des cyanotoxines parfois toxiques peuvent faire leur apparition à la fin de l'été, comme en 2020 dans le lac de Neuchâtel, ce qui peut alors affecter le réseau alimentaire de l'écosystème.

6.9.2 Conséquences sur les différentes espèces et sur la biodiversité

Les changements climatiques qui progressent rendent toujours plus difficile la survie des espèces spécialisées cryophiles. Les grands gagnants sont les espèces généralistes thermophiles. Dans l'ensemble, la biodiversité est mise de plus en plus sous pression.

Les changements climatiques provoquent l'homogénéisation des milieux naturels dans les cours d'eau et les lacs (Benateau S. et al. 2019), l'extinction d'espèces et une perte de diversité génétique au sein des espèces (Bálint M. et al. 2011). Les conséquences sur les espèces sont présentées ci-après à l'aide de quelques exemples, comme les impacts sur la biodiversité.

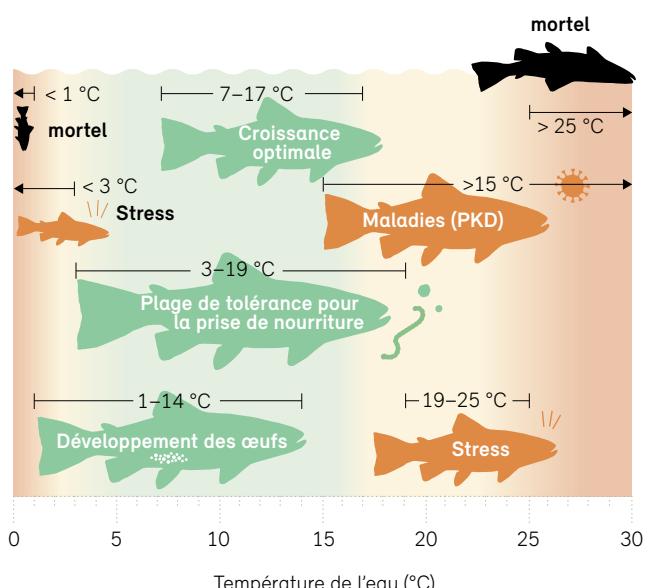
Exemple des truites de rivière

On voit sur les truites de rivière comment les changements climatiques impactent les poissons tributaires des eaux froides et riches en oxygène (Hari R.E. et al. 2006). Ces dernières années, leur population a connu un net recul en Suisse (Borsuk M.E. et al. 2006). Chez les organismes aquatiques poikilothermes comme les truites de rivière, la température de l'eau détermine non seulement leur métabolisme, mais aussi leur comportement en termes de migration, d'alimentation et d'accouplement. Idéalement, elle se situe entre 8 et 19 °C pour l'ensemble du cycle de vie des truites, qui ne peuvent pas survivre au-delà de 25 °C (Burkhardt-Holm P. et al. 2002). La Figure 6-26 montre les conditions thermiques optimales et les marges de tolérance pour les truites de rivière selon leurs activités et les stades de leur vie. Si une population vit déjà dans des eaux dont la température est proche de sa limite de tolérance, le moindre réchauffement supplémentaire peut entraîner son extinction locale. En outre, de nouveaux rapports de concurrence émergent avec l'apparition d'espèces thermophiles telles que le chevaine. Le réchauffement de l'eau est également à l'origine de maladies parasitaires comme la PKD qui peut aggraver la mortalité des truites si l'eau est à plus de 15 °C sur une période prolongée. Comme indi-

qué au point 6.7, de telles températures critiques ont été de plus en plus fréquentes ces dernières décennies et ont concerné un nombre croissant d'eaux.

Figure 6-26 : Exigences thermiques des truites de rivière

Le graphique montre les plages de température auxquelles les truites de rivière peuvent se développer de manière optimale (vert), sont soumises à un stress (orange) ou leur survie est menacée (noir). Le réchauffement de l'eau soumet la truite à une pression croissante : il génère du stress, restreint l'activité et favorise les maladies.



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

Des crues plus fréquentes et plus importantes en hiver et au printemps détériorent les conditions de reproduction des truites de rivière. De fin octobre à début janvier, elles enfouissent leur frai dans les frayères situées dans le lit des cours d'eau. Les œufs et les poissons nouvellement éclos y passent jusqu'à un semestre. C'est surtout dans les cours d'eau aménagés que les frayères peuvent être endommagées, et le frai déposé ou les alevins, emportés en raison des vitesses d'écoulement plus élevées lors des crues. De même, les matières en suspension qui sont plus concentrées avec les crues peuvent avoir des conséquences néfastes sur la population piscicole, en particulier sur les alevins et les poissons juvéniles (Burkhardt-Holm P. 2009). Aussi est-il important d'aménager les cours d'eau de manière aussi proche que possible de l'état naturel afin de créer des zones où la vitesse

d'écoulement est plus faible. La mise en réseau des eaux latérales doit elle aussi garantir que les truites de rivières puissent les coloniser pour y pondre (Junker J. et al. 2015). Les changements climatiques font que la période de développement des œufs est de moins en moins adaptée au régime d'écoulement des eaux.

L'exemple des truites de rivière montre clairement à quel point les poissons sont affectés par les changements climatiques. En effet, non seulement ils sont à l'origine d'un réchauffement, mais ils influencent aussi les conditions d'écoulement, l'offre de nourriture, le transport de sédiments, la structure hydrographique et les frayères, tout en aggravant les menaces que représentent les espèces concurrentes et les nouvelles maladies. Tous ces effets pèsent lourdement sur les organismes aquatiques. La future protection des eaux peut être la meilleure solu-

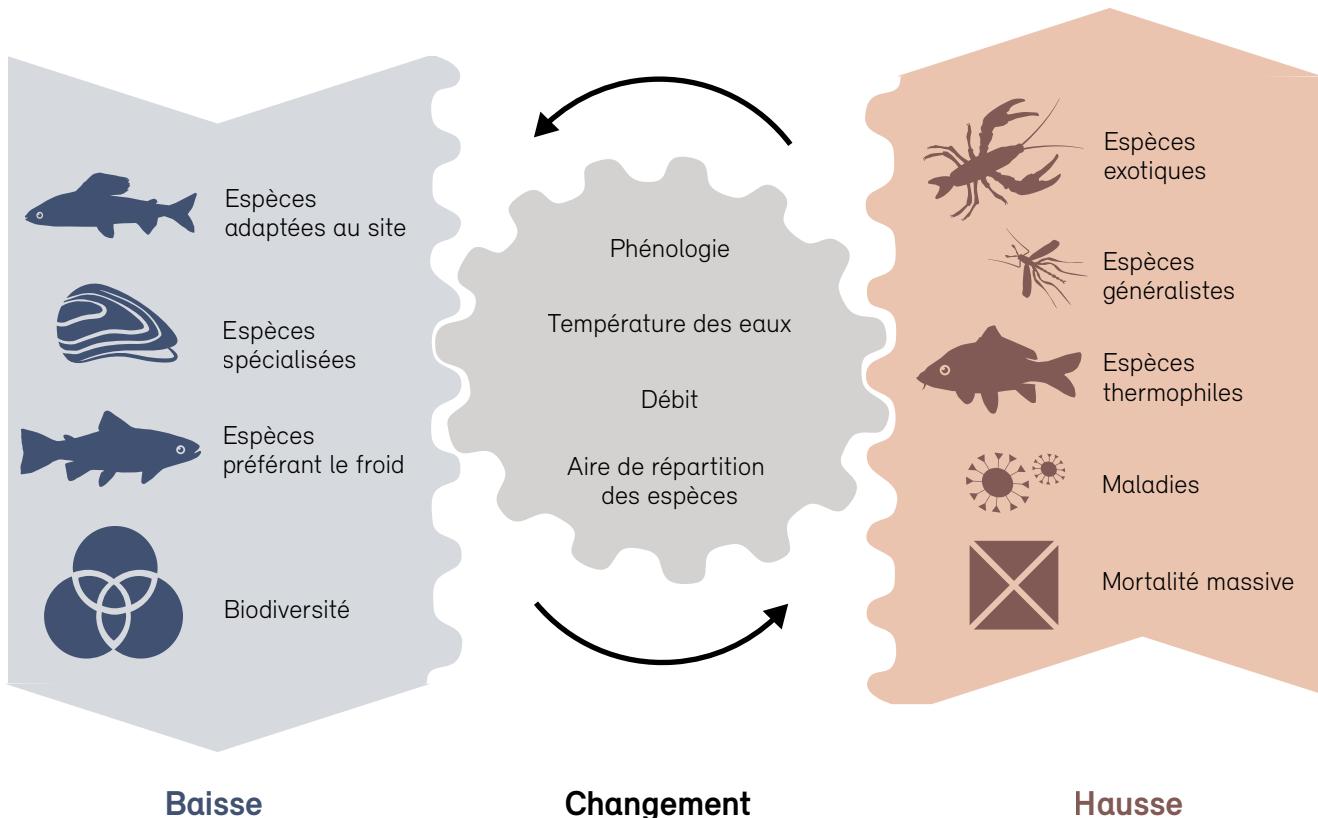
tion à apporter, avec l'allègement des autres pressions et la préservation ou la restauration des eaux naturelles.

Exemple des macroinvertébrés

Les macroinvertébrés réagissent très vite aux changements climatiques et sont fortement influencés par la température de l'eau notamment (Rüegg J., Robinson C.T. 2004). C'est pourquoi, dans ce groupe, des modifications importantes sont attendues concernant la diversité et la composition des espèces (Jacobsen D. et al. 2014). Dans les eaux stagnantes suisses, le réchauffement menace d'extinction par exemple 11 % des coléoptères aquatiques et 33 % des libellules, tandis que 63 % d'entre elles y trouvent un bienfait (Rosset V., Oertli B. 2011). Néanmoins, même si une espèce résiste aux changements climatiques, elle présentera une diversité génétique beaucoup plus faible. Ainsi, d'après une

Figure 6-27 : Gagnants et perdants des changements climatiques

Les changements climatiques modifient à plusieurs titres les écosystèmes, affectent les organismes aquatiques et entraînent une nouvelle composition des espèces.



étude (Bálint M. et al. 2011), certes 67 % des espèces de macroinvertébrés étudiées survivent, mais cela ne représente que 16 à 35 % des variations génétiques au sein des espèces. Les espèces gagnantes vivent surtout à basse altitude et sont capables d'étendre leur habitat à de plus hautes altitudes, alors que les espèces alpines n'ont pas cette possibilité, ce qui les affecte particulièrement. Il faut noter que même les autres espèces préférant le froid, à l'instar de nombreux plécoptères, sont menacées par le réchauffement. Chez le gammaré commun, très répandu en Suisse, on observe une sensibilité accrue aux pesticides lorsque la température de l'eau est plus élevée (Russo R. et al. 2018).

Appauvrissement de la biodiversité

Même si de nouveaux milieux naturels précieux apparaissent localement, par exemple dans les marges proglaciaires du fait du retrait de la masse glaciaire, les biotopes vont s'uniformiser de manière générale compte tenu de la disparition des niches écologiques. Les espèces cryophiles très spécialisées connaissent de grandes difficultés, contrairement aux espèces thermophiles généralistes (Figure 6-27). Du fait des changements climatiques, l'habitat des espèces est déplacé. Certaines réussissent à s'établir dans des régions suisses situées à plus haute altitude, tandis que d'autres n'y parviennent pas. De nouvelles espèces non indigènes, voire envahissantes, arrivent sur le territoire helvétique. Ces espèces étrangères à la région sont susceptibles d'entrer en concurrence avec les espèces adaptées au site et d'accentuer encore la pression qui pèse sur celles-ci. La diversité génétique au sein des espèces va reculer. Cela est critique car c'est aussi la capacité d'adaptation aux nouvelles conditions qui peut être réduite (Bálint M. et al. 2011). La modification à long terme des milieux naturels associée aux perturbations plus fréquentes causées par des événements extrêmes va se traduire par une augmentation des maladies et des extinctions de masse. Alors que jusqu'à présent, les populations étaient généralement capables de se remettre des phénomènes extrêmes, ce rétablissement devient de plus en plus compliqué avec la progression des changements climatiques, jusqu'au moment où un seuil est franchi, entraînant des bouleversements irréversibles allant jusqu'à l'extinction d'une espèce (Harris R.M.B. et al. 2018). Le fonctionnement d'un écosystème repose sur des interdépendances com-

plexes entre les espèces. C'est pourquoi les changements subis par une espèce peuvent affaiblir la stabilité et la résilience de tout un écosystème (Benateau S. et al. 2019). Tous ces facteurs appauvriront encore plus la biodiversité (Urban M.C. et al. 2016).

Autres informations et références sur le thème « Écologie des eaux »

- Benateau S. et al. 2019 : Climate change and freshwater ecosystems : Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report.

7 Gestion des eaux

Les résultats du projet Hydro-CH2018 montrent que les changements climatiques accroissent la pression pesant sur la gestion des eaux suisses. Les trois aspects de ce domaine, à savoir l'utilisation de l'eau, la protection contre les crues et la protection des eaux, sont fortement affectés. Les mesures déjà mises en œuvre aident à axer la gestion des eaux sur le climat futur, mais elles doivent être suivies d'autres adaptations aux changements climatiques.

7.1 Utilisation de l'eau

L'eau est l'une des principales ressources pour la vie et l'économie, que ce soit sous forme d'eau potable ou à des fins d'irrigation, de production d'énergie industrielle. Les changements climatiques vont entraîner des modifications tant au niveau du volume d'eau global disponible que des besoins en eau pour les différents usages.

7.1.1 Approvisionnement en eau potable

L'eau potable provient essentiellement des eaux souterraines, déjà sous pression en raison de l'urbanisation et des apports diffus de substances, en particulier sur le Plateau et dans les grandes vallées alpines. La fréquence accrue et l'allongement des périodes de sécheresse sont sources de défis supplémentaires pour l'approvisionnement en eau.

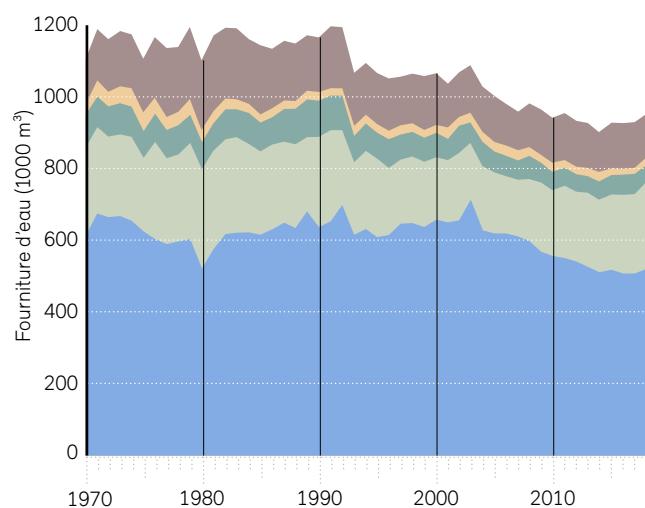
Avec pas moins de 953 millions de mètres cubes (chiffres 2018), le réseau d'approvisionnement en eau potable fournit la majeure partie de l'eau destinée aux ménages et une partie de celle allouée à l'industrie et à l'artisanat. Légèrement en recul depuis les années 1990, la consommation est repartie à la hausse ces dernières années (Figure 7-1). L'eau potable est prélevée à près de 80% dans les eaux souterraines (y compris les eaux de sources) au moyen de quelque 18 000 captages d'eau souterraine d'intérêt public, c'est-à-dire de captages utilisés par les entreprises publiques d'approvisionnement en eau ou les entreprises et les commerces du secteur alimentaire. La plus grande partie de cette eau peut être injectée dans le réseau d'eau potable telle quelle ou au terme de procédés de traitement simples. Les 20% res-

tants sont prélevés dans les lacs et doivent être traités (SSIGE 2020).

Figure 7-1 : Évolution de la fourniture d'eau en Suisse de 1970 à 2018

Le graphique présente l'évolution dans le temps de chaque type d'utilisation de l'eau. En léger recul depuis les années 1990, la consommation a de nouveau augmenté ces dernières années.

 Pertes Consommation propre Services publics et fontaines	 Industrie et artisanat Ménages et petit artisanat
---	--



Source: Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE)

Impacts de la sécheresse

Avec les changements climatiques, le débit des cours d'eau va fortement diminuer en été et à l'automne, en particulier sur le Plateau et dans le Jura (point 6.2, Figure 6-3), et les périodes de sécheresse vont se multiplier. Ces évolutions se répercutent sur les eaux souterraines communiquant avec les cours d'eau et peuvent donc réduire les quantités d'eaux souterraines disponibles (point 6.4). Durant les sécheresses des années 2015 et 2018, les niveaux des eaux souterraines sont restés pendant des mois inférieurs à la moyenne dans environ 60% des stations de mesure NAQUA. Après la sécheresse de 2003, les réserves d'eaux souterraines, par exemple dans le Haut-Emmental et dans le Bas Wiggertal, ne se sont reconstituées que lente-

ment, car l'année 2004 a également été marquée par de faibles précipitations (Hunkeler D. et al. 2014). L'approvisionnement en eau potable doit donc lui aussi s'adapter temporairement à des ressources réduites. Au cours des précédentes sécheresses, il est arrivé que seule une quantité d'eau réduite soit disponible pour l'alimentation en eau potable dans les régions concernées. Toutefois, dans la mesure où la Suisse dispose de ressources en eaux souterraines suffisantes malgré les changements climatiques, les principaux défis résident dans la protection des eaux souterraines nécessaires à l'approvisionnement en eau potable et dans la distribution de celle-ci.

Intensification des conflits d'utilisation

Il est possible que les besoins des différents utilisateurs d'eau, par exemple les besoins en eau d'usage pour l'irrigation des terres agricoles, s'accentuent du fait des changements climatiques. Or, si l'eau d'usage provient des eaux souterraines, cela risque d'entraîner notamment une surexploitation des ressources souterraines locales. Afin d'éviter des conflits de ce type, il est essentiel d'identifier les ressources et les captages d'eaux souterraines indispensables à l'approvisionnement en eau potable, et de veiller à ce que leur exploitation soit garantie durablement, y compris en période de sécheresse.

De plus, la transition énergétique entraîne le développement d'autres usages de l'eau, par exemple comme eau de refroidissement ou source de chaleur pour des systèmes de chauffage climatiquement neutres n'émettant pas de CO₂. Or, les forages nécessaires aux installations puisant la chaleur dans l'eau souterraine peuvent présenter un danger de pollution des eaux souterraines. Ces forages devraient en principe être limités à une poignée de sites pourvus de grandes installations exploitées et entretenues par des professionnels.

Atteintes aux eaux souterraines dues aux apports diffus de polluants

L'un des grands défis en matière d'approvisionnement en eau est la mise à disposition d'eau potable de qualité suffisante. Dans environ 15 % des stations de mesure NAQUA et 40 % des stations de mesure situées dans les bassins versants à dominante agricole, les valeurs de nitrate dépassent la valeur limite de 25 mg/l fixée pour les eaux souterraines dans l'ordonnance sur la protection des eaux

(OEaux; OFEV 2019a). On observe des produits de dégradation (métabolites) ou des résidus de produits phytosanitaires dans plus de la moitié des stations de mesure des eaux souterraines. La valeur limite de 0,1 µg/l définie par l'OEaux est dépassée dans 2 % des stations pour les principes actifs phytosanitaires, et dans 20 % des stations pour les métabolites, auxquels cette limite ne s'applique que partiellement. Concernant les métabolites du fongicide chlorothalonil, l'OFEV estime même que plus de la moitié environ des stations de mesure NAQUA du Plateau, affichent des valeurs supérieures à la limite⁴. La présence de polluants dans les eaux souterraines est problématique pour les distributeurs lorsqu'ils ne disposent pas de suffisamment de ressources de remplacement ou de ressources non polluées après mélange pour pouvoir distribuer de l'eau potable d'une qualité conforme à la législation sur les denrées alimentaires. Ce phénomène s'accentue lors des périodes de sécheresse, qui vont s'accroître en raison des changements climatiques.

Aggravation des problèmes de qualité du fait des changements climatiques

Dans les zones d'agriculture intensive, l'eau potable doit être prélevée de plus en plus dans des captages proches de grands cours d'eau pour garantir une qualité suffisante. L'eau souterraine potentiellement polluée y est en effet diluée grâce à l'infiltration d'autres eaux. Mais si, en période de sécheresse, le débit des cours d'eau diminue, l'infiltration dans les eaux souterraines et la dilution qui en découle diminuent à leur tour. Ces captages d'eau potable ne peuvent alors plus être utilisés en raison de leur qualité insuffisante, justement au moment où l'eau manque le plus.

En cas d'étiage, la part des eaux usées épurées des stations d'épuration augmente dans les cours d'eau. L'infiltration de cette eau superficielle peut accroître les concentrations de micropolluants et de germes dans les eaux souterraines. Or, les changements climatiques vont provoquer des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes : indirectement, ils vont donc avoir une influence négative sur la qualité des eaux souterraines et des captages d'eau potable proches des cours d'eau à forte proportion d'eaux usées épurées.

4 www.bafu.admin.ch/chlorothalonil

Conséquences possibles pour la production d'eau potable à partir des eaux superficielles

Pour les zones à forte concentration urbaine, les lacs sont d'importantes sources d'eau brute, souvent de bonne qualité et présente en quantité suffisante. C'est le cas notamment du lac de Constance ou du lac de Zurich. Mais les changements climatiques risquent de favoriser l'apparition d'organismes non indigènes ou rares, sans compter d'autres effets néfastes tels que le manque d'oxygène en profondeur. On peut citer par exemple les cyanobactéries toxiques et leurs composants (point 6.9.1) ou les moules Quagga, désormais établie dans le lac de Constance, qui s'accrochent aux installations de filtrage et aux canalisations d'eau (Figure 7-2). Les procédés de traitement de l'eau potable permettent généralement de retenir ces organismes et d'éliminer les polluants. Mais il faut observer attentivement l'évolution de la situation afin d'adapter si besoin les systèmes de traitement.

En l'absence de mesures spécifiques, l'augmentation des précipitations intenses peut conduire plus fréquemment à ce que des eaux usées non épurées provenant des déversements d'eaux mélangées parviennent dans les cours d'eau. De plus, la concentration de particules en suspension dans l'eau peut s'accroître du fait de l'érosion, du lessivage et des processus de charriage. À l'avenir, l'utilisation indirecte de l'eau des cours d'eau pour pro-

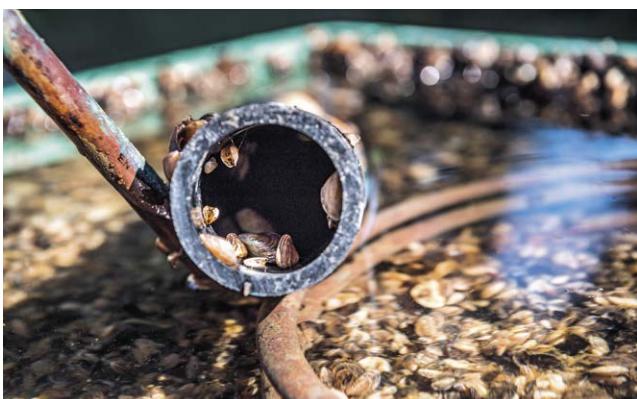
duire de l'eau potable (p. ex. en cas d'alimentation des eaux souterraines à partir des cours d'eau ou d'utilisation de filtres de rive) pourrait coûter plus cher si les installations de traitement des eaux fonctionnent davantage dans des conditions difficiles ou si elles doivent être adaptées à de nouvelles conditions plus extrêmes. Les procédés de désinfection, par exemple, peuvent être mis en œuvre de manière sûre et efficace uniquement jusqu'à une certaine concentration de particules. Des stratégies pour maîtriser ces effets sont déjà étudiées et prises en compte dans la région de Bâle, fortement dépendante de l'eau du Rhin.

Distribution de l'eau

Les changements climatiques peuvent également avoir des conséquences sur la distribution de l'eau: en effet, durant les vagues de chaleur, l'eau potable risque de se réchauffer considérablement lors de son trajet entre la centrale hydroélectrique et les foyers desservis, en particulier si les canalisations sont exposées. Ce réchauffement favorise l'apparition de problèmes microbiologiques, ce qui peut faire grimper le coût de la maintenance préventive des canalisations ou des mesures de traitement et de désinfection. Cet effet est encore accentué par l'augmentation progressive de la température des eaux souterraines et superficielles utilisées, induite elle aussi par les changements climatiques.

Figure 7-2 : Organismes problématiques pour l'approvisionnement en eau potable

Dans les lacs, les algues bleues toxiques et les moules Quagga peuvent être problématiques pour la production d'eau potable et accroître le coût du traitement de l'eau et de l'entretien des infrastructures. Les moules Quagga, dont la taille peut atteindre 40 mm, sont une espèce envahissante et se fixent partout.



Possibilités d'adaptation

Dans l'ensemble, les entreprises d'approvisionnement en eau étaient bien préparées aux périodes de sécheresse des dernières années. Les problèmes d'approvisionnement ont jusqu'à présent pu être limités grâce à la livraison d'eau par des installations voisines et à un approvisionnement provenant de ressources en eau potable indépendantes du point de vue hydrologique (approche dite du «deuxième pilier»). Mais les bas niveaux des eaux souterraines ont conduit, pendant les années de sécheresse comme 2018, à de nombreux appels à la population pour économiser l'eau, parfois à titre préventif. Plusieurs entreprises d'approvisionnement en eau ont été confrontées à des pénuries, poussant certaines d'entre elles à prendre des mesures d'urgence dans six cantons (OFEV 2019b).

À l'avenir, la meilleure solution pour devancer ce type de difficultés consistera à planifier l'approvisionnement en eau à l'échelle régionale et à renforcer l'interconnexion

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Amélioration de la résilience de l'approvisionnement en eau potable face aux situations de pénurie dues à la sécheresse : planifications régionales de l'approvisionnement en eau, inventaire des captages, identification des captages indispensables à l'approvisionnement en eau, interconnexion des réseaux d'approvisionnement en eau, production d'eau à partir de deux piliers indépendants sur le plan hydrologique, accroissement des capacités de stockage de l'eau, protection sur le long terme des captages d'eau souterraine (planification de la protection des eaux).
- Séparation entre les utilisations d'eau d'usage (p. ex. eau destinée à l'irrigation des terres agricoles) et l'approvisionnement en eau potable, identification des besoins en eau d'usage et mesures d'économie d'eau dans ce domaine.
- Amélioration des bases hydrogéologiques : modèles de calcul et de prévision pour les aquifères importants, vulnérabilité des ressources d'eaux souterraines face à la sécheresse et aux apports de polluants, suivi des variations de débit des sources.

des systèmes voisins. En principe, l'eau de chaque système d'approvisionnement devrait provenir d'au moins deux régions indépendantes sur le plan hydrologique (OFEV 2014). Il est également essentiel de bien protéger les captages d'eaux souterraines afin de garantir durablement la qualité de ces ressources pour la production d'eau potable (point 7.3.4). Il s'agit ainsi d'éviter que le volume d'eau disponible diminue encore du fait des apports de polluants et que le coût de traitement de l'eau augmente.

Autres informations et références sur le thème

«Approvisionnement en eau potable»

- Lanz K. (éd.) 2020 : «Trinkwasserversorgung», *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.2 Irrigation des terres agricoles et eau d'usage pour l'industrie et l'artisanat

Les changements climatiques ont de fortes répercussions sur l'irrigation agricole. Si, jusqu'à présent, relativement peu de surfaces étaient irriguées en Suisse, la situation devrait changer avec la hausse des températures et la multiplication des périodes de sécheresse en été, mais aussi le développement de la culture de légumes et d'autres cultures spéciales. Les besoins en eau de l'industrie et de l'artisanat, en revanche, sont peu affectés par l'évolution du climat.

Outre l'approvisionnement en eau potable, nos eaux sont utilisées principalement pour l'agriculture, ainsi que pour l'industrie et l'artisanat, par le biais d'un auto-approvisionnement reposant sur un système de concessions. Il manque des chiffres très récents sur les volumes consommés, la dernière estimation datant du rapport de la SSIGE (SSIGE 2015). En 2009, sur les 1200 millions de mètres cubes d'eau prélevés par des systèmes d'auto-approvisionnement sous concession, la moitié environ provenait des eaux superficielles (Freiburghaus M. 2009). Dans l'industrie et l'artisanat, l'eau d'usage sert avant tout au refroidissement, au nettoyage et à d'autres processus ne requérant pas une eau d'aussi bonne qualité que l'eau potable. Dans l'agriculture, l'eau de source alimentant les abreuvoirs dans les étables et les pâturages représente une part importante de la consommation. Lors des périodes de sécheresse, on ne constate généralement pas d'accroissement des besoins en eau d'usage dans l'arti-

sanat et l'industrie, même si l'amenuisement du volume d'eau disponible peut entraîner des restrictions au niveau de l'approvisionnement.

Les changements climatiques influent fortement sur l'irrigation des terres agricoles. En Suisse, au cours d'une année normale, plus de 95 % des surfaces utiles agricoles n'ont pas besoin d'irrigation artificielle. Selon les recensements des exploitations agricoles des années 2010, 2013 et 2016, seuls 34 000 ha sont régulièrement irrigués en Suisse, soit quelque 2 % de la surface agricole du pays (OFS 2016).

La grande majorité des exploitations n'ont pas d'équipements ou du moins pas d'installations fixes permettant une irrigation à grande échelle. Ce sont essentiellement les cultures spéciales telles que les légumes, les fruits et les baies qui sont régulièrement arrosées. Les grandes cultures comme les pommes de terre, les betteraves sucrières et le maïs nécessitent aussi une irrigation. Un tiers des surfaces irriguées sont des prairies artificielles et des herbages permanents, dont la grande partie est encore irriguée de manière traditionnelle dans les vallées sèches intra-alpines (OFS 2016). Ce sont les conditions bioclimatiques et surtout socio-économiques qui déterminent s'il doit y avoir irrigation, et si oui, sous quelle forme. Ainsi, ce n'est pas parce qu'une culture a besoin d'être irriguée qu'il est utile de le faire⁵. Le caractère rentable des mesures d'irrigation dépend notamment de la disponibilité des ressources en eau. Là où l'eau est disponible de manière fiable et à moindre coût, l'irrigation apparaît davantage comme une mesure permettant de stabiliser les rendements que dans les régions où la disponibilité de l'eau est limitée. Mais il est également important que les coûts effectifs soient répercutés sur ceux qui en sont à l'origine, c'est-à-dire que la vérité des coûts soit assurée.

Figure 7-3 : Systèmes d'irrigation

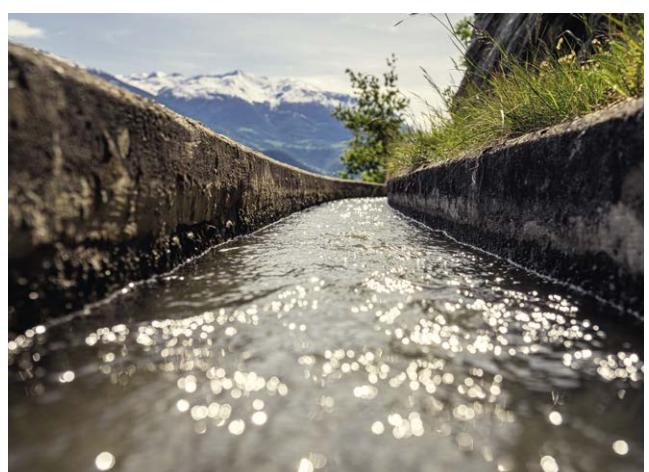
Différents types d'irrigation : irrigation par aspersion (haut), irrigation par goutte-à-goutte permettant d'économiser l'eau (milieu), et irrigation traditionnelle des prairies (bas)



Crédit photographique : © lysala, stock.adobe.com



Crédit photographique : © lavizzara, stock.adobe.com



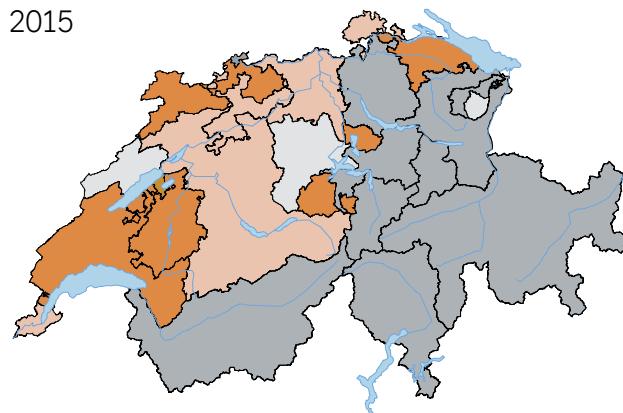
Crédit photographique : © Rotscher, stock.adobe.com

⁵ On considère qu'une culture a besoin d'être irriguée lorsque le volume naturel des précipitations et la capacité du sol à retenir l'eau ne sont pas suffisants pour assurer une bonne croissance des plantes, et qu'il est utile d'irriguer si le gain de rendement et/ou de qualité est supérieur au coût de l'irrigation.

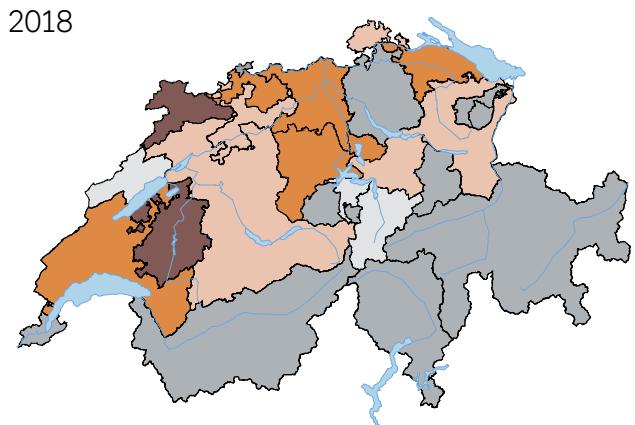
Figure 7-4: Restrictions applicables aux prélèvements d'eau*Interdictions et restrictions prélevement de l'eau dans les eaux superficielles pour l'irrigation agricole aux seconds semestres de 2015 et 2018*

- | | |
|---|--|
| ■ Interdiction générale
■ Interdiction partielle
■ Interdiction avec dérogations | Aucune restriction connue
 Aucune donnée |
|---|--|

2015



2018



Source: OFEV 2016 et OFEV 2019b

Fréquence accrue des restrictions pour les prélèvements d'eau destinés à l'irrigation

La consommation d'eau de l'agriculture dépend fortement des conditions météorologiques (Hofer S. et al. 2017). De manière générale, la hausse des températures accroît l'évaporation potentielle du sol et des plantes et, par conséquent, le besoin d'irrigation des cultures. Parallèlement, du fait des changements climatiques, le volume d'eau disponible durant les mois d'été va baisser dans d'importantes zones de culture du Plateau. Les précipitations et les débits estivaux vont diminuer et les périodes de sécheresse devenir plus fréquentes et plus intenses. Lors des années de sécheresse 2015 et 2018, les prélèvements d'eau ont dû être restreints en de nombreux endroits afin de garantir les débits résiduels minimaux requis pour la protection des organismes aquatiques (Figure 7-4). Ces restrictions concernaient principalement les petits et moyens cours d'eau, qui représentent environ 80 % de l'ensemble du réseau hydrographique (OFEV 2009) : en cas de situation extrême, une grande partie de ce réseau ne constitue donc déjà plus une ressource fiable pour l'irrigation.

Si les systèmes de culture ne sont pas adaptés, les scénarios pour la fin du siècle indiquent une hausse de la demande d'irrigation de 10 à 20 % avec des mesures de

protection du climat (scénario RCP2.6) et de 40 à 50 % sans mesures de protection du climat (scénario RCP8.5) (Hirschi M. et al. 2020, Holzkämper A. 2020). De plus, si des surfaces plus importantes sont à l'avenir dédiées à des cultures très consommatrices d'eau, la hausse de la demande d'irrigation sera encore plus forte.

Mesures d'adaptation complémentaires

Afin de garantir une utilisation durable des ressources en eau, celles-ci doivent être planifiées et gérées à l'échelon régional. Il est essentiel de recenser les différentes utilisations et d'éviter la surexploitation de ces ressources. Par ailleurs, pour empêcher l'apparition de graves conflits, il faut également définir les utilisations prioritaires de manière à pouvoir procéder aux restrictions requises en cas de pénurie persistante.

Dans les régions agricoles particulièrement touchées par la sécheresse, des mesures préventives devront être mises en œuvre pour réduire au minimum, lors des années extrêmes, les conflits entre l'irrigation et l'écologie des eaux, mais aussi, entre les autres utilisations de l'eau, en particulier l'approvisionnement en eau potable. Il faudra alors veiller à garantir le principe de la vérité des coûts. Parmi les mesures envisageables, il est possible d'adapter l'exploitation (choix des cultures, des variétés et du

site, travail du sol, p. ex.) ou l'infrastructure (p. ex. conduites d'alimentation) afin de profiter des grands réservoirs (lacs, grands cours d'eau) pour l'irrigation. Nombreux sont ceux qui réfléchissent actuellement à des systèmes d'irrigation régionaux qui acheminent de l'eau supplémentaire depuis des lacs, de grandes rivières ou des lacs d'accumulation. Une autre solution envisagée est l'irrigation à partir des eaux souterraines ou des réseaux publics de distribution d'eau, mais celle-ci ne doit en aucun cas conduire à une surexploitation des ressources ou à des problèmes d'approvisionnement en eau potable. De petits réservoirs d'eau locaux sur les exploitations agricoles constituent une troisième piste. Des coopératives d'irrigation se forment pour faire face au coût élevé des investissements et des infrastructures nécessaires pour acheminer l'eau depuis des lacs et des cours d'eau éloignés. Ces projets sont soutenus, sous certaines conditions, par des contributions de la Confédération et des cantons visant à promouvoir les améliorations

structurelles, comme dans le cas du projet d'irrigation du Furttal (Müller U. 2019).

L'apport d'eau supplémentaire n'est toutefois pas la solution à tous les problèmes. En effet, l'irrigation n'est pas rentable pour la grande majorité des cultures, et d'autres risques liés au climat tels que le stress thermique, la pression accrue des organismes nuisibles et les dommages causés par les fortes précipitations ou la grêle doivent être pris en compte dans le cadre de l'adaptation agricole. L'évolution de l'agriculture dépend en premier lieu des orientations politiques et sociétales ainsi que de l'évolution du marché. Au cours des dernières années par exemple, la surface occupée par les cultures maraîchères nécessitant une irrigation continue a augmenté de 24% (OFS 2018). Le choix des cultures et des modes de production, notamment en ce qui concerne le travail du sol, joue donc un rôle déterminant sur le long terme, de même que le développement du système de marché agricole vers plus de durabilité.

AgriAdapt : comment le besoin d'irrigation évolue-t-il face aux changements climatiques et quelles sont les répercussions sur le niveau des eaux souterraines ?

Démarche

Pour un aquifère du Seeland bernois, on a étudié, à l'aide d'un système intégré de modèles (modèle végétal, modèle hydrologique et modèle d'eaux souterraines), les répercussions des changements climatiques sur les cultures agricoles, les besoins d'irrigation et le niveau des eaux souterraines.

Principaux résultats

- Sans mesures de protection du climat (scénario RCP8.5), le besoin d'irrigation augmenterait d'environ 40 % d'ici à la fin du siècle ; avec des mesures de protection du climat (scénario RCP2.6), il faudrait s'attendre à une augmentation moyenne d'environ 13 %.
- Sans mesures de protection du climat et en cas d'intensification de l'agriculture (+20 % de cultures fortement consommatrices d'eau), le besoin d'eau augmenterait en moyenne de 35 % supplémentaires. Une façon d'économiser l'eau consisterait à cultiver davantage de variétés précoces et à développer les cultures hivernales.
- Sans mesures de protection du climat (scénario RCP8.5), les besoins en eau liés à l'irrigation dépasseraient à l'avenir le besoin actuel en eau potable.
- Sans mesures de protection du climat (scénario RCP8.5), le niveau des eaux souterraines serait plus bas en été et à l'automne. Ce phénomène serait encore accentué par des prélèvements d'eau supplémentaires en vue de l'irrigation. Toutefois, l'effet des changements climatiques sur le niveau des eaux souterraines serait plus important que les conséquences des scénarios d'utilisation du sol (+/- 20 % de cultures fortement consommatrices d'eau).

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Modification des systèmes de culture afin de réduire les besoins en eau, modes d'exploitation des sols et cultures adaptés au site.
- Protection contre les sécheresses extrêmes sous la forme d'une assurance contre les pertes de récolte.
- Irrigation professionnelle optimisée, soutenue par des systèmes numériques de mesure de l'humidité des sols, des technologies d'irrigation efficaces et le renforcement de la formation dans le domaine de l'irrigation.
- Gestion et planification des ressources en eau afin de garantir une utilisation durable des eaux et d'éviter une surexploitation, dans ce cadre, définition de priorités pour les utilisations de l'eau afin d'empêcher les conflits en cas de forte sécheresse, adaptation de la pratique en matière d'octroi des concessions.
- Planification de l'eau d'usage pour l'irrigation agricole et mise en œuvre d'un financement reposant sur le principe de causalité, prise de mesures préventives contre les conflits autour de l'utilisation de l'eau, mise en œuvre du principe de causalité (vérité des coûts) pour l'eau d'usage.

L'eau est utilisée pour la production d'électricité depuis la fin du XIX^e siècle. Un bon nombre des centrales hydro-électriques ont été construites entre 1945 et 1970 et disposent d'une concession d'une durée de 80 ans environ. Les grandes centrales à accumulation se situent dans l'espace alpin, les grandes centrales au fil de l'eau sur le Plateau.

Des répercussions différentes pour les centrales à accumulation et les centrales au fil de l'eau

Si la production d'électricité des centrales à accumulation peut être relativement alignée sur la demande et sur les prix, celle des centrales au fil de l'eau dépend du volume d'eau disponible à un instant T. À l'avenir, les cours d'eau charrieront davantage d'eau l'hiver, ce qui permettra dans l'ensemble de produire plus d'électricité issue de la force hydraulique. Le recul attendu des débits estivaux se traduira quant à lui par un plus faible volume d'eau disponible pour la production d'électricité l'été. Les centrales à accumulation pourront compenser en partie ces variations saisonnières en retenant l'eau.

Effets positifs et négatifs pour les centrales au fil de l'eau

Le centre de compétence suisse pour la recherche énergétique (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) a étudié les effets qu'auront les changements climatiques sur onze centrales au fil de l'eau suisses (Figure 7-5). Pour la quasi-totalité d'entre elles, la production hivernale augmentera d'ici au milieu du siècle d'environ 5 % par rapport à la période de référence (1981-2010) et ce, que des mesures de protection du climat soient mises en œuvre (scénario RCP2.6) ou non (scénario RCP8.5 ; SCCER-SoE 2019). D'ici à la fin du siècle, cette hausse atteindra 10 % sans mesures de protection du climat, mais restera stable avec des mesures de protection du climat. Quant à la production annuelle, elle sera constante ou ne diminuera que faiblement si des mesures de protection du climat sont prises, mais baissera d'environ 3 % d'ici au milieu du siècle et d'environ 7 % d'ici à la fin du siècle sans mesures de protection du climat. Les centrales hydroélectriques alpines situées en altitude feront figure d'exceptions, puisque leur production augmentera – un phénomène dû essentiellement à la fonte des glaciers, dont l'ensemble de la force hydraulique suisse profite encore à l'heure actuelle. Sur la période de

Autres informations et références sur le thème « Irrigation des terres agricoles »

- Holzkämper A. et al. 2020: AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland, Hydro-CH2018 Bericht.
- Lanz K. (éd.) 2020: « Landwirtschaftliche Bewässerung », *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.3 Force hydraulique

En Suisse, plus de la moitié de l'électricité produite est issue de la force hydraulique. Cette source d'énergie bénéficie pour l'instant encore de la fonte des glaciers tout au long de l'année. Mais à long terme, les affluents d'eau de fonte vont diminuer. Le rôle de la force hydraulique en tant que réservoir pour l'électricité solaire et éolienne et en tant qu'élément stabilisateur des réseaux électriques va, lui, s'accroître.

1980 à 2010, 3 à 4 % de la production hydroélectrique suisse, soit 1 à 1,4 TWh par an, provenait de la fonte des glaciers. La contribution annuelle de ces eaux de fonte va cependant reculer de 0,56 TWh d'ici au milieu du siècle et de 1 TWh d'ici à 2100 (Schaecli B et al. 2019).

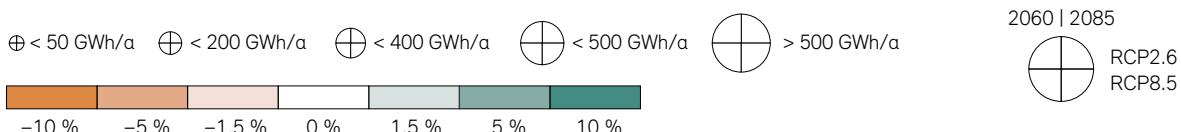
L'évolution effective de la production électrique dépendra également du taux d'utilisation des centrales. Les débits faibles ne peuvent pas être exploités en raison des débits résiduels minimaux, et en cas de débits importants, les performances sont limitées par la capacité de la centrale, appelée « crue de projet » (SCCER-SoE 2019). L'augmentation de la crue de projet ou l'optimisation de la production, par exemple, pourraient donc permettre aux centrales électriques dont le taux d'utilisation n'est pas maximal de produire davantage de courant qu'aujourd'hui, de façon à compenser les pertes liées aux changements climatiques – à condition de tenir compte de l'importance écologique des déversoirs au niveau des captages (débits résiduels dynamiques).

Défis et opportunités pour les centrales à accumulation

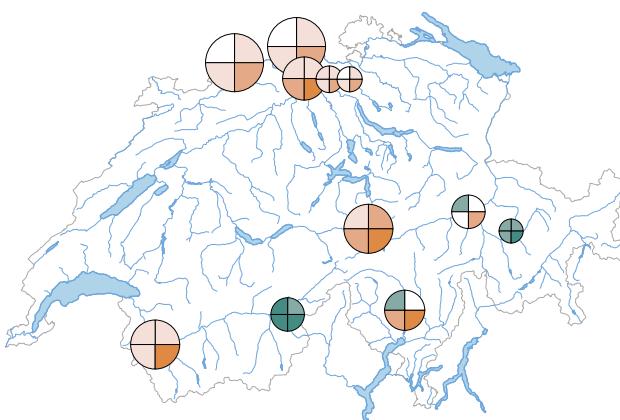
Situées en montagne, les centrales à accumulation sont très exposées aux risques naturels. La fonte des glaciers, le dégel du permafrost et la multiplication des précipitations intenses, notamment, accentuent les risques naturels menaçant ces centrales alpines. En fonction du niveau de remplissage de leur réservoir, elles peuvent retenir de grandes quantités d'eau en cas de crue, et contribuer ainsi à la protection contre ces phénomènes extrêmes. À l'avenir, les besoins d'utilisation des lacs de retenue à de multiples fins, par exemple en tant qu'éléments de rétention de crues ou ressources d'eau en cas de pénurie, pourraient s'intensifier. Il faut également s'attendre à ce que les lacs d'accumulation alpins se comblient plus rapidement en raison du surplus d'apports de sédiments. Des mesures d'entretien et des méthodes techniques sont mises en œuvre pour tenter de résoudre ce problème.

Figure 7-5 : Modifications prévisibles de la production des centrales au fil de l'eau

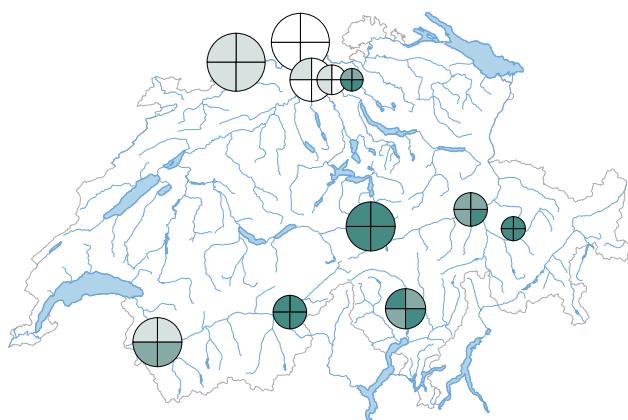
Modifications prévisibles de la production annuelle et hivernale de centrales au fil de l'eau suisses pour les périodes 2060 (2045-2074) et 2085 (2070-2099) par rapport à la période de référence (1981-2010), avec des mesures de protection du climat (RCP2.6) et sans mesures de protection du climat (RCP8.5). Les projections se fondent sur une performance stable des centrales et des débits résiduels inchangés.



Évolution de la production annuelle (GWh/an)



Évolution de la production hivernale (GWh/hiver)



La force hydraulique, affectée par les changements climatiques, en tant que partie de la solution

Pour mettre en œuvre l'Accord de Paris, il est nécessaire de restructurer l'approvisionnement en énergie de façon à se passer des énergies fossiles. La Stratégie énergétique 2050 prévoit pour la force hydraulique une production annuelle moyenne d'au moins 37 400 GWh à l'horizon 2035, soit 2,6 % de plus qu'en 2018 (art. 2 de la loi sur l'énergie). Pour y parvenir, des gains d'efficacité sont nécessaires, tout comme la création de volumes de stockage supplémentaires ou de nouvelles installations. La fonte des glaciers libère de nouveaux espaces qui pourraient être en partie utilisés pour la production hydraulique (Farinotti D. et al. 2019), comme c'est le cas de la centrale à accumulation prévue dans le secteur du glacier de Trift dans l'Oberland bernois.

Les centrales à pompage-turbinage sont primordiales non seulement pour la production d'électricité, mais aussi pour le stockage d'électricité et la stabilisation des réseaux électriques. Leur rôle deviendra de plus en plus important avec l'essor des installations solaires et éoliennes, dont la production tributaire des conditions météorologiques est par nature irrégulière.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Reconfiguration des installations sur la base du nouveau volume d'eau disponible.
- Vérification du risque de catastrophes naturelles pour les ouvrages de retenue suite au dégel du permafrost et à la fonte des glaciers.
- Examen de la multifonctionnalité des lacs d'accumulation (nouvelles prestations possibles).
- Amélioration des prévisions des débits sur le long terme afin d'optimiser la production électrique.
- Prise en compte des changements climatiques lors de l'octroi de nouvelles concessions.

Autres informations et références sur le thème « Force hydraulique »

- Lanz K. (éd.) 2020: Wechsler T., «Wasserkraft». *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.
- SCCER-SoE (éd.) 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production.

7.1.4 Utilisation thermique des eaux

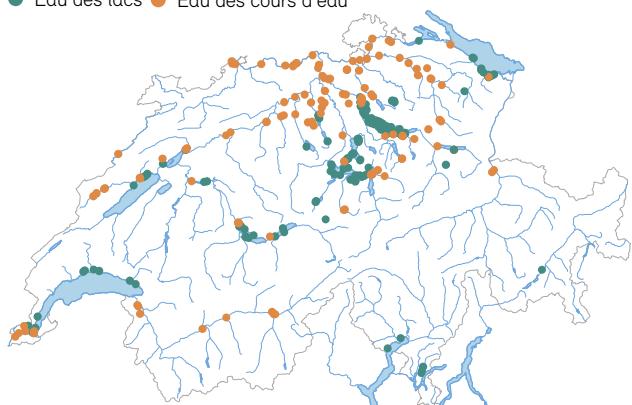
En Suisse, l'eau est utilisée pour la production de chaleur et le refroidissement. Sur ce premier point, les changements climatiques ont un effet positif puisqu'ils réchauffent les eaux, permettant ainsi d'en extraire davantage d'énergie. En revanche, le besoin croissant de refroidissement en été se heurte à la problématique d'eaux plus chaudes et de débits réduits.

Les cours d'eau jouent depuis des décennies un rôle essentiel dans le refroidissement des grandes installations : depuis l'arrêt de la centrale nucléaire de Mühleberg en décembre 2019, c'est celle de Beznau qui arrive en tête des installations restituant la plus grande quantité de chaleur à un cours d'eau suisse, suivie par les usines d'incinération des ordures ménagères et les entreprises industrielles. Concernant l'utilisation thermique, si les lacs et les cours d'eau offrent un gros potentiel, leur exploitation est toutefois limitée spatialement du fait des investissements requis par les réseaux de chaleur à distance. C'est en association avec des systèmes de refroidissement de grande taille, par exemple pour des installations industrielles ou des centres de calcul, que les systèmes de chauffage employant l'eau des lacs ou des cours d'eau sont les plus rentables (Rust P. 2017). L'exploitation thermique des eaux permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre suisses et devrait donc, à ce titre, se développer de plus en plus. La Figure 7-6 donne un aperçu de l'utilisation thermique des lacs et des cours d'eau.

Figure 7-6 : Utilisation thermique des lacs et cours d'eau en Suisse

Les points signalent les endroits où l'eau des cours d'eau (en orange) ou celle des lacs (en turquoise) est utilisée à des fins thermiques.

- Eau des lacs
- Eau des cours d'eau



Source: données Eawag (état en 2018, <https://thermdis.eawag.ch/fr>)

Un potentiel presque épuisé pour les installations de refroidissement le long des cours d'eau

Le réchauffement des eaux lié aux changements climatiques réduit leur capacité de refroidissement. L'été en particulier, lorsque la demande de refroidissement est la plus importante, il est toujours plus fréquent aujourd'hui que l'eau des cours d'eau atteigne des températures critiques pour les organismes aquatiques (point 6.9.1). Lors des étés caniculaires de 2003, 2006, 2015, 2018 et 2019, certaines grosses installations ont dû limiter temporairement leur utilisation thermique de l'eau. Afin d'éviter d'aggraver la pression déjà subie par les écosystèmes aquatiques du fait des changements climatiques, une approche critique doit être adoptée pour la plupart des cours d'eau face à toute nouvelle utilisation de l'eau à des fins de refroidissement. Un potentiel éventuel réside dans les gros cours d'eau des Préalpes dont le débit restera élevé en été.

Potentiels des lacs pour l'utilisation thermique

Malgré la progression des changements climatiques, les grands lacs présentent un potentiel considérable pour l'utilisation thermique, tant pour l'extraction de chaleur que pour le refroidissement, principalement en raison de leurs gros volumes et de leurs eaux profondes qui restent fraîches même en été. Afin d'exclure tout impact négatif sur leur écosystème, il faut néanmoins prendre en compte les répercussions de l'extraction d'eau et de la restitution d'eau plus chaude ou plus froide sur la stratification, déjà modifiée par les changements climatiques. Ainsi, pour certains lacs, il est prévu que la stagnation estivale s'intensifie et se prolonge à l'avenir (point 6.7.2). Pour ne pas renforcer encore ce phénomène par l'utilisation de l'eau pour le refroidissement, l'eau réchauffée doit être réintroduite dans les eaux profondes. Mais cela entraîne un réchauffement de ces couches d'eau, qui a lui aussi des répercussions négatives et doit donc être limité autant que possible. Par conséquent, les petits lacs possédant peu d'eaux profondes ne présentent quasiment pas de potentiel pour le refroidissement. En revanche, le potentiel de refroidissement des grands lacs devrait pouvoir être exploité sans conséquences écologiques négatives, y compris durant les étés très chauds (Gaudard A. et al. 2019). Pour les exploitations situées près d'effluents lacustres, il est également possible de restituer dans l'effluent l'eau des couches profondes réchauffée

par l'utilisation thermique. Selon la température de l'eau de restitution, cela pourrait même aboutir à un refroidissement de l'effluent du lac, si l'eau restituée s'avère plus fraîche que l'eau superficielle. Dans de tels cas, le prélevement d'eau abaisse néanmoins la limite entre les eaux profondes froides et l'eau superficielle plus chaude.

Utilisation de la chaleur des eaux souterraines

L'utilisation de la chaleur de la terre et des eaux souterraines est largement répandue en Suisse. Actuellement, l'impact éventuel de l'exploitation thermique des eaux souterraines sur la température de ces dernières n'est pas au cœur des préoccupations. L'enjeu consiste plutôt à éviter les conflits avec la protection des eaux souterraines : dans la mesure où chaque utilisation nécessite de percer la couche protectrice de l'eau souterraine, l'exploitation thermique n'est pas autorisée dans les zones de protection des eaux souterraines et dans les eaux souterraines pouvant être utilisées pour la production d'eau potable.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Prévention et réduction du besoin de refroidissement et de chauffage par une meilleure technique des bâtiments et l'optimisation des processus.
- Renonciation à la construction d'autres installations de refroidissement le long des cours d'eau et rénovation des installations ne respectant pas ou plus les exigences de l'OEAUX.
- Exploitation du potentiel de l'eau des lacs en tenant compte des conséquences pour les écosystèmes.
- Promotion de l'utilisation des eaux aux fins de chauffage.

Autres informations et références sur le thème « Utilisation thermique »

- Lanz K. (éd.) 2020 : « Thermische Nutzung, Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz, Hydro-CH2018 Bericht.

7.1.5 Loisirs, détente et tourisme

L'attractivité du tourisme suisse et des espaces de loisirs est étroitement liée au paysage et à l'eau, à la neige et à la glace. Les changements climatiques vont modifier l'offre touristique du pays, en particulier en raison du recul des glaciers et de l'augmentation de la limite du zéro degré, mais aussi accroître le besoin de se rafraîchir dans les points d'eau et les régions de montagne.

Avec 53,3 millions de nuitées par an, le tourisme est un secteur économique important en Suisse. Il génère un chiffre d'affaires annuel de 18,7 milliards de francs, soit 2,4 % du produit intérieur brut, et revêt une importance majeure pour l'emploi avec pas moins de 175 489 équivalents plein temps en 2018 (FST 2019, OFS 2019). Le rôle des eaux pour les loisirs de proximité et le tourisme

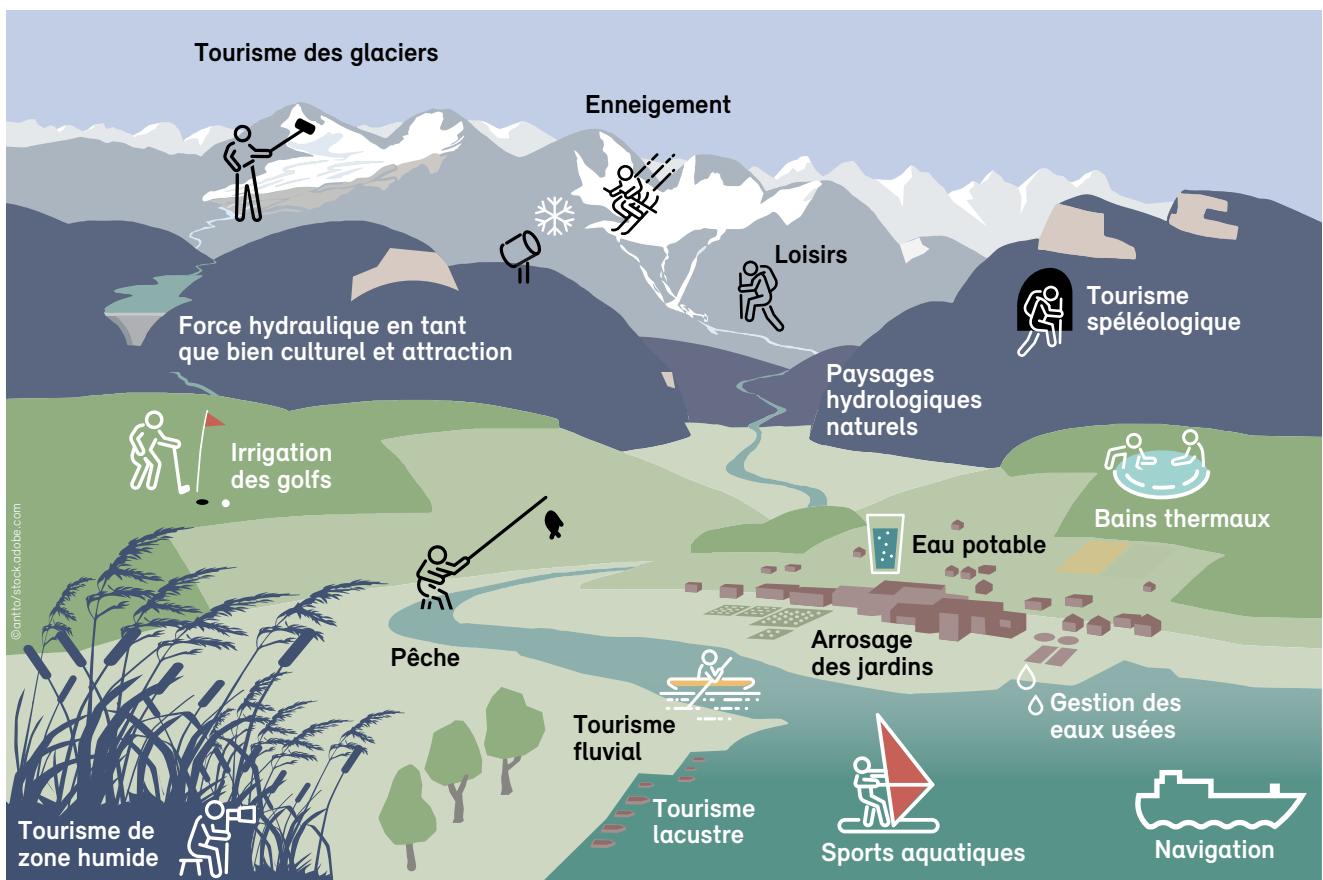
devrait se renforcer encore face aux changements climatiques, non seulement dans le cadre d'activités touristiques, mais aussi comme ressource pour les besoins quotidiens des touristes (Figure 7-7).

Défis pour le tourisme hivernal

La hausse des températures hivernales se traduit par un recul marqué du nombre de jours de neige fraîche dans les Alpes (NCCS 2018). Ces dernières années, l'élévation de la limite du zéro degré s'est déjà fait ressentir dans les stations de sports d'hiver situées à basse altitude, et certaines d'entre elles ont dû cesser leur activité. Pour compenser la baisse de l'enneigement, la plupart des destinations se sont équipées de canons à neige. En 2016, 49 % des quelque 22 500 kilomètres de pistes suisses pouvaient ainsi être enneigés artificiellement (Remontées Mécaniques Suisses 2017).

Figure 7-7 : Dépendance du tourisme et des loisirs de proximité suisses vis-à-vis de l'eau

L'eau est une ressource centrale, tant pour l'infrastructure touristique que pour de nombreuses activités du tourisme hivernal et estival.



L'eau nécessaire pour l'enneigement artificiel doit être disponible à de hautes altitudes lors des mois d'automne et d'hiver, caractérisés par de faibles débits – les dispositions relatives aux débits résiduels devant être respectées aussi pour les eaux alpines d'altitude. C'est pourquoi, en de nombreux endroits, l'eau de fonte et les précipitations estivales sont recueillies dans des lacs de réserve créés dans le domaine skiable. Et lorsque ces réserves ne suffisent pas, l'eau doit être acheminée depuis la vallée au moyen de pompes. L'enneigement artificiel puise aussi parfois dans le réseau local d'eau potable, ce qui peut engendrer des conflits (Lanz K. 2016). Dans certaines stations, l'eau peut être prélevée dans les lacs d'accumulation des centrales hydrauliques, comme à Saas-Fee, à Nendaz-Veysonnaz ou à Crans-Montana (Reynard E. et al. 2014).

Utilisation de l'eau dans les destinations de vacances alpines

Les variations saisonnières extrêmes du nombre de nuitées et leur situation excentrée rendent particulièrement difficile l'adaptation aux changements climatiques des destinations de vacances à la montagne. La consommation d'eau provenant des réseaux publics de distribution d'eau potable accuse une forte hausse les jours de pointe. Ces pics de consommation s'accompagnent d'une augmentation des eaux usées, ce qui entraîne des contraintes importantes pour l'infrastructure, ainsi qu'une hausse des coûts. Les lieux où les jours de pointe coïncideront de plus en plus fréquemment avec les périodes de réduction du volume d'eau disponible auront plus de risques de connaître des pénuries d'eau.

L'été, le paysage va se modifier en raison de la fonte des glaciers. Les destinations prisées des visiteurs en raison de leurs glaciers ou d'activités associées vont perdre de leur attractivité.

Opportunités pour le tourisme estival

Pour les régions touristiques de montagne, les changements climatiques sont également synonymes d'opportunités. Il est à prévoir que les personnes en quête de détente seront de plus en plus nombreuses à rechercher la fraîcheur du climat d'altitude lors des chaudes journées d'été. Il y a quelques années déjà, on a pu constater une corrélation entre le nombre de nuitées des touristes

suisses en montagne et les températures élevées des vallées (Serquet G. et Rebetez M. 2011). De plus, l'arrivée plus tardive des premières chutes de neige à l'automne prolonge la saison de randonnée. On ignore encore dans quelle mesure précise les nouveaux espaces et lacs de haute montagne issus de la fonte des glaciers pourront

Tableau 7-1 : Restrictions de la navigation sur les lacs et rivières suisses à l'été et l'automne 2018

Lacs et cours d'eau	Répercussions, restrictions
Lac de Constance	Débarcadères de Bad Schachen et de Langenargen fermés à compter respectivement du 23 juillet et du 24 septembre; à partir de juillet, absence d'accès pour fauteuils roulants à de nombreux débarcadères
Lac de Constance (lac Inférieur)	Pas de bateaux en service régulier entre Diessenhofen et Stein am Rhein du 23 juillet au mois d'octobre
Lac de Constance (Altenrhein)	À partir du 30 juillet et jusqu'à fin septembre, pas de bateaux en service régulier entre Rorschach et Rheineck
Lac de Walenstadt	Déplacement du débarcadère de Quinten, pose de rampes plus raides à tous les embarcadères
Lac de Zoug, lac d'Aegeri	Tous les débarcadères accessibles malgré de bas niveaux historiques, mais au prix de rampes très raides
Lac de Greifen	Débarcadère de Mönchaltorf fermé à partir du 16 juillet, niveau du lac inférieur de 1 m à la normale
Lac de Hallwil	Niveau du lac inférieur à la normale de plus de 60 cm, grosses difficultés pour l'embarquement (rampe nécessaire), mais tous les débarcadères accessibles
Lac Majeur	Débarcadère d'Isola Madre (Italie) non accessible à partir d'août en raison d'un niveau d'eau trop bas
Lac de Zurich	Pas de restrictions malgré un niveau d'eau estival historiquement bas
Limmat	Interruption périodique de la navigation en raison de températures trop élevées à bord (bateaux vitrés)
Lac des Quatre-Cantons	Pas de restrictions malgré un niveau d'eau estival historiquement bas

Source: Reynard et al. (2020b)

être des destinations attrayantes pour les vacanciers. Mais à l'ère des changements climatiques, des lacs et cours d'eau attrayants et diversifiés revêtent une importance croissante pour les loisirs. Des établissements de bains locaux et d'agréables berges de lacs et de cours d'eau promettent en effet rafraîchissement et détente à la population.

Restrictions de la navigation de plaisance

L'été 2018 a montré que la sécheresse et la chaleur pouvaient également poser problème pour la navigation sur les lacs et les cours d'eau. Les espaces les plus touchés ont été le lac de Constance, non régulé, ainsi que de petits lacs, tels que les lacs de Zoug, de Hallwil et de Greifen, dont le système de régulation n'est pas parvenu à maintenir le niveau d'eau en raison du faible débit de leurs affluents.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Innovation et diversification, notamment promotion du tourisme estival et à l'année.
- Réduction du besoin en eau de façon à ne pas surexploiter les ressources, élaboration de bases de données de meilleure résolution sur la consommation d'eau correspondant aux différentes utilisations dans les destinations touristiques : hébergement, enneigement, terrains de golf, établissements thermaux, épuration des eaux usées, planification régionale des ressources en eau.
- Mise en réseau des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'épuration des eaux usées entre les communes voisines et développement des capacités de stockage, principe du deuxième pilier indépendant d'un point de vue hydrologique.

Autres informations et références sur le thème « Tourisme »

- Reynard E. et al. 2020a: «Eau et tourisme». Rapport réalisé dans le cadre de Hydro-CH2018.
- Reynard E. et al. 2020b: «Wasser und Tourismus», *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.

7.2 Protection contre les dangers naturels liés aux eaux

La recrudescence des épisodes de fortes précipitations, le transport accru de sédiments dû aux changements climatiques et la progression de l'urbanisation dans les zones à risques accroissent l'insécurité face aux crues et au ruissellement. Ce dernier est d'ores et déjà pris en compte dans le cadre de la protection contre les crues et de l'évacuation des eaux urbaines.

7.2.1 Protection contre les crues

Les futures mesures de protection contre les crues doivent impérativement tenir compte des modifications induites par les changements climatiques. La gestion intégrée des risques jette les bases en la matière depuis plusieurs décennies.

Par le passé, la Suisse a régulièrement traversé des périodes marquées par des crues nombreuses et de grande ampleur (Schmocker-Fackel P. et Naef F. 2010). Des crues catastrophiques peuvent survenir avec le climat actuel, comme l'ont montré les événements de 1987, 1999 et 2005, et elles continueront de se produire à l'avenir. Primordiale pour la planification et le dimensionnement des mesures de protection, la probabilité de survenue de certains débits de crue évolue au fil du temps et se modifie du fait des changements climatiques. Selon plusieurs éléments, elle tend à augmenter (point 6.5). À l'heure actuelle, les phénomènes extrêmes se caractérisent déjà par de fortes incertitudes, qui vont encore s'amplifier en raison des changements climatiques. La protection contre les crues doit prendre en compte au mieux ces incertitudes. De plus, les changements climatiques devraient aussi accroître le volume de sédiments mobilisés puis transportés et déposés lors des crues, risquant ainsi de causer de graves dommages.

Évolution constante de la protection contre les crues

La protection contre les crues a pris de l'essor au XIX^e siècle, alors que l'industrialisation et la croissance démographique poussaient à s'approprier sans cesse de nouvelles surfaces proches des points d'eau. Les cours d'eau ont alors été corrigés et pourvus de digues afin d'accroître la capacité de débit en cas de crue et de protéger les zones à proximité. Le rétrécissement des cours d'eau et la rétention de sédiments provenant des affluents latéraux

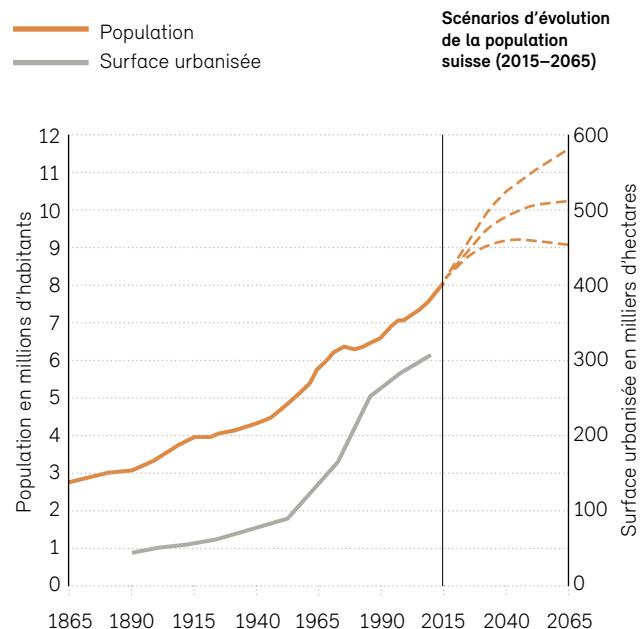
ont notamment contribué à renforcer l'érosion des berges et du fond du lit des cours d'eau, un problème que l'on a tenté de résoudre par d'autres aménagements. Sur le long terme, cette stratégie s'est révélée inadaptée pour protéger durablement les habitations et les biens matériels des inondations. Suite à des crues parfois dévastatrices ayant causé des dégâts considérables, la Suisse a enclenché voilà environ 25 ans un changement de paradigme dans la protection contre les crues, en passant d'une protection reposant exclusivement sur des mesures architecturales à une gestion intégrée des risques. Aujourd'hui, la prévention, la préparation, la maîtrise et le rétablissement en lien avec les phénomènes naturels dangereux sont considérés de façon globale et comme un processus cyclique. Tous les acteurs importants prennent part à la planification et à la mise en œuvre des mesures, en combinant le mieux possible les mesures techniques, de planification et d'aménagement du territoire, biologiques et organisationnelles. Depuis quelques années, les impacts et les facteurs d'influence des changements climatiques sont aussi pris en considération. La nécessité d'agir a été reconnue dans le rapport «Gestion des dangers naturels en Suisse» (OFEV 2016); la mise en œuvre a déjà commencé dans le cadre de la protection contre les crues.

L'évolution socio-économique comme moteur du potentiel de dommages

La manière dont les risques liés aux crues évolueront au cours des prochaines décennies ne dépendra pas uniquement de la modification des débits de pointe, mais aussi de l'évolution du potentiel de dommages. Entre la fin de la Seconde Guerre mondiale et 2009, la surface urbanisée a plus que triplé en Suisse (Figure 7-8). Cette expansion de la surface urbanisée, associée à des biens matériels de grande valeur au sein des bâtiments et à l'intensification de l'utilisation du sol dans des zones potentiellement dangereuses, a entraîné une hausse constante du potentiel de dommages des crues, alors que l'espace disponible pour les mesures de protection envisageables ne cesse de diminuer. Pour éviter que les risques continuent d'augmenter, il faut les prendre en compte dès l'élaboration des plans directeurs, des plans d'affectation ou des règlements sur les constructions. Des cartes de dangers qui montrent les zones habitées et les voies de circulation menacées par les crues et d'autres risques naturels ont été établies à cette fin pour l'ensemble de la Suisse (ARE et OFEV 2005).

Figure 7-8 : Évolution de la population et de la surface urbanisée en Suisse

Entre 1865 et 2015, la population suisse s'est accrue d'environ 5,5 millions d'habitants (courbe orange) et devrait continuer d'augmenter d'ici à 2065 (plus ou moins fortement selon les scénarios, pointillé orange). La surface urbanisée progresse quant à elle plus vite que la population (en gris). En 1890, alors que la Suisse comptait à peine 3 millions d'habitants, moins de 50 000 ha étaient urbanisés: en 2009, cette surface s'élevait à plus de 300 000 ha pour quelque 7,5 millions d'habitants.



Sources: données en partie corrigées provenant des estimations et statistiques de la superficie de la Confédération. Population résidente permanente selon ESPOP, STATPOP et les scénarios démographiques de l'OFS.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Sensibilisation aux risques occasionnés ou renforcés par les changements climatiques, tels que l'enchaînement de processus ou le dépassement de valeurs seuils pour certains processus, et prise en compte de ceux-ci.
- Housse de l'acceptation de mesures radicales et impopulaires telles que le départ de zones exposées.
- Prévention de nouveaux risques inacceptables grâce à un aménagement du territoire fondé sur les risques.
- Gestion des dépôts de sédiments dans les torrents et dans les deltas des lacs.

7.2.2 Protection contre le ruissellement

L'augmentation des précipitations intenses va entraîner un ruissellement plus fréquent et plus intense, conduisant à davantage de dommages, y compris dans les zones non menacées par les crues des lacs et des cours d'eau. C'est pourquoi des mesures de protection des objets, un aménagement du territoire fondé sur les risques et une adaptation de l'évacuation des eaux urbaines aux changements climatiques sont essentielles.

Les scénarios climatiques CH2018 prévoient que sans mesures de protection du climat, les précipitations intenses pourraient connaître d'ici à 2100 une hausse allant jusqu'à 20 %. Or, lors de tels épisodes pluvieux, le sol ne peut plus absorber l'eau entièrement et celle-ci s'écoule à la surface (c'est ce que l'on appelle le «ruissellement»). Ce phénomène peut provoquer de vastes inondations même dans des zones éloignées de tout lac ou cours d'eau. Le ruissellement peut causer des dégâts de plusieurs millions de francs au niveau des bâtiments, des infrastructures et des paysages. Ainsi, de nombreux bâtiments situés en dehors des zones dangereuses connues ont été endommagés en juillet 2017 à Zofingue suite à un orage persistant (Figure 7-9). La Confédération a fait un premier pas important ces dernières années en élaborant, conjointement avec l'Association des établissements cantonaux d'assurance et l'Association Suisse d'Assurances, une carte de l'aléa ruissellement pour l'ensemble de la Suisse : celle-ci montre où ruisselle l'eau qui ne peut s'infiltrer dans le sol, les surfaces concernées et le niveau que l'eau peut atteindre. Dans le contexte des changements climatiques, il faut renforcer la prise de conscience des dangers liés au ruissellement. Des mesures de protection des objets souvent simples et peu onéreuses ou l'obstruction des ouvertures et la pose de barrières basses permettent déjà d'empêcher l'eau de pénétrer dans les caves ou les garages souterrains.

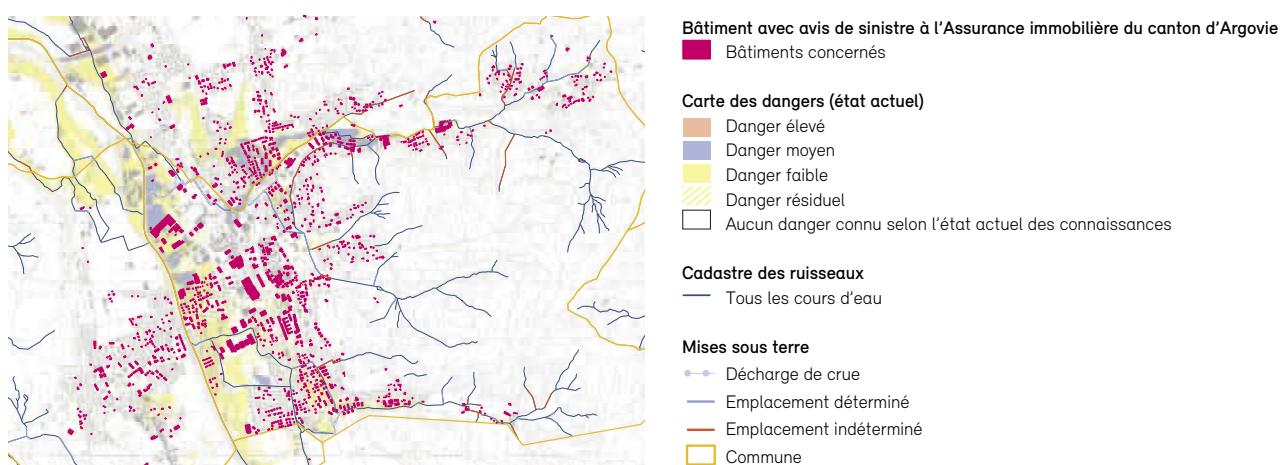
segments cantonaux d'assurance et l'Association Suisse d'Assurances, une carte de l'aléa ruissellement pour l'ensemble de la Suisse : celle-ci montre où ruisselle l'eau qui ne peut s'infiltrer dans le sol, les surfaces concernées et le niveau que l'eau peut atteindre. Dans le contexte des changements climatiques, il faut renforcer la prise de conscience des dangers liés au ruissellement. Des mesures de protection des objets souvent simples et peu onéreuses ou l'obstruction des ouvertures et la pose de barrières basses permettent déjà d'empêcher l'eau de pénétrer dans les caves ou les garages souterrains.

Adaptation de l'évacuation des eaux urbaines

Les fortes précipitations sont particulièrement problématiques dans les zones habitées dont la majorité des surfaces sont imperméabilisées et dans lesquelles l'eau ne peut pas s'infiltrer. Face à la progression des changements climatiques, l'évacuation des eaux urbaines doit donc relever un défi de taille. Une possibilité consiste à accroître la capacité d'écoulement en provenance de la zone habitée, d'une part par l'agrandissement des canalisations, et de l'autre par la création de corridors d'écoulement de secours en surface. Les fortes pluies peuvent également saturer les canalisations, entraînant ainsi le déversement d'eaux usées non épurées (point 7.3.2).

Figure 7-9 : Nouveaux dangers, y compris en dehors des zones menacées par les crues selon la carte de dangers

De nombreux bâtiments (en rouge) de Zofingue (AG) ayant subi des dégâts des eaux lors d'un orage persistant en juillet 2017 se trouvent en dehors des zones de danger identifiées jusqu'à présent. Ces dégâts ont été causés par le ruissellement et par un reflux dû à une canalisation saturée.



L'accélération de l'évacuation des fortes pluies en provenance des zones habitées peut toutefois conduire en aval à un accroissement du débit de crue. D'où la nécessité de trouver de nouvelles idées et de renforcer la coopération entre l'évacuation des eaux urbaines, l'aménagement urbain et la protection contre les crues. Le concept de la «ville éponge» adopte cette approche globale : l'eau de pluie est stockée dans des citernes, des bassins de collecte d'eau pluviale ou des toitures végétalisées au lieu d'être évacuée directement au moyen des canalisations. Cela présente non seulement l'avantage de délester les canalisations, mais aussi de limiter les conséquences des vagues de chaleur estivales dans les villes et les agglomérations. En effet, les cartes d'analyse climatique montrent que lors des jours de grande chaleur, la température dans les quartiers de la ville de Zurich peut être de 6 à 7 °C supérieure à celles des zones rurales périphériques. Le développement urbain adapté aux changements climatiques mise par conséquent sur davantage d'espaces verts et ouverts, de lieux ombragés et de points d'eau librement accessibles.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Crédit de corridors d'écoulement de secours en surface pour les épisodes pluvieux dans les zones habitées dont la capacité d'absorption des canalisations et des bassins de décharge des eaux pluviales est insuffisante, de façon à ce que l'excédent de précipitations puisse rejoindre les cours d'eau sans causer de dommages.
- Développement urbain adapté au climat : création de surfaces perméables, d'espaces verts, de toits et de façades végétalisés, aménagement local de réservoirs et de fossés destinés à stocker provisoirement l'eau de pluie, et de grands bassins de décharge des eaux pluviales pour les canalisations. Ces mesures permettent en outre de contribuer à lutter contre les îlots de chaleur dans les villes.

Autres informations et références sur le thème « Protection contre les crues »

- Lanz K. (éd.) 2020 : « Hochwasserschutz », Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz, Hydro-CH2018 Bericht.

7.3 Protection des eaux

Comme son nom l'indique, la protection des eaux a pour mission de protéger les eaux de tout effet préjudiciable, afin de permettre une utilisation durable des eaux et de préserver les écosystèmes aquatiques. Au cours des dernières années, plusieurs programmes d'assainissement ont été lancés pour réduire la charge des eaux en diverses substances, les renaturer et les protéger de la surexploitation. Ces mesures visant à protéger les eaux vont gagner encore en importance dans le contexte des changements climatiques.

7.3.1 Changements climatiques et protection d'eaux en pleine mutation

En Suisse, les lacs et les cours d'eau, ainsi que leurs rives, sont fortement sollicités par les activités humaines, qui affectent sur de vastes tronçons l'écoulement la qualité et la structure des eaux. Les changements climatiques constituent un facteur de stress supplémentaire accentuant la nécessité d'une application rapide de la LEaux et d'une utilisation encore plus mesurée des eaux. Il faut également s'attendre à ce que des conséquences imprévues des changements climatiques obligent à réviser ponctuellement certains concepts et certaines mesures de la protection des eaux.

Les lacs et les cours d'eau revêtent une fonction clé pour la société, l'économie et la nature. Ils façonnent les paysages et nous approvisionnent en eau. La protection des eaux veille à ce que ces espaces puissent remplir le plus durablement possible leurs fonctions d'habitat pour les espèces végétales et animales, de ressource en eau potable et de zone de détente pour la population. De plus, ils doivent être disponibles pour les activités économiques (p. ex. utilisation thermique, production d'électricité, tourisme).

À l'heure actuelle, de nombreux lacs et cours d'eau ainsi que leurs rives (espace réservé aux eaux) sont touchés par des facteurs de stress anthropiques tels que des constructions, des polluants chimiques ou des modifications de la dynamique de débit. À ceux-ci s'ajoutent les conséquences des changements climatiques, voire les accentuent davantage. Une application rigoureuse de la LEaux est par conséquent décisive pour renforcer le plus

vite possible la résilience et la capacité d'adaptation des lacs et des cours d'eau face aux changements climatiques. Cela implique de réduire les charges en diverses substances, de mettre en œuvre rapidement les travaux de revitalisation des eaux et d'assainissement de la force hydraulique, de définir, de façonner et de gérer d'une manière conforme à la loi l'espace réservé aux eaux et de garantir des volumes suffisants dans les lacs et les cours d'eau.

Dans la mesure où les changements climatiques vont aussi accroître les sollicitations humaines (p. ex. prélèvements supplémentaires pour l'irrigation et l'enneigement, dilution moindre des substances nocives en cas d'étiage), divers domaines relevant de la protection des eaux gagnent en importance. Dans l'ensemble, la nécessité de concertation avec d'autres secteurs (p. ex. protection contre les crues, utilisation des eaux) s'accroît. Il faut en outre vérifier régulièrement si les stratégies et pratiques actuelles de la protection des eaux peuvent ou doivent être optimisées du fait des changements climatiques. Ainsi, au niveau fédéral, les mesures de protection des eaux sont actuellement examinées par des experts externes sur mandat de l'OFEV dans le cadre du projet «Examen de la protection des eaux concernant le changement climatique» (Ecoplan, en cours d'élaboration). Les échanges d'expériences peuvent contribuer à renforcer l'exécution au sein des cantons.

La Confédération et les cantons observent et documentent l'état ainsi que les modifications des eaux suisses au moyen de plusieurs réseaux de mesure :

- concernant la qualité de l'eau, à l'aide de l'Observation nationale de la qualité des eaux de surface NAWA, de l'Observation nationale des eaux souterraines NAQUA et des réseaux de mesure des températures et des concentrations en matériaux solides ;
- concernant la quantité d'eau, à l'aide des réseaux de mesure du niveau d'eau et du débit, et de NAQUA ;
- concernant l'écologie des eaux, au moyen de NAWA et du monitoring de la biodiversité.

Les méthodes relevant du système modulaire gradué permettent de déterminer l'état des eaux à partir des mesures réalisées. Pour servir d'outils centraux de pilotage de la

politique de gestion de l'eau, l'observation et l'évaluation des eaux doivent aussi bien montrer les conséquences des changements climatiques que les impacts d'autres facteurs anthropiques sur les eaux. Les programmes de monitoring et les méthodes d'évaluation doivent par conséquent être régulièrement examinés afin de définir s'ils doivent être développés du fait des changements climatiques.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Poursuite de l'observation des eaux afin d'identifier et de documenter leurs modifications, examen régulier de la nécessité de développer les programmes de monitoring en raison des changements climatiques.
- Examen régulier, aux niveaux fédéral et cantonal, des stratégies et pratiques existantes en matière de protection des eaux de façon à permettre aux eaux de continuer à remplir leurs fonctions malgré la progression des changements climatiques.

7.3.2 Réduire la charge en diverses substances

La qualité de l'eau est fortement dégradée par l'apport de nutriments, de produits phytosanitaires et d'autres micropolluants. Plusieurs mesures visent, d'une part, à réduire la pollution actuelle et, de l'autre, à baisser le risque de nouvelles pollutions. Cela permet de réduire le stress subi par les écosystèmes aquatiques, d'accroître la résilience et d'améliorer la qualité de l'eau, autant d'aspects qui profitent aussi aux utilisations humaines.

Plus de 97 % des eaux usées communales en Suisse sont centralisées et traitées dans les 800 stations d'épuration (STEP) grâce à quelque 1 300 000 km de canalisations. Chaque jour, près de 650 litres d'eaux usées par habitant arrivent dans les STEP, dont environ 22 % proviennent des ménages et à peu près autant de l'industrie et de l'artisanat. Au total, 55 % des volumes acheminés par les canalisations sont des eaux pluviales ruisselant sur les toits et les chaussées ou des eaux parasites⁶ (Maurer M. et al. 2012). Quelque 88,3 % des eaux traitées dans les STEP

⁶ Eaux parasites provenant des fontaines, des ruisseaux, des drainages et des infiltrations d'eaux souterraines

sont ensuite réinjectées dans les cours d'eau et 11,7 % dans les lacs (Base de données des stations d'épuration suisses, OFEV 2018). Comme ces eaux constituent l'habitat d'espèces animales et végétales, mais aussi parce qu'elles servent directement ou indirectement de ressources d'eau potable, l'efficacité d'épuration des STEP doit être très élevée.

Améliorer l'efficacité d'épuration des STEP

Les changements climatiques diminuent périodiquement le débit des cours d'eau, réduisant ainsi la dilution des eaux rejetées par les STEP et accroissant la charge en diverses substances. Toutefois, les STEP se révèlent plus efficaces en cas de températures élevées de l'eau et de faibles précipitations, ce qui compense un peu la baisse de la dilution (OFEV 2019b). L'ajout d'une quatrième étape de traitement devrait permettre aux stations d'épuration, conformément à la modification de 2014 de la LEaux, de réduire les apports de micropolluants tels que les principes actifs pharmaceutiques ou les biocides, mais aussi la propagation, considérée comme critique, de bactéries résistantes aux antibiotiques. Environ 140 STEP ont été sélectionnées à cette fin selon des critères axés sur les objectifs et ancrés dans la législation : elles seront équipées d'ici à 2040 d'une étape de traitement supplémentaire.

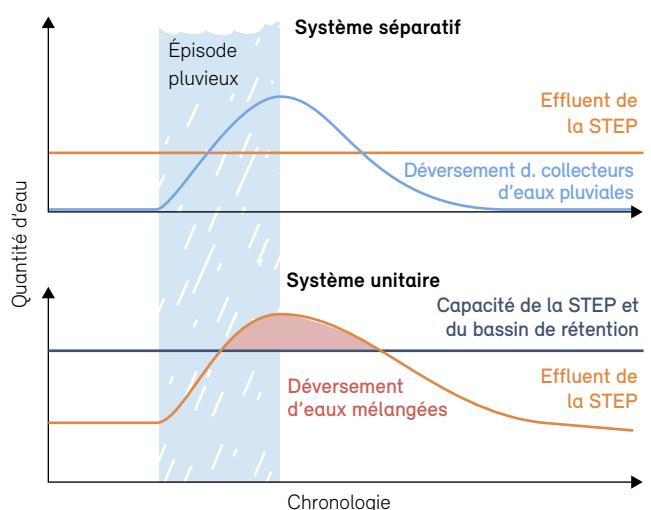
Adapter l'évacuation des eaux urbaines aux changements climatiques

Historiquement, deux systèmes se sont établis en Suisse pour la gestion des eaux pluviales dans les zones urbanisées. Sur 70 % de la surface urbanisée, la pluie tombant sur les toits et les chaussées est collectée dans le réseau unitaire d'assainissement, où elle se mélange aux eaux usées avant d'être acheminée vers la STEP afin d'y être épurée. En cas de fortes pluies, lorsque ce réseau et les bassins de rétention ne peuvent pas absorber toute l'eau, un mélange d'eaux pluviales et d'eaux usées non traitées rejoint le réseau hydrographique : on parle alors de déversement d'eaux mélangées (Figure 7-10). Sur les 30 % restants, on a recours à un système séparatif : un deuxième réseau collecte les eaux pluviales et les redirige directement vers les eaux de surface. Là où l'eau de pluie est très polluée, par exemple sur les routes très fréquentées, l'eau évacuée doit être traitée avant d'être déversée dans le réseau hydrographique.

Figure 7-10 : Réaction du système séparatif et du système unitaire en cas de fortes précipitations

Dans le cas des systèmes unitaires, qui assurent l'évacuation des eaux sur 70 % de la surface urbanisée, il arrive qu'un mélange d'eaux usées et d'eaux pluviales se déverse sans épuration dans le réseau hydrographique.

■ Épisode pluvieux ■ Déversement d'eaux mélangées



Source: Braun C. et al. (2015)

Du fait de la hausse des précipitations intenses, les cas de déversement d'eaux usées non épurées directement dans les eaux superficielles seront plus fréquents à l'avenir si le système d'évacuation des eaux urbaines n'est pas modifié. Pour décharger le réseau, il faudrait donc que l'eau de pluie s'infiltra davantage dans le sol, y compris dans les zones urbanisées. Là où cela s'avère insuffisant, il faut créer des réservoirs intermédiaires (bassins de décharge des eaux pluviales, installations de traitement d'eaux mélangées déversées) ou transformer le réseau unitaire en un réseau séparatif (avec un système distinct d'évacuation des eaux pluviales). Étant donné que les installations d'évacuation des eaux urbaines ont une durée de vie de plusieurs décennies, il est important de prendre en compte les changements climatiques dès maintenant dans les mesures de construction. Cela implique également de vérifier et d'actualiser régulièrement des instruments tels que la planification générale et régionale d'évacuation des eaux ainsi que les normes et bases de données correspondantes.

Poursuivre les mesures visant à réduire la charge en substances

Une grande partie des micropolluants, comme les insecticides, les herbicides ou les fongicides, sont des apports diffus provenant de l'agriculture et sur lesquels l'équipement des STEP n'a aucun impact. Du phosphore et de l'azote issus d'engrais et de lisier se retrouvent également dans les eaux. Toutes ces substances ont des effets néfastes sur l'écologie des eaux, et la réduction de leur présence est l'un des objectifs de la protection des eaux. Les changements climatiques vont entraîner des changements dans l'agriculture, comme la délocalisation des surfaces de cultures intensives, la culture d'autres végétaux et d'autres variétés ou l'apparition de nouveaux organismes nuisibles et de nouvelles maladies, qui conduiront à leur tout à des évolutions dans l'usage des produits phytosanitaires. Ces facteurs indirects auront probablement beaucoup plus d'impact sur la charge des eaux en produits phytosanitaires que les effets directs des changements climatiques. La hausse attendue du ruissellement et les modifications concernant le renouvellement des eaux souterraines risquent d'accroître encore le déversement de ces substances dans les eaux. Il est donc primordial de continuer à réduire l'apport de substances critiques, comme le prévoit notamment le plan d'action Produits phytosanitaires (Conseil fédéral 2017). Celui-ci fixe en premier lieu la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, par exemple via la lutte mécanique contre les mauvaises herbes, l'agriculture biologique, l'interdiction de certains produits phytosanitaires ou le recours à des organismes auxiliaires. D'autres approches consistent à empêcher le

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Examen régulier et, le cas échéant, modification du plan d'évacuation des eaux d'une région, limitation des volumes et de la fréquence des déversements d'eaux mélangées.
- Poursuite de l'équipement des STEP afin d'améliorer l'efficacité d'épuration.
- Détermination, au niveau de l'aménagement du territoire, de l'espace réservé aux eaux ainsi que conception et gestion extensives de cet espace
- Mise en œuvre rigoureuse du plan d'action Produits phytosanitaires.

ruissellement des champs, à cultiver de manière extensive des bordures tampon le long des cours d'eau ou à opter pour un nettoyage respectueux de l'environnement des réservoirs des pulvérisateurs. De plus, les mesures et objectifs visant à réduire la charge des eaux en produits phytosanitaires et en nutriments doivent être mis en œuvre indépendamment des changements climatiques.

Autres informations et références sur le thème sur le thème « Réduction de la charge en diverses substances »

- Conseil fédéral (éd.) 2017: Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires
- Lanz K. (éd.) 2020: « Siedlungsentwässerung », *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.

7.3.3 Renaturation des eaux

Des eaux proches de leur état naturel offrent des habitats diversifiés pour les espèces animales et végétales indigènes. Les écosystèmes aquatiques vont se modifier en raison des changements climatiques. Des eaux naturelles sont plus à même de supporter ces modifications que des eaux chargées en substances chimiques, aménagées ou perturbées sur le plan hydrologique par l'exploitation de la force hydraulique.

Une grande partie des eaux naturelles en Suisse ont disparu depuis le XIX^e siècle. De vastes corrections des eaux et aménagements de petits ruisseaux et rivières, motivés par l'amélioration de la protection contre les crues, la production d'énergie, l'utilisation à des fins industrielles et la desserte de corridors de transport, de surfaces agricoles utiles et de zones urbaines, ont eu de profondes conséquences. Sur le Plateau en particulier, caractérisé par une activité très dense, les eaux affichent une diversité structurelle insuffisante et sont très loin de leur état originel. Au total, pas moins d'un quart des tronçons de cours d'eau suisses sont artificiels, très atteints ou mis sous terre.

Afin de rendre aux eaux une structure plus naturelle et de supprimer les atteintes graves, la LEaux a été révisée en 2011. Si la renaturation des eaux a été lancée indépendamment des changements climatiques, elle contribue

directement à accroître la résilience et à la capacité d'adaptation de ces espaces. Les cantons ont examiné systématiquement dans quels lacs et cours d'eau la faune et la flore indigènes étaient gravement affectées, et déterminé les centrales hydroélectriques à assainir ou les eaux à revitaliser.

Préserver et créer des habitats diversifiés

Les changements climatiques vont provoquer une hausse des températures de l'eau ainsi que des modifications en matière de débit et de transport de sédiments. De nombreuses espèces ne pourront pas s'adapter aisément à ces nouvelles conditions. Leur survie dépendra de leur possibilité de migrer vers d'autres habitats ou de se retirer dans d'autres zones moins affectées lors des situations extrêmes – par exemple en cas de vague de chaleur ou d'étiage. Pour cela, elles doivent avoir accès à un réseau

hydrographique intact, doté d'habitats variés. Les cours d'eau proches de leur état naturel sont donc essentiels à la conservation de la biodiversité.

Les possibilités de migration des organismes vivant dans les cours d'eau et au bord de ceux-ci sont au cœur de l'interconnexion des cours d'eau (Figure 7-12). Or, en Suisse, les centrales hydroélectriques totalisent environ 1000 obstacles à la montaison et à la dévalaison des poissons et d'autres espèces migratoires telles que les écrevisses. Les centrales devant être assainies vont par conséquent être équipées d'ici à 2030 d'ouvrages de franchissement pour les poissons. De plus, quelque 100 000 seuils et chutes de plus de 0,5 m de haut interrompent la connectivité. Ces ouvrages doivent être supprimés progressivement au fil des projets d'aménagement et d'entretien des cours d'eau.

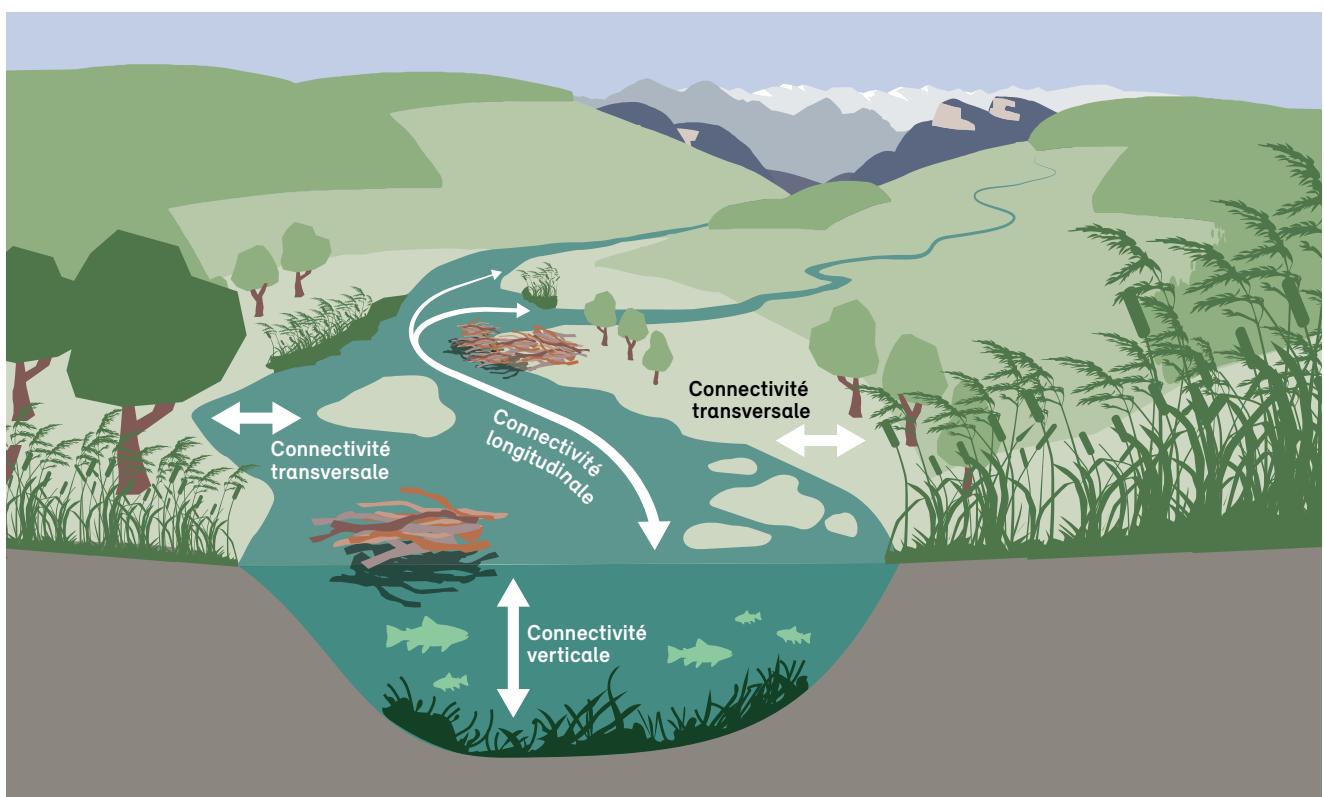
Figure 7-11 : Précieux habitats issus de revitalisations

Près de Rietheim, dans le canton d'Argovie, le Chli Rhi, un bras latéral du Rhin qui avait été comblé, a été dégagé et peut déborder en cas de crue. Un paysage alluvial dynamique a ainsi été créé. Photo prise le 22 août 2016.



Figure 7-12 : Dimensions de la connectivité dans un système hydrographique intact

Une bonne connectivité longitudinale est nécessaire pour que les organismes aquatiques puissent se disséminer le long des cours d'eau. De nombreuses espèces franchissent de longues distances pour se reproduire, mais elles parcourent aussi des distances courtes pour rechercher de la nourriture ou se réfugier pendant des périodes de chaleur, d'étiage ou de crue. Un bon niveau de connectivité transversale (zones alluviales périodiquement inondées) et de connectivité verticale (échanges entre les eaux superficielles et souterraines) est tout aussi important.



Source : d'après OFEV 2011

Pour offrir des habitats variés, les cours d'eau doivent posséder un lit diversifié et bien structuré, des zones avec des vitesses d'écoulement différentes, des possibilités de retrait en cas de situation extrême (p. ex. chenaux d'étiage) et des cachettes pour les organismes aquatiques. Il est plus important que jamais de concevoir les projets d'aménagement des eaux de façon à préserver et à créer des habitats variés. Dans la mesure où les projets de revitalisation sont censés durer plusieurs décennies, ils doivent anticiper le climat futur et tenir compte dès à présent des changements attendus au niveau du débit, de la température et de l'écologie des eaux. Par exemple, la plantation d'arbres sur les rives, en particulier pour les petits cours d'eau, peut procurer suffisamment d'ombre pour freiner la hausse des températures. Les habitats des différentes espèces vont – dans une certaine mesure – se décaler et

de nouvelles espèces vont arriver dans les cours d'eau, tandis que d'autres disparaîtront. Mais ces nouveaux arrivants auront peut-être d'autres besoins vis-à-vis de leur habitat que les espèces actuelles, par exemple en matière de structure ou de vitesse d'écoulement. Il est prévu de revitaliser d'ici à 2090 environ 4000 km de tronçons de cours d'eau et, ainsi, de rétablir les fonctions naturelles de ces espaces (Göggel W. 2012).

Davantage d'espace pour les eaux

Les cours d'eau et leurs rives remplissent de nombreuses fonctions naturelles. Des eaux proches de leur état naturel ont besoin de suffisamment d'espace pour évoluer. La jonction entre l'eau et la terre fait naître sur un espace restreint des habitats très variés : c'est pour cette raison que l'espace réservé aux eaux est crucial pour la biodiver-

sité. En outre, les rives servent de tampon et limitent l'apport de substances nocives et de nutriments. En cas de crue, l'eau et les matériaux charriés peuvent être retenus dans l'espace réservé aux eaux de manière à réduire les pics de crue et les dommages. Enfin, de nombreux cours d'eau alimentent les eaux souterraines.

Les fonctions naturelles d'un cours d'eau ne peuvent être rétablies que si ce dernier dispose d'un espace suffisant. La présence, près de l'eau, d'arbres et de buissons adaptés au site permet de réduire les températures maximales de l'eau, en particulier pour les ruisseaux et les petites rivières, et de créer des refuges thermiques. Les zones d'eau froide ne peuvent cependant servir de refuge que si les organismes peuvent les atteindre (continuité des cours d'eau). Par ailleurs, en plus d'avoir un effet rafraîchissant, le boisement des rives au moyen d'une végétation typique de ces zones accroît aussi la diversité structurelle d'un cours d'eau et revalorise l'habitat qu'il offre à la faune et la flore.

Importance croissante des exigences écologiques relatives aux débits résiduels

En près de 1500 points, les cours d'eau suisses subissent un prélèvement d'eau pour la production d'électricité, la règle étant que le volume prélevé permette au cours d'eau de conserver un débit résiduel approprié. La LEaux de 1992 fixe la manière de déterminer les débits résiduels minimaux. Ce principe ne vaut toutefois que pour les prélevements autorisés après 1992. Pour les concessions plus anciennes, les dispositions relatives au débit résiduel ne s'appliquent qu'en cas d'octroi d'une nouvelle concession. Néanmoins, lorsque cela est économiquement supportable, les tronçons à débit résiduel existants doivent eux aussi être assainis (art. 80 et 81 LEaux). Les débits résiduels sont définis au moyen de l'indicateur hydrologique Q_{347} et des exigences écologiques spécifiques pour le tronçon concerné. Le besoin en eau pour les habitats tributaires du cours d'eau, pour la migration des poissons et pour l'alimentation des eaux souterraines doit alors être pris en compte. La hausse attendue de la température de l'eau du fait des changements climatiques, la baisse des débits estivaux et des débits d'étiage ainsi que la fréquence accrue des sécheresses vont accroître l'importance des exigences écologiques spécifiques lors de la détermination du débit résiduel.

Poursuite rigoureuse de l'assainissement de la force hydraulique

Presque tous les poissons entreprennent de petites ou de grandes migrations au cours de leur vie. Or, l'exploitation de la force hydraulique rompt totalement ou partiellement la continuité de nombreux hydrosystèmes. Les changements climatiques rendent encore plus urgent l'assainissement des quelque 1000 obstacles à la migration des poissons en lien avec les centrales hydroélectriques : ainsi, ces derniers doivent pouvoir, lors des périodes de sécheresse ou des vagues de chaleur, se réfugier dans des tronçons de cours d'eau où ils subiront moins de stress.

Dans les centrales à accumulation, l'eau est collectée dans des lacs de retenue puis relâchée afin de produire du courant. Étant donné que la production d'électricité oscille au gré de la demande et des prix de l'électricité, les tronçons en aval des centrales hydroélectriques subissent des variations rapides de leur débit et de leur niveau d'eau (éclusées). Il existe en Suisse une centaine de centrales hydroélectriques provoquant de telles variations artificielles du débit, qui sont problématiques pour l'écologie des eaux car les animaux sont emportés par le courant ou s'échouent dans des zones asséchées en cas de baisse rapide du débit. Les centrales peuvent également modifier le charriage, en particulier lorsque les zones d'accumulation agissent comme un piège à sédiments et entraînent un déficit de charriage dans le cours aval. C'est pour cette raison que les centrales hydroélectriques à l'origine de variations artificielles du débit et 150 centrales occasionnant des déficits de charriage sont elles aussi assainies (OFEV 2015).

Les mesures de renaturation et d'assainissement décrites permettent de revaloriser les écosystèmes aquatiques, augmentant ainsi leur résilience face aux facteurs de stress climatiques. Ces mesures sur le long terme doivent souvent être complétées, en cas d'événement, par des mesures ayant un impact rapide, comme les plans d'urgence dans le domaine de la pêche. Ainsi, à l'été 2018, de nombreuses embouchures d'affluents ont été creusées le long du haut Rhin dans les cantons de Schaffhouse, de Thurgovie et de Zurich afin de créer des zones de retrait plus fraîches pour les poissons (OFEV 2019b).

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Application rigoureuse des plans de renaturation des cantons : assainissement de la migration piscicole, assainissement des éclusées, assainissement du régime de charriage et revitalisation tenant compte des changements climatiques.
- Évaluation régulière de l'efficacité des plans et mesures de protection des eaux pour la préservation et la création d'habitats aquatiques mieux adaptés au climat, et examen des mesures de protection des eaux à l'aune des changements climatiques.

Autres informations et références sur le thème « Renaturation »

- OFEV (éd.) 2015 : Renaturation des eaux suisses : plans d'assainissement des cantons dès 2015

7.3.4 Protection des ressources en eau et des eaux souterraines

En ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable, les pénuries liées aux périodes de sécheresse peuvent être évitées grâce à une planification et une préparation de qualité. De même, le besoin en eau d'usage pour l'irrigation s'accroît en l'absence de précipitations. Les ressources en eau doivent être planifiées et gérées à l'échelon régional pour protéger les systèmes d'approvisionnement face aux sollicitations accrues et empêcher la surexploitation des eaux souterraines ou superficielles.

Les changements climatiques se traduisent presque partout en Suisse par une sécheresse croissante pendant l'été et l'automne. Parallèlement, le besoin en eau d'usage augmente en été, en particulier pour l'irrigation agricole. La Figure 7-13 montre comment la pénurie d'eau estivale (rapport entre le besoin en eau et le volume disponible dans les eaux superficielles) va évoluer dans les différents bassins versants. Certains d'entre eux affichent déjà durant l'été un déficit d'eau superficielle pour la période de référence (Brunner M. et al. 2019a). Les années normales, la demande d'eau d'usage peut cependant être couverte par des prélèvements dans les eaux souterraines. En cas d'épisode de sécheresse décennal à cen-

tennal, de vastes zones du Plateau et du Jura subissent déjà des pénuries d'eau estivales, comme l'ont confirmé les années de sécheresse 2003, 2015 et 2018, lorsqu'il a fallu interdire les prélèvements dans les eaux superficielles, mais aussi souterraines (OFEV 2019b). En effet, plus aucun prélèvement n'était possible, notamment dans les eaux souterraines de petite taille. Dans la mesure où le volume des eaux souterraines est lui aussi réduit lors des périodes de sécheresse, on peut s'attendre à l'avenir à de plus fortes restrictions régionales concernant les prélèvements d'eaux souterraines.

Garantir l'approvisionnement en eau potable

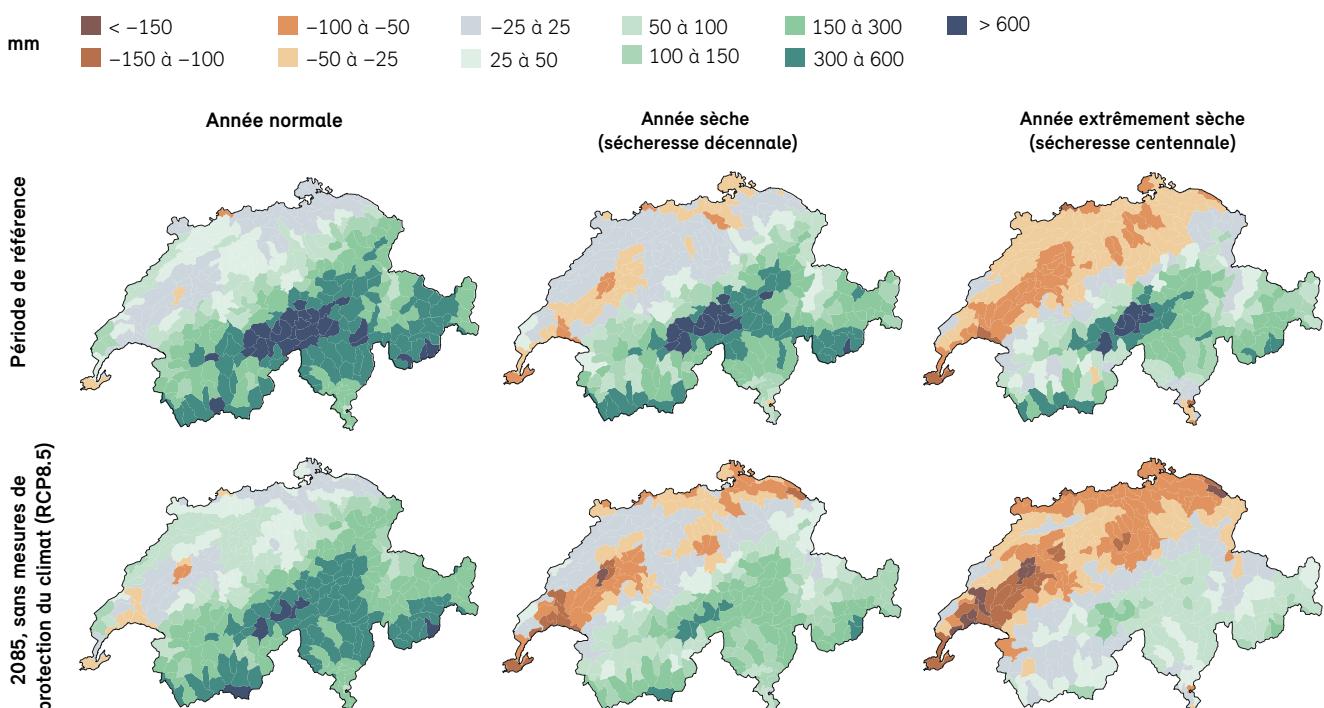
L'alimentation en eau potable peut être assurée grâce à une mise en réseau des systèmes d'approvisionnement en eau et une meilleure distribution de l'eau potable. Pour ce faire, il faut une planification régionale de l'approvisionnement en eau qui permette de définir les mesures concrètes destinées à garantir la fourniture d'eau potable puis de les mettre en œuvre dans le cadre du renouvellement et de l'adaptation usuels des infrastructures concernées. Par ailleurs, il est important que les eaux souterraines utilisées pour l'alimentation en eau potable ne soient pas surexploitées pour répondre à d'autres besoins, en particulier ceux de l'agriculture. De même, l'approvisionnement en eau doit être protégé contre les revendications d'autres utilisateurs souhaitant obtenir de grandes quantités d'eau la moins chère possible. L'approvisionnement en eau à des fins industrielles doit être mis en place ou développé là où cela est nécessaire, en tenant compte notamment de la vérité des coûts. De plus, des mesures agricoles appropriées telles que des techniques d'irrigation innovantes, des drainages adaptés et la culture de végétaux plus résistants à la sécheresse peuvent éviter une surexploitation des eaux et/ou des pénuries d'eau d'usage. La gestion des ressources en eau par les cantons devient de plus en plus cruciale pour éviter les conflits d'intérêts entre les différentes utilisations de l'eau.

Garantir les fonctions des eaux souterraines en cas de sécheresse

L'utilisation des eaux souterraines ne doit pas entraver les fonctions naturelles essentielles de celles-ci. En effet, les eaux souterraines contribuent dans une large mesure à l'alimentation de nombreux cours d'eau en cas d'étiage et empêchent ainsi que des habitats aquatiques

Figure 7-13: Risque de pénurie d'eau durant les mois d'été (juin, juillet, août)

Les cartes ci-dessous représentent le bilan hydrique, c'est-à-dire l'écart entre le volume d'eau disponible dans les eaux superficielles d'un bassin versant et le besoin en eau de cette région, dans les conditions actuelles et futures, sans mesures de protection du climat (scénario RCP8.5), pour une année normale, une année sèche et une année extrêmement sèche. Les nuances de marron indiquent une pénurie d'eau, les nuances de gris et de vert, des excédents d'eau.



Source: Brunner M. et al. (2019a)

s'assèchent complètement ou partiellement. Les forêts dépendent elles aussi des eaux souterraines lors des sécheresses (Seibert J. et al. 2018b). La sensibilité des habitats et la vulnérabilité des captages d'eau souterraine face aux étiages et à la baisse du niveau des eaux souterraines sont très variables d'un lieu à l'autre (Figure 7-14). Il est impératif de considérer à l'échelon régional la totalité des eaux souterraines et leur utilisation afin de préserver autant que possible les fonctions de ces ressources pour les populations et la nature, y compris durant les sécheresses.

Protection rigoureuse des captages d'eau souterraine pour l'approvisionnement en eau potable

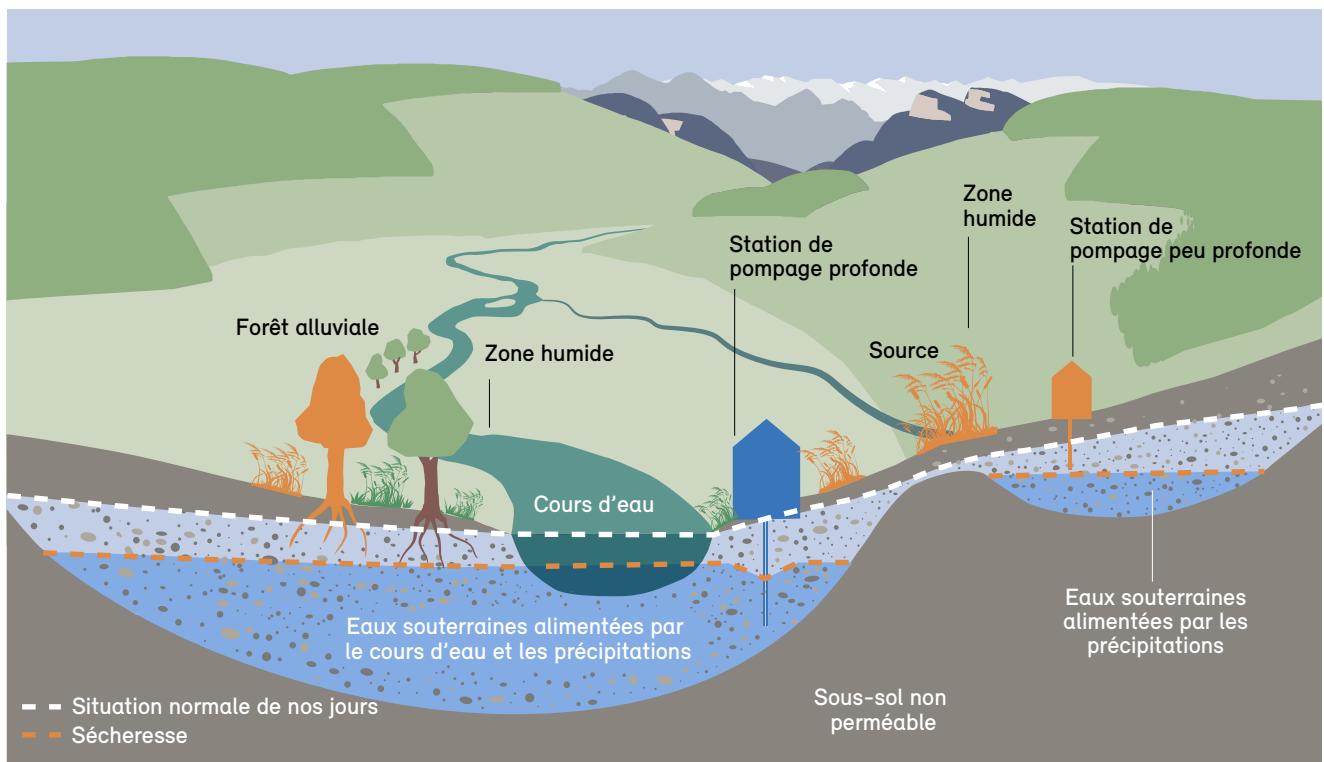
Pendant les périodes de sécheresse, la quantité d'eau souterraine disponible diminue à l'échelle locale, mais aussi régionale. L'approvisionnement en eau est alors particulièrement tributaire d'un petit nombre de cap-

tages d'eau souterraine non affectés par la sécheresse. La protection préventive de ces captages indispensables à l'approvisionnement en eau potable doit être renforcée et accélérée. Il faut à cette fin désigner, pour tous les captages d'eau souterraine d'intérêt public (approvisionnement en eau potable), des aires d'alimentation en vue de la protection de la qualité de l'eau, et des mesures doivent être prises pour assainir les captages contaminés. Cela implique avant tout de modifier l'exploitation agricole de façon à mettre un terme aux vastes pollutions par les nitrates et les métabolites des produits phytosanitaires. De même, des mesures appropriées s'imposent pour empêcher toute contamination potentielle des captages d'eau potable en raison d'une utilisation des sols dans leur aire d'alimentation.

La pression anthropique exceptionnellement élevée sur le Plateau et dans les vallées alpines (cf. Figure 7-15) occa-

Figure 7-14: Fonctions et niveaux des eaux souterraines

Durant de longues périodes de sécheresse associées à de bas niveaux des eaux souterraines, les zones humides et les forêts alluviales s'assèchent temporairement. Parallèlement, les petites stations de pompage ne parviennent plus à atteindre les ressources souterraines, plus basses, et il arrive que des sources se tarissent.



Source: adaptation d'après Hunkeler D. et al. (2020)

sionne souvent des conflits entre la protection des eaux souterraines et le besoin de surfaces pour les habitations, les voies de circulation ou l'agriculture. C'est pourquoi la protection de nombreux captages n'est plus entièrement conforme aux exigences fédérales. Selon les dispositions de la législation en matière de protection des eaux, la nécessité d'agir est très nette dans ce domaine. Qu'elles soient anciennes ou récemment créées, les zones de protection doivent être rigoureusement respectées afin d'éviter tout risque de pollution à court terme résultant d'événements survenus dans l'environnement proche du captage (p. ex. fuite de citerne, fuites dans le réseau de canalisation des eaux usées).

De nombreux captages ont même dû être abandonnés parce qu'il était devenu impossible de garantir une qualité suffisante de l'eau prélevée ou que le risque de pollution était trop élevé. Pour continuer à assurer la

sécurité de l'approvisionnement, il faut résoudre ces conflits de surfaces et lutter contre les pollutions étendues de l'eau souterraine.

Axes de l'adaptation aux changements climatiques

- Mise en œuvre d'une gestion régionale des ressources hydriques par les cantons.
- Exploitation des potentiels pour une utilisation plus efficace de l'eau.
- Application rigoureuse des mesures d'organisation du territoire visant à protéger les eaux souterraines et de la planification en vue de l'usage ménager des eaux souterraines (art. 43 LEaux en association avec l'art. 46, al. 2, LEaux), définition et protection des aires d'alimentation.

Figure 7-15 : Dégradation de l'environnement des captages d'eau souterraine du fait de l'expansion des zones urbanisées et des voies de circulation

Initialement installées sur de vertes prairies en 1962, les stations de pompage des eaux souterraines de Niedergösgen (en marron) et de Schönenwerd (en bleu) se trouvent aujourd'hui dans des zones urbaines.

1962



2020



Source : Lanz K. (éd.) 2020, d'après Hug R. et al. (2017); support de carte : Office fédéral de topographie

Autres informations et références sur le thème « Protection des eaux »

- Page Internet de l'OFEV sur les débits résiduels : [> Thème Eaux > Informations pour spécialistes > Mesures > Renaturation des eaux > Débits résiduels](http://www.bafu.admin.ch)
- Brunner M. et al. 2019a, Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Hydro-CH2018 Bericht.
- Bases pratiques pour une gestion régionale des ressources en eau en trois modules : [> Thème Eaux > Informations pour spécialistes > Mesures > Instruments fondamentaux > Gestion des ressources en eau](http://www.bafu.admin.ch)
- Seibert J. et al. 2018b: BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser

7.4 Importance internationale des eaux suisses

Le Rhin, le Rhône, le Tessin, l’Inn et le Doubs acheminent de grandes quantités d’eau de la Suisse vers les pays voisins, puis jusqu’à la mer. Les pays en aval étant tributaires de cette eau, la Suisse porte une grande responsabilité dans la gestion précautionneuse de cette ressource.

Les pays voisins et en aval exploitent les ressources hydriques de nombreuses façons, que ce soit sous forme d’eau potable, pour l’irrigation, pour le refroidissement ou pour la production d’électricité. De plus, la protection contre les crues et les bases pour une écologie des eaux intacte doivent aussi y être garanties. Les différents intérêts sont réglés par des accords internationaux, des traités entre États ou des organismes spécifiques (cf. le cas du Tessin, p. 113). La navigation sur le Rhin jusqu’à la mer est également garantie par un accord (Convention révisée pour la navigation du Rhin ou Convention de Mannheim de 1868). La Figure 7-16 donne une vue d’ensemble des intérêts faisant l’objet d’accords internationaux.

Conséquences pour les États riverains du Rhin et la navigation rhénane

Les répercussions des changements climatiques sur les eaux transfrontalières affectent parfois davantage les riverains en aval que la Suisse elle-même. Par exemple, les crues du Rhin en aval de Bâle surviennent principalement l’hiver, lorsque le débit du cours amont est faible. Or, en raison de la hausse des précipitations et des débits hivernaux, la contribution de la partie suisse aux crues hivernales va augmenter. Inversement, la contribution au débit issue de la fonte des neiges et des glaciers va reculer, ce qui pourrait encore accroître les futurs épisodes d’étiage dans le cours aval du Rhin durant l’été et l’automne. Ainsi, lors de la situation d’étiage de septembre 2003, plus de 75 % du débit du Rhin à hauteur de Lobith, à la frontière néerlandaise, provenait du bassin versant en amont de Bâle, dont 16 % de la fonte des glaciers (Stahl K. et al. 2016). Pendant cette période d’étiage marquée et persistante, il avait fallu réduire drastiquement la navigation à fort tonnage, et parfois l’interrompre totalement. En conséquence, le volume des importations, par exemple de pétrole brut ou d’aliments pour animaux, sur cette voie fluviale a baissé d’environ 20 % par rap-

port à l’année précédente (Ports rhénans suisses 2019). L’importance économique et stratégique de la navigation rhénane est considérable : en termes de volume, plus de 10 % du commerce extérieur de la Suisse passe par le Rhin, soit quelque 7 millions de tonnes de marchandises et 100 000 conteneurs par an. La Suisse est donc fortement tributaire des importations via le Rhin et elle a tout intérêt à ce que la gestion du fleuve soit coordonnée à l’échelle internationale. Si à l’avenir, conformément aux prévisions des scénarios hydrologiques, des épisodes d’étiage plus fréquents et plus marqués devaient survenir sur le Rhin, cela aurait des conséquences économiques très importantes.

Conflits d’objectifs dans l’utilisation de l’eau

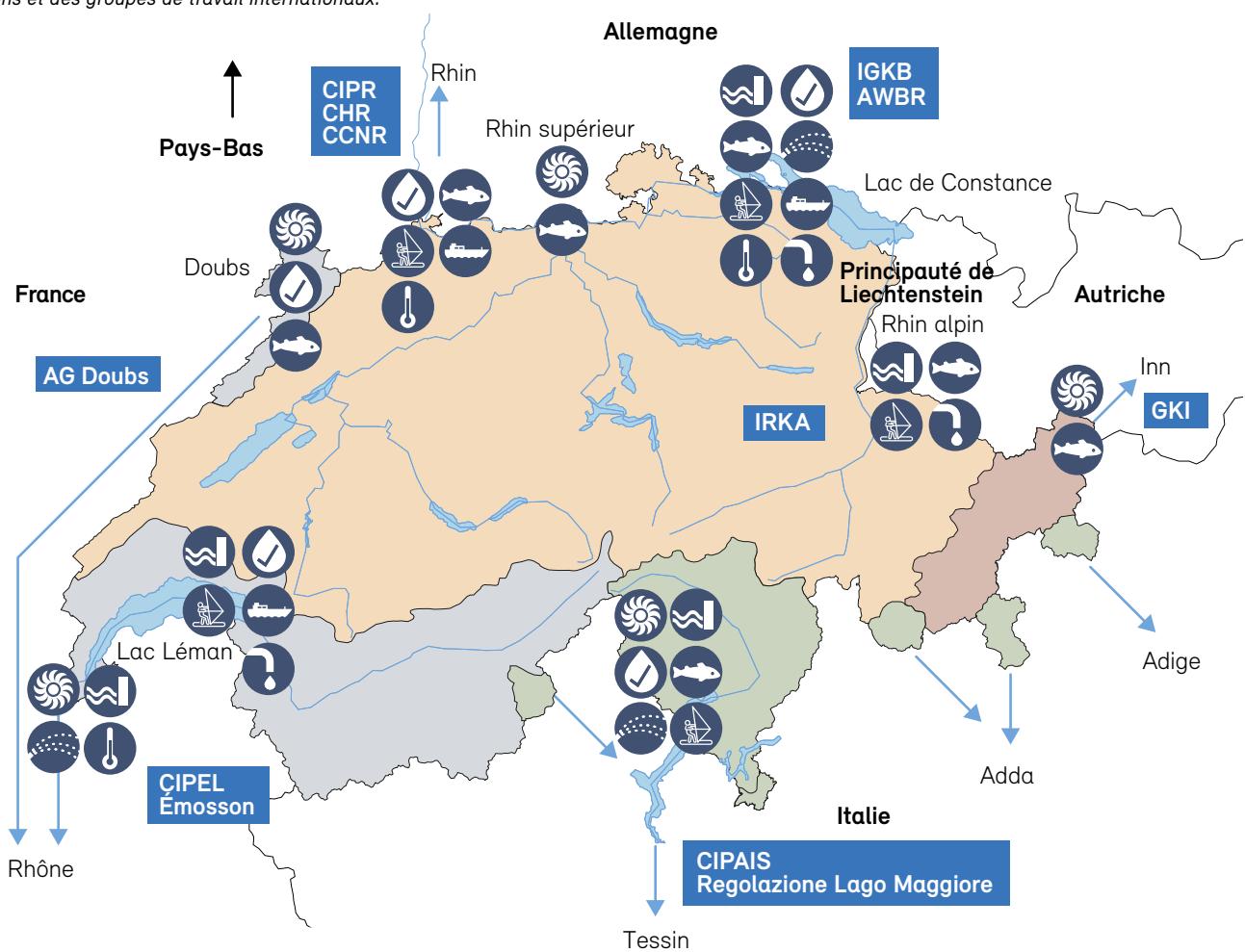
Dans le cadre de la gestion internationale des eaux, les préoccupations relatives aux changements climatiques et les mesures d’adaptation correspondantes varient fortement selon les régions. Les réactions des différents utilisateurs de l’eau peuvent renforcer les conflits d’objectifs entre les riverains en amont et en aval, mais aussi entre différents secteurs, comme le montre le cas du Tessin.

Axes de l’adaptation aux changements climatiques

- Gestion durable des bassins fluviaux internationaux possédant de précieuses artères vitales pour la nature et pour l’homme, afin d’accroître leur résilience face aux répercussions des changements climatiques, garantie ou amélioration de la qualité des eaux, puisque celles-ci sont utilisées par les riverains en aval pour la production d’eau potable.
- Optimisation de l’utilisation de l’eau (gestion de la demande) : création de mesures incitatives pour exploiter les potentiels d’économie d’eau existants, par exemple dans le domaine de l’irrigation ou du refroidissement, afin de réduire la pression sur les ressources hydriques et de simplifier la coopération transfrontalière.
- Garantie de la fiabilité et de la sécurité de la navigation rhénane, par exemple grâce à un approfondissement des chenaux (comme c’est le cas actuellement dans l’agglomération de Bâle).

Figure 7-16: Aspects de gestion coordonnés à l'échelle internationale

La gestion d'eaux transfrontalières nécessite à bien des égards une planification coordonnée. C'est dans ce but qu'ont été créés des commissions et des groupes de travail internationaux.



Different aspects to take into account :

	Force hydraulique		Écologie des eaux		Navigation		Aar/Rhin
	Protection contre les crues		Irrigation		Utilisation thermique		Rhône
	Qualité des eaux		Tourisme		Alimentation en eau potable		Inn/Danube
							Tessin/Pô

Organisms internationaux

- AG Doubs** Groupe de travail binational du Doubs
- AWBR** Fédération des producteurs d'eau Lac de Constance – Rhin
- Regolazione Lago Maggiore** – Organisme de consultation bilatéral italo-suisse sur la régulation du lac Majeur
- CIPAIS** Commission internationale pour la protection des eaux italo-suisses contre la pollution
- CIPEL** Commission internationale pour la protection des eaux du Léman

- Émosson** Groupe de travail franco-suisse sur les accords sur les eaux d'Émosson
- GKI** Gemeinschaftskraftwerk Inn
- IGKB** Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance
- CIPR** Commission Internationale pour la Protection du Rhin
- IRKA** Commission intergouvernementale pour le Rhin alpin
- CHR** Commission Internationale de l'Hydrologie du Bassin du Rhin
- CCNR** Commission centrale pour la navigation du Rhin

Cas du Tessin, lac Majeur

Si la Suisse et l'Italie se partagent à peu près équitablement le bassin versant du lac Majeur, le lac lui-même se trouve principalement en Italie. L'interface de gestion des eaux entre les deux pays est le barrage de Sesto Calende, qui régule l'écoulement du lac Majeur dans le Tessin depuis 1943. Bien que la Suisse n'ait aucune influence sur la régulation du débit, elle s'est accordée dès 1938 avec l'Italie sur une plage de variation du niveau du lac : à l'intérieur de celle-ci, le consortium italien Consorzio del Ticino peut décider librement de l'écoulement du lac.

Pour les provinces de Lombardie et du Piémont, situées en aval, l'irrigation est la priorité durant les mois estivaux : les canaux Villoresi et Naviglio Grande, alimentés par le Tessin, acheminent jusqu'à 120 m³/s vers les surfaces agricoles (Gandolfi C. 2003). D'autres prélevements d'eau profitent aux provinces piémontaises de Vercelli et de Novara, qui concentrent à peu près la moitié de la culture rizicole italienne. Selon les consortiums d'irrigation, le lac devrait être géré comme un bassin de retenue avec un niveau d'eau élevé afin de pouvoir continuer à irriguer sans restrictions en juillet et en août. Il est estimé parallèlement que le besoin en eau de l'agriculture devrait pouvoir être réduit drastiquement grâce à des techniques plus efficaces, puisqu'en 2010, les systèmes de micro-irrigation n'étaient utilisés que sur 1,4 % des surfaces cultivées de Lombardie (Regione Lombardia 2015).

Le cours inférieur du Tessin et la réserve naturelle Parco del Ticino souffrent toute l'année de débits réduits, car jusqu'à 90 % de l'eau du fleuve est détournée dans des canaux. Par conséquent, les associations locales de protection de la nature plaident, tout comme le secteur agricole, pour un niveau du lac Majeur le plus haut possible afin de garantir des débits résiduels suffisants en cas de sécheresse persistante.

Mais les communes riveraines du lac Majeur refusent, de part et d'autre de la frontière, que le niveau maximal du lac soit rehaussé l'été : en effet, un niveau élevé réduit la capacité d'absorption des précipitations intenses, fréquentes dans le bassin versant du lac. Le risque d'inondation augmente sur les rives du lac comme en aval, au niveau de la confluence entre le Tessin et le Pô, près de Pavie. Enfin, un niveau élevé a des répercussions négatives sur l'utilisation des plages et, en particulier au printemps, sur la réserve naturelle Bolle di Magadino.

En réalité, la régulation du débit et du niveau du lac Majeur n'est pas un conflit entre l'Italie et la Suisse, mais plutôt entre les riverains du lac et les acteurs situés sur le cours aval du Tessin.

Autres informations et références sur le thème « Gestion des eaux frontalières »

- Lanz K. (éd.) 2020: « Bewirtschaftung der Grenzwässer », *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz*, Hydro-CH2018 Bericht.

8 Amélioration des bases de connaissances

L'adaptation aux changements climatiques de la gestion des eaux est déjà en cours. Mais pour réagir plus efficacement aux répercussions des changements climatiques et pour continuer à développer et à optimiser des stratégies d'adaptation, il faut davantage de bases de données et de connaissances de grande qualité. Il convient dès lors de combler les lacunes de la recherche mises en évidence et d'améliorer le monitoring. De plus, il faut mener un dialogue avec les utilisateurs de ces informations.

Concernant l'adaptation aux changements climatiques, des bases de connaissances complètes sont nécessaires, d'une part sur les processus naturels en pleine mutation, et de l'autre sur les répercussions déjà observées ou futures de ces évolutions sur l'environnement, la société et l'économie. Ces bases de connaissances et de décisions sont en général constituées par des chercheurs et des spécialistes de l'observation de l'environnement, en étroite collaboration avec des experts et des praticiens. Des spécialistes des différents secteurs de la gestion des eaux s'y réfèrent ensuite pour élaborer les mesures

d'adaptation à proprement parler. Pour être exploitées dans le cadre de la conception de mesures d'adaptation, les bases de connaissances doivent être compilées, interprétées et parfois complétées ou adaptées aux utilisateurs.

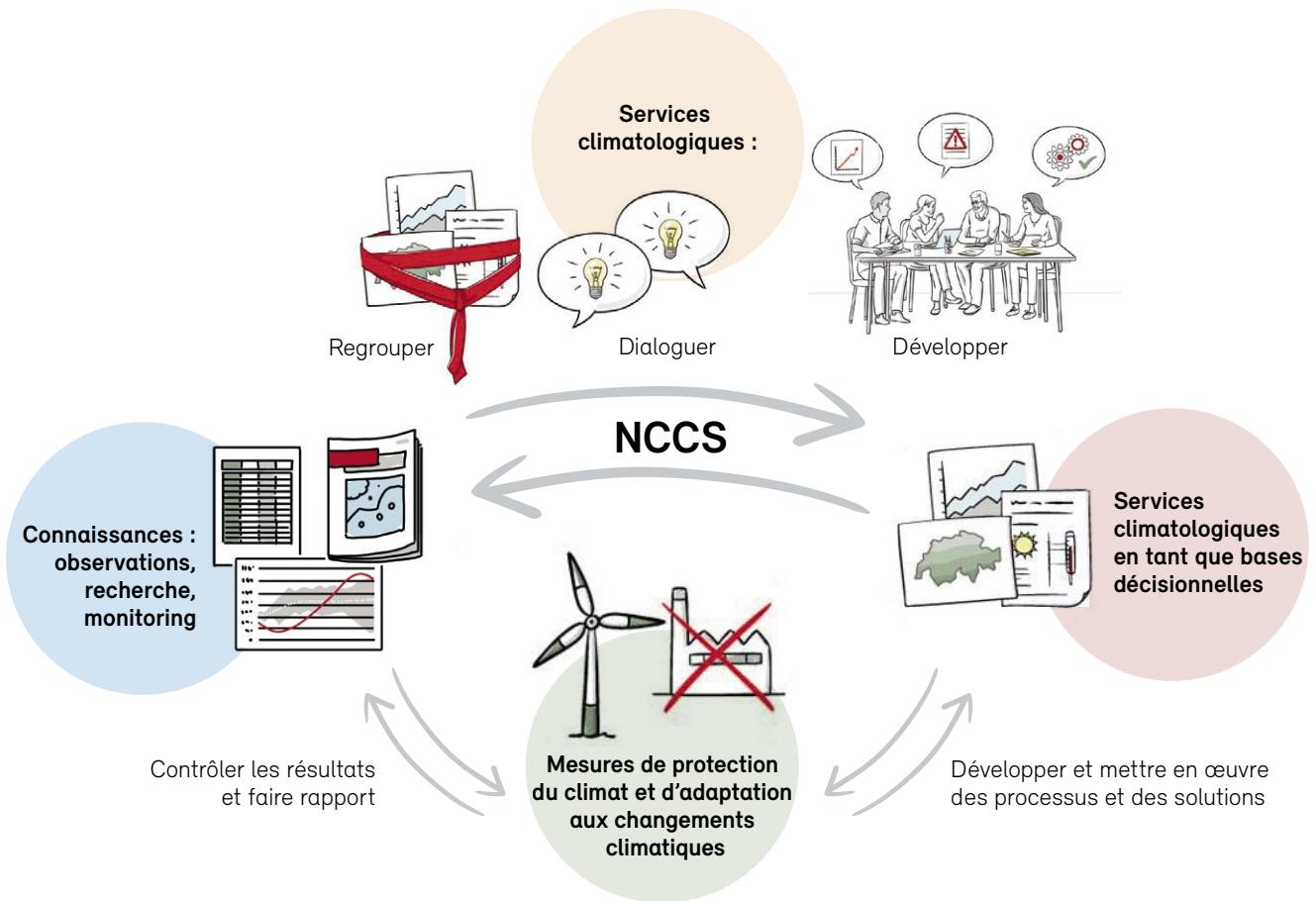
Hydro-CH2018 est un thème prioritaire du NCCS, dont l'objectif est de mettre à disposition les bases de connaissances requises, également appelées «services climatologiques», pour la Suisse (cf. encadré). Il a aussi pour mission d'informer les chercheurs et les spécialistes de l'observation de l'environnement des points sur lesquels les acteurs de la pratique ont besoin de données. Inversement, la mise en œuvre réussie de mesures de protection du climat et d'adaptation livre de précieuses pistes pour l'optimisation des bases de connaissances, en particulier des scénarios climatiques. Ce lien entre connaissances, services climatologiques et mesures, tout comme le rôle du NCCS en la matière, sont représentés à la Figure 8-1. Ces travaux sont réalisés dans le cadre de thèmes prioritaires.

Les services climatologiques et le NCCS

Les services climatologiques sont des informations et des données à caractère scientifique sur le climat passé, présent et futur, et ses incidences sur l'environnement, l'économie et la société. Ils constituent la base de décisions respectueuses du climat. C'est pourquoi l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a créé en 2009 le Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC, Global Framework for Climate Services GFCS, gfcs.wmo.int), qui exhorte à mettre en place des mécanismes de coordination nationaux pour le développement et la diffusion des services climatologiques. En Suisse, c'est le *National Centre for Climate Services* (NCCS), fondé en 2015, qui coordonne ces tâches en tant que réseau de la Confédération. Le NCCS est organisé comme un centre virtuel qui regroupe des unités administratives⁷ centrales ou décentralisées de la Confédération. Il a pour objectif de mutualiser les services climatologiques issus de différents secteurs et de les mettre à disposition pour utilisation, d'encourager le dialogue avec les acteurs et, ainsi, d'établir et de communiquer des services climatologiques coordonnés et taillés sur mesure. Cela permet aux utilisateurs de développer des processus et des solutions pour la protection du climat et l'adaptation aux changements climatiques.

⁷ Membres du NCCS: Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), Office fédéral de l'environnement (OFEV), Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Office fédéral de la santé publique (OFSP), Office fédéral de la protection de la population (OFPP), Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV), Office fédéral de l'énergie (OFEN), EPF de Zurich, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). Partenaires du NCCS: Agroscope, Centre Oeschger pour la recherche climatologique, Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), ProClim, Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance (ECA), Société suisse d'assurance contre la grêle (Suisse Grêle), Association Suisse d'Assurances (ASA).

Figure 8-1 : Interactions entre connaissances, services climatologiques comme base décisionnelle et mesures de protection du climat et d'adaptation aux changements climatiques, et rôle du NCCS au sein de ce système



Source: d'après le NCCS

De nombreux services climatologiques déjà disponibles

Le NCCS élabore, dans le cadre des thèmes prioritaires, des services climatologiques tels que les scénarios climatiques CH2018, qui servent de base à tous les autres thèmes prioritaires et aux scénarios hydrologiques Hydro-CH2018. D'autres projets de la Confédération, comme le programme pilote «Adaptation aux changements climatiques», fournissent également des services climatologiques. Ceux-ci prennent des formes très variées :

- Des synthèses permettent aux intéressés d'accéder facilement et rapidement aux connaissances actuelles, par exemple sous la forme de rapports de base ou finaux, de brochures du NCCS, d'informations sur le site Internet du NCCS (www.nccs.admin.ch) ou de vidéos.
- Des manifestations comme les Stakeholder-Workshops (ateliers des parties prenantes) et le symposium final

du projet Hydro-CH2018, le forum annuel du NCCS ou encore le symposium «Adaptation aux changements climatiques» offrent un espace pour la transmission de connaissances et le dialogue entre la science et la pratique, mais aussi pour la formulation de besoins de la part des parties prenantes.

- Des portails de données tels que l'atlas en ligne du NCCS, l'Atlas hydrologique de la Suisse (HADES) ou le portail de cartes www.map.geo.admin.ch mettent à disposition des données, des graphiques ainsi que des scénarios climatiques et hydrologiques.
- Des prestations de conseil, un travail de communication et un travail médiatique sur le thème des changements climatiques et des services climatologiques sont réalisés.

Demande d'autres services climatologiques

Lors d'un Stakeholder-Workshop effectué en 2018, les besoins en services climatologiques suivants ont été identifiés dans les domaines des scénarios climatiques, de l'hydrologie et de la gestion des eaux :

- Informations sur les périodes de sécheresse et pendant celles-ci : les parties prenantes souhaitent d'une part des informations et des prévisions en temps réel en cas d'événement, mais aussi des prévisions à haute résolution à long terme concernant les paramètres de niveau d'étiage et de sécheresse (p. ex. Q₃₄₇ et NM7Q).
- Informations exhaustives et à l'échelle de la Suisse sur les températures actuelles et futures des eaux en vue de la protection des eaux et de l'utilisation thermique
- Informations exhaustives et à l'échelle de la Suisse sur les fortes précipitations locales et régionales, concernant la période actuelle et future, pour l'évacuation des eaux urbaines et des chaussées ainsi que pour la protection contre les crues
- Données hydrologiques de base comme support de sensibilisation pour l'agriculture et comme base décisionnelle pour la politique agricole, la vulgarisation agricole, les compagnies d'assurance, les agences cantonales et les exploitations agricoles
- Informations dans le domaine des eaux souterraines sur le transport de chaleur, en particulier pour les régions urbaines avec une utilisation importante des sondes géothermiques ; sur les processus de stockage dans les aquifères et sur l'importance des régions karstiques pendant les périodes d'étiage
- Activités et supports pour la formation, la communication, la sensibilisation et le conseil

Poursuite ciblée de la recherche

Pour couvrir cette demande de services climatologiques, il faut entre autres continuer les activités de recherche. Outre la poursuite de la recherche concernant les données de base dans le but d'améliorer la connaissance des processus et les modèles qui en découlent, les domaines ci-dessous ont été identifiés comme particulièrement importants :

- Développement de la modélisation climatique et de la réduction d'échelle («downscaling») statistique, notamment en tenant compte des processus et struc-

tures localisés, tels que la formation de précipitations convectives (p. ex. orages). L'objectif est d'améliorer la résolution spatiale et temporelle, mais aussi la cohérence entre les différentes variables climatiques. Cela devrait permettre d'émettre des prévisions plus précises sur les évolutions futures des crues.

- Prévisions sur l'évolution/la modification des crues de grande envergure en termes de probabilité, de débit et d'étendue spatiale
- Prise en considération systématique de l'ensemble du cycle de l'eau : atmosphère, surface terrestre, hydro(géo)logie, écosystèmes et impacts des diverses utilisations. Les différents sous-systèmes dépendent les uns des autres et s'influencent grandement. La plupart des modèles environnementaux se limitent toutefois à l'un de ces sous-systèmes, tandis que les autres sont fortement simplifiés ou pris en compte seulement en tant que limites constantes. Il est alors très difficile d'identifier et de quantifier les effets de rétroaction entre les sous-systèmes.
- Analyse approfondie des impacts des changements climatiques sur la qualité de l'eau et sur les écosystèmes aquatiques. Par exemple, on sait encore peu de choses sur les conséquences d'un accroissement de l'irrigation sur la charge des eaux en pesticides et en nitrates ou sur les répercussions des changements climatiques sur l'érosion et le transport de sédiments. Des lacunes sont également constatées en ce qui concerne l'effet combiné des charges en diverses substances et du stress (multifactoriel) lié au climat sur les écosystèmes aquatiques.
- Gestion des incertitudes que renferment les prévisions, notamment quant aux évolutions qui modifient un système rapidement et de manière irréversible pour transformer son état (points de basculement). Les connaissances sur ces points de basculement ne sont pour l'instant pas suffisantes pour une modélisation. Un système d'alerte précoce approprié est pourtant indispensable pour pouvoir empêcher des changements irréversibles. D'où la nécessité d'approfondir la recherche dans le domaine des points de basculement.
- Recherche socio-économique et politique : les demandes concernent des scénarios socio-économiques comme données d'entrée pour la modélisation environnementale, des analyses coûts-avantages de la protection du climat et des mesures d'adaptation, mais

aussi un travail sur l'acceptation et les valeurs (légitimation des décisions d'action) ainsi que la définition d'objectifs en matière d'évolution future des eaux.

Parallèlement à la mise à disposition de ces bases scientifiques, il faudrait aussi continuer d'intensifier les liens entre la recherche et la pratique, par exemple à travers la création d'interfaces systématiques (telles que la plate-forme VSA sur la qualité de l'eau).

Actualisation régulière des scénarios hydrologiques

Les mesures d'adaptation aux changements climatiques s'appuient sur les scénarios hydrologiques et sont parfois orientées vers le très long terme. Une actualisation fréquente des scénarios hydrologiques pourrait donc rendre plus complexe l'adaptation. C'est pourquoi ces scénarios ne devraient être actualisés qu'en cas de modifications importantes du régime des eaux. Le dialogue avec les utilisateurs doit être l'occasion de déterminer quelles sont ces transformations. Parmi les éléments entraînant de grandes modifications des scénarios hydrologiques, on peut citer de nouveaux résultats provenant de générations futures de scénarios climatiques, de nouvelles connaissances sur les processus ou une meilleure disponibilité des données de base. Pour ce faire, une opérationnalisation de l'élaboration des scénarios hydrologiques (analogue à celle des scénarios climatiques) et un monitoring des évolutions scientifiques dans le cadre du NCCS sont nécessaires.

Mieux axer le monitoring existant sur les questions climatiques

Des bases de données de qualité sur le climat, le régime des eaux, la gestion des eaux et les caractéristiques des différentes zones sont indispensables, tant pour la recherche que pour l'élaboration de scénarios ou la mise en œuvre des mesures d'adaptation dans le domaine de l'eau. Pour pouvoir observer et documenter les changements des eaux liés au climat, il faut de longues séries de mesures homogènes et influencées le moins possible par la gestion des eaux (c'est-à-dire par les utilisations humaines). Il est donc très important de poursuivre les séries de mesures qui remplissent ces critères. Mais cela ne va pas de soi car les stations de mesure existantes doivent sans cesse être abandonnées ou déplacées, par exemple en raison de mesures d'aménagement des eaux

visant à améliorer la protection contre les crues, de l'équipement ou de la transformation de centrales hydroélectriques, ou encore pour simplifier le monitoring.

Jusqu'à une époque récente, le monitoring de paramètres hydrologiques (p. ex. débit, niveau des eaux souterraines) servait principalement à l'utilisation de l'eau, à la protection contre les crues ou à la protection des eaux, et non à l'observation des répercussions des changements climatiques. C'est pour cette raison que certains paramètres et bassins versants importants d'un point de vue climatique sont sous-représentés dans les réseaux de mesure. Ce phénomène concerne en premier lieu les régions alpines recouvertes de glaciers pour les mesures de débit, et les petits cours d'eau du Plateau pour le réseau de mesure de la température de l'eau. Quant aux grands lacs, il faut renforcer l'enregistrement continu des profils verticaux de température. Le monitoring est insuffisant, voire encore inexistant, pour les lacs alpins qui sont en train de se former suite au retrait des glaciers. Il manque également des données sur le transport de sédiments et l'humidité du sol.

Au niveau international, les données issues des nombreuses séries de mesures climatiques sont regroupées et mises à disposition notamment par le Système mondial d'observation du climat (SMOC)⁸. En Suisse, différents instituts exploitent les réseaux de mesure qui, ensemble, fournissent un très large aperçu des impacts des changements climatiques. Le SMOC Suisse a pour objectif de conserver ces séries de mesures, de les développer si nécessaire et de les coordonner.

D'importantes bases de données sont manquantes ou insuffisantes

La modélisation hydrologique, mais aussi les modélisations des évolutions dans les domaines de l'agriculture, de la sylviculture ou de l'écologie constituent la base pour diverses mesures d'adaptation. Mais tous ces modèles requièrent des données de base qui sont actuellement indisponibles ou dont la qualité et la résolution sont insuffisantes. Ce problème concerne particulièrement les informations systématiques et à grande échelle sur les sols, la géologie et l'utilisation du sol. La priorité doit être

⁸ <https://geos.wmo.int>

donnée ici à la collecte d'informations sur les sols pour l'ensemble de la Suisse.

Aujourd'hui, la plupart des cantons ne collectent pas systématiquement de chiffres sur l'utilisation actuelle de l'eau par l'agriculture, le tourisme, l'industrie et l'artisanat. De même, il n'existe pas toujours de scénarios socio-économiques permettant de prévoir l'évolution future de la consommation d'eau. La consommation d'eau des utilisateurs individuels, mais aussi de branches entières devrait pourtant être connue pour servir de base à une adaptation durable de la gestion des eaux aux changements climatiques. En effet, la connaissance précise de schémas de consommation permet de dimensionner correctement les réseaux d'approvisionnement et d'adapter l'utilisation au volume d'eau global disponible sur le long terme.

De même, il n'existe pas en Suisse de recueil systématique des données sur les impacts déjà observés des changements climatiques sur la gestion des eaux, par exemple sur les lieux et les moments auxquels il faut prononcer des interdictions de procéder à des prélèvements d'eau en cas d'étiage. Certes, des données sont disponibles à ce sujet à l'échelon cantonal, régional et local ou encore chez des acteurs privés, mais elles ne sont pas collectées et regroupées systématiquement et uniformément. Les informations relatives à la gestion des eaux sont pourtant particulièrement importantes pour l'adaptation aux changements climatiques, et il est aujourd'hui nécessaire de coordonner les jeux de données sur les impacts climatiques et de les mettre à disposition de manière centralisée.

9 Conclusion : mesures de protection du climat et adaptation aux changements climatiques nécessaires

Les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau sont d'ores et déjà perceptibles et vont encore s'accentuer à l'avenir. Si les changements climatiques se poursuivent à un rythme effréné, les eaux subiront de profonds bouleversements, avec des répercussions désastreuses sur leur écologie et leur gestion. En revanche, si l'on parvient à atteindre les objectifs de l'Accord de Paris et à contenir le réchauffement mondial nettement en dessous de 2 °C, nombre de ces mutations pourront être évitées, et l'adaptation aux changements climatiques sera plus facile et moins coûteuse.

Les résultats d'Hydro-CH2018 montrent que les débits hivernaux vont continuer de croître et les débits estivaux, de diminuer. La fonte des glaciers va elle aussi se poursuivre, et les chutes de neige se feront de plus en plus rares. Les épisodes exceptionnels de sécheresse et de chaleur vont devenir toujours plus fréquents l'été, entraînant des situations de pénurie d'eau. Les températures des eaux vont augmenter, parfois avec de graves conséquences pour les organismes aquatiques. L'évolution future présente cependant encore des incertitudes, notamment quant à la fréquence des événements hydrologiques extrêmes ou l'atteinte de points de basculement écologiques à partir desquels les changements sont profonds et irréversibles. Pour mieux anticiper les développements à venir, il est indispensable d'effectuer un monitoring des changements, d'améliorer les bases de connaissances et de disposer de scénarios hydrologiques fiables. Il convient donc de garantir et de développer une infrastructure de mesure hydrologique solide, avec des séries de mesures sûres. Il faut également des prévisions relatives à la sécheresse et aux étiages reposant sur de nouvelles méthodes issues de la numérisation et de la télédétection.

La protection des eaux, l'utilisation des eaux, la protection contre les crues, mais aussi l'agriculture doivent

s'adapter aux nouvelles conditions hydrologiques, marquées par un changement dans la disponibilité de l'eau. Comme le révèle une comparaison des scénarios pour les cours d'eau en été, l'ampleur de ces évolutions variera cependant considérablement selon que l'évolution du climat suive un scénario avec ou sans mesures de protection du climat. Avec des mesures rigoureuses de protection du climat, la hausse des températures des cours d'eau du Plateau peut être contenue en dessous de 2 °C d'ici à la fin du siècle et la baisse des débits estivaux, limitée à 20 %. Inversement, sans mesures de protection du climat, les cours d'eau du Plateau se réchaufferaient d'environ 4,5 °C et la diminution des débits estivaux pourrait atteindre 50 %, même en moyenne pluriannuelle. Cela se traduirait également par un assèchement plus fréquent des petits cours d'eau. Par conséquent, le réchauffement de l'eau et la diminution des débits d'une telle ampleur provoqueraient un changement sans précédent des cours d'eau, du moins en été. Les écosystèmes aquatiques actuels, tout comme la composition et la répartition des espèces, se modifieraient radicalement et inexorablement.

Il est donc primordial de limiter les changements climatiques aussi pour le domaine des eaux. Afin que les écosystèmes puissent remplir leurs fonctions essentielles même dans un avenir lointain, une démarche prospective dans le développement des eaux est également décisive. Le programme de renaturation visant à revitaliser les cours d'eau et à assainir la force hydraulique sur le plan écologique, la garantie de débits résiduels appropriés, l'équipement des STEP d'une étape de traitement supplémentaire et la réduction des apports diffus émanant de l'agriculture jouent un rôle majeur pour réduire la pression subie par les eaux, qui devrait s'accentuer du fait des changements climatiques. La protection des eaux et les mesures en faveur de cours d'eau les plus naturels possible se révèlent donc d'autant plus importantes.

Les besoins en eau d'usage, en particulier de la part de l'agriculture, vont fortement augmenter, tandis que le volume d'eau global disponible va diminuer. Bien souvent, les utilisations et systèmes actuels ne pourront être conservés et devront être adaptés. Dans le domaine de l'agriculture, il peut s'agir, par exemple, d'opter pour des cultures ou des variétés résistantes à la sécheresse et à la chaleur, d'utiliser l'eau plus efficacement ou de créer des infrastructures pour stocker et acheminer l'eau. Dans l'industrie et l'artisanat, il est là aussi important de développer et de promouvoir des techniques et des procédés économies en eau. En outre, des planifications régionales d'approvisionnement en eau couvrant toutes les utilisations sont nécessaires pour éviter les pénuries locales.

Les changements vont être particulièrement marqués en haute montagne : l'élévation de la limite du zéro degré aura des répercussions sur le tourisme hivernal, avec des conséquences potentiellement désastreuses pour l'industrie touristique. En revanche, de nouvelles opportunités se présenteront pour le tourisme estival dans les Alpes et autour des points d'eau. La fonte des glaciers et le dégel du permafrost, mais aussi l'intensification des précipitations intenses vont accroître les dangers naturels, déjà pris en compte dans le cadre de la gestion intégrée des risques.

De nouveaux lacs, cours d'eau et zones alluviales apparaîtront en haute montagne. Essentiels sur le plan écologique, ils pourraient aussi être exploités pour la production d'électricité. Par conséquent, il est primordial de lancer un processus de clarification à l'échelle de la Suisse et pour l'ensemble des secteurs afin de déterminer la manière dont seront gérés ces nouveaux espaces. La transformation hydrologique à l'œuvre en haute montagne aura des répercussions également sur les pays voisins, où de nombreuses utilisations dépendent des cours d'eau provenant de Suisse.

La nature, mais aussi l'utilisation de l'eau, la protection contre les crues et la protection des eaux ont déjà commencé à s'adapter aux nouvelles conditions. Avec sa stratégie «Adaptation aux changements climatiques en Suisse» (Confédération suisse 2012), qui définit les objectifs de l'adaptation et décrit les principaux défis ainsi que les champs d'action pour l'adaptation au niveau

fédéral, le Conseil fédéral a posé le cadre d'une procédure coordonnée. Cette stratégie a été mise en œuvre à travers un premier plan d'action pour les années 2014 à 2019 (Confédération suisse 2014). Un deuxième plan d'action, adopté en 2020, règle la mise en œuvre pour les années 2020 à 2025 (Confédération suisse 2020).

Les résultats issus d'Hydro-CH2018 – du moins ceux qui étaient déjà disponibles – ont été pris en compte dans l'élaboration du plan d'action de 2020 à 2025 (tableau A-3). Mais les mesures d'adaptation ne seront efficaces que si les changements du régime des eaux liés au climat ne se produisent pas trop vite. Dans le domaine des eaux, le constat est sans appel : les mesures de protection du climat ne sont pas une option, mais une nécessité, et sont absolument incontournables pour empêcher des changements de grande ampleur et limiter les coûts de l'adaptation.

Les changements climatiques sont un phénomène mondial. L'Accord de Paris, conclu le 12 décembre 2015 lors de la conférence sur le climat organisée dans la capitale française, engage les États signataires à contenir le réchauffement mondial en dessous de 2 °C, l'objectif étant de limiter la hausse à 1,5 °C. La Suisse a ratifié cet accord le 6 octobre 2017, et s'est ainsi engagée à réduire d'ici à 2030 ses émissions de gaz à effet de serre de 50 % par rapport à 1990. Elle entend également atteindre le niveau de zéro émission nette d'ici à 2050. Il demeure néanmoins impératif, en parallèle, de redoubler d'efforts dans l'adaptation aux changements climatiques.

10 Références bibliographiques

Rapports réalisés dans le cadre de Hydro-CH2018

Arnoux M., Hunkeler D., Cochand F., Brunner P., Schaeffli B. 2020a : Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants alpins face aux changements climatiques. Rapport réalisé dans le cadre de Hydro-CH2018. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 23.

Ayala A., Farinotti D., Stoffel M., Huss M. 2020 : Glaciers. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 44. DOI 10.3929/ethz-b-000398099.

Benateau S., Gaudard A., Stamm C., Altermatt F. 2019 : Climate change and freshwater ecosystems : Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 110. DOI : 10.5167/uzh-169641.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019a : Wasserspeicher. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Vermeidung zukünftiger Wasserknappheit ? Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 66.

Burlando P., Peleg N., Moraga-Navarrete S., Molnar P., Fatichi S. 2020 : Evaluation of future hydrological scenarios using stochastic high-resolution climate data. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 50.

Epting J., Huggenberger P., Affolter A., Michel A. 2020 : Ist-Zustand und Temperatur-Entwicklung Schweizer Lockergesteins-Grundwasservorkommen. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 119.

Freudiger D., Vis M., Seibert J. 2020 : Quantifying the contributions to discharge of snow and glacier melt. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 50.

Hirschi M., Davin E.L., Schwingshackl C., Wartenburger R., Meier R., Gudmundsson L., Seneviratne S.I. 2020 : Soil moisture and evapotranspiration. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 48. DOI : 10.3929/ethz-b-000389455.

Holzkämper A., Cochand F., Rössler O., Brunner P., Hunkeler D. 2020 : AgriAdapt – Modellgestützte Untersuchung der Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf Grundwasserressourcen im Berner Seeland. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 38.

Hunkeler D., Malard A., Arnoux M., Jeannin P.Y., Brunner P. 2020 : Effect of Climate Change on Groundwater Quantity and Quality in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 79.

Kohn I., Stahl K., Stoelzle M. 2019 : Low Flow Events – a Review in the Context of Climate Change in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 75. DOI : 10.6094/UNIFR/150448.

Lanz K. (éd.) 2020 : Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 400.

Marty C., Bavay M., Farinotti A., Huss M. 2020 : Snow. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 25. DOI : 10.16904/sl2.2.

Matti B., Andres N., Zappa M., Bogner K., Liechti K., Seibert J., van Meerveld I., Vivirol D., Seneviratne S.I., Hirschi M., Schaeffli B. (en cours d'élaboration) : Uncertainty and further methodological topics. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

Michel A., Bouffard D., Huwald H., Råman Vinnå C., Schmid M. (en cours d'élaboration) : Water temperature in lakes and rivers. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2020 : Neue hydrologische Szenarien für die Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 51.

Nötzli J. et Phillips M. 2019 : Mountain permafrost hydrology. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 18. DOI : 10.16904/slf.1.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020a : Eau et tourisme. Rapport dans le cadre de Hydro-CH2018. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 23.

Reynard E., Calianno M., Milano M. 2020b : Wasser und Tourismus. In : Lanz K. (éd.) : Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 45.

Ruiz-Villanueva V. et Molnar P. 2020 : Past, current and future changes in floods in Switzerland. Hydro-CH2018 report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 79.

Speerli J., Gysin S., Bieler S., Bachmann A.-K., 2020 : Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenttransport. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 48.

Speich M., Lischke H., Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Zappa M. (en cours d'élaboration) : Einfluss der Walddynamik auf den zukünftigen Wasserhaushalt von Schweizer Einzugsgebieten. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

Weingartner R. et Schwanbeck J. 2020 : Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961–2018. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 42.

Weingartner R. 2018 : Veränderung der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 67.

Publications scientifiques réalisées dans le cadre de Hydro-CH2018

Arnoux M., Halloran L.J.S., Berdat E., Hunkeler D. 2020b : Characterising seasonal groundwater storage in alpine catchments using timelapse gravimetry, water stable isotopes, and water balance methods. *Hydrological Processes*, 34(22) : 4319–4333. DOI : 10.1002/hyp.13884.

Arnoux M., Brunner P., Schäfeli B., Mott R., Cochand F., Hunkeler D. 2021 : Low-flow behavior of alpine catchments with varying quaternary cover under current and future climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 592 : 125591. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2020.125591.

Arnoux M., Cochand F., Schäfeli B., Jonas T., Brunner P., Hunkeler D. : Storage in quaternary deposits buffers the discharge response to climate change of a small alpine catchment. En préparation pour la revue *Groundwater*.

Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D., Stähli M. 2019b : Beitrag von Wasserspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? *Wasser Energie Luft*, 111(3), Baden : 145–152.

-
- Brunner M., Björnson Gurung A., Zappa M., Zekollari H., Farinotti D., Stähli M. 2019c: Present and Future Water Scarcity in Switzerland: Potential for Alleviation through Reservoirs and Lakes. *Science of The Total Environment*, 666: 1033–1047. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.
- Brunner M., Farinotti D., Zekollari H., Huss M., Zappa M. 2019d: Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11): 4471–4489. DOI: 10.5194/hess-23-4471-2019.
- Cochand F., Brunner P., Hunkeler D., Rössler O. Holzkämper A.: Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater dynamics. En préparation pour la revue *Sciences of the Total Environment*.
- Epting J., Michel A., Affolter A., Huggenberger H. 2021: Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 11, 100071. DOI: 10.1016/j.jhydro.2020.100071.
- Gaudard A., Råman Vinnå L., Bärenbold F., Schmid M., Bouffard D. 2019: Toward an open access to high-frequency lake modeling and statistics data for scientists and practitioners – the case of Swiss lakes using Simstrat v2.1. *Geoscientific Model Development*, 12(9): 3955–3974. DOI: 10.5194/gmd-12-3955-2019.
- Holzkämper A. 2020: Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agricultural Water Management*, 237(106202). DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106202.
- Kellner E. et Brunner M. 2020: Reservoir governance in world's water towers needs to anticipate multi-purpose use. *Earth's Future*. DOI: 10.1029/2020EF001643.
- Michel A., Brauchli T., Lehning M., Schaeefli B., Huwald H. 2019: Stream temperature evolution in Switzerland over the last 50 years. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1): 115–142. DOI: 10.5194/hess-24-115-2020.
- Michel A., Carletti F., Sharma V., Huwald H., Lehning M.: Snow cover changes in Switzerland using an enhanced temporal downscaling method for climate change scenarios in Switzerland. En préparation.
- Michel A., Lehning M., Huwald H.: Future trends in river temperature in Switzerland using physical models. En préparation.
- Moraga S., Peleg N., Fatichi S., Molnar P., Burlando P.: High-resolution investigation of climate change in mountain catchments reveals diverse impacts on streamflow and its uncertainties. En préparation pour la revue *Journal of Hydrology*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021a: Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. Soumise à la revue *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021b: Changes in high and low flow indicators in mesoscale Swiss catchments under climate change. En préparation pour la revue *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Mülchi R., Rössler O., Schwanbeck J., Weingartner R., Martius O. 2021c: Hydro-CH2018-Runoff: An ensemble of daily simulated discharge data (1981–2099) under climate change conditions for 105 catchments in Switzerland. En préparation pour la revue *Earth System Science Data*.
- Råman Vinnå L., Medhaug I., Schmid M., Bouffard D. 2021: The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient. *Nature Communications Earth & Environment* 2, 35. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>.
- Schwingshackl C., Davin E.L., Hirschi M., Sørland S.L., Wartenburger R., Seneviratne S.I. 2019: Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO₂ response. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114019. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4949.

Speich M., Zappa M., Scherstjanoi M., Lischke H. 2020: FORests and HYdrology under Climate Change in Switzerland v1.0: a spatially distributed model combining hydrology and forest dynamics. *Geoscientific Model Development*, 13(2): 537–564. DOI: 10.3929/ethz-b-000402828.

Autres références bibliographiques

Académies suisses des sciences 2016 : Coup de projecteur sur le climat suisse. Etat des lieux et perspectives. *Swiss Academies Reports*, 11(5): 218.

Alcaraz M., García-Gil A., Vázquez-Suñé E., Velasco V. 2016: Advection and dispersion heat transport mechanisms in the quantification of shallow geothermal resources and associated environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 543: 536–546. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.022.

ALG (Abteilung Landschaft und Gewässer) 2017 : Ereignisanalyse Hochwasser Juli 2017 : Gefahrenkarte mit betroffenen Gebäuden, Region Zofingen, Stand 25. Juli 2017. Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Kanton Aargau, Sektion Wasserbau, Aarau.

Altermatt F. 2010 : Tell me what you eat and I'll tell you when you fly: diet can predict phenological changes in response to climate change. *Ecology Letters*, 13(12): 1475–1484. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01534.x.

Altermatt F., Seymour M., Martinez N. 2013 : River network properties shape a-diversity and community similarity patterns of aquatic insect communities across major drainage basins. *Journal of Biogeography*, 40(12): 2249–2260. DOI: 10.1111/jbi.12178.

ARE (Office fédéral du développement territorial) et OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2005 : Aménagement du territoire et dangers naturels. *L'environnement pratique*, VU-7516-F, Berne : 50.

Badoux A., Hofer M., Jonas T. 2013 : Hydrometeorologische Analyse des Hochwasserereignisses vom 10. Oktober 2011. Institution fédérale de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Office fédéral de météorologie et climatologie MétéoSuisse, geo7 geowissenschaftliches Büro, Office fédéral de l'environnement (OFEV) : 92.

Bálint M., Domisch S., Engelhardt C.H.M., Haase P., Lehrian S., Sauer J., Theissinger K., Pauls S.U., Nowak C. 2011 : Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Climate Change*, 1(6): 313–318. DOI: 10.1038/nclimate1191.

Begert M., Stöckli R., Croci-Maspoli M. 2018 : Klimaentwicklung in der Schweiz – Vorindustrielle Referenzperiode und Veränderung seit 1864 auf Basis der Temperaturmessung. *Rapports techniques MétéoSuisse*, 274, Zurich : 23.

Bernacchi C.J. et van Loocke A. 2015 : Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1): 599–622. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114834.

Binderheim E. et Göggel W. 2007 : Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau : Aspect général. *L'environnement pratique*, 0701. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 43.

Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A. et al. 2020: Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583(7817): 560–566. DOI: 10.1038/s41586-020-2478-3.

Borsuk M.E., Reichert P., Peter A., Schager E., Burkhardt-Holm P. 2006 : Assessing the decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Swiss rivers using a Bayesian probability network. *Ecological Modelling*, 192(1): 224–244. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.006.

- Braun C., Gälli R., Leu C., Munz N., Schindler Wildhaber Y., Strahm I., Wittmer I. 2015 : Micropolluants dans les cours d'eau provenant d'apports diffus. *État de l'environnement*, 1514. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 78.
- Brönnimann S., Rohr C., Stucki P., Summermatter S., Bandhauer M., Barton Y., Fischer A., Froidevaux P., Germann U., Grosjean M., Hupfer F., Ingold K., Isotta F., Keiler M., Martius O., Messmer M., Mülchi R., Panziera L., Pfister L., Raible C.C., Reist T., Rössler O., Röthlisberger V., Scherrer S., Weingartner R., Zappa M., Zimmermann M., Zischg A.P. 2018 : 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte. Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensis* G94: 52. DOI:10.4480/GB2018.G94.01.
- Brönnimann S., Frigerio L., Schwander M., Rohrer M., Stucki P., Franke J. 2019 : Causes of Increased Flood Frequency in Central Europe in the 19th Century. *Climate of the Past*, 15(4) : 1395–1409. DOI : 10.5194/cp-15-1395-2019.
- Brown L.E., Hannah D.M., Milner A.M. 2007 : Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology*, 13(5) : 958–966. DOI : 10.1111/j.1365-2486.2007.01341.x.
- Brunner P. et Simmons C.T. 2012 : HydroGeoSphere : A fully integrated, physically based hydrological model. *Ground Water*, 50(2) : 170-176. DOI : 10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x.
- Burkhardt-Holm P., Peter A., Segner H. 2002 : Decline of fish catch in Switzerland. *Aquatic Sciences*, 64(1) : 36–54. DOI : 10.1007/s00027-002-8053-1.
- Burkhardt-Holm 2009 : Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang ? Resultate aus der Schweiz. *Environmental Sciences Europe*, 21(2) : 177–185. DOI : 10.1007/s12302-009-0043-7.
- Carlier C., Wirth S.B., Cochand F., Hunkeler D., Brunner P. 2018 : Geology controls streamflow dynamics, *Journal of Hydrology*, 566 : 756–769. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2018.08.069.
- CH2014-Impacts 2014 : Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim, Berne : 136. ISBN : 978-3-033-04406-7.
- Comola F., Schaeefli B., Rinaldo A., Lehning M. 2015 : Thermodynamics in the hydrologic response : Travel time formulation and application to Alpine catchments. *Water Resources Research*, 51(3) : 1671–1687. DOI : 10.1002/2014WR016228.
- Conseil fédéral (éd.) 2017 : Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires. Rapport du Conseil fédéral, Berne : 81.
- Davidson E.A. et Janssens I.A. 2006 : Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081) : 165–173. DOI : 10.1038/nature04514.
- Davin E.L., Stöckli R., Jaeger E.B., Levis S., Seneviratne S.I. 2011 : COSMO-CLM2 : a new version of the COSMO-CLM model coupled to the Community Land Model. *Climate Dynamics*, 37(9–10) : 1889–1907. DOI : 10.1007/s00382-011-1019-z.
- Diersch H.-J. 2014 : FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, XXXV : 996. DOI : 10.1007/978-3-642-38739-5.
- Ecoplan (en cours d'élaboration) : Überprüfung der GSchG-Massnahmen hinsichtlich Klimawandel. Projektbericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- Elliott J.M. 1994 : Quantitative Ecology and the Brown Trout. Oxford series in ecology and evolution, Band 7. Oxford University Press : 286. ISSN : 1746-3130.
- Epting J. et Huggenberger P. 2013 : Unraveling the Heat Island Effect Observed in Urban Groundwater Bodies – Definition of a Potential Natural State. *Journal of Hydrology*, 501 : 193–204. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2013.08.002.

- Epting J., Scheidler S., Egli L., Affolter A., Mueller M.H., García-Gil A., Borer P., Huggenberger P. 2017: Thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 596–597 : 87–96. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.296.
- Everall N.C., Johnson M.F., Wilby R.L., Bennett C.J. 2015: Detecting phenology change in the mayfly *Ephemera danica*: responses to spatial and temporal water temperature variations: Mayfly phenology in relation to river temperature. *Ecological Entomology*, 40(2) : 95–105. DOI: 10.1111/een.12164.
- Farinotti D., Pistocchi A., Huss M. 2016: From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters*, 11(5) : 054022. DOI: 10.1088/1748-9326/11/5/054022.
- Farinotti D., Round V., Huss M., Compagno L., Zekollari H. 2019: Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, 575(7782) : 341–344. DOI: 10.1038/s41586-019-1740-z.
- Faticchi S., Rimkus S., Burlando P., Bordoy R., Molnar P. 2015: High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *Journal of Hydrology*, 525 : 362–382. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.036.
- Fischer M., Huss M., Hoelzle M. 2015: Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980–2010. *The Cryosphere*, 2(2) : 525–540. DOI: 10.5194/tc-9-525-2015.
- Freiburghaus M. 2009: Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *gwa*, 12, Zurich : 1001–1009.
- FST (Fédération suisse du tourisme) 2019: Le tourisme suisse en chiffres 2018. Fédération suisse du tourisme, Berne : 60.
- Gallice A., Bavay M., Brauchli T.J., Comola F., Lehning M., Huwald H. 2016: StreamFlow 1.0: 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.
- Gandolfi C. 2003: Ricerca sui consumi irrigui e le tecniche di irrigazione in Lombardia. Università degli Studi di Milano, Istituto di Idraulica Agraria : 225.
- Gaudard A., Schmid M., Wüst A. 2017: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. *Aqua & Gas*, 97(5), Zurich : 40–45.
- Göggel W. 2012: Revitalisation des cours d'eau. Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturalisation des eaux. *L'environnement pratique*, 1208. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 43.
- Goudsmit G.-H., Burchard H., Peeters F., Wüest A. 2002: Application of k-e turbulence models to enclosed basins: the role of internal seiches. *Journal of Geophysical Research*, 107 : 3230. DOI: 10.1029/2001JC000954.
- Haeberli W., Schleiss A., Linsbauer A., Künzler M., Bütler M. 2012: Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser Energie Luft*, 104(2) : 94–102. DOI: 10.5167/uzh-140414.
- Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A. 2018: Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteintes physiques aux sols suisses. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68), Berne : 93. ISBN: 978-3-907087-31-2.
- Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Göttinger H. 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.

- Harris R.M.B., Beaumont L.J., Vance T.R., Tozer C.R., Remenyi T.A., Perkins-Kirkpatrick S.E., Mitchel P.J., Nicotra A.B., McGregor S., Andrew N.R., Letnic M., Kearney M.R., Wernberg T., Hutley L.B., Chambers L.E., Fletcher M.-S., Keatley M.R., Woodward C.A., Williams G., Duke, N.C., Bowman D.M.J.S.: 2018: Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change*, 8(7): 579–587. DOI: 10.1038/s41558-018-0187-9.
- Hendricks Franssen H.-J. et Scherrer S.C. 2008: Freezing of lakes on the Swiss Plateau in the period 1901–2006. *International Journal of Climatology*, 28(4): 421–433. DOI: 10.1002/joc.1553.
- Hirschi M., Michel D., Lehner I., Seneviratne S.I. 2017: A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3): 1809. DOI: 10.5194/hess-21-1809-2017.
- Hock R. 1999: A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45(149): 101–111. DOI: 10.3189/S0022143000003087.
- Hofer S., Egli T., Steingruber N., Lehner M. 2017: Entwicklung von Instrumenten zur Früherkennung und von Lösungsansätzen für die Thurgauer Land- und Ernährungswirtschaft beim Umgang mit Wasserknappheit. Pilotprojekt zur Anpassung an den Klimawandel. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Frauenfeld : 74.
- Hug R., Schöni T., Schibl M., Lanz K. 2017: Gutes Wasser für morgen – regionale Wasserversorgungsplanung im Kanton Solothurn am Beispiel Olten Gösgen. *Aqua & Gas*, 97(6), Zurich : 44–51.
- Huguenin M.F., Fischer E.M., Kotlarski S., Scherrer S.C., Schwierz C., Knutti R. 2020: Lack of change in the projected frequency and persistence of atmospheric circulation types over Central Europe. *Geophysical Research Letters*, 47(9): e2019GL086132. DOI: 10.1029/2019GL086132.
- Hunkeler D., Moeck C., Käser D., Brunner P. 2014: Klimaeinflüsse auf Grundwassermengen. *Aqua & Gas*, 94(11), Zurich : 42–49.
- IPBES 2019: Résumé à l'intention des décideurs du rapport sur l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques : 53.
- 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, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press : 1535.
- Jacobsen D., Cauvy-Fraunie S., Andino P., Espinosa R., Cueva D., Dangles O. 2014: Runoff and the longitudinal distribution of macroinvertebrates in a glacier-fed stream: implications for the effects of global warming. *Freshwater Biology*, 59(10): 2038–2050. DOI: 10.1111/fwb.12405.
- Junker J., Heimann F.U.M., Hauer C., Turowski J.M., Rickenmann D., Zappa M., Peter A. 2015: Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia*, 751(1): 1–21. DOI: 10.1007/s10750-014-2073-4.
- Langhammer L., Grab M., Bauder A., Maurer H. 2019: Glacier thickness estimation of alpine glaciers using data and modeling constraints. *The Cryosphere*, 13(8): 2189–2202. DOI: 10.5194/tc-13-2189-2019.
- Lanz K. 2016: Wasser im Engadin – Nutzung, Ökologie, Konflikte. Sur mandat du WWF Suisse, Evilard : 101.
- Lanz K. et Wechsler T. 2020: Wasserkraft. In: Lanz K. (éd.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkirtschaft der Schweiz. Hydro-CH2018 Bericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 30.

-
- Lehning M., Völksch I., Gustafsson D., Nguyen T.A., Stähli M., Zappa M. 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.
- Lorenz R., Jaeger E.B., Seneviratne S.I. 2010 : Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophysical Research Letters*. 37(9). DOI : 10.1029/2010GL042764.
- Marty C., Tilg A.-M., Jonas T. 2017 : Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4) : 1021–1031. DOI : 10.1175/JHM-D-16-0188.1.
- Maurer M., Chawla F., von Horn J., Staufer P. 2012 : Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. *Schriftenreihe der Eawag*, (21) : 232. ISBN : 978-3-906484-54-9.
- Merrifield A.L., Simpson I.R., McKinnon K.A., Sippel S., Xie S.-P., Deser C. 2019 : Local and nonlocal land surface influence in european heatwave initial condition ensembles. *Geophysical Research Letters*, 46(23) : 14082–14092. DOI : 10.1029/2019GL083945.
- Mueller M.H., Huggenberger P., Epting J. 2018 : Combining monitoring and modelling tools as a basis for city-scale concepts for a sustainable thermal management of urban groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 627 : 1121–1136. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.01.250.
- Müller U. 2019 : Projet d'irrigation du Furttal. *Rapport agricole 2019*. Müller Ingenieure AG, Dielsdorf. Internet : <https://www.agrarbericht.ch/fr/politique/ameliorations-structurelles-et-mesures-daccompagnement-social/projet-dirrigation-du-furttal?highlight=furttal>. Consulté le 04.09.2020.
- NCCS (National Centre for Climate Services) (éd.) 2018 : CH2018 – Scénarios climatiques pour la Suisse, Zurich : 24. ISBN : 978-3-9525031-1-9.
- North R.P., North R.L., Livingstone D.M., Köster O., Kipfer, R. 2014 : Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake : consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*, 20(3) : 811–823. DOI : 10.1111/gcb.12371.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2009 : Ecomorphologie des cours d'eau suisses ; Etat du lit, des berges et des rives. Résultats des relevés éco-morphologiques (avril 2009). *État de l'environnement*, 0926, Berne : 100.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2011 : Les veines du paysages. *Magazine «l'environnement»*, 3 : 8–15.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2012a : Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. *Connaissance de l'environnement*, 1217, Berne : 76.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2012b : Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. *Les miscellanées de l'environnement*, 1055, Berne : 64.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2014a : Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. *Connaissance de l'environnement*, 1404, Berne : 116.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2014b : Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Plan d'action 2014–2019. *Les miscellanées de l'environnement*, 1081. Berne : 100.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2015 : Renaturation des eaux suisses : plans d'assainissement des cantons dès 2015. Berne : 13.
- OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2016a : La canicule et la sécheresse de l'été 2015. *État de l'environnement*, 1629, Bern : 110.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2016b: Gestion des dangers naturels en Suisse. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 12.4271 déposé par Christophe Darbellay le 14.12.2012, Berne : 125.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2017a: Biodiversité en Suisse : état et évolution. *État de l'environnement*, 1630, Berne : 60.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2017b: Dynamique du charriage et des habitats. *Connaissance de l'environnement*, 1708, Berne : 85.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2019a: État et évolution des eaux souterraines en Suisse. *État de l'environnement*, UZ-1901-F, Berne : 142.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) (éd.) 2019b: La canicule et la sécheresse de l'été 2018. *État de l'environnement*, UZ-1909-F, Berne : 91.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) 2020: Adaptation aux changements climatiques en Suisse : Plan d'action 2020-2025. *Environnement Info*, UI-2022-F, Berne : 155.

OFS (Office fédéral de la statistique) 2016: Recensement des entreprises agricoles – Relevé complémentaire. Neuchâtel.

OFS (Office fédéral de la statistique) 2018: Moins d'exploitations agricoles, toujours plus de bio. Communiqué de presse du 8.5.2018, Neuchâtel : 6. Internet : <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/actualites/quoi-de-neuf.assetdetail.5127814.html>. Consulté le : 04.09.2020.

OFS (Office fédéral de la statistique) 2019: La statistique suisse du tourisme 2017, Neuchâtel : 81.

Peleg N., Fatichi S., Paschalis A., Molnar P., Burlando P. 2017: An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high resolution climate variables. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(3) : 1595–1627. DOI: 10.1002/2016MS000854.

Peleg N., Molnar P., Burlando P., Fatichi S. 2019: Exploring stochastic climate uncertainty in space and time using a gridded hourly weather generator. *Journal of Hydrology*, 571 : 627–641. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.010.

Pellicciotti F., Brock B., Strasser U., Burlando P., Funk M., Corripio J. 2005: An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance : Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175) : 573–587. DOI: 10.3189/172756505781829124.

PERMOS 2019: Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. Nötzli J., Pellet C., Staub B. (éd.), Glaciological Report (Permafrost) No. 16–19 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences : 104. DOI:10.13093/permos-rep-2019-16-19.

Pfister C., Weingartner R., Luterbacher J. 2006: Hydrological winter droughts over the last 450 years in the Upper Rhine basin : A methodological approach. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5) : 966–985. DOI: 10.1623/hysj.51.5.966.

Rapport technique CH2018 2018 : CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services (NCCS), Zurich : 271. ISBN : 978-3-9525031-4-0.

Regione Lombardia 2015: Lombardy Agriculture in Figures 2015. Milan : 188.

Remontées Mécaniques Suisses 2017 : Faits et chiffres de la branche de remontées, Berne : 36.

Reynard E., Bonriposi M., Graefe O., Homewood C., Huss M., Kauzlaric M., Liniger H., Rey E., Rist S., Schädler B., Schneider F., Weingartner R. 2014: Interdisciplinary Assessment of Complex Regional Water Systems and their Future Evolution : How Socio-economic Drivers Can Matter more than Climate. *WIREs Water*, 1(4) : 413–426. DOI: 10.1002/wat2.1032.

- Rhodes, J., Hetzenauer, H., Frassl, M.A., Rothhaupt, K.O., Rinke, K. 2017: Long-term development of hypolimnetic oxygen depletion rates in the large Lake Constance. *Ambio*, 46(5): 554–565. DOI: 10.1007/s13280-017-0896-8.
- Rolls R.J., Heino J., Ryder D.S., Chessman B.C., Growns I.O., Thompson R.M., Gido K.B. 2017: Scaling biodiversity responses to hydrological regimes. *Biological Reviews*, 93(2): 971–995. DOI: 10.1111/brv.12381.
- Rosset V. et Oertli B. 2011: Freshwater biodiversity under climate warming pressure: Identifying the winners and losers in temperate standing waterbodies. *Biological Conservation*, 144(9): 2311–2319. DOI: 10.1016/j.biocon.2011.06.009.
- Rüegg J. et Robinson C.T. 2004: Comparison of macroinvertebrate assemblages of permanent and temporary streams in an Alpine flood plain, Switzerland. *Archiv für Hydrobiologie*, 161(4): 489–510. DOI: 10.1127/0003-9136/2004/0161-0489.
- Russo R., Becher J.M., Liess M. 2018: Sequential exposure to low levels of pesticides and temperature stress increase toxicological sensitivity of crustaceans. *Science of the Total Environment*, 610–611: 563–569. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.073.
- Rust P. 2017: See-Energie Projektübersicht ewl (Energie Wasser Luzern). Présentation dans le cadre d'un cours Eawag sur la pratique PEAK «Heizen und Kühlen mit Seen und Flüssen» du 08.11.2017.
- SCCER-SoE (éd.) 2019: Climate change impact on Swiss hydropower production: synthesis report. Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity, Zurich: 28.
- Schaefli B., Manso T., Fischer M., Huss M., Farinotti D. 2019: The Role of Glacier retreat for Swiss Hydropower Production. *Renewable Energy*, 132: 615–627. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.104.
- Scherrer S.C., Fischer E.M., Posselt R., Liniger M.A., Croci-Maspoli M., Knutti R. 2016: Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6): 2626–2637. DOI: 10.1002/2015JD024634.
- Schlesinger W.H., Dietze M.C., Jackson R.B., Phillips R.P., Rhoades C.C., Rustad L.E., Vose J.M. 2015: Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology*, 22(7): 2318–2328. DOI: 10.1111/gcb.13105.
- Schmid M. 2019: verwundBAR: Wie verändert die Energienutzung die Gewässertemperaturen? *Forum für Wissen. Schweiz erneuerbar! Rapports du WSL*, 84, Birmensdorf: 31–36.
- Schmocke-Fackel P. et Naef F. 2010: Changes in Flood Frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8): 1581–1594. DOI: 10.5194/hess-14-1581-2010.
- Schürch M., Bulgheroni M., Sinreich M. 2018: Température des Eaux Souterraines. Un Aperçu de l'Etat et de l'Evolution en Suisse. *Aqua & Gas*, 98(7), Zurich: 40–48.
- Schwefel R., Gaudard A., Wüest A., Bouffard D. 2016: Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): Comparing observational findings and modeling. *Water Resources Research*, 52(11): 8811–8826. DOI: 10.1002/2016WR019194.
- Schweizerische Rheinhäfen 2019: Niedrigwasser prägt Güterumschlag 2018 – Container bleiben auf Rekordniveau. Medienmitteilung vom 07.02.2019, Basel. Internet: <https://port-of-switzerland.ch/niedrigwasser-praeagt-gueterumschlag-2018-container-bleiben-auf-rekordniveau/>. Consulté le 04.09.2020.
- Seibert J. et Vis M. 2012: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9): 3315–3325. DOI: 10.5194/hess-16-3315-2012.

-
- Seibert J., Vis M., Kohn I., Weiler M., Stahl K. 2018a: Technical note : Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4) : 2211–2224.
DOI: 10.5194/hess-22-2211-2018.
- Seibert J., Weiler M., Stahl K., Brunner P., Hunkeler D. 2018b : BAFU-Projekt Niedrigwasser und Grundwasser. Synthesebericht. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne : 54.
- Serquet G. et Rebetez M. 2011 : Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108(1) : 291–300. DOI: 10.1007/s10584-010-0012-6.
- Sinreich M., Kozel R., Lützenkirchen V., Matousek F., Jeannin P.-Y., Loew S., Stauffer F. 2012 : Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas*, 92(9), Zurich :16–28.
- Soria M., Leigh C., Datry T., Bini L.M., Bonada N. 2017 : Biodiversity in perennial and intermittent rivers : a meta-analysis. *Oikos*, 126(8) : 1078–1089.
DOI: 10.1111/oik.04118.
- Speich M.J.R., Bernhard L., Teuling A.J., Zappa M. 2015 : Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 523 : 804–821. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.
- SSIGE (La Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux) 2015 : Rapport de branche des distributeurs d'eau suisses. Pour un approvisionnement en eau potable sûr et durable, Zurich : 40.
- SSIGE (La Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux) 2020 : Résultats statistiques des distributeurs d'eau en Suisse. Année de l'exercice 2018, Information W 15 001, Zurich : 91.
- Stahl K., Weiler M., Freudiger D., Kohn I., Seibert J., Vis M., Gerlinger K., Böhm M. 2016 : Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Fribourg-en-Brisgau : 151.
- Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R. 2003 : CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18 : 289–307. DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0.
- Straile D., Kerimoglu O., Peeters F., Jochimsen M.C., Kümmelin R., Rinke K., Rothhaupt K.-O. 2010 : Effects of a half a millennium winter on a deep lake – a shape of things to come ? *Global Change Biology*, 16(10), 2844–2856. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02158.x.
- Stucki P., Rickli R., Brönnimann S., Martius O., Wanner H., Grebner D., Luterbacher J. 2012 : Weather Patterns and Hydro-climatological Precursors of Extreme Floods in Switzerland since 1968. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(6) : 53–550. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/368.
- Urban M.C., Bocedi G., Hendry A.P., Mihoub J.B., Pe'er G., Singer A., Bridle J.R., Crozier L.G., Meester L.D., Godsoe W., Gonzalez A., Hellmann J.J., Holt R.D., Huth A., Johst K., Krug C.B., Leadley P.W., Palmer S.C.F., Pantel J.H., Schmitz A., Zollner P.A., Travis J.M.J. 2016 : Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science*, 353(6304). DOI: 10.1126/science.aad8466.
- Van Asch M., Salis L., Holleman L.J.M., van Lith B., Visser M.E. 2013 : Evolutionary response of the egg hatching date of a herbivorous insect under climate change. *Nature Climate Change*, 3(3) : 244–248.
DOI: 10.1038/nclimate1717.
- Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. 2009 : An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10) : 1209 – 1222. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

Vogel M.M., Orth R., Cheruy F., Hagemann S., Lorenz R., van den Hurk B.J.J.M., Seneviratne S.I. 2017 : Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks, *Geophysical Research Letters*, 44(3) : 1511–1519. DOI: 10.1002/2016GL071235.

Weingartner R. et Aschwanden H. 1992 : Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2, Berne.

Wernli H., Naef F., Piaget N., Smoorenburg M. 2016 : Heavy Precipitation and Flood, Final Report. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Zurich : 51.

Weusthoff T. 2011 : Weather type classification at MeteoSwiss : Introduction of new automatic classification schemes, *Comptes rendus techniques de MétéoSuisse*, 235 : 46.

Woollings T., Barriopedro D., Methven J. Son S., Martius O., Harvey B., Sillmann J., Lupo A., Seneviratne S.I. 2018 : Blocking and its Response to Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 4(3) : 287–300. DOI: 10.1007/s40641-018-0108-z.

Zarrineh N., Abbaspour K.C., Holzkämper A. 2020 : Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of The Total Environment*, 708, 135212. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135212.

Zekollari H., Huss M., Farinotti D. 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.

11 Glossaire

Biodiversité

Notion recouvrant toutes les formes de vie (espèces animales et végétales, champignons, bactéries), leurs habitats (écosystèmes tels que les eaux) et la diversité génétique au sein des espèces (p. ex. sous-espèces, variétés et races)

Éclusées

Fluctuations rapides et fréquentes du débit suite au turbinage de l'eau des réservoirs des centrales hydroélectriques en vue de la production d'électricité. Les tronçons à éclusées sont les sections de cours d'eau concernées par ces variations de débit.

Effets de rétroaction

Réaction d'un système face à un changement : la rétroaction positive est un processus qui s'autoalimente, tandis que la rétroaction négative signifie que le changement est compensé par une réaction opposée.

Gestion des eaux

Notion englobant toutes les activités anthropiques liées à l'eau (utilisation, protection des eaux ou lutte contre les dangers liés aux eaux)

MRP

Maladie rénale proliférative touchant certaines espèces de poissons, potentiellement mortelle en cas de température de l'eau supérieure à 15 °C pendant une période prolongée.

NM7Q

Débits moyens les plus faibles de l'année calculés sur sept jours consécutifs. Ce paramètre d'étiage repose sur une moyenne calculée sur plusieurs jours, ce qui le rend moins sensible que d'autres paramètres aux éventuelles erreurs de mesure et aux impacts à court terme des activités humaines.

Précipitations intenses

Précipitations présentant une intensité de pluie élevée par rapport à leur durée. Les épisodes de précipitations intenses peuvent être de courte durée et de forte intensité comme durer plusieurs heures ou plusieurs jours, générant alors des cumuls accrus. Outre la durée et la fréquence de précipitation, la taille de la surface concernée par les précipitations intenses est également déterminante.

Q_{347}

Art. 4 LEaux: débit d'un cours d'eau atteint ou dépassé pendant 347 jours (95^e centile) par année, dont la moyenne est calculée sur une période de dix ans et qui n'est pas influencé sensiblement par des retenues, des prélèvements ou des apports d'eau.

Régime d'écoulement : glaciaire, nival, pluvial

Évolution caractéristique des débits saisonniers d'un cours d'eau, selon des facteurs météorologiques et les particularités du bassin versant. Le régime glaciaire est caractérisé par la fonte des glaciers en été, le régime nival, par la fonte des neiges au printemps et le régime pluvial, par l'interaction entre la pluie et l'évaporation.

Ruisseaulement

Eaux pluviales non absorbées par le sol, notamment lors de fortes précipitations, et s'écoulant à la surface et pouvant ainsi causer des dégâts

Scénarios d'émissions, RCP2.6, RCP8.5

Futures trajectoires possibles des émissions anthropiques de gaz à effet de serre et d'aérosols. La nouvelle génération de scénarios d'émissions, les *Representative Concentration Pathways* (RCP), définit la courbe que doivent suivre les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols pour atteindre un objectif climatique déterminé. Le RCP2.6 et le RCP8.5 correspondent au forçage radiatif estimé pour 2100 en W/m².

RCP2.6 : trajectoire des émissions avec mesures rigoureuses de protection du climat (mise en œuvre de l'Accord de Paris)

RCP8.5 : trajectoire des émissions sans mesures de protection du climat

12 Annexes

Tableau A1. Modèles utilisés dans le projet Hydro-CH2018

Modèle	Méthodes utilisées	Calibrage	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Références bibliographiques
PREVAH-WSL	Évapotranspiration: Penman-Monteith Formation de l'écoulement: PREVAH de type BV Fonte des neiges: degré-jour étendu (Hock R. 1999) Fonte des glaciers: degré-jour étendu (Hock R. 1999). Seule l'étendue des glaciers est prise en compte. L'étendue des glaciers est actualisée tous les 5 ans à partir des données issues de Zekollari H. et al. (2019)	Calibrage d'après les débits mesurés Régionalisation pour les zones sans mesure des débits avec krigage	Trame Suisse politique 500 × 500 m Trame Suisse hydrologique 200 × 200 m	1 journée	Brunner M. et al. 2019c Speich M.J.R. et al. 2015
PREVAH-UniBE	Évapotranspiration: Hamon Formation de l'écoulement: PREVAH de type HBV Fonte des neiges: degré-jour (Hock R. 1999) Fonte des glaciers: degré-jour étendu (Hock R. 1999). Seule l'étendue des glaciers est prise en compte. L'étendue des glaciers est actualisée tous les 5 ans à partir des données issues de Zekollari H. et al. (2019)	Calibrage d'après les débits Pas de régionalisation	Basée sur l'unité de réponse hydrologique (HRU); 93 bassins versants	1 journée	Viviroli D. et al. 2009
HBV Light-UniZH	Évapotranspiration: Hamon Fonte des neiges et des glaciers: méthode du degré-jour Les variations des glaciers sont simulées à l'aide de la méthode «delta H» de Huss (Seibert J. et al. 2018a).	Calibrage d'après les débits mesurés, limite des neiges issue de MODIS, volume des glaciers Régionalisation des paramètres de formation de l'écoulement pour les zones sans mesure des débits	Modèle semi-distribué, basé sur la HRU; 190 bassins versants glaciaires	1 journée	Seibert J. et Vis M. 2012 Seibert J. et al. 2018a
Modèle climatique régional combiné COSMO-CLM ² EPFZ			Europe, trame 0,44 × 0,44° (50 km)	1 journée	Davin E.L. et al. 2011
Simstrat (v.2.1.2) Eawag	Modèle hydrodynamique unidimensionnel (résolution verticale)	Calibrage avec des températures mesurées pour 27 des 29 lacs de la simulation	0,5 m (verticalement)	10 minutes	Goudsmit G.-H. et al. 2002 Gaudard A. et al. 2019
Snowpack/ Alpine3D, Stream- Flow EPFL	Méthodes basées sur la physique Le temps de séjour de l'eau dans le sol est paramétré selon Comola F. 2015 et la concentration en eau selon Gallice A. et al. 2016.	Snowpack/Alpine3D: pas de calibrage StreamFlow: calibrage d'après le temps de séjour de l'eau dans le sol et flux de chaleur du sol	Snowpack/ Alpine3D: 100 ou 500 m StreamFlow: 100 ou 500 m	1 heure	Lehning M. et al. 2006 Gallice A. et al. 2016

Modèle	Méthodes utilisées	Calibrage	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Références bibliographiques
HydroGeoSphere Université de Neuchâtel	Évapotranspiration: évapotranspiration actuelle Regroupement eau du sol/eaux souterraines/formation de l'écoulement Eaux souterraines: système aquifère distribué spatialement selon l'équation de Darcy Écoulement: dans le réseau hydrographique Fonte des neiges: degré-jour	Calibrage d'après les hauteurs de neige, les débits et les niveaux des eaux souterraines mesurés	Méthode des éléments finis (2 à 100 m)	1 heure à 1 journée	Brunner P. et Simmons C.T. 2012
Feflow®, ArcMap® Université de Bâle	« Raster analysis », « Hydrology Tool » (ArcMap®), durée d'écoulement dérivée des longueurs d'écoulement et des vitesses calculées selon l'équation de Darcy Outil « GeoTher » (Alcaraz M. et al. 2016)	Bâle-Ville : calibrage et validation d'après les données en matière d'hydraulique et de température de > 100 stations de mesure des eaux souterraines	5 à 25 m	1 journée	Diersch H.-J. 2014 Alcaraz M. et al. 2016 Epting J. et al. 2013 Mueller M.H. et al. 2018
PREVAH-WSL couplé au modèle de développement forestier	Évapotranspiration: Penman-Monteith Formation de l'écoulement: PREVAH de type HBV Fonte des neiges: degré-jour étendu (Hock R. 1999) Fonte des glaciers: degré-jour étendu (Hock R. 1999). Les variations des glaciers sont simulées à l'aide de la méthode delta H de Huss.	Calibrage d'après les débits mesurés Régionalisation pour les zones sans mesure des débits avec krigage	200 × 200 m 6 grandes zones dans différentes régions climatiques de Suisse et alternance entre les versants exposés au sud et au nord	1 journée	Speich M.J.R. et al. 2015 Speich M.J.R. et al. 2020
TOPKAPI-EPFZ, fonctionnant avec le généra- teur de temps AWE-GEN-2d	Modèle spatialement distribué et physiquement explicite Évapotranspiration: Priestley-Taylor Écoulement de l'onde dans le lit du cours d'eau: onde cinématique (Fatichi S. et al. 2015) Fonte des neiges et fonte des glaciers: méthode d'indice de température (Pellicciotti F. et al. 2005)	Calibrage d'après les débits mesurés	Trame de 100 m pour la Thur, la Petite Emme et la Maggia	1 heure, réduction d'échelle avec générateur de temps	Fatichi S. et al. 2015 Peleg N. et al. 2017 Peleg N. et al. 2019 Peleg N. et al. 2020
Modèle de crois- sance des cultures CropSyst	Évapotranspiration: Penman-Monteith Teneur en eau du sol: modèle en cascade (journalier)	Calibrage sur les statistiques de rendement	Échelle du champ	1 journée	Stöckle C.O. et al. 2003

Tableau A2a. Chaînes de modèles climatiques utilisées pour la modélisation hydrologique dans le scénario RCP8.5

Certaines chaînes de modèles climatiques sont disponibles en deux résolutions spatiales : la résolution EUR-11 ou $0,11^\circ$, indiquée par x, et la résolution EUR-44 ou $0,44^\circ$, indiquée par (x).

Tableau A2b. Chaînes de modèles climatiques utilisées pour la modélisation hydrologique dans le scénario RCP2.6

Certaines chaînes de modèles climatiques ont été utilisées dans deux résolutions spatiales : la résolution EUR-11 ou $0,11^\circ$, indiquée par x, et la résolution EUR-44 ou $0,44^\circ$, indiquée par (x).

Tableau A-3. Mesures d'adaptation aux changements climatiques à l'échelle fédérale

Le tableau présente les mesures relatives aux eaux et à la gestion de celles-ci dans le cadre du premier et du deuxième plans d'actions (PA1 et PA2) ainsi que l'état de mise en œuvre de ces mesures (Confédération suisse 2014 et 2020).

	Numéro	Intitulé	État en 2020
Eaux	PA2-ge1	Collecte de données sur les besoins en eau en Suisse	Nouvelles mesures
	PA2-ge2	Examen des mesures de protection des eaux sous l'angle des changements climatiques	
	PA1-ge1	Instruments de planification pour la gestion des ressources en eau	Mesures poursuivies
	PA1-ge3	Mise en réseau et garantie de l'approvisionnement en eau	
	PA1-ge4	Potentiel des retenues et des réservoirs d'eau	
	PA1-ge5	Régulation des lacs	
	PA1-ge6	Gestion des lacs et des réservoirs d'eau suisses dans le contexte international	
	PA1-ge7	Prise en compte de l'évolution des régimes des débits et des températures pour l'évacuation des eaux en provenance des zones habitées	
	PA1-ge10	Détection précoce des épisodes de sécheresse	
	PA1-ge2	Conditions-cadres de la gestion des eaux par bassin versant – soutien par la communication, l'échange d'expériences et la formation	Mesures achevées
	PA1-ge8	Déversement d'eau chaude dans les eaux	
Dangers naturels	PA1-ge9	Qualité de l'eau – éviter toute détérioration supplémentaire des eaux superficielles et souterraines due aux fortes précipitations ou à l'irrigation des cultures	
	PA1-ge11	Correction de la voie navigable Bâle-Birsfelden	
	PA1-dn1	Suivi des phénomènes dangereux	Mesures poursuivies
	PA1-dn2	Connaissances des dangers et des risques	
	PA1-dn3	Mesures de protection efficaces et évolutives	
	PA1-dn4	Mise en œuvre de mesures d'aménagement du territoire : réduction du potentiel de dommages par un aménagement du territoire fondé sur les risques	
Sols	PA1-dn5	Maîtrise des phénomènes naturels	
	PA1-dn6	Renforcer la conscience des dangers naturels ainsi que la formation et la recherche en la matière	
Sols	PA2-s1	Stratégie de mise en œuvre de la cartographie des sols à l'échelle nationale	Nouvelles mesure
Agriculture	PA1-a1	Utilisation optimisée de variétés et de races adaptées, y compris gestion des organismes nuisibles	Mesures poursuivies
	PA1-a2	Utilisation mesurée des sols et de l'eau	
	PA1-a3	Élaboration de bases en vue d'une exploitation adaptée au site	
Énergie	PA1-e4	Études concernant les effets des changements climatiques sur l'utilisation de la force hydraulique, avec sensibilisation des acteurs concernés	Mesures poursuivies
	PA1-e5	Prise en compte des effets des changements climatiques dans la surveillance des barrages	Mesures achevées
	PA1-e6	Examen des prescriptions relatives à la restitution de l'eau prélevée pour le refroidissement	
Bio-diversité	PA2-gb7	Ombrage par boisement	Nouvelles mesure
	PA1-gb3	Exigences minimales sur le plan écologique et mesures de revalorisation pour les milieux naturels particulièrement tributaires d'une alimentation en eau suffisante	Mesures achevées
Socle	PA2-sc4	Analyse des conséquences des changements climatiques en Suisse (CH-Impacts)	Nouvelles mesure
	PA1-sc1	Élaboration périodique de scénarios climatiques régionaux pour la Suisse	Mesures poursuivies
	PA1-sc2	Bases hydrologiques et scénarios pour l'adaptation aux changements climatiques	
	PA1-sc3	Schéma pour la collecte d'informations pédologiques	Mesure achevée