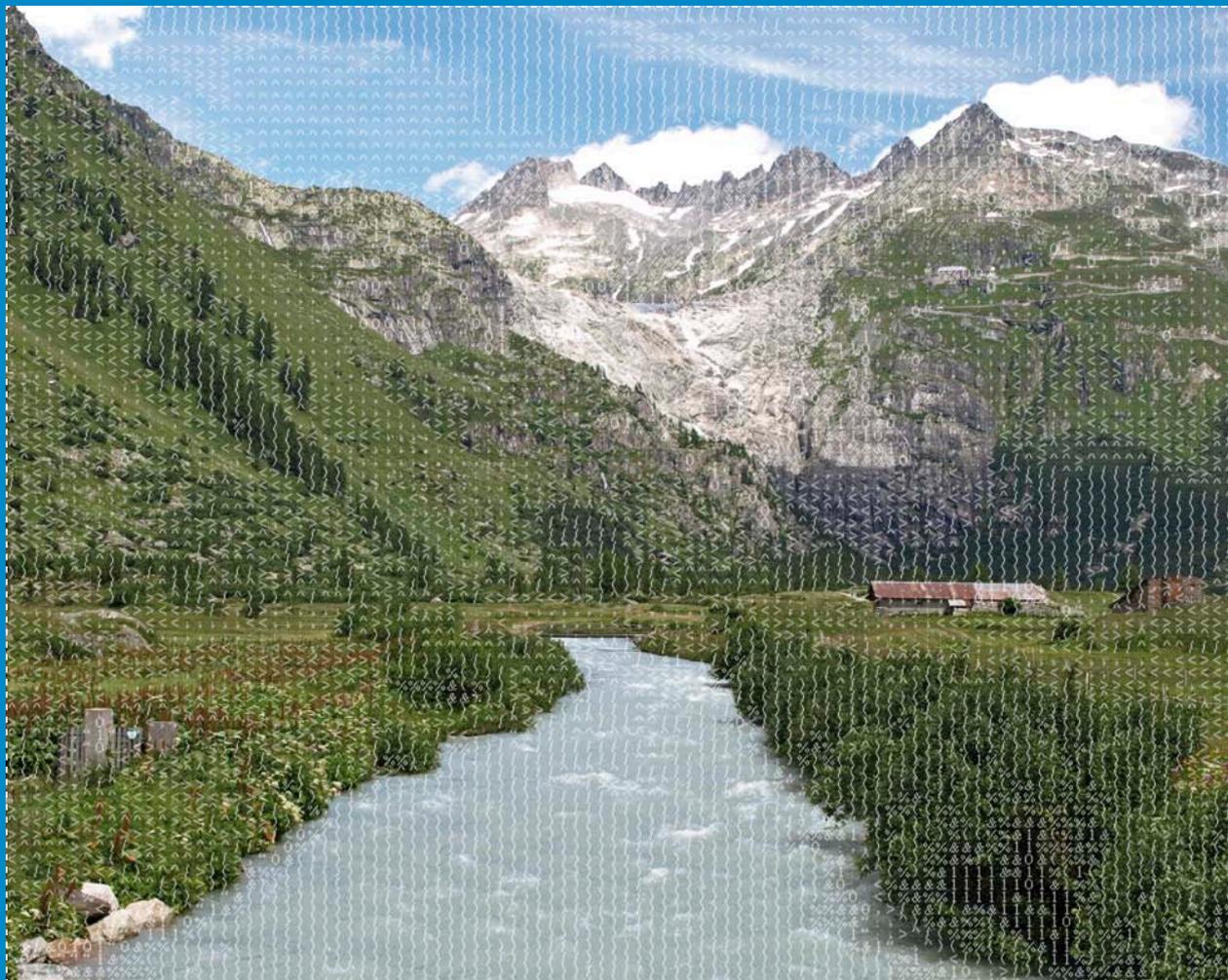


# > Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau

*Rapport de synthèse du projet  
«Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro)*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV



# > Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau

*Rapport de synthèse du projet  
«Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro)*

## Impressum

### Editeur

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).

### Direction du projet

Dr. David Volken, OFEV, division Hydrologie

### Direction générale du projet

Dr. Adrian Jakob, OFEV, division Hydrologie

Dr. Willy Geiger, OFEV, Direction

Dr. Dominique Bérod, OFEV, division Hydrologie

Dr. Ronald Kozel, OFEV, division Hydrologie

Dr. Petra Schmocker-Fackel, OFEV, division Hydrologie

Dr. Hugo Aschwanden, OFEV, division Eaux

Dr. Roland Hohmann, OFEV, division Climat

Dr. Gian Reto Bezzola, OFEV, division Prévention des dangers

### Auteurs des rapports finaux des modules du projet CCHydro

Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPFZ:

Dr. Thomas Bosshard, Dr. Sven Kotlarski, Prof. Dr. Christoph Schär  
Institut de géographie de l'Université de Berne (GIUB): Nina Köplin,

Raphael Meyer, Dr. Bruno Schädler, Prof. Rolf Weingartner  
Institut géographique de l'Université de Zurich (GIUZ):

Andreas Linsbauer, Dr. Frank Paul, Prof. Dr. Wilfried Haeberli  
Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL):

Luzi Bernhard, Dr. Massimiliano Zappa

Laboratoires de recherches hydrauliques, hydrologiques et  
glaciologiques (VAW), EPFZ: Dr. Daniel Farinotti, Dr. Andreas  
Bauder, Prof. Dr. Martin Funk

Laboratory of Environmental Fluid Mechanics and Hydrology,

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne:

Dr. Hendrik Huwald, Prof. Dr. Marc Parlange

HYBEST GmbH, Birmensdorf:

Dr. Felix Naef

## Rédaction du rapport de synthèse

Dr. Bruno Schädler, Institut de géographie (GIUB) de l'Université de Berne

Pascal Blanc, Institut de géographie (GIUB) de l'Université de Berne

Dr. David Volken, OFEV, division Hydrologie

## Référence bibliographique

Office fédéral de l'environnement (OFEV) (éd.) 2012: Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1217: 76 p.

## Traduction

Petra Varilek, 1095 Lutry

## Graphisme, mise en page

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

## Photo de couverture

Glacier du Rhône, 2008, OFEV / E. Lehmann

## Commande de la version imprimée et téléchargement au format PDF

OFCL, Diffusion des publications fédérales, CH-3003 Berne

Tél. +41 (0)31 325 50 50, fax +41 (0)31 325 50 58

[verkauf.zivil@bbl.admin.ch](mailto:verkauf.zivil@bbl.admin.ch)

Numéro de commande: 810.300.127f

[www.bafu.admin.ch/uw-1217-f](http://www.bafu.admin.ch/uw-1217-f)

Cette publication est également disponible en allemand et anglais.

© OFEV 2012

# > Table des matières

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>	<b>6 Les débits</b>	<b>44</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>7</b>	6.1 Cycle de l'eau et bilan hydrique	44
<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>	6.2 La distribution saisonnière des débits et leur évolution future	47
<b>Résumé</b>	Fehler! Textmarke nicht definiert.	6.3 Quels bassins versants réagiront le plus fortement aux changements climatiques?	52
<b>Riassunto</b>	<b>12</b>	6.4 Régime des eaux et ressources en eau	56
<b>Summary</b>	<b>14</b>	6.5 Débits extrêmes	60
<hr/>		6.5.1 Etiages	62
<b>1 Introduction</b>	<b>16</b>	6.5.2 Crues	63
<hr/>		6.6 Conclusions	64
<b>2 Méthodes</b>	<b>18</b>	<b>7 Température des eaux</b>	<b>65</b>
2.1 Périodes considérées	18	7.1 La température de l'air, principal facteur influant sur la température des eaux	65
2.2 Périmètre étudié	19	7.2 Température des cours d'eau: un bref historique	66
2.3 Modèles utilisés	19	7.3 Evolution des températures de l'eau	67
2.4 Données	20	<hr/>	
2.5 Incertitudes	20	<b>8 Conclusions</b>	<b>69</b>
<hr/>		8.1 Mesures d'adaptation	69
<b>3 Changements climatiques</b>	<b>22</b>	8.2 Perspectives	70
3.1 Observations faites jusqu'ici	22	8.3 Bilan	71
3.2 Scénarios climatiques les plus récents	24	<hr/>	
3.3 Événements extrêmes	29	<b>Bibliographie</b>	<b>72</b>
3.4 Marge d'incertitude des scénarios climatiques	30	<b>Index</b>	<b>75</b>
<hr/>			
<b>4 Les glaciers</b>	<b>31</b>		
4.1 Les processus fondamentaux en jeu	31		
4.2 Variation de la taille des glaciers depuis le petit âge glaciaire	32		
4.3 Scénarios de fonte des glaciers	33		
4.3.1 Modélisation de l'évolution de certains glaciers	33		
4.3.2 Modélisation des glaciers à l'échelle de la Suisse	34		
4.3.3 Résultats	34		
4.3.4 Incertitudes	38		
4.4 Conclusions	38		
<hr/>			
<b>5 La neige</b>	<b>40</b>		



## > Abstracts

Under the project «Climate Change and Hydrology in Switzerland» (CCHydro) run by the Federal Office for the Environment (FOEN), the effects of climate change on the water balance in Switzerland by the year 2100 were studied. The water resources will only change slightly by then. However, as a result of the rise in the snow line associated with increasing air temperature, the volumes of snow and ice stored in the Alps will be greatly reduced. This will combine with a seasonal redistribution of the precipitation (drier in summer, wetter in winter) to cause a seasonal flow redistribution. High and (particularly) low water flow events will probably occur more frequently – mainly in sensitive regions such as the Swiss Plateau, Valais and Ticino.

**Keywords:**  
Climate change,  
Hydrology,  
Surface waters,  
Water resources,  
Snow,  
Glaciers

Im Rahmen des Projekts «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100 untersucht. Das Wasserdargebot wird sich bis dann nur wenig ändern. Als Folge des Anstiegs der Schneefallgrenze parallel zur Zunahme der Lufttemperatur werden die in den Alpen gespeicherten Schnee- und Eismassen jedoch stark vermindert. Zusammen mit einer saisonalen Umverteilung des Niederschlags (trockener im Sommer, feuchter im Winter) wird dies eine jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse hervorrufen. Hochwasser- und insbesondere Niedrigwasserereignisse werden wahrscheinlich vermehrt auftreten – vor allem in sensitiven Regionen wie dem Mittelland, dem Wallis oder dem Tessin.

**Stichwörter:**  
Klimaänderung,  
Hydrologie,  
Gewässer,  
Wasserressourcen,  
Schnee,  
Gletscher

Dans le cadre du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro) de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau de la Suisse jusqu'à l'horizon 2100 ont été analysées en détail. Le total des ressources en eau disponible ne va que peu changer. Par contre, suite à l'élévation de la limite pluie-neige parallèlement à l'augmentation des températures, les masses de neige et de glace stockées dans les Alpes vont diminuer fortement. Combinées à une redistribution attendue des précipitations (plus sec en été, plus humide en hiver), ces modifications devraient entraîner une redistribution des débits au cours des saisons, conduisant à des situations d'étiages et de crues plus fréquentes, particulièrement dans certaines régions sensibles comme le Plateau, le Valais ou le Tessin.

**Mots clés:**  
Changements climatiques,  
Hydrologie,  
Eaux,  
Ressources en eau,  
Neige,  
Glaciers

Nel quadro del progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro) dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) sono stati analizzati gli effetti dei cambiamenti climatici sul regime idrico della Svizzera fino al 2100. Di fatto, le risorse idriche subiranno solo lievi modifiche. L'innalzamento del limite delle nevicate e il parallelo aumento della temperatura dell'aria provocheranno tuttavia una forte diminuzione delle masse di neve e ghiaccio accumulate nelle Alpi. Questo effetto, associato a una ridistribuzione delle precipitazioni (più secco in estate e più umido in inverno), dovrebbe causare una diversa distribuzione delle portate nel corso delle stagioni. Gli eventi di piena e soprattutto quelli di magra saranno più frequenti, in particolare in regioni sensibili quali l'Altopiano, il Vallese o il Ticino.

**Parole chiave:**  
Cambiamenti climatici,  
Idrologia,  
Acque,  
Risorse idriche,  
Neve,  
Ghiacciai



---

## > Avant-propos

La sécheresse suivie par des inondations, la canicule cédant le pas aux grands froids: voilà ce que 2011 et l'hiver 2012 nous ont réservé, et qui nous permet d'imaginer vers quoi notre climat pourrait s'acheminer ces prochaines années. Toujours plus d'indices concordent: l'activité humaine contribue bien aux changements climatiques. Ce que nous ne savons pas en revanche, c'est si nous pourrions réussir à moyen terme à inverser la tendance. Dès aujourd'hui, nous devons nous atteler au développement de stratégies qui permettront à notre société de s'adapter à la nouvelle donne climatique.

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) coordonne l'élaboration de la stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques, qui vise à répondre à l'un des défis les plus importants de notre temps: assurer la pérennité de nos ressources en eau, éviter les conflits d'intérêts entre les différents utilisateurs et prévenir ou du moins atténuer les conséquences d'une augmentation de la fréquence des inondations.

La connaissance est le fondement de toute stratégie. Pour maîtriser les conséquences de l'évolution du climat, nous devons commencer par acquérir des connaissances fiables concernant les processus naturels et humains en jeu, et élaborer des scénarios plausibles. La tâche de l'OFEV consiste à initier, soutenir et diriger des études visant à réunir ces connaissances et à s'assurer de la disponibilité des bases nécessaires à la réflexion stratégique et à la décision. Le projet CCHydro s'inscrit parfaitement dans cette démarche: une sélection de partenaires hautement qualifiés ont permis de réunir les bases nécessaires pour évaluer les impacts de divers scénarios climatiques sur les différents éléments du cycle hydrologique. La coordination a également été assurée avec des études menées dans des domaines proches, comme le projet de recherche consacré aux effets des changements climatiques sur l'utilisation de la force hydraulique, dont les résultats ont été publiés en 2011, ou le Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61), qui a débuté en 2010 et s'achèvera en 2013.

Le projet de recherche CCHydro a contribué de façon importante à l'élaboration de stratégies d'adaptation dans le domaine de l'eau et a fourni des pistes pour approfondir les connaissances en matière d'hydrologie en Suisse. Il faut poursuivre les recherches, en les accompagnant d'un monitoring sur le long terme, car elles constituent la clef d'une gestion des eaux durable, équilibrée et capable de s'adapter en temps voulu.

Willy Geiger  
Sous-directeur  
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

## > Résumé

### Le projet CCHydro

Dans le cadre du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro), l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a depuis 2009 chargé différentes institutions spécialisées d'étudier les changements qui pourraient survenir en Suisse d'ici à la fin du siècle dans les domaines suivants: régime des eaux, fréquence des crues et des étiages et température des eaux. Ces études reposent sur des scénarios climatiques nationaux élaborés en parallèle au projet. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans ce rapport.

### Scénarios de débits

A court terme (soit d'ici à 2035), le niveau annuel des ressources en eau dans notre pays ne va pratiquement pas changer, à l'exception d'une augmentation temporaire des débits dans les zones fortement englacées. A long terme (soit d'ici à 2085), les ressources en eau disponibles baisseront légèrement, surtout dans le bassin versant du Lac Majeur (moins 10 % pour le fleuve Tessin et pour le Toce). La distribution saisonnière des débits (régime d'écoulement) va quant à elle changer dans presque toute la Suisse. Vers la fin du siècle, pratiquement tous les bassins versants à régime glacio-nival auront disparu. Les régimes des petits bassins versants acquerront un caractère de type méditerranéen respectivement méridional toujours plus accentué. Sur le Plateau, un nouveau type de régime, appelé *pluvial de transition*, fera son apparition. Il se distingue par un débit minimal marqué en août et par deux maxima en janvier et en mars. Les débits seront nettement plus importants dans de nombreuses régions en hiver et moindres en été, excepté dans les zones encore englacées. C'est pourquoi, dans la majeure partie des régions du Plateau, la période de crue potentielle du début de l'été va se reporter au semestre d'hiver et parfois se prolonger. La fréquence des crues moyennes (dans les Préalpes et les Alpes) et importantes (sur le Plateau et dans le Jura) devrait également augmenter dans de nombreuses régions.

Les grandes rivières, qui sont alimentées par de nombreux petits bassins versants, subiront également une

évolution. Avec le temps, le Rhin verra par exemple apparaître un deuxième maximum saisonnier, en hiver, en sus de celui que le fleuve connaît aujourd'hui au début de l'été. Les étiages des cours d'eau préalpins et alpins ne se produiront plus en hiver mais à la fin de l'été, et seront moins marqués. Sur le Plateau, les débits vont nettement baisser et les périodes d'étiage s'allonger. Ainsi, le débit de l'Aar à la fin de l'été va graduellement s'abaisser en dessous de celui mesuré actuellement en hiver.

### Impact des changements climatiques sur les réservoirs

Les modifications du régime des eaux et la plus grande probabilité de crues et d'étiages que l'on observe déjà aujourd'hui sont dues aux changements climatiques. En effet, au cours des 100 dernières années, la température annuelle en Suisse a augmenté de 1,5 °C. Par rapport à l'évolution constatée entre 1980 et 2009, la hausse prévue entre 2012 et 2085 est de 3 °C ± 1 °C, ce qui ne manquera pas d'affecter les niveaux saisonniers des réservoirs hydrologiques en Suisse. En parallèle à cette hausse de la température, on constatera une élévation de la limite des chutes de neige. La superficie enneigée décroît régulièrement, tout comme l'épaisseur et la persistance du manteau neigeux. Les réserves d'eau de fonte sont en fin de compte moins abondantes: alors que près de 40 % des débits mesurés en Suisse entre 1980 et 2009 étaient alimentés par la fonte des neiges, ce pourcentage va baisser à environ 25 % d'ici à 2085. Ainsi, une part toujours plus importante des précipitations pourra s'écouler immédiatement, surtout en hiver. Aujourd'hui, un peu moins de 2 % des débits annuels sont liés à la fonte estivale des glaciers. Dans les cours d'eau à proximité des glaciers, ce pourcentage est toutefois nettement plus conséquent en été.

Les glaciers, qui répondent avec un temps de retard aux changements climatiques, ont une taille disproportionnée par rapport aux conditions climatiques actuelles et à venir; ils continueront donc à fondre. Ce phénomène va induire des écoulements supplémentaires dans les bassins versants des Alpes, mais sur une période relativement limitée. Pour les glaciers de grande taille, cette

période va durer jusqu'en 2040, alors que les écoulements dus aux glaciers de moindre importance ont déjà recommencé à baisser. D'ici à 2100, il ne restera que 30 % du volume de glace actuel, principalement dans le bassin versant du Rhône.

### **Modification prévisible des précipitations**

Dans l'ensemble, les précipitations en Suisse ont légèrement augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Cette tendance va se confirmer durant le 21<sup>e</sup> siècle: les précipitations seront à peine plus fréquentes au nord, mais se feront en revanche quelque peu plus rares au sud de notre pays. Toutefois, les deux versants des Alpes verront s'opérer une nette redistribution dans les années à venir. Les précipitations diminueront fortement en été (de 20 %) et augmenteront le reste de l'année (sauf au printemps dans le sud). Cette redistribution des précipitations saisonnières renforcera l'impact sur les débits des changements observés dans les réservoirs (neige, glace) suite à la hausse de la température. En hiver, il y aura plus de précipitations liquides, et en été, nettement moins de pluies et d'eaux de fonte. D'ici à la fin du siècle, un été sur deux sera au moins aussi chaud que celui de 2003. Les sécheresses seront donc plus fréquentes et dureront plus longtemps.

### **Incertitudes**

Actuellement, toute prévision fiable concernant les épisodes de fortes précipitations est impossible. De plus, les scénarios liés aux émissions et au climat présentent de grandes incertitudes, notamment en ce qui concerne la hausse de la température. Dans ces conditions, il n'est pas possible de déterminer exactement à quelle vitesse les réservoirs de neige et de glace vont diminuer. En outre, la redistribution saisonnière des précipitations ne peut pas encore être définie clairement. Ces incertitudes ont été prises en compte dans les modélisations hydrologiques et il est donc possible de se faire une idée des modifications du régime des eaux en Suisse en fonction des changements climatiques à venir.

### **Conséquences pour la gestion des eaux et l'écologie**

Les changements climatiques auront un impact sur les débits et par conséquent sur la gestion des eaux. Les mesures de protection contre les crues existantes sur le Plateau et dans le Jura doivent être révisées. Etant donné le risque aggravé de pénurie d'eau en été, le potentiel de conflits entre les différents utilisateurs prend également de nouvelles dimensions. Etant donné que le régime des eaux et notamment la température des eaux vont subir de nets changements, il s'agira d'examiner les réglementations légales relatives aux différents domaines concernés (déversement d'eaux de refroidissement, eaux usées, règlements de régulation des lacs, débits résiduels). Le besoin supplémentaire en réservoirs (à usages multiples) doit également être éclairci. De plus, la navigation sur le Rhin pourrait être entravée plus fréquemment en raison de la fréquence et de l'intensité accrues des périodes d'étiage et des débits hivernaux plus importants.

Enfin, les écosystèmes des cours d'eau seront doublement touchés par les changements climatiques: ils souffriront de la hausse de la température de l'air et de la redistribution des débits. Le réchauffement des eaux qui résultera de la hausse de la température atmosphérique, associé à la baisse des niveaux en été, accroîtra la pression sur ces écosystèmes, ce qui se répercutera sur les utilisateurs d'eau (agriculture, rejets de chaleur industrielle) et sur les pêcheurs.

### **Perspectives**

Il n'est pas encore été possible de répondre de manière exhaustive à toutes les questions posées. Des recherches supplémentaires doivent être menées dans les domaines suivants: modélisations climatiques régionales, évolution de l'intensité et de la fréquence des fortes précipitations et des crues rares qui en résultent, niveau des débits (étiages) dans les Préalpes et les Alpes et modification de la température des eaux. Le projet CCHydro a permis de mettre en place des bases hydrologiques essentielles aux réflexions et décisions stratégiques en la matière. Grâce aux résultats obtenus, il est pour la première fois possible d'évaluer à l'échelle de la Suisse l'impact des changements climatiques sur les différents éléments du cycle hydrologique.

## > Zusammenfassung

### Das Projekt CCHydro

Im Rahmen des Projekts «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) hat das Bundesamt für Umwelt BAFU ab 2009 verschiedene Forschungsinstitute beauftragt, zu untersuchen, wie sich der Wasserhaushalt in der Schweiz, die Häufigkeit von Hoch- und Niedrigwasser sowie die Wassertemperatur bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts verändern könnten. Diese Untersuchungen wurden auf der Grundlage von zugleich erarbeiteten nationalen Klimaszenarien durchgeführt. Der vorliegende Bericht legt die wichtigsten Ergebnisse des Projekts dar.

### Abflusszenarien

Bis in die nahe Zukunft (2035) wird sich das jährliche Wasserdargebot der Schweiz mit Ausnahme vorübergehender Zunahmen der Abflüsse in stark vergletscherten Gebieten nur wenig verändern. Langfristig (bis 2085) werden die verfügbaren Wasserressourcen leicht abnehmen, vor allem im Einzugsgebiet des Lago Maggiore (Flüsse Ticino und Toce, minus 10%). Die jahreszeitlichen Verteilungen der Abflüsse (Abflussregimes) hingegen werden sich beinahe in der ganzen Schweiz verschieben. Glazial und nival geprägte Einzugsgebiete werden gegen Ende dieses Jahrhunderts nur noch vereinzelt zu finden sein. Die kleinen Einzugsgebiete werden zunehmend mittelländisch bzw. meridional geprägt sein. Im Mittelland wird ein neuer Regime-Typ auftreten, *pluvial de transition*, welcher sich durch ein ausgeprägtes Abflussminimum im August und zwei Maxima im Januar und im März auszeichnen wird. Im Winter wird in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer jedoch weniger – ausser in den noch vergletscherten Gebieten – erwartet. Deshalb wird sich im grössten Teil des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit vom Frühsommer in das Winterhalbjahr verschieben und teilweise auch verlängern. Die Häufigkeit von mittleren (in den Voralpen und Alpen) bzw. grossen (im Mittelland und Jura) Hochwasserereignissen dürfte zudem in vielen Gebieten steigen. Auch die grossen Flüsse, welche aus zahlreichen kleineren Einzugsgebieten gespeist werden, werden sich entsprechend verändern. Im Rhein wird

sich beispielsweise im Lauf der Zeit zusätzlich zum Frühsommer ein zweites saisonales Maximum im Winter bilden. Niedrigwasserereignisse werden sich in den Fliessgewässern der Voralpen und der Alpen vom Winter in den Spätsommer verschieben und dann weniger ausgeprägt sein. In den Gebieten des Mittellandes werden die Niedrigwasserabflüsse deutlich abnehmen und die Niedrigwasserperioden länger werden. So werden beispielsweise die Niedrigwasserabflüsse der Aare im Spätsommer allmählich Werte annehmen, welche tiefer sein werden als heutzutage im Winter.

### Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserspeicher

Die Regimeänderungen und die erhöhte Disposition für Hoch- und Niedrigwasser, welche bereits heute zu beobachten sind, lassen sich durch die veränderten klimatischen Bedingungen erklären. In den letzten 100 Jahren hat die mittlere Jahrestemperatur in der Schweiz um mehr als 1,5 °C zugenommen. Im Vergleich zu 1980 bis 2009 wird die erwartete Temperaturzunahme von heute bis zum Jahr 2085  $3\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  betragen. Dies wird nicht ohne Auswirkungen auf die saisonalen hydrologischen Speicher in der Schweiz bleiben: Parallel zur Temperaturerhöhung findet ein Anstieg der Schneefallgrenze statt. Die im Mittel von Schnee bedeckte Fläche nimmt stetig ab, gleichzeitig vermindern sich die Mächtigkeit und die Dauer der Schneedecke. Schliesslich sind weniger Schneereserven vorhanden, welche geschmolzen werden können. Rund 40 % des Abflusses aus der Schweiz in der Periode 1980–2009 bestand aus Schneeschmelze. Dieser Anteil wird bis 2085 auf etwa 25 % sinken. Damit wird ein immer grösserer Teil des Niederschlags, insbesondere im Winter, sofort abfliessen können. Nur weniger als 2 % des Jahresabflusses entstammen heute der sommerlichen Gletscherschmelze. In gletschernahen Fliessgewässern bildet sie jedoch im Sommer einen bedeutenden Anteil.

Da die Gletscher, welche nur träge auf Umweltveränderungen reagieren, zu gross sind im Vergleich zu den heutigen und zu den erwarteten zukünftigen Klimabedingungen, werden sie weiterhin stark schmelzen. Dies

wird zu zusätzlichen Abflüssen in den alpinen Einzugsgebieten führen, allerdings nur für eine relativ kurze Zeit: Für die volumenmässig grösseren Gletscher bis etwa 2040, bei kleineren Gletschern nehmen die Abflüsse bereits jetzt wieder ab. Bis 2100 werden voraussichtlich nur noch 30 % der heutigen Eisvolumen übrig bleiben, hauptsächlich im Einzugsgebiet der Rhone.

### **Erwartete Änderungen des Niederschlags**

Während des 20. Jahrhunderts haben die Niederschläge insgesamt für die Schweiz leicht zugenommen. Die beobachtete Tendenz der Jahresniederschläge wird sich im Laufe des 21. Jahrhunderts fortsetzen: Die Niederschläge werden im Norden leicht zunehmen, im Süden aber leicht zurückgehen. Eine deutliche Umverteilung im Jahresverlauf wird jedoch beidseits der Alpen stattfinden: Im Sommer werden die Niederschläge sehr stark zurückgehen (um 20 %), in den übrigen Jahreszeiten jedoch zunehmen (ausser im Frühling im Süden). Diese Umverteilung der saisonalen Niederschläge wird die Auswirkungen der temperaturbedingten Speicheränderungen (Schnee, Eis) auf den Abfluss verstärken: Im Winter mehr Niederschlag in flüssiger Form, im Sommer deutlich weniger Niederschlag und reduzierte Schmelzwassermengen. Bis Ende des Jahrhunderts wird jeder zweite Sommer mindestens so warm sein wie derjenige von 2003. Trockenperioden dürften damit häufiger auftreten und länger anhalten.

### **Unsicherheiten**

Verlässliche Aussagen betreffend extreme Starkniederschlagsereignisse können zurzeit keine gemacht werden. Ausserdem bleiben die Unsicherheiten in den Emissions- und in den Klimaszenarien gross. Die Unsicherheiten bezüglich der Temperaturzunahme lässt die Geschwindigkeit der Änderungen der Schnee- und Eispeicher nicht genau beziffern, zudem bleibt noch unklar, wie stark die jahreszeitliche Umverteilung der Niederschlagsmengen tatsächlich ausfallen wird. Diese Unsicherheiten wurden in den hydrologischen Modellierungen berücksichtigt, sodass es möglich ist, sich ein Bild der Änderungen im Schweizer Wasserhaushalt je nach künftiger Klimaentwicklung zu machen.

### **Wasserwirtschaftliche und ökologische Folgen**

Die beschriebenen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Abflüsse werden wasserwirtschaftliche Folgen haben. Die bestehenden Hochwasserschutzmassnahmen müssen im Mittelland und Jura überprüft werden. Zudem bergen grössere Risiken für Wasserknappheit im Sommer ein Konfliktpotenzial unter den verschiedenen Nutzern. Da sich die Abflussregimes und z. T. die Wassertemperaturen markant verändern, müssen die rechtlichen Regelungen in verschiedenen Bereichen (Einleitung von Kühlwasser, Abwasser, Regulierreglemente der Seen, Restwasser) überprüft werden. Der Bedarf an zusätzlichen (Mehrzweck-)Speichern muss abgeklärt werden. Häufiger und stärker vorkommende Niedrigwasserereignisse sowie höhere Winterabflüsse könnten die Rheinschifffahrt vermehrt beeinträchtigen.

Schliesslich werden die Ökosysteme der Fliessgewässer doppelt vom Klimawandel betroffen sein: Durch die erhöhte Lufttemperatur und durch die jahreszeitliche Umverteilung der Abflüsse. Erhöhte Lufttemperatur und damit erhöhte Wassertemperatur sowie tiefere Pegelstände im Sommer dürften die Ökologie der Fliessgewässer und damit die Wassernutzung (Landwirtschaft, industrielle Wärmezufuhr) und die Fischerei vermehrt unter Druck setzen.

### **Ausblick**

Es konnten noch nicht alle Fragen abschliessend beantwortet werden. Weiterer Forschungsbedarf wurde in den Bereichen der Unsicherheiten der regionalen Klimamodellierung, der Veränderung der Stärke und Häufigkeit von Starkniederschlägen und der damit verbundenen seltenen Hochwasser, der zukünftigen Niedrigwasserabflüsse in den Voralpen und Alpen sowie der Veränderung der Wassertemperaturen identifiziert. Mit dem Forschungsprojekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro) konnten wichtige hydrologische Grundlagen für strategische Überlegungen und Entscheidungen bereitgestellt werden. Die Resultate des Projekts CCHydro erlauben es, erstmals flächendeckend für die ganze Schweiz die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderung auf die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs abzuschätzen.

## > Riassunto

### Il progetto CCHydro

Nel quadro del progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro), dal 2009 l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) ha incaricato diversi istituti di ricerca di analizzare i cambiamenti che potrebbero intervenire sino alla fine del secolo in corso nel regime idrico della Svizzera, nella frequenza degli eventi di piena e di magra e nella temperatura delle acque. Le analisi sono state effettuate in base a scenari climatici nazionali elaborati in contemporanea. Il presente rapporto riporta i principali risultati del progetto.

### Scenari di deflusso

A breve termine (fino al 2035) le risorse idriche annue della Svizzera subiranno pochi cambiamenti, tranne un aumento temporaneo delle portate nelle zone in cui sono presenti molti ghiacciai. A più lungo termine (fino al 2085) le riserve idriche disponibili diminuiranno leggermente, soprattutto nel bacino imbrifero del lago Maggiore (fiumi Ticino e Toce, -10%). Per contro, le distribuzioni stagionali delle portate (regime di deflusso) subiranno modifiche in quasi tutta la Svizzera. Verso la fine del secolo, i bacini imbriferi di origine glaciale o nivale saranno molto rari. I bacini imbriferi piccoli assumeranno un carattere sempre più mediterraneo o meridionale. Nell'Altopiano apparirà un nuovo tipo di regime (*pluviale di transizione*) caratterizzato da una portata minima ad agosto e due punte massime a gennaio e marzo. In numerose regioni si prevedono portate sensibilmente superiori in inverno e inferiori in estate, tranne nelle zone in cui si trovano ancora dei ghiacciai. Il periodo di piena nella maggior parte dell'Altopiano potrebbe quindi spostarsi dall'inizio dell'estate al semestre invernale e risultare in parte anche più lungo. Inoltre, si prevede che gli eventi di piena di media (nelle Prealpi e nelle Alpi) o grande entità (nell'Altopiano e nel Giura) diventino più frequenti in molte regioni. I principali fiumi, alimentati da numerosi bacini imbriferi di più piccole dimensioni, subiranno cambiamenti analoghi. Nel Reno si formerà ad esempio nel corso degli anni un secondo massimo stagionale in inverno in aggiunta a quello di inizio estate. Gli eventi di magra nei corsi d'acqua delle Prealpi e

delle Alpi si sposteranno dall'inverno alla tarda estate e saranno meno accentuati. Nelle zone dell'Altopiano le portate di magra si accentueranno e i periodi di magra si prolungheranno. Le portate di magra dell'Aar scenderanno gradualmente al di sotto dei valori registrati attualmente in inverno.

### Effetti dei cambiamenti climatici sulla capacità di immagazzinamento idrico

Le modifiche del regime e la maggiore predisposizione a piene e magre, già osservabile ai nostri giorni, è riconducibile ai cambiamenti climatici. Negli ultimi cento anni, la temperatura media annua in Svizzera è aumentata di oltre 1,5 gradi. Rispetto all'evoluzione constatata fra il 1980 e il 2009, l'aumento di temperatura atteso fino al 2085 è pari a 3 gradi (con una tolleranza di  $\pm 1$  °C). Ciò si ripercuoterà sulla capacità d'immagazzinamento idrico regionale, in quanto l'aumento della temperatura causerà un innalzamento del limite delle nevicate. Le zone centrali coperte da neve diminuiranno sempre più e, al contempo, si ridurrà lo spessore e la durata della copertura nevosa. Infine saranno disponibili sempre meno riserve di neve che possono sciogliersi. Nel periodo 1980–2009 in Svizzera il 40 per cento circa delle portate era costituito da neve sciolta. Tale quota scenderà fino a circa il 25 per cento entro il 2085. Una parte sempre più consistente delle precipitazioni, soprattutto in inverno, potrà quindi defluire immediatamente. Solo meno del 2 per cento delle portate annue deriva attualmente dallo scioglimento estivo dei ghiacciai. In estate, tuttavia, nei corsi d'acqua situati nelle vicinanze dei ghiacciai, l'acqua di scioglimento costituisce una quota importante.

I ghiacciai, che reagiscono lentamente agli effetti dei cambiamenti climatici, sono troppo grandi in rapporto alle condizioni ambientali attuali. Essi continueranno a sciogliersi in modo massiccio. Ciò comporterà portate supplementari nei bacini imbriferi alpini. Il fenomeno sarà comunque di durata relativamente breve: per i ghiacciai più grandi in termini di volume fino circa al 2040, mentre per quelli più piccoli si registra già attualmente una diminuzione delle portate. Nel 2100 rimarrà

presumibilmente solo il 30 per cento del volume attuale dei ghiacciai, principalmente nel bacino imbrifero del Rodano.

### **Cambiamenti previsti nelle precipitazioni**

Durante il XX secolo le precipitazioni hanno registrato un leggero aumento su tutto il territorio nazionale. La tendenza osservata nelle precipitazioni annue proseguirà nel corso del XXI secolo: esse aumenteranno leggermente nella parte settentrionale del Paese, mentre si ridurranno in misura attenuata in quella meridionale. Una redistribuzione significativa nel corso dell'anno avverrà comunque su entrambi i versanti alpini: le precipitazioni diminuiranno fortemente (di circa il 20%) in estate, mentre aumenteranno nelle altre stagioni (tranne in primavera sul versante meridionale). Questa redistribuzione delle precipitazioni stagionali accentuerà le ripercussioni sulle portate dovute ai cambiamenti della capacità di immagazzinamento (di neve e ghiaccio), che dipende dalle temperature, e inciderà maggiormente sulle portate: in inverno si registreranno più precipitazioni in forma liquida, mentre in estate vi saranno molto meno precipitazioni e un apporto inferiore di acqua di scioglimento. Sino alla fine del secolo, ogni due anni si registreranno estati calde almeno quanto quella del 2003. I periodi di siccità saranno più frequenti e di più lunga durata.

### **Incertezze**

Per il momento non è possibile fare previsioni attendibili su eventi estremi di forti precipitazioni. Permangono inoltre notevoli incertezze in merito agli scenari relativi alle emissioni e al clima. L'incertezza sull'aumento delle temperature non consente di valutare esattamente la rapidità dei cambiamenti nella capacità di accumulazione di neve e ghiaccio. Infine, rimangono incertezze sull'entità effettiva della redistribuzione stagionale del volume delle precipitazioni. I modelli idrologici tengono conto di tutte queste incertezze ed è quindi possibile farsi un'idea dei cambiamenti che interverranno nel regime idrico svizzero in base alla futura evoluzione climatica.

### **Conseguenze nella gestione delle acque e nell'ecologia dei corsi d'acqua**

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle portate illustrati nella presente pubblicazione avranno conseguenze a livello di gestione delle acque. Le misure di protezione contro le piene adottate finora nell'Altopiano e nel Giura dovranno essere riesaminate. Inoltre, i rischi di penuria d'acqua nel periodo estivo costituiscono una potenziale fonte di conflitto fra i diversi utenti. A causa delle importanti variazioni del regime delle portate e in parte della temperatura dell'acqua, occorrerà rivedere le norme giuridiche di differenti campi (emissione delle acque di raffreddamento, acque di scarico, regolazione dei laghi, acque residuali). Va chiarita inoltre la necessità di creare bacini di accumulazione supplementari (multiuso). Eventi di magra più frequenti e intensi e portate maggiori durante l'inverno potrebbero perturbare più sovente la navigazione sul Reno.

Infine, gli ecosistemi dei corsi d'acqua subiranno doppiamente gli effetti dei cambiamenti climatici: da un lato, in seguito all'aumento della temperatura dell'aria e, dall'altro, alla redistribuzione stagionale delle portate. L'aumento della temperatura dell'aria e quindi dell'acqua e livelli d'acqua più bassi in estate potrebbero mettere ancor più a dura prova l'ecologia dei corsi d'acqua e dunque l'utilizzazione delle acque (per l'agricoltura, l'erogazione di calore industriale) e la pesca.

### **Prospettive**

Finora, non è stato possibile rispondere in modo esauritivo a tutte le domande. Ulteriori ricerche saranno necessarie sia laddove sussistono incertezze legate ai modelli climatici a livello regionale, sia per quanto attiene alla variazione della frequenza e dell'intensità delle forti precipitazioni e, dunque, della rarità degli eventi di piena, alle future portate di magra nelle Alpi e nelle Prealpi e alla modifica della temperatura delle acque che ne conseguono. Il progetto «Cambiamenti climatici e idrologia in Svizzera» (CCHydro) ha consentito di creare basi idrologiche solide per le riflessioni e le decisioni di ordine strategico. Grazie ai risultati di questo progetto è per la prima volta possibile valutare a livello nazionale gli effetti futuri dei cambiamenti climatici sui singoli elementi del ciclo idrologico.

## > Summary

### The CCHydro project

In 2009 the Federal Office for the Environment FOEN, under the project «Climate Change and Hydrology in Switzerland» (CCHydro), commissioned various research institutes to investigate how the water balance in Switzerland, the frequency of floods and low water as well as the water temperature might change by the end of this century. These studies were carried out on the basis of national climate scenarios developed at the same time. This report details the main results of the project.

### Stream flow scenarios

In the near term (until 2035), annual Swiss available water resources will change very little, apart from temporary increases in the stream flows in heavily glaciated regions. In the long term (by 2085) the available water resources will fall slightly, particularly in the Lake Maggiore basin (Rivers Ticino and Toce, minus 10%). However, the seasonal distribution of stream flows (flow regime) will shift almost everywhere in Switzerland. By the end of the century glacial and nival based catchments will only be found in isolated areas. The small catchments will increasingly be dominated by midland and meridional regimes. The Swiss Plateau will see the development of a new type of regime called *pluvial de transition* which will be characterised by a distinct minimum flow in August and two seasonal flow peaks in January and March. In many regions the stream flow is expected to be much higher in winter but lower in summer – except in the regions where glaciation remains. In most of the Swiss Plateau, therefore, the period of potential flooding will move from early summer to the winter season and will sometimes last longer. The frequency of flood events which are average (in the alpine foothills and the Alps) or high (in the Swiss Plateau and Jura) is also likely to increase in many regions. The major rivers, which are fed from numerous smaller catchments, will change accordingly. On the Rhine for example, a second seasonal maximum will develop over time in the winter in addition to the one in early summer. In the watercourses of the alpine foothills and the Alps, low water events will move from winter to late summer and will be less

pronounced. In the Swiss Plateau regions the flow during low water events will decrease considerably and these periods will be longer. For instance, the low stream flows of the Aare in late summer will gradually fall to levels lower than those currently found in winter.

### Effects of climate change on water reservoirs

The regime changes and the increased frequency of high and low water events which are already being observed can be explained by the changes in climatic conditions. Over the past 100 years the average annual temperature in Switzerland has risen by more than 1.5 °C. Compared with the 1980 to 2009 period, the expected temperature increase until the year 2085 is 3 °C ± 1 °C. This is bound to have an impact on seasonal hydrological reserves in Switzerland: The increase in temperature will be accompanied by a rise in the snow line. The average area covered by snow is being continually reduced, as is the thickness and duration of the snow cover. Finally, the reserves of snow available for melting are decreasing. Some 40% of the stream flow out of Switzerland during the 1980–2009 period consisted of snow melt. This percentage will fall to about 25% by 2085. This will lead to an increasing proportion of precipitation being free to drain away immediately, particularly in winter. Less than 2% of annual flow is currently derived from the summer glacier ice melt, but on watercourses near glaciers this represents a significant percentage in summer.

Because the glaciers – which react only slowly to environmental changes – are too large for current and future climatic conditions they will continue to melt rapidly. This will lead to higher stream flows in the alpine catchments, if only for a relatively short time: up to about 2040 for the larger glaciers (in terms of volume); on smaller glaciers flows are already decreasing again. By 2100 it is likely that only 30% of the current volume of ice will remain, mainly in the Rhone basin.

### Expected precipitation changes

Total Precipitation in Switzerland rose slightly during the 20<sup>th</sup> century. The annual precipitation trend observed will continue during the 21<sup>st</sup> century: Precipitation

will increase slightly in the North but will fall slightly in the South. A significant redistribution over the course of the year will take place on both sides of the Alps, however: summer precipitation will decrease very strongly (by 20%), but it will increase over the rest of the year (except in spring in the South). This redistribution of seasonal precipitation will strengthen the effects of the temperature-related changes in reserves (snow and ice) on the stream flow: More precipitation in liquid form in the winter, much lower precipitation and reduced melt water volumes in the summer. By the end of the century every second summer will be at least as warm as the summer of 2003. Droughts are likely to occur more often and last longer.

#### **Uncertainty**

Reliable statements on extreme high precipitation events cannot be given at present. The uncertainties in the emission and climate scenarios are also considerable. The uncertainty about temperature changes makes it difficult to quantify the rate at which the changes in snow and ice reserves will occur and it is still uncertain how marked the seasonal redistribution of precipitation volumes will actually turn out to be. These uncertainties have been allowed for in the hydrological modelling, making it possible to obtain an idea of the changes in the Swiss water balance as a result of future climate developments.

#### **Water management and ecological consequences**

The effect of climate change on the stream flows described above will have water management consequences. The existing flood protection measures must be reviewed in the Swiss Plateau and Jura. An increased risk of water shortages in the summer may

mean a potential for conflict among the different users. As stream flow regimes and some water temperatures will change significantly, the legal provisions in various areas (introduction of cooling water, waste water, lake control regulations, residual water) must be reviewed. The need for additional (multipurpose) reservoirs must be clarified. More frequent and serious low water events and higher winter flows could increasingly affect navigation on the Rhine.

Finally, the ecosystems in the rivers will be doubly affected by climate change: due to the higher air temperature and the seasonal redistribution of stream flows. Higher air temperatures and associated higher water temperatures and lower levels in summer are likely to put pressure on river ecology and therefore on water use (agriculture, heat input from industrial cooling) and fishing.

#### **Outlook**

It has not yet been possible to definitely answer all questions. Further research is required in relation to uncertainties in regional climate modelling, the change in intensity and frequency of high-precipitation events and their associated rare floods, future low water stream flows in the Pre-Alps and Alps and changing water temperatures. The research project «Climate Change and Hydrology in Switzerland» (CCHydro) has provided important hydrological foundations for strategic considerations and decisions. The results of the CCHydro project allow us to comprehensively estimate for the first time the future effects of climate change on the individual components of the hydrological cycle for the whole of Switzerland.

# 1 > Introduction

En août 2009, le Conseil fédéral chargeait les instances compétentes d'élaborer une stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Le premier volet de cette stratégie formulait les objectifs et les principes généraux régissant l'adaptation, définissait les champs d'action et les objectifs des différents secteurs concernés et identifiait les grands défis touchant l'ensemble des secteurs (OFEV 2012). Pour le secteur de la gestion des eaux, la stratégie délimitait quatorze champs d'action revêtant chacun un degré d'urgence propre. Et parmi les défis touchant l'ensemble des secteurs, elle mettait notamment en exergue les sécheresses estivales prolongées et l'aggravation des risques de crues. Le second volet de la stratégie, qui prendra la forme d'un plan d'action, devra donner des pistes pour relever les défis identifiés dans les différents secteurs.

**Adaptation aux changements climatiques: stratégie de la Confédération**

Dès 2008, mû par la volonté de rassembler les bases hydrologiques nécessaires à l'élaboration de la stratégie d'adaptation, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) décidait de lancer son projet d'envergure «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro).

Partant des scénarios climatiques les plus récents, le projet CCHydro avait pour but de mettre à disposition des scénarios liés au cycle de l'eau et aux débits en Suisse pour les périodes autour de 2035 et 2085. Elaborés à des échelles spatiotemporelles très fines, ces scénarios étaient différenciés selon les régions climatiques et les étages altitudinaux. Ils devaient servir de base à l'analyse des modifications des valeurs extrêmes des débits (étiages/crués), des ressources en eau et de leur distribution saisonnière (régime des eaux), ainsi que des températures (Volken 2010).

**CCHydro: objectifs et projets partiels**

Le projet comptait sept modules, traités par différents instituts scientifiques entre 2009 et 2011:

1. Scénarios climatiques pour la Suisse jusqu'en 2100, Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPFZ
2. Régime naturel des eaux en Suisse et bassins versants d'importance nationale, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), avec la collaboration de l'institut de géographie de l'Université de Zurich (GIUZ)
3. Changement climatique et régime des eaux dans les régions à l'équilibre fragile, Institut de géographie de l'université de Berne (GIUB)
4. Changement climatique et étiages, Institut de géographie de l'Université de Berne (GIUB)
5. Modélisation du débit de glaciers suisses, Laboratoires de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPFZ
6. Changement climatique et crues, HYBEST GmbH
7. Changement climatique et température de l'eau (étude pilote), Laboratoire de mécanique des fluides de l'environnement et de l'hydrologie, EPFL

---

Différents aspects quantitatifs de l'hydrologie de surface sont abordés au fil de ces différents modules. Les questions ayant trait à la qualité des eaux (à l'exception du projet pilote consacré à la température de l'eau) et celles spécifiquement liées aux lacs et aux eaux souterraines sortent en revanche du cadre du projet.

Un rapport partiel a été remis pour chaque module du projet CCHydro. Ces rapports partiels sont cités dans la bibliographie et peuvent être consultés sur le site Internet de l'OFEV. Il existe par ailleurs de nombreuses publications scientifiques traitant de thèmes connexes.

Nombre d'autres projets et programmes nationaux ou internationaux se sont penchés sur le thème de l'hydrologie et, de façon plus générale, sur la gestion des eaux. Le projet CCHydro a bien entendu cherché à exploiter toutes les synergies possibles avec ces différents projets. Les chercheurs se sont notamment fondés sur les mêmes scénarios climatiques et ont échangé leurs données de base et leurs résultats. Les différents projets partenaires sont énumérés ci-dessous:

#### Projets apparentés

- > Répercussions des changements climatiques sur la protection contre les crues en Suisse (CIPC 2007)
- > Projet «Rheinblick 2050» de la Commission internationale pour l'hydrologie du bassin rhénan (CHR) avec examen des impacts du changement climatique sur le débit du Rhin (CHR 2010)
- > Water Management in a Changing Environment – Strategies against Water Scarcity in the Alps (AlpWaterScarce 2011)
- > Adaptation to Climate Change in the Alpine Space – Work Package Water Regime (WP4) (Adaptalp 2011)
- > Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique (SSHL et CHy 2011)
- > Projets du groupe de travail Climat et eaux souterraines de la Société suisse d'hydrogéologie (Schürch 2011)
- > PNR 61 «Gestion durable de l'eau», avec huit projets dans chacun des domaines Hydrologie et Gestion des eaux (Fonds National Suisse 2010). Les résultats du programme sont attendus pour 2013/14.

## 2 > Méthodes

---

Le projet CCHydro avait pour objectif principal de mettre à disposition des scénarios à haute résolution spatiotemporelle concernant le cycle de l'eau et les débits en Suisse pour les périodes autour de 2035 et de 2085. Comme on ne pouvait espérer y parvenir avec un seul grand modèle, il a fallu subdiviser les travaux en plusieurs modules: modifications de la surface, du volume et du débit des glaciers ainsi que des quantités d'eau de fonte; modélisation détaillée du cycle hydrologique et des débits de bassins versants de petite ou moyenne taille; analyse des débits d'étiage et de crue.

**Objectifs du projet**

Un ensemble de scénarios climatiques récemment mis au point (Bosshard et al. 2011a) a servi de base commune à toutes les modélisations hydrologiques et glaciologiques. L'emploi d'un cadre temporel et de scénarios unifiés a permis de s'assurer que les résultats de tous les modules soient comparables.

Pour pouvoir tenir compte de l'influence des glaciers sur la modélisation hydrologique, on a considéré de façon unifiée les résultats de la modélisation des glaciers pour toute la Suisse (Linsbauer et al. 2012).

### 2.1 Périodes considérées

La période choisie comme base de référence s'échelonne de 1980 à 2010. Pour des motifs de disponibilité des données, certains projets ont toutefois dû définir des périodes légèrement divergentes (plus courtes), comprises dans cette période de référence. Toutes les indications de changements intervenus dans les scénarios climatiques ou hydrologiques se réfèrent à ces périodes.

**Période de référence**

Les scénarios portent quant à eux sur des périodes allant de 2021 à 2050 et de 2070 à 2099. Pour simplifier, on a choisi de parler d'évolution à court terme (2035, avenir proche) et à long terme (2085, avenir lointain). D'autres horizons temporels encore ont été définis pour l'étude des glaciers.

**Périodes de projection**

Les comparaisons et les analyses exposées dans le présent rapport portent non pas sur un jour, un mois ou une année en particulier, mais sur des valeurs moyennes calculées sur l'une des périodes évoquées plus haut ou sur d'autres évaluations statistiques s'étendant sur l'ensemble des périodes, comme souvent dans les études du climat. Ces restrictions sont indispensables pour assurer la pertinence des modèles climatiques (CH2011, 2011).

## 2.2 Périmètre étudié

Le périmètre étudié s'étend à l'ensemble de la Suisse et comprend également les régions limitrophes des pays voisins dont les eaux s'écoulent dans le Rhin, le Rhône, le Tessin et l'Inn. Pour l'évaluation globale du territoire, la superficie totale de la Suisse a été subdivisée en 25 bassins versants partiels, qui ont été modélisés un à un (Zappa et al. 2012). Pour l'examen des bassins versants sensibles de taille moyenne, on s'est référé à un total de 189 zones (voir fig. 23 et fig. 27; Köplin et al. 2011). L'analyse des débits d'étiage a quant à elle porté sur 29 bassins versants du Plateau (voir fig. 35; Meyer et al. 2011a). Et pour les questions portant sur les débits de crue, Naef (2011) a étudié 94 bassins versants, pour la plupart très petits.

Bassins versants

Des analyses détaillées ont été menées sur sept glaciers, soit les glaciers d'Aletsch, du Rhône, du Trift, de Gries, de Findelen, de Silvretta et de Morteratsch (VAW 2011). Pour l'estimation de la fonte des glaciers, Linsbauer et al. (2012) ont étudié l'ensemble des glaciers suisses.

Glaciers examinés

## 2.3 Modèles utilisés

Pour calculer les scénarios climatiques, on a appliqué la méthode Delta change. On s'est fondé pour cela sur les résultats de dix chaînes de modèles sélectionnées parmi celles du projet européen ENSEMBLES, issues de l'association entre un modèle climatique global (MCG) et un modèle climatique régional (MCR). Toutes les modélisations se sont fondées sur le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A1B (GIEC 2008). Les résultats du projet ENSEMBLES ont été interpolés pour 189 stations de mesure des températures et 565 stations de mesure des précipitations, de façon à déterminer les facteurs de changement Delta. Cela a requis une analyse harmonique des variations annuelles des températures et des précipitations, dont on a déduit les facteurs moyens de changement Delta pour chaque jour de l'année (Bosshard et al. 2011a, b, c; CH2011, 2011). Tous les scénarios climatiques sont disponibles gratuitement sous: [www.ch2011.ch](http://www.ch2011.ch).

Scénarios climatiques

Scénario d'émissions A1B

Pour la modélisation du régime des eaux et des débits, on a utilisé le très réputé modèle hydrologique PREVAH (Viviroli et al. 2009), dans trois variantes différentes:

Modélisation du régime des eaux et des débits

- > Pour analyser la sensibilité de territoires de taille moyenne, on a utilisé le modèle PREVAH original, en régionalisant toutefois ses paramètres (Köplin et al. 2010, 2011, 2012).
- > Pour les débits d'étiage, on a ajouté au modèle PREVAH un module permettant de le calibrer sur le débit de base. Le calibrage multicritères ainsi obtenu a permis d'améliorer la précision des modèles de débits d'étiage dans les scénarios climatiques. (Meyer et al. 2011b, 2012a, b).
- > Enfin, pour les grands bassins versants, on a utilisé une variante du modèle PREVAH qui effectue ses calculs non pas sur des zones dotées de caractéristiques hydrologiques comparables (hydrotopes) mais sur une grille à maillage uniforme (Bernhard et al. 2011, Zappa et al. 2012).

Pour analyser les bassins versants sous l'angle de leur régime d'écoulement et de leur potentiel de crues, on a appliqué une méthode éprouvée, utilisée pour estimer le régime d'écoulement des surfaces en cas de fortes pluies, et qui a permis de représenter de façon différenciée le régime des bassins versants. (Naef et al. 2007, Naef 2011).

Potentiel de crues

Aux fins de modélisation détaillée d'une sélection de glaciers de grande taille, on a recouru au modèle d'évolution des glaciers et d'écoulement GERM. Ce modèle permet de simuler l'accumulation, l'ablation, l'évolution des glaciers, l'évapotranspiration et la formation des débits, en haute résolution spatiotemporelle (Huss et al. 2008, Farinotti et al. 2011).

Pour les applications comprises dans le modèle hydrologique PREVAH, la modélisation de tous les glaciers à l'échelle de la Suisse s'est fondée sur le modèle «déplacement de la ligne d'équilibre». Ce modèle repose sur le postulat que la ligne d'équilibre remonte lorsque la température augmente, diminuant d'autant la zone d'accumulation. Grâce au rapport connu entre la taille de la zone d'accumulation et celle de la zone d'ablation pour une étendue de glacier en équilibre avec le climat, il est possible de déterminer une nouvelle étendue totale du glacier (Paul et al. 2007). D'autres approches encore ont été mises au point et contrôlées pour la modélisation à l'échelle de la Suisse, comme le modèle de diminution de l'épaisseur et le modèle GlabTop (Linsbauer et al. 2012, Paul et Linsbauer 2012).

Modélisation des glaciers

## 2.4 Données

Les différents modèles utilisés dans le cadre du projet CCHydro nécessitent des collections de données de nature très diverse. Les principales sources de données ont été:

- > L'Office fédéral de la statistique (OFS): utilisation et couverture du sol, modèle numérique de terrain.
- > Swisstopo: modèle numérique de terrain, cartes nationales numériques, informations concernant la géologie et l'utilisation du sol
- > MétéoSuisse: séries temporelles de données climatiques, cartes des précipitations interpolées
- > Office fédéral de l'environnement (OFEV): séries temporelles de données hydrologiques

## 2.5 Incertitudes

On trouve des incertitudes dans chaque maillon de la chaîne de modèles utilisée. Ces incertitudes se propagent d'un maillon à l'autre et, ce faisant, elles peuvent soit se renforcer, soit s'atténuer.

- > L'une des principales incertitudes concerne l'avenir lointain défini dans le scénario d'émissions utilisé. En effet, celui-ci nécessite que l'on formule une série d'hypothèses concernant l'évolution de la population, de l'économie, du commerce et de la disponibilité des matières premières, ainsi que l'influence possible de la politique sur les émissions de gaz à effet de serre.

- > Bien que la modélisation du climat ait fait des progrès considérables, il n'est pas possible de reproduire des données climatiques locales dans l'espace alpin. Ainsi, la résolution spatiale du modèle utilisé ne permet pas de formuler des valeurs ponctuelles concrètes pour le Valais ou l'Engadine par exemple (CH2011, 2011).
- > Les modèles hydrologiques ont atteint un haut niveau de qualité. Les incertitudes quant aux évolutions futures sont toutefois difficiles à chiffrer, car les modèles sont calibrés en fonction des conditions environnementales actuelles et que les paramètres peuvent se modifier. Les incertitudes dans la modélisation des extrêmes demeurent elles aussi élevées.
- > Si la modélisation des glaciers a également beaucoup progressé, il reste difficile de déterminer la vitesse de fonte de glaciers de tailles et d'emplacements divers.

Pour tenir compte des incertitudes qui persistent dans la modélisation du climat, on a développé dix scénarios climatiques différents, reflétant toute la gamme des évolutions envisageables. Ces dix scénarios sont entrés dans l'élaboration de tous les modèles hydrologiques et glaciologiques, de façon à inclure les incertitudes climatiques dans les incertitudes concernant les débits. Il est ainsi possible de se faire une idée de l'évolution possible du régime des eaux en Suisse en fonction de l'évolution que pourra connaître le climat.

Dix scénarios climatiques

## 3 > Changements climatiques

*Les températures mesurées en Suisse ont augmenté de plus de 1,5 °C au cours du siècle dernier. Côté précipitations annuelles, une légère augmentation a été observée au nord, une légère diminution au sud, sans que l'on puisse parler de tendances significatives. Ces tendances sont appelées à se maintenir mais l'ampleur des changements dépendra de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Sur l'ensemble du territoire suisse, les principaux changements interviendront durant l'été: d'après le scénario d'émissions A1B, plutôt optimiste, il faut s'attendre d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle à une augmentation des températures de l'ordre de 4 °C et à un accroissement des précipitations pouvant atteindre 20 % par rapport à la période 1980–2009. Les canicules seront ainsi plus fréquentes et dureront plus longtemps. Il n'est en revanche pas possible pour l'heure d'émettre de pronostics fiables quant à l'intensité ou à la fréquence des épisodes pluvieux extrêmes.*

### 3.1 Observations faites jusqu'ici

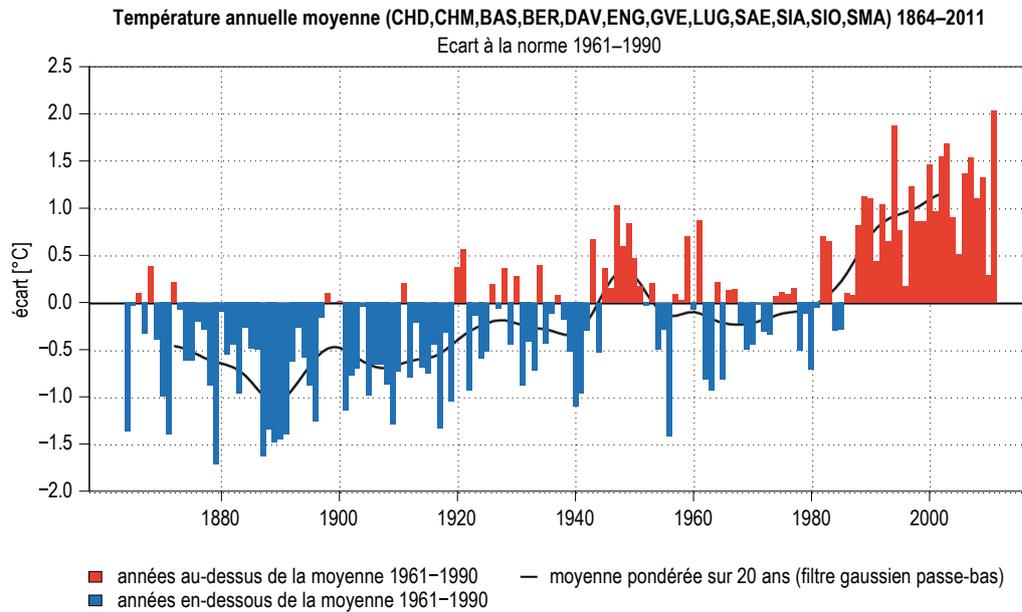
Au cours du siècle dernier (1912–2011), les températures annuelles moyennes en Suisse ont augmenté de plus de 1,5 °C (fig. 1). Le réchauffement a connu une accélération ces 30 dernières années (1982–2011), avoisinant +0,5 °C par décennie. C'est avant tout la hausse des températures observée au printemps et en été dans les régions de basse altitude qui contribue à cette forte augmentation. Le réchauffement s'avère environ deux fois plus marqué en Suisse qu'en moyenne mondiale, ce qui s'explique notamment par les propriétés physiques spécifiques des surfaces terrestres et des surfaces couvertes par les océans. Il faut considérer en outre que dans les régions septentrionales du globe ainsi que dans les Alpes, des surfaces importantes sont recouvertes de neige et de glace. Or celles-ci rétrécissant progressivement, la proportion des surfaces de couleur foncée augmente et l'albédo diminue (rapport rayonnement renvoyé/rayonnement entrant), ce qui entraîne un accroissement du bilan énergétique (rétroaction albédo de la glace et de la neige).

Températures

Il serait difficile de vouloir dégager une tendance claire et uniforme dans les précipitations au cours du siècle dernier, étant donnée leur forte variabilité naturelle (fig. 2). En effet, les tendances observées sont fonction de la fenêtre temporelle choisie, de la saison et de la zone géographique. A titre d'exemple, alors que l'accroissement des précipitations atteignait 25 % entre 1971 et 2000 dans les Alpes orientales notamment, on a observé un recul de l'ordre de 15 % entre 1982 et 2011 en particulier en Suisse romande et au Tessin (fig. 3).

Précipitations

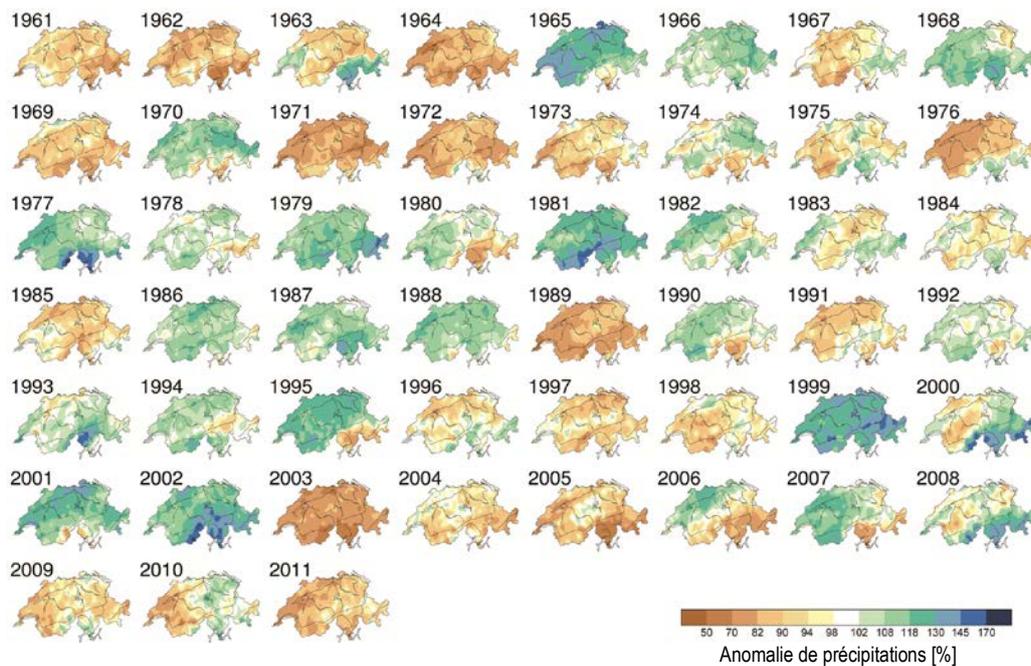
**Fig. 1** > Ecart à la norme constatés pour les températures annuelles moyennes entre 1961 et 1990 en Suisse



MétéoSuisse 2012a

**Fig. 2** > Répartition spatiale des écarts constatés pour les précipitations annuelles des derniers 50 ans par rapport à la période 1961–1990

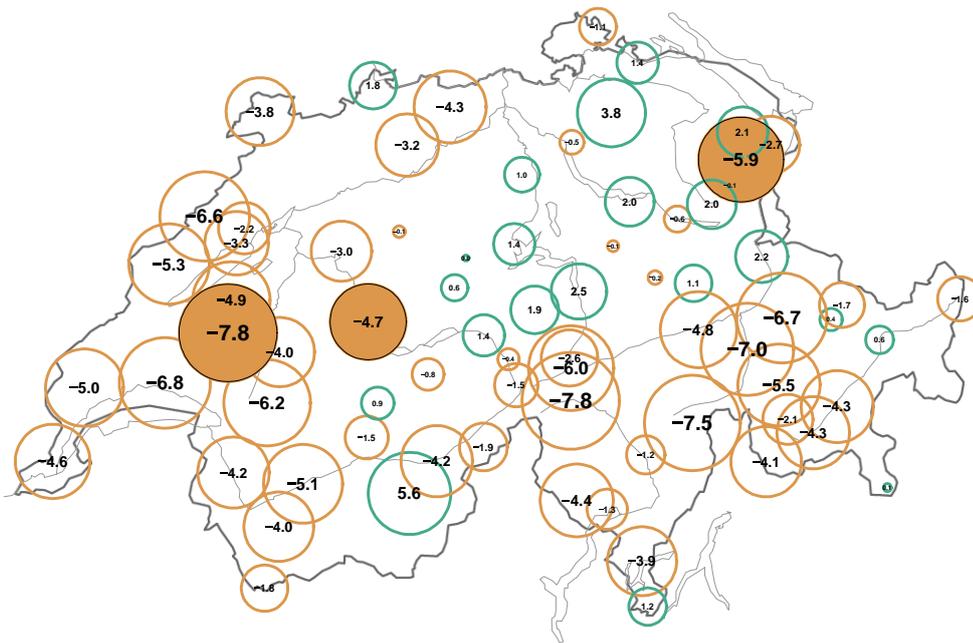
*On distingue des phases humides et des phases plus sèches, ainsi que des années présentant des différences régionales marquées. Ces changements sont dus au caractère variable de la circulation atmosphérique.*



MétéoSuisse

**Fig. 3 Répartition spatiale des modifications constatées dans les précipitations annuelles entre 1982 et 2011 en Suisse**

Alors que pour la température, on repère des tendances claires pour l'ensemble des régions et des classes d'altitude, des différences régionales importantes apparaissent pour les précipitations. La taille des cercles est fonction de l'importance du changement par décennie (en %). Les cercles verts indiquent une augmentation tendancielle, les cercles bruns une diminution. Les cercles pleins signalent une tendance significative au seuil de 95 %.



MétéoSuisse 2012b

### 3.2 Scénarios climatiques les plus récents

Les modèles climatiques globaux et régionaux utilisés pour les scénarios climatiques les plus récents se fondent eux-mêmes sur des scénarios d'émissions. Elaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC 2008), ces derniers examinent l'évolution future possible des émissions de gaz à effet de serre. Ils dépendent de facteurs démographiques, socioéconomiques et technologiques, ainsi que des mesures prises dans le domaine de l'énergie. Comme il est difficile de prédire l'évolution démographique mondiale, tout comme notre future dépendance à l'égard des énergies fossiles, les pronostics quant à nos futures émissions de gaz à effet de serre présentent une marge d'incertitude importante. Or l'évolution à venir des émissions sera déterminante pour celle des températures annuelles et des précipitations estivales d'ici la fin du siècle (fig. 4). A en croire le scénario A1B qui a servi de base à la présente étude, les émissions doubleront d'ici 2050 par rapport à leur niveau de 1990 et se stabiliseront ensuite. Quant à l'économie, elle continuera de connaître de forts taux de croissance, parallèlement à la population mondiale. Nos besoins énergétiques, enfin, seront couverts pour moitié par des énergies renouvelables et pour l'autre moitié par des énergies fossiles.

Le scénario d'émissions A1B  
utilisé pour le projet

**Fig. 4** > Emissions globales de gaz à effet de serre

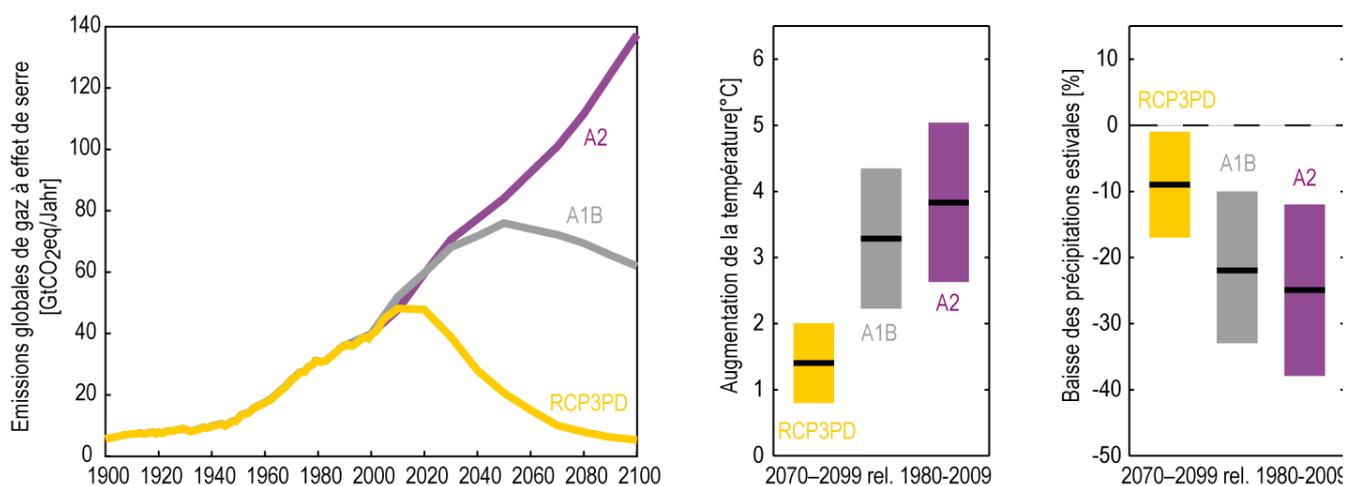
Evolution passée et trois évolutions futures possibles des émissions globales de gaz à effet de serre, en équivalents CO<sub>2</sub>. Le scénario RCP3PD correspond à la réduction des émissions de gaz à effet de serre nécessaire pour atteindre «l'objectif des 2 °C» (limitation du réchauffement global à 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle).

**Evolution des températures**

Augmentation moyenne des températures (changements en °C) pour la Suisse jusqu'en 2070–2099 par rapport à la période de référence 1980–1999, sur la base des trois scénarios d'émissions. Les lignes noires correspondent aux valeurs moyennes et les colonnes de couleur à la plage d'incertitude des modèles.

**Evolution des précipitations**

Même mode de représentation que celui du schéma central, mais pour les précipitations estivales (variations en %).



CH2011, 2011

On a également élaboré pour la Suisse, selon diverses méthodes, des scénarios climatiques régionaux (CH2011, 2011) fondés sur les résultats du projet européen ENSEMBLES. On a conçu des scénarios saisonniers probabilistes pour les trois grandes régions que sont le nord, l'ouest et le sud de la Suisse, en se fondant sur trois scénarios d'émissions (fig. 4). Les scénarios utilisés dans le cadre du projet CCHydro se fondent sur dix chaînes de modèles et un seul scénario d'émissions, mais sont disponibles pour chaque jour donné, au niveau local (Bosshard et al. 2011a). Chaque chaîne de modèles permet de simuler pour toute l'Europe, sur la base du scénario d'émissions A1B, une évolution possible du climat jusqu'en 2100. Pour arriver à cela, on a utilisé dans chaque chaîne de modèles un modèle climatique global à basse résolution spatiale, dont on a affiné les résultats grâce à un modèle climatique régional présentant une meilleure résolution (25 x 25 km). On espère parvenir ainsi à mieux décrire la variabilité régionale des paramètres climatiques, notamment dans l'espace topographiquement complexe que sont les Alpes. Malgré la relative bonne résolution des modèles climatiques régionaux, il ne sera toutefois pas possible de reproduire les conditions locales pouvant régner dans telle vallée alpine ou sur tel sommet particulier, par exemple.

Elaboration des scénarios climatiques destinés au projet CCHydro

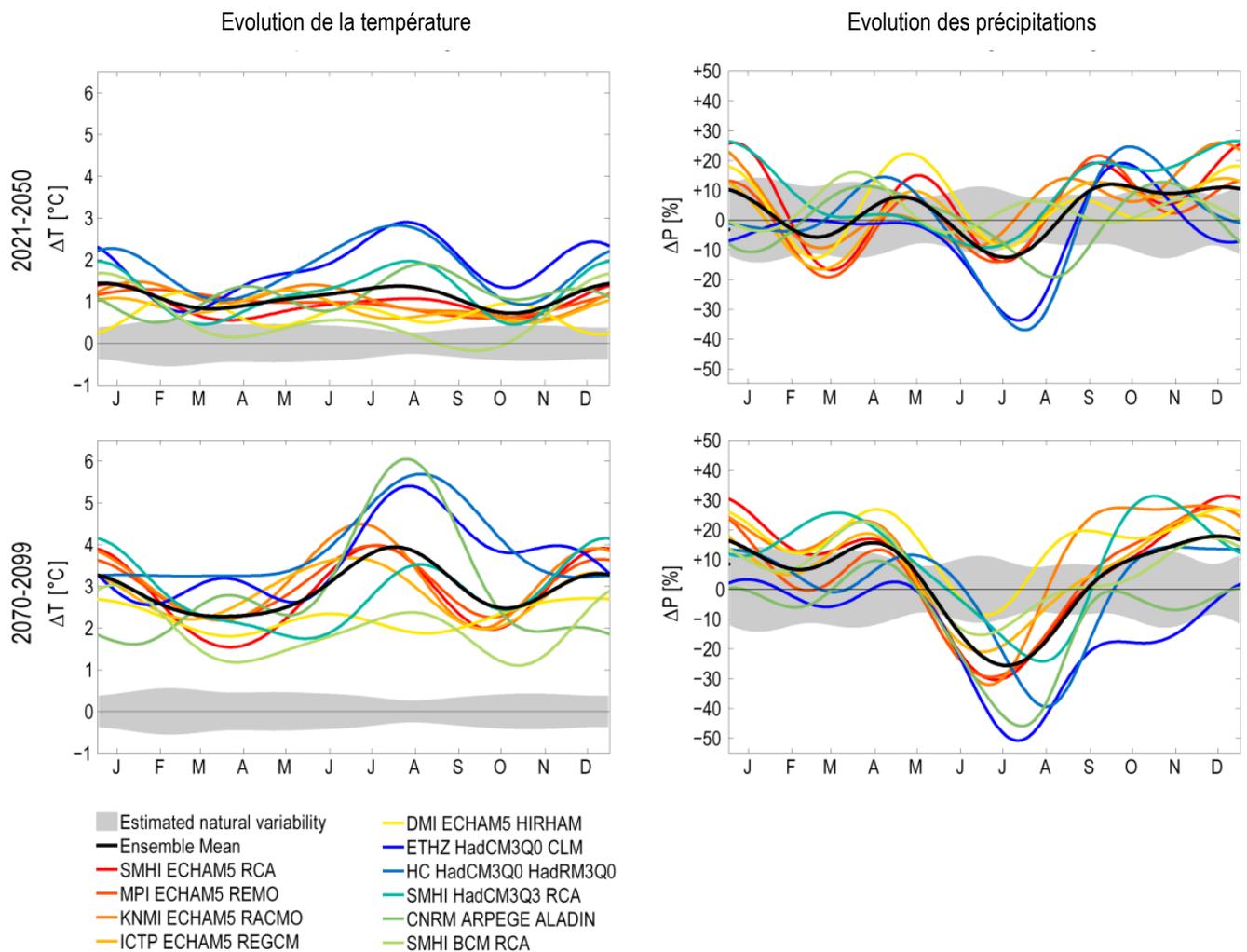
Pour pouvoir utiliser les données dans le cadre d'études hydrologiques plus poussées et plus localisées, il a fallu les préparer quelque peu. On a tout d'abord interpolé les résultats des modèles climatiques régionaux sur une sélection de lieux (189 stations de mesure des températures et 565 stations de mesure des précipitations) par pondération inverse des distances aux quatre intersections de la grille les plus proches, pour obtenir un lissage spatial. Il a par ailleurs fallu séparer le signal climatique effectif de la varia-

Méthode Delta change

bilité naturelle. Pour ce faire, on a procédé au filtrage spectral des variations annuelles et l'on a appliqué celui-ci à la méthode Delta change (Bossard et al. 2011b). Pour chaque station et chaque jour de l'année, on a calculé un signal de changement climatique de la température et des précipitations (exemple dans la fig. 5). Puis l'on a procédé à la modification des données relevées aux stations de mesure sur la base du signal de modification climatique. Relevons à cet égard que la méthode Delta change présente deux limitations majeures: tout d'abord elle ne convient pas pour évaluer les modifications des événements à précipitations extrêmes. De plus, du fait de changements dans la fréquence de certaines situations météorologiques, elle ne tient pas compte des influences sur la variabilité des températures et des précipitations.

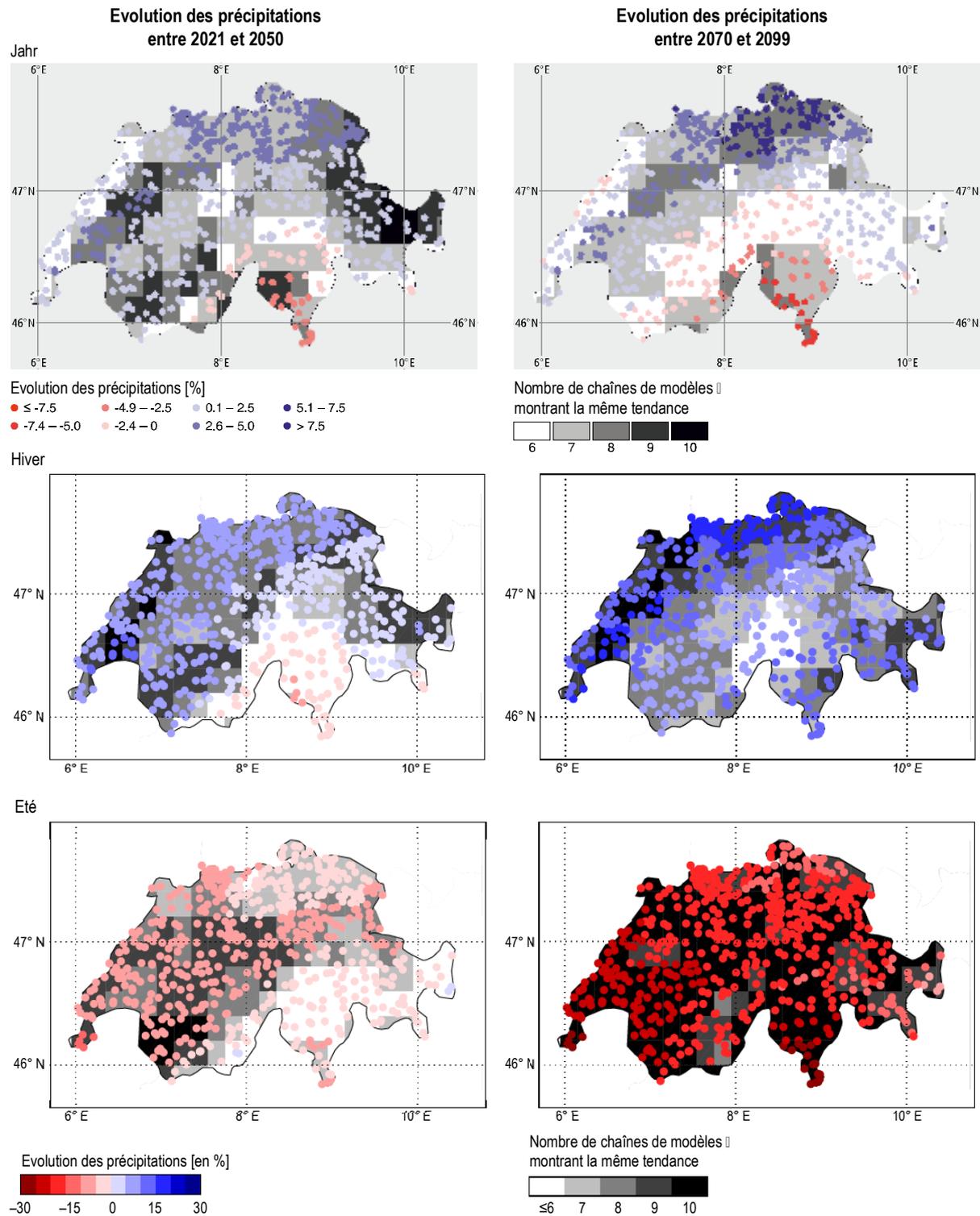
**Fig. 5 Variations annuelles des signaux de changement climatique pour les températures et pour les précipitations pour la station de Berne/Zollikofen et pour les deux périodes de projection 2021–2050 (en haut) et 2070–2099 (en bas)**

*La ligne noire correspond à la valeur moyenne des dix chaînes de modèles utilisées (lignes de couleur). La zone grisée correspond à l'écart-type de la variabilité naturelle.*



**Fig. 6** > Répartition spatiale des changements observés dans les précipitations pour les périodes 2021–2050 et 2070–2099 par rapport à la période 1980–2009

Les deux figures du haut montrent l'évolution des sommes de précipitations annuelles, celles du milieu l'évolution des précipitations hivernales et celles du bas l'évolution des précipitations estivales. Les zones grisées indiquent le nombre de chaînes de modèles montrant la même tendance. Plus le gris est foncé et plus les chaînes de modèles concordent.



Toutes les chaînes de modèles prédisent pour les décennies à venir une augmentation des températures à chaque période de l'année. Jusqu'à la période 2021–2050 déjà, le réchauffement attendu excède clairement la plage d'incertitude due à la variabilité naturelle et se poursuit jusqu'à la période 2070–2099 (fig. 5). Au sud comme au nord des Alpes, les changements de température les plus marqués sont attendus pour la période estivale. Pour ce qui est des précipitations, les différences saisonnières et régionales tendent à s'accroître avec le temps (fig. 6): partout on prévoit un fort recul des précipitations en été (entre -18 et -28 % jusqu'à la période 2070–2099). Une nette augmentation est prévue en hiver dans le sud, alors que dans le nord, les précipitations ne devraient diminuer qu'en été et suivre une tendance haussière le reste de l'année. Les résultats se trouvent synthétisés dans la fig. 7. Toutes saisons confondues, on voit s'esquisser une différenciation nord-sud: alors que les conditions tendent à devenir plus humides au nord, les régions méridionales deviendront légèrement plus sèches (fig. 6).

Evolution des températures et des précipitations

**Fig. 7 Evolution du climat en Suisse pour les périodes 2021–2050 et 2070–2099 selon le scénario d'émissions A1B**

Le tableau indique les températures (moyennes de l'ensemble), leur zone d'incertitude (écart-type), ainsi que la tendance suivie par les précipitations (si sept au moins des dix chaînes de modèles affichent la même tendance). Les flèches rouges signalent des conditions plus sèches, les bleues des conditions plus humides. N correspond aux régions du nord des Alpes, S aux régions méridionales – Tessin, Valais du sud-est, Engadine et vallées du sud des Grisons.

	2021–2050		2070–2099	
	Température	Précipitations	Température	Précipitations
<b>Année</b>	+1.2°C ± 0.5°C	N S	+3°C ± 1°C	N S
<b>Printemps</b>	+1°C ± 0.5°C		+2.5°C ± 1°C	N S
<b>Été</b>	+1.5°C ± 0.5°C	N	+4°C ± 1°C	N/S
<b>Automne</b>	+1°C ± 0.5°C	N	+2°C ± 1°C	N
<b>Hiver</b>	+1°C ± 0.5°C	N	+3°C ± 1°C	N/S

léger (< 10%)		fort (10 - 20%)		très fort (> 20%)	
------------------	--	--------------------	--	----------------------	--

### 3.3 Événements extrêmes

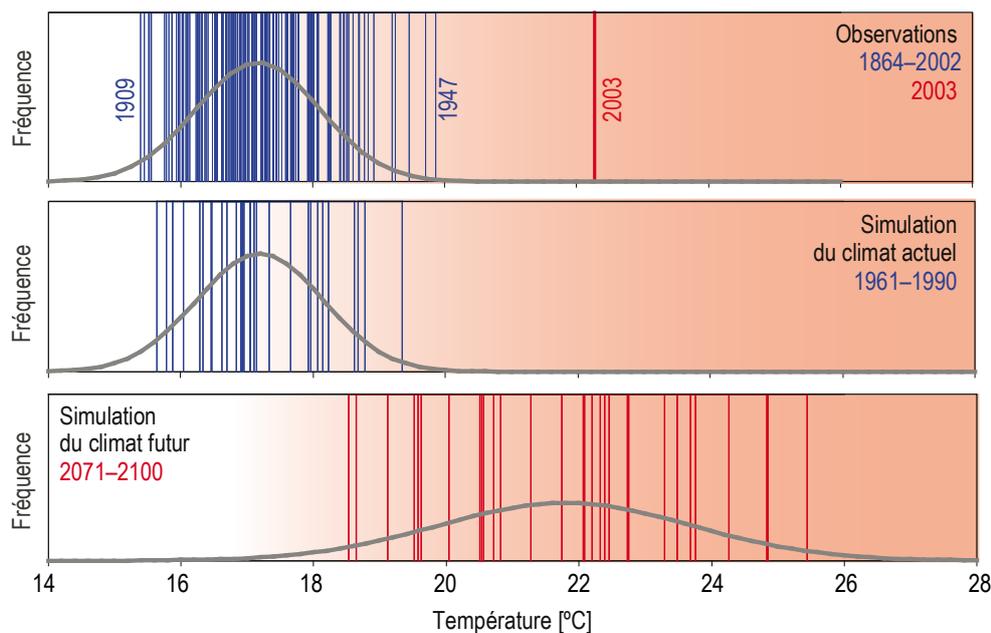
Le réchauffement climatique se répercutera tant sur les valeurs moyennes que sur la répartition des paramètres climatiques, et donc aussi sur la fréquence des événements extrêmes (fig. 8). Comme le montrent les récents calculs CH2011 (CH2011, 2011), la fréquence des canicules est appelée à s'accroître. Les étés caniculaires comme celui de 2003 pourraient devenir la norme d'ici la fin du siècle en cours (Schär et al. 2004). Chaque deuxième été serait ainsi au moins aussi chaud que celui de 2003. On s'attend également à une plus grande variabilité interannuelle des températures estivales. La plupart des modèles s'accordent à prévoir une prolongation des périodes sèches en été, bien que la marge d'incertitude demeure importante (valeurs comprises entre -10 et +70 % [CH2011, 2011]). Il n'est en revanche pas possible pour l'instant de faire des prévisions quantitatives sur la fréquence et la force des orages estivaux. Quant à l'intensité des épisodes de fortes précipitations en hiver, les résultats des différentes chaînes de modèles présentent une dispersion importante (CH2011, 2011). La valeur moyenne obtenue par le projet ENSEMBLES ne permet pas de dégager une tendance claire. Dans l'état actuel des connaissances, on ne peut dire si la fréquence des fortes précipitations est appelée à augmenter ou à diminuer. Une étude plus ancienne avait pronostiqué un accroissement de près de 50 % de la fréquence des épisodes pluvieux extrêmes au printemps (Frei et al. 2006).

Episodes caniculaires

Fortes précipitations

**Fig. 8** Modification attendue dans la répartition des températures estivales par rapport à 1961–1990

*La forme et la position des répartitions (valeur moyenne, largeur) sont liées à la fréquence et à l'intensité des événements extrêmes.*



### 3.4 Marge d'incertitude des scénarios climatiques

Les modèles climatiques régionaux étant couplés aux modèles globaux, les incertitudes des deux types de modèles sont cumulées. Aux côtés des processus devant être paramétrés dans les modèles climatiques du fait de la résolution spatiale relativement grossière de ces derniers, certains phénomènes restent insuffisamment étudiés. Il subsiste par exemple de grandes incertitudes quant à la couverture nuageuse et à ses effets sur l'albédo ou quant aux modifications du cycle du carbone (notamment pour l'absorption et le rejet de CO<sub>2</sub> par les plantes et les océans). On ne parvient par exemple pas non plus à simuler de façon satisfaisante les modifications de la circulation atmosphérique ou les phénomènes saisonniers (ProClim, OcCC 2011). Des études effectuées sur la base de modèles globaux des températures et des précipitations en Europe ont montré que les plus grandes marges d'incertitude (de 50 à 85 %) proviennent de causes intrinsèques (Prein et al. 2011), ce qui signifie qu'elles sont inhérentes à la modélisation. Seuls 10 à 20 % sont liés à la variabilité naturelle des systèmes chaotiques. L'influence des scénarios d'émissions sur la marge d'incertitude totale relative aux températures est quasi négligeable jusqu'en 2050. Après cela, ils y contribuent de façon toujours plus marquée (jusqu'à 35 %). La marge d'incertitude totale des résultats concernant les précipitations est sensiblement plus importante et, par rapport aux températures, elle subit moins l'influence des émissions (fig. 4). Cela s'explique par la variabilité naturelle importante des précipitations (fig. 5) et par le nombre de paramètres en jeu dans les modèles, étant donné la complexité des processus.

## 4 > Les glaciers

*Le volume des glaciers suisses a diminué de plus de la moitié depuis la fin du petit âge glaciaire, soit depuis 1850 environ. Si les conditions climatiques restent constantes, les glaciers devront encore perdre la moitié de leur volume au cours des prochaines décennies pour atteindre un nouvel équilibre. Du fait de l'augmentation attendue des températures, toutefois, la fonte des glaciers va encore s'accélérer. D'ici à 2100, à en croire les modélisations, il ne devrait plus subsister que 20 à 30 % du volume actuel des glaciers, en majeure partie dans le bassin versant du Rhône.*

### 4.1 Les processus fondamentaux en jeu

Comme la glace des glaciers provient de neige transformée par compression, on ne trouve de glaciers que là où il tombe de la neige et où celle-ci subsiste plusieurs années. Dans les endroits favorables à cette accumulation (haute altitude, pente pas trop importante), la neige subit un processus de tassement graduel sur des décennies, qui la transforme lentement en glace. La glace s'écoule peu à peu vers la vallée sous l'effet de la pesanteur et, en contact avec des températures plus clémentes, elle fond à nouveau. La masse glaciaire est ainsi continuellement transportée de la zone d'accumulation à la zone d'ablation. Si les conditions climatiques restent stables, les phénomènes d'accumulation et d'ablation s'équilibrent et le glacier conserve une taille constante. On nomme ligne d'équilibre la ligne séparant la zone d'accumulation de la zone d'ablation. La zone d'accumulation (soit à peu près la surface restant couverte de neige à la fin de l'été) doit représenter en moyenne 60 % de la surface totale (WGMS 2009, p. ex.) pour qu'un glacier conserve un bilan de masse équilibré. Si elle diminue, suite à un réchauffement, le bilan entre la masse glaciaire qui fond et la masse de neige venant s'accumuler sur les hauts du glacier devient négatif et le glacier perd de sa masse.

Outre les modifications annuelles du bilan de masse, qui est la résultante directe des conditions météo d'une année donnée (températures, précipitations, rayonnement, etc.), il faut également considérer un phénomène plus lent mais néanmoins observable, par lequel un glacier réagit et s'adapte aux conditions climatiques. Il faut pour cela se représenter un glacier comme une sorte de tapis roulant qui se raccourcirait dès lors qu'on entasse à son sommet moins de glace qu'il n'en fond dans sa partie inférieure (et inversement). La vitesse d'écoulement régit la quantité de glace qui est livrée en bout de course et contribue à déterminer si un glacier s'agrandit ou au contraire diminue. Cette vitesse tend à diminuer lorsque le glacier est moins alimenté en neige: il coule moins de glace vers la vallée, le glacier perd de son épaisseur en même temps qu'il raccourcit, ce qui entraîne une diminution de la zone d'ablation. Il faut toutefois du temps pour qu'un nouvel équilibre s'instaure, et il est probable qu'entretiens le climat ait à nouveau évolué. La taille d'un glacier est donc le fruit d'une lente et constante adaptation à un signal climatique du passé. Or pour l'actuel niveau des températures, nos glaciers présentent une étendue bien trop importante. Ainsi, même en admettant

**Bilan de masse des glaciers:  
la perte de masse se poursuivra  
certainement**

que les températures demeurent stables au cours des décennies à venir, les masses glaciaires continueraient de diminuer. C'est particulièrement vrai pour les grands glaciers, qui ont des temps de réaction plus longs. La moitié environ du volume actuel des glaces devrait fondre pour que s'instaure un nouvel équilibre.

#### 4.2 Variation de la taille des glaciers depuis le petit âge glaciaire

Au cours du petit âge glaciaire (de 1600 à 1850), l'espace alpin a connu des étés souvent frais, alors que la limite des chutes de neiges se maintenait à un niveau généralement bas. Ces conditions climatiques ont favorisé la croissance des glaciers, qui ont atteint leur extension maximale aux alentours de 1850 (fig. 9). Ces variations de la taille des glaciers au cours du petit âge glaciaire se trouvent très richement documentées dans les régions alpines, dans un vaste corpus autant écrit que pictographique (Zumbühl et al. 2008). Avec la remontée des températures, après 1850, les glaciers ont commencé à perdre plus de masse en été qu'ils n'en gagnaient en hiver par les chutes de neige (bilan de masse négatif). Ce retrait graduel s'est poursuivi depuis, interrompu seulement dans les années 1890, 1910 et 1970 par quelques modestes regains de taille de glaciers pour la plupart assez petits (fig. 10). Ces phases intermédiaires se sont caractérisées par des étés plus frais et un abaissement généralisé de la limite des chutes de neige. Les glaciers de grande taille comme le glacier d'Aletsch (partie ouest, Grosser Aletschgletscher) ne s'adaptent toutefois qu'avec un grand retard à de nouvelles conditions climatiques et ne réagissent donc pas aux fluctuations temporaires (fig. 10).

Extension maximale des glaciers  
aux alentours de 1850

Fig. 9 > Le glacier d'Aletsch photographié en 1880, puis en 2010, de l'hôtel Belalp



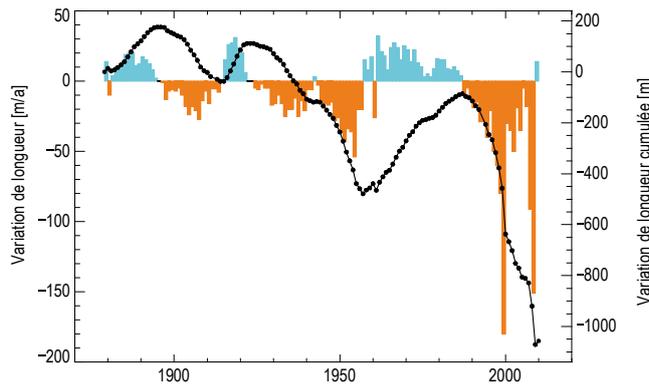
Photos: [www.myswissalps.ch/507](http://www.myswissalps.ch/507), H. Holzhauser (à gauche); R. Schmid (à droite)

Les températures estivales sont restées à peu près stables entre 1960 et 1980, avant d'augmenter de 1 °C. Depuis, la plupart des étés ont été sensiblement plus chauds que la moyenne établie entre 1961 et 1990, alors que les quantités de neige accumulées sur les glaciers variaient à peine. Cela s'est traduit par une diminution sensible de l'épaisseur des glaciers en Suisse, qui continue actuellement au rythme de 1 m par an. Ces pertes de volume varient toutefois selon les caractéristiques de chaque glacier et selon son environnement (plage d'altitudes, topographie, etc.). En se fondant sur la surface totale actuelle des glaciers, soit environ 1000 km<sup>2</sup>, cela équivaut à une perte de volume de glace de 1 km<sup>3</sup> par an, pour un volume résiduel estimé de 55 ± 15 km<sup>3</sup>. Le volume d'eaux de fonte qui en résulte avoisine 25 m<sup>3</sup> par seconde en moyenne sur l'année; la

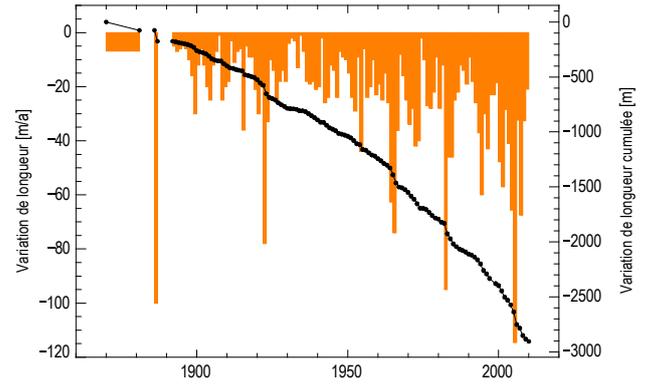
Volume des glaciers – diminution  
de l'épaisseur de 1 m par an

fonte se concentre toutefois sur les mois de juin à septembre, où elle est nettement plus marquée.

**Fig. 10** > Variations de longueur du glacier du Trient



et du glacier d'Aletsch (Grosser Aletschgletscher)



Rapports sur les glaciers 1881–2011

### 4.3 Scénarios de fonte des glaciers

Les premières simulations de la fonte des glaciers dans tout l'espace alpin (Haeberli & Hoelzle 1995, Zemp et al. 2006) se trouvent confirmées ici pour l'essentiel par de nouvelles modélisations plus détaillées. En s'aidant de modèles numériques de terrain et de cartes délimitant les glaciers, il est possible de modéliser les processus physiques fondamentaux à l'œuvre et d'en déduire l'évolution future des glaciers sur la base de scénarios climatiques donnés. Selon le modèle utilisé, les données nécessaires pour les calculs peuvent varier. Un premier modèle, fondé sur les bilans de masse, a été appliqué à certains glaciers et à leur bassin versant et a permis de calculer non seulement leur évolution, mais aussi celle des débits (VAW 2011). Un deuxième modèle, basé sur les lignes d'équilibre (Paul et al. 2007), a servi à établir les scénarios d'évolution des surfaces glaciaires en Suisse qui ont permis, grâce à un modèle hydrologique, d'estimer les débits globaux futurs (chap. 6).

#### 4.3.1 Modélisation de l'évolution de certains glaciers

Les modélisations effectuées en 2011 par le VAW de l'EPFZ se sont appuyées sur un modèle hydro-glaciologique combiné (Glacier evolution runoff model, GERM, Huss et al. 2008) pour estimer l'évolution future des masses glaciaires et des débits dans neuf bassins versants comportant des glaciers. Les bassins versants fortement englacés de Gorner ou de Mattmark (SSH et CHy 2011) ainsi que ceux d'Aletsch, du Rhône, du Trift, de Gries, de Findelen, de Silvretta et de Morteratsch (VAW 2011) renferment à eux seuls environ 40 % de l'actuelle masse glaciaire recensée en Suisse. Des études supplémentaires sont en cours, dans le cadre du programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61). La modélisation se fonde sur des relevés quotidiens de températures et de précipitations et tient compte également des conditions d'ensoleillement (zones d'ombre). Les données homogénéisées nécessaires ont été

Modélisation des grands glaciers

fournies par MétéoSuisse. Les valeurs futures ont été générées en tenant compte de la modification des signaux climatiques (Bosshard et al. 2011a). Pour prendre en considération la variabilité des températures et des précipitations, les chercheurs ont produit pour chacune des dix chaînes de modèles considérées dix séries temporelles différentes reflétant la variabilité observée par le passé. Les 100 modèles d'évolution des températures et des précipitations ainsi générés pour la période 2010–2100 ont servi à alimenter le modèle GERM. Pour calibrer le modèle, ils se sont fondés sur des relevés de l'état des glaciers (contours et altitude de la surface de la glace tirés de cartes topographiques, et, dès 1960, de photos aériennes), de la profondeur des lits (profils radar) et des bilans de masse.

#### 4.3.2 Modélisation des glaciers à l'échelle de la Suisse

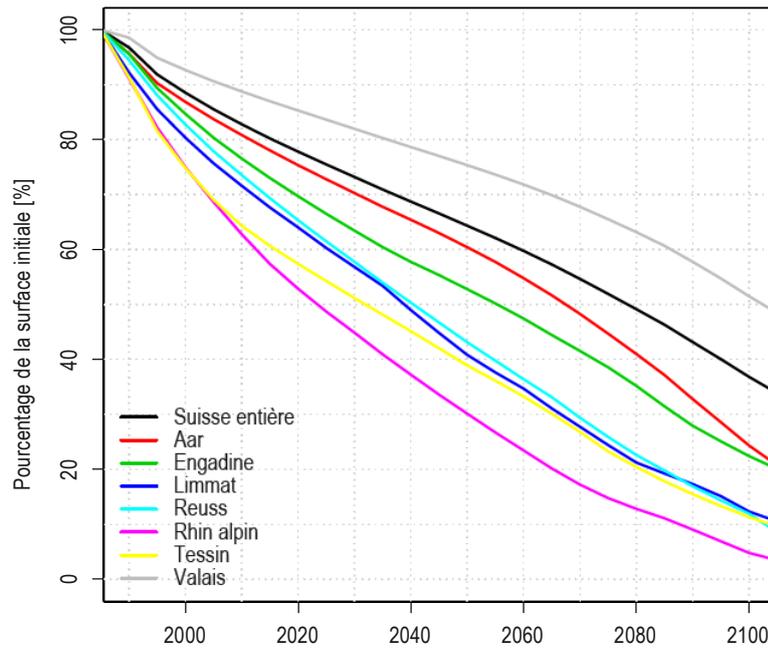
Pour modéliser l'évolution des débits à l'échelle de la Suisse (voir chap. 6), il fallait disposer de scénarios concernant l'étendue totale des glaciers du pays. Le choix des chercheurs s'est porté sur le modèle élaboré par Paul et al. (2007), qui permet de calculer les futures surfaces glaciaires sur la base d'un modèle de terrain et de contours de glaciers numérisés pour divers scénarios d'évolution des températures. Ils ont résumé les résultats de l'étude consacrée à l'évolution des températures par Bosshard et al. (2011a) en trois scénarios, qu'ils ont corrélés au modèle appliquant le déplacement de la ligne d'équilibre selon l'évolution des températures. Ils ont ainsi simulé l'évolution de la surface totale des glaciers suisses avec une résolution spatiale de 100 m, à des intervalles de cinq ans. Pour intégrer la dépendance au temps dans le modèle, ils ont postulé que les glaciers s'adaptent à de nouvelles conditions climatiques avec un retard de 25 ans. C'est là une valeur moyenne reflétant l'évolution d'une majorité de glaciers, mais qui surestime la vitesse de diminution de la surface des grands glaciers et sous-estime celle des petits glaciers ou de ceux présentant une pente importante. Un autre modèle a servi à déterminer l'évolution de la surface et du volume de tous les glaciers suisses. On a commencé pour ce faire par déterminer la répartition spatiale des épaisseurs pour l'ensemble des glaciers, avant d'extrapoler linéairement dans l'avenir la diminution des épaisseurs observée de 1985 à 2000 (Linsbauer et al. 2012).

Concentration de la masse  
glaciaire en Valais

#### 4.3.3 Résultats

Selon le modèle et le scénario climatique, il faut s'attendre d'ici la fin du siècle à une diminution de 60 à 80 % de la surface glaciaire subsistant actuellement en Suisse. Les pertes se concentreront sur les bassins versants du Rhône et de l'Aar, dans lesquels on trouve actuellement le plus de glace. Etant donnée la forte épaisseur de glace mesurée dans ces régions, les pertes relatives de surface interviendront toutefois avec un temps de retard (fig. 11). C'est pourquoi le Valais, qui concentre 80 % de la masse glaciaire recensée en Suisse, conservera jusqu'à 30 % de sa masse glaciaire, contre 10 % maximum dans les autres régions. Les régions étudiées différant sensiblement par leur étendue, l'altitude à laquelle elles se situent et la surface englacée, il est difficile de généraliser les résultats obtenus pour les divers bassins versants.

**Fig. 11** Evolution relative des surfaces entre 1985 et 2100 pour chaque bassin versant séparément et pour toute la Suisse, conformément au modèle de diminution des épaisseurs utilisé pour la modélisation à l'échelle de la Suisse

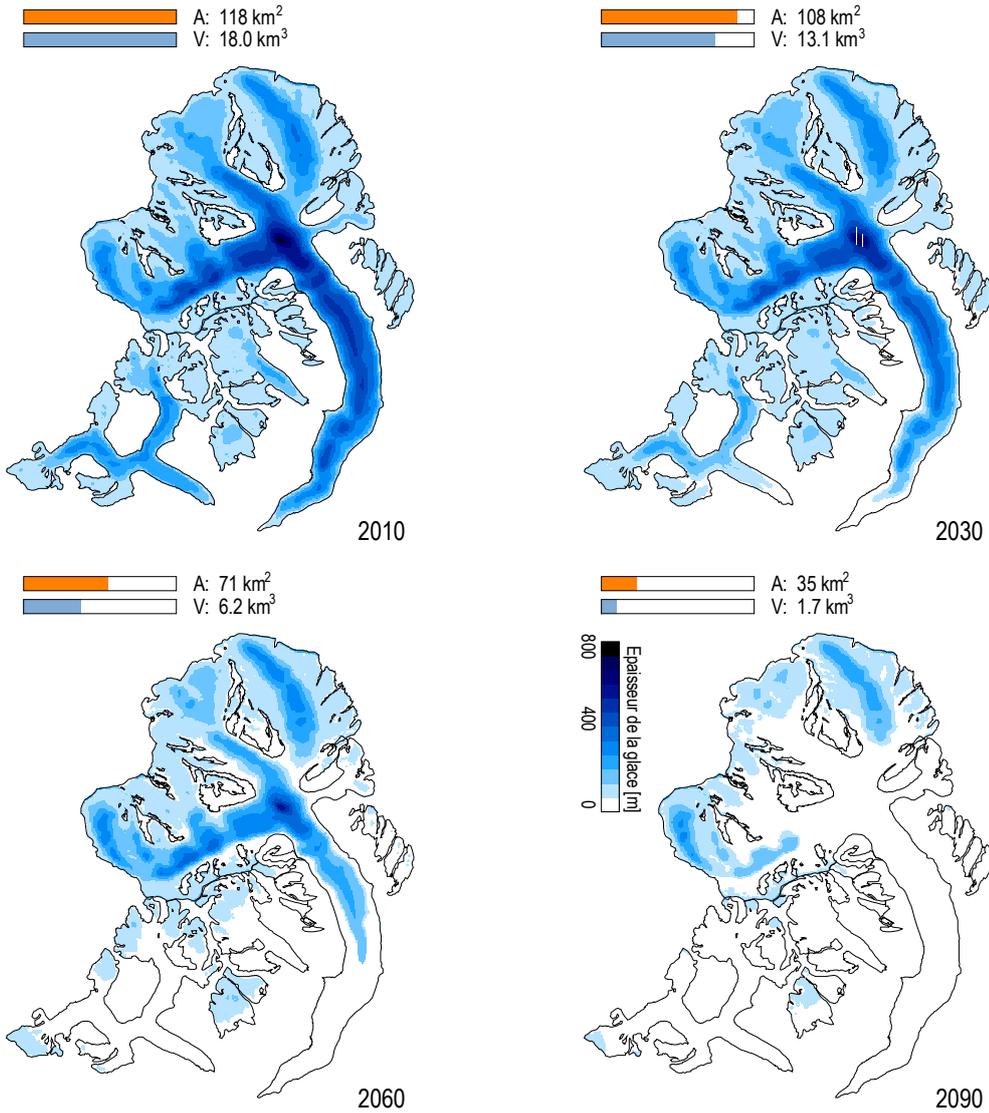


Linsbauer et al. 2012

Illustrant la modélisation de glaciers individuels, les figures 12 et 14 montrent l'évolution des glaciers dans deux bassins versants présentant des caractéristiques divergentes. Malgré son épaisseur considérable (jusqu'à 900 m de glace à la Konkordiaplatz), le glacier d'Aletsch aura perdu l'essentiel de sa langue d'ici 2100 (fig. 12). Cela s'explique principalement par l'altitude relativement basse où est situé son lit, ce qui limite les possibilités de retrait dans des zones plus élevées (et plus fraîches). Au lieu de cela, l'épaisseur du glacier diminue et sa surface descend à des altitudes toujours plus basses et plus chaudes. Ce processus, qui s'auto-amplifie et qui accélère la fonte des glaces, est également ce qui attend par exemple le glacier de l'Unteraar, comme le montre le modèle de diminution des épaisseurs utilisé par la modélisation à l'échelle de la Suisse (fig. 13). Les glaciers situés plus en altitude, comme le glacier de la Silvretta (fig. 14), réagiront avec un temps de retard, mais de façon plus marquée. Leur zone d'accumulation relativement plate se retrouvera alors totalement dénuée de neige et se convertira donc en zone d'ablation. Dans ces conditions, la totalité du glacier aura fondu dans un délai très bref. Ce processus est par exemple déjà amorcé sur le glacier de la Plaine-Morte, lui aussi très plat.

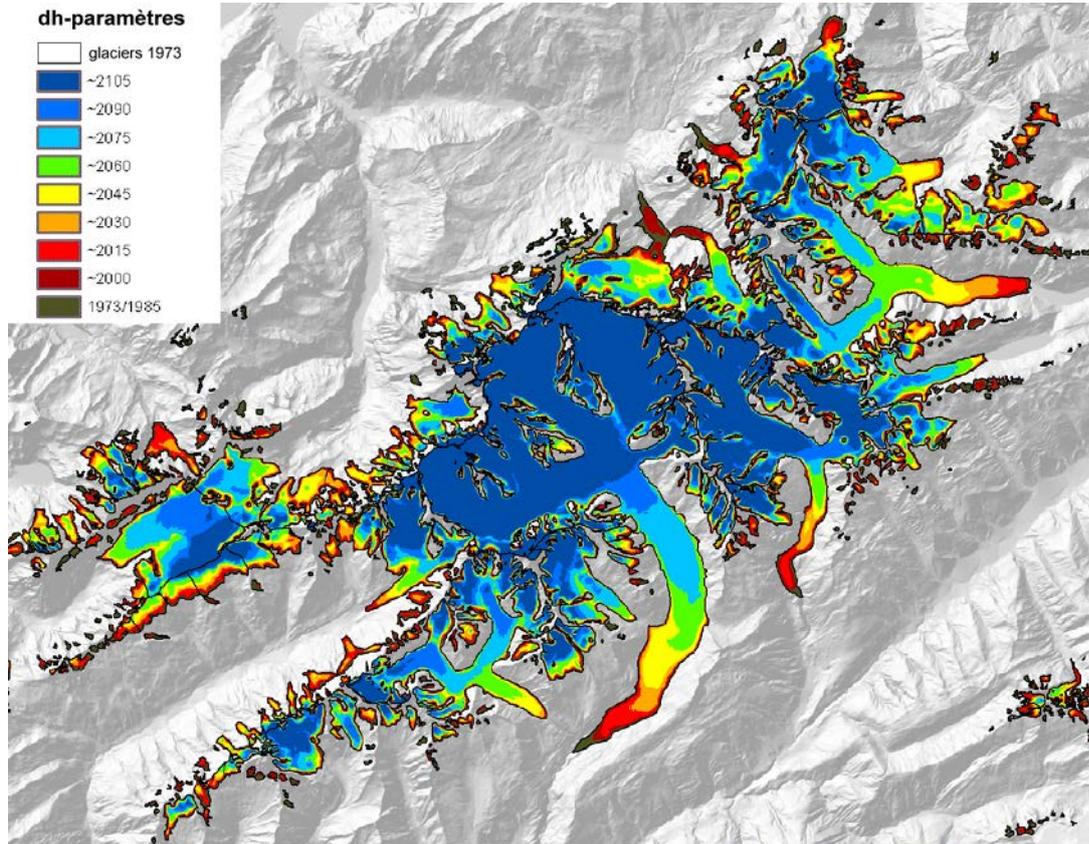
**Fig. 12 Evolution des glaciers de la région d'Aletsch jusqu'en 2090**

Les contours des glaciers correspondent à l'état mesuré en 1999. L'épaisseur moyenne de la glace est représentée en bleu. Les zones pour lesquelles plus de la moitié des réalisations possibles ne sont pas englacées sont représentées en blanc.



**Fig. 13** Extrait de la modélisation à l'échelle de la Suisse pour la région d'Aletsch sur la base du modèle de diminution de l'épaisseur

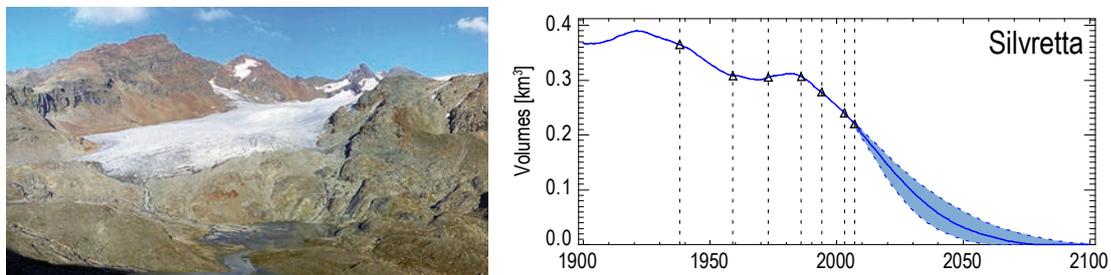
*En dépit des différences dans la méthodologie appliquée, les résultats sont comparables avec ceux représentés dans la fig. 12.*



Linsbauer et al. 2012

**Fig. 14** > Glacier de Silvretta

*Etant donné sa taille réduite, le glacier de Silvretta aura disparu avant la fin du siècle (voir volumes de glace dans la zone glaciaire, à droite).*



VAW 2011; photo: <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/glaciers/silvretta.html>, M. Huss

La fonte des glaciers mettra à nu des surcreusements dans leur lit, qui pourront conduire à la formation de nouveaux lacs (Linsbauer et al. 2012). On a observé ce processus dans divers grands glaciers de vallée (Trift, Gauri, Rhône, p. ex.) ces dernières années et il devient un problème à l'échelle mondiale. S'ils peuvent être source de nouveaux risques naturels (effondrements rocheux suivis de débordements), ces nouveaux lacs représentent également une chance pour l'exploitation de la force hydraulique (SSHL & CHy 2011) ou pour le tourisme (NELAK 2012).

Nouveaux lacs

#### 4.3.4 Incertitudes

Les modèles utilisés pour estimer l'évolution future des glaciers sont incomplets, alors que les estimations concernant le volume actuel des glaces en Suisse comportent une marge d'incertitude de 20 à 30 %. En effet, les modèles utilisés pour l'estimation de la répartition des épaisseurs de glace ne constituent au mieux qu'une approximation d'une réalité complexe (Farinotti et al. 2009, Linsbauer et al. 2009, 2012). Par ailleurs, les incertitudes inhérentes aux scénarios climatiques se répercutent également sur les scénarios d'évolution des glaciers. Tous les modèles utilisés pour les glaciers omettent en effet un certain nombre de processus. Parmi ceux-ci, la diminution de l'albédo observée ces dernières années (du fait des poussières qui se déposent sur la glace et lui donnent une teinte plus foncée) est appelée à perdurer et à accélérer encore la fonte des glaciers (Oerlemans et al. 2009). De la même manière, la formation de lacs à mesure que les langues glaciaires se retirent peut accentuer le phénomène de fonte. Il se peut en revanche que la déposition de gravats supplémentaires, due à la déstabilisation des parois rocheuses et des moraines suite à l'allègement de la pression exercée jusque là par les glaces et à la fonte du permafrost en surplomb des glaciers, freine quelque peu le phénomène de fonte.

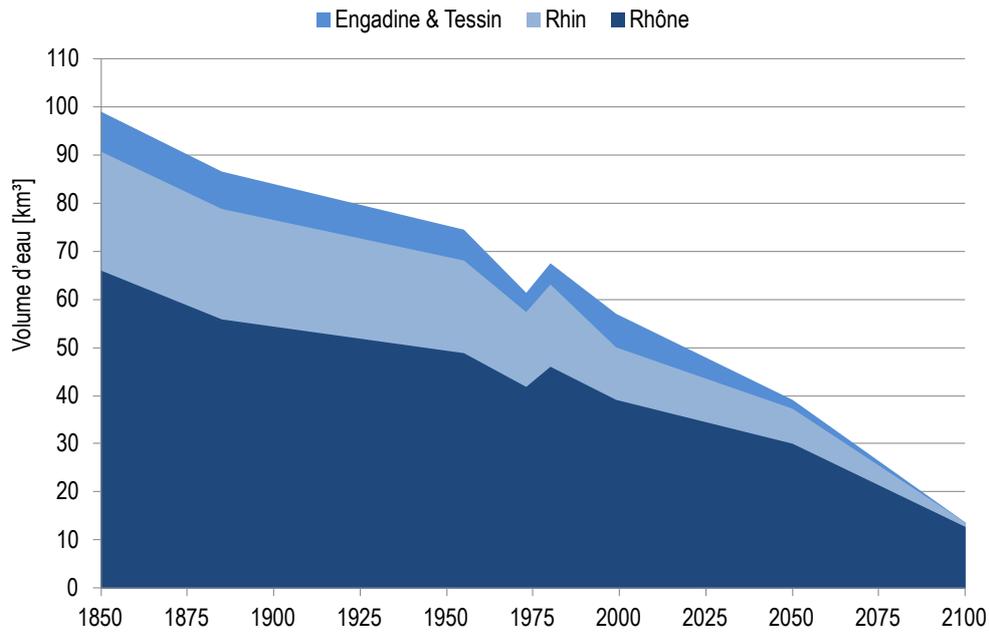
Accélération de la fonte  
des glaces

#### 4.4 Conclusions

La figure 15 résume l'évolution des masses glaciaires dans les trois grands bassins versants que compte la Suisse depuis la fin du petit âge glaciaire jusqu'en 2100. Elle se fonde sur des extrapolations et des inventaires établis par le passé, ainsi que sur les résultats des modélisations effectuées dans le cadre de cette étude. Mise à part une brève inversion constatée dans les années 1970, la tendance est très nettement négative. Il subsistera certes encore de la glace en Suisse aux alentours de 2100, mais les glaciers typiques que nous connaissons aujourd'hui auront disparu. Sachant que le réchauffement pourra être nettement plus marqué jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle que dans le scénario moyen choisi ici, il se peut que les glaciers fondent encore bien plus vite. Les conséquences pour les débits mesurés dans les bassins versants fortement englacés sont discutées au chapitre 6.

**Fig. 15** Evolution des volumes d'eau stockés dans les glaciers suisses (bassins versants du Rhône et du Rhin, Engadine et Tessin) depuis la fin du petit âge glaciaire

*Estimation depuis la fin du petit âge glaciaire (marge d'incertitude de 20 à 30 %) et simulation jusqu'en 2100.*



Schädler 1985; Farinotti et al. 2009; Linsbauer et al. 2012

## 5 > La neige

Chaque année, la fonte des neiges contribue pour environ 22 km<sup>3</sup> aux débits des cours d'eau suisses. Cet apport correspond à peu près à 40 % des débits globaux et dépasse de loin celui de la fonte des glaciers (1 km<sup>3</sup>).

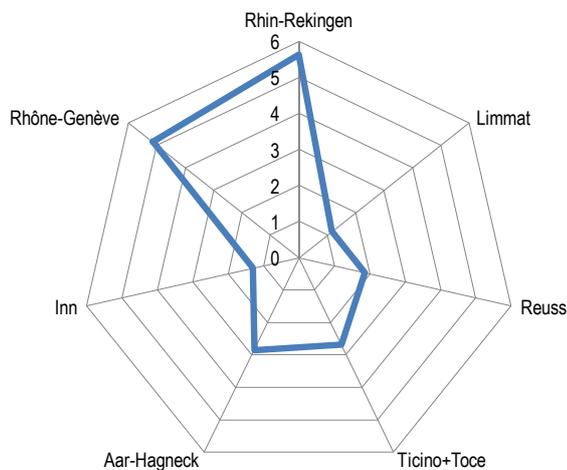
Or la limite des chutes de neige va monter à mesure que les températures augmenteront. D'ici la fin du siècle, les pentes des montagnes seront ainsi exemptes de neige en été jusqu'à une altitude de 3500 m. En dessous de cette limite, la neige persistera au minimum un mois de moins à tous les étages altitudinaux, alors que l'épaisseur maximale du manteau neigeux diminuera de moitié. Cela se traduira par une baisse de 40 % environ des réserves d'eau stockées sous forme de neige.

A la différence du stockage de l'eau dans les glaciers, qui peut s'étendre sur des dizaines d'années, la durée de vie du manteau neigeux se chiffre en mois. Chaque hiver, la couche de neige s'épaissit et les capacités maximales de stockage de l'eau sous forme de neige sont graduellement atteintes. Puis les températures s'adoucissent et la neige commence à fondre. C'est ainsi qu'il fond annuellement en Suisse quelque 22 km<sup>3</sup> de neige (Zappa et al. 2012, fig. 16). Si l'on n'a pas jusqu'ici porté une attention démesurée au rôle de la couverture neigeuse dans l'hydrologie de la Suisse, la situation est certainement appelée à changer rapidement dans le contexte du réchauffement climatique.

Le manteau neigeux, important fournisseur d'eaux de fonte

**Fig. 16** Quantités annuelles d'eaux de fonte provenant de la neige dans les principaux bassins versants de Suisse (moyennes établies sur la période 1980–2009, en km<sup>3</sup>)

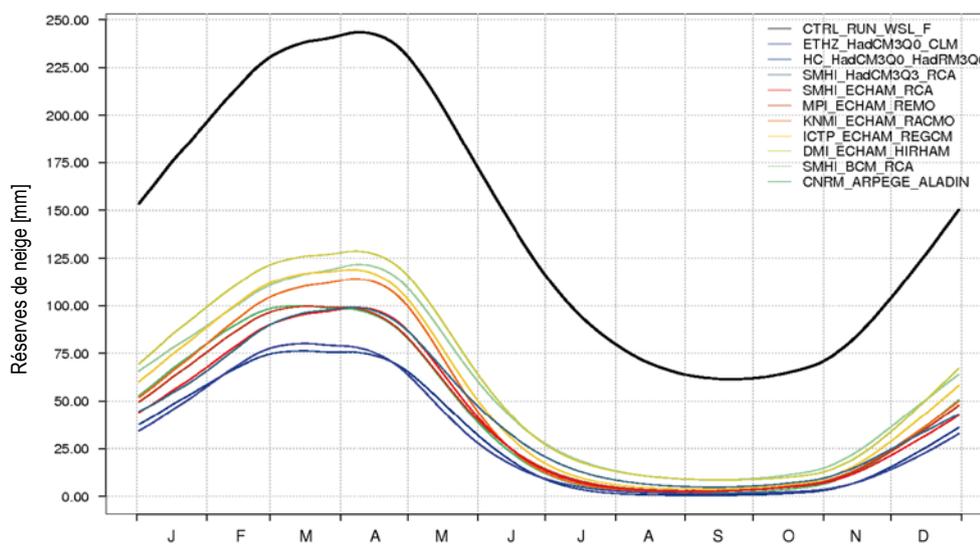
Les plus grands réservoirs de neige se trouvent dans les bassins versants du Rhône et du Rhin.



A l'avenir, on s'attend à une forte baisse des équivalents en eau maximaux du manteau neigeux, sauf à très haute altitude. C'est ainsi que Zappa et al. (2012) prévoient une diminution de 20 à 50 % des réservoirs neigeux maximaux d'ici 2035 et même une diminution de 50 bis 60 % d'ici 2085 (fig. 17). Dans un horizon relativement lointain, l'épaisseur du manteau neigeux augmentera plus lentement et le maximum sera atteint environ deux semaines plus tôt qu'aujourd'hui. Les fortes variations des réservoirs d'une année sur l'autre sont elles aussi appelées à s'atténuer car les hivers très neigeux se raréfieront. Enfin, la couverture neigeuse persistera en moyenne moins longtemps, soit, dès 2035, 25 jours de moins par an dans les zones situées au-dessus de 1200 m (Hänggi et al. 2011). Les marges d'incertitude des modèles sont toutefois importantes.

Evolution du manteau neigeux

**Fig. 17** Evolution sur l'année des équivalents en eau du manteau neigeux (lignes de couleur, en mm) estimés en Suisse pour la période 2070–2099 par rapport à la moyenne établie sur la période 1980–2009 (en noir), sur la base des différentes chaînes de modèles climatiques

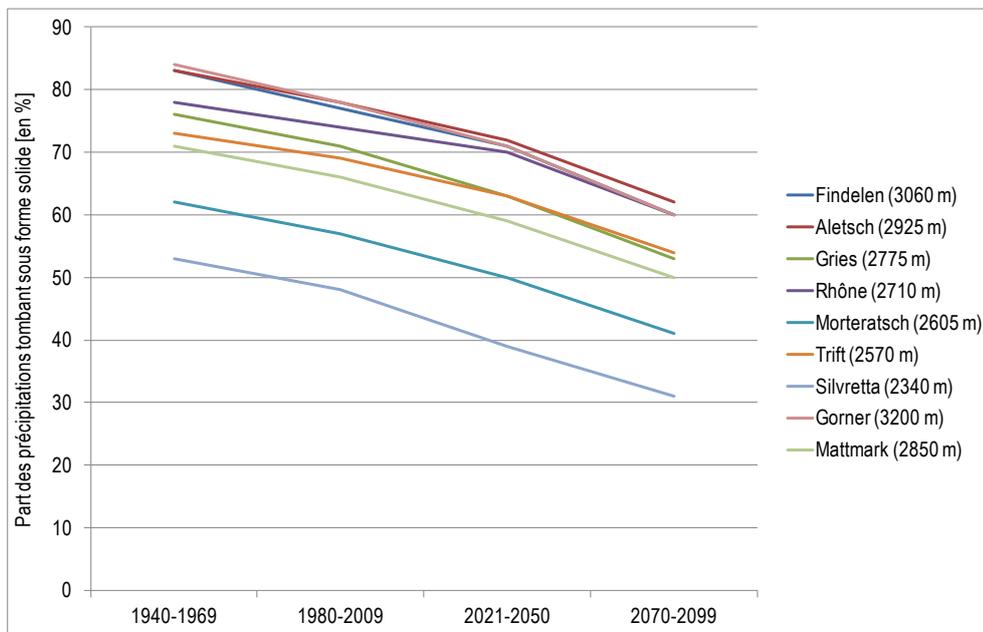


Zappa et al. 2012

Au cours des 30 dernières années, on a observé une nette diminution du nombre de jours où l'on a recensé des chutes de neige par rapport au nombre total de jours où l'on a enregistré des précipitations. Cette évolution est particulièrement frappante entre 1985 et 1995 en basse altitude, car on y a en général recensé moins de jours de neige en chiffres absolus. Entre 1978 et 2009, les jours de neige ont ainsi diminué de plus de 40 % dans les régions situées à moins de 500 m (Latarnser et al. 2003, Serquet et al. 2011). A l'avenir, c'est surtout en altitude que l'on assistera à un recul du nombre de jours de neige. D'ici 2100, la part des précipitations neigeuses diminuera sensiblement dans les zones de glaciers de haute altitude, pour atteindre des valeurs comparables à celles qui étaient usuelles aux environs de 1950 dans les régions situées 500 m plus bas (voir régions de Findelen et de Morteratsch dans la fig. 18).

Jours avec chutes de neige

**Fig. 18** Part des précipitations neigeuses dans les précipitations totales pour diverses régions fortement englacées, avec indication de l'altitude moyenne



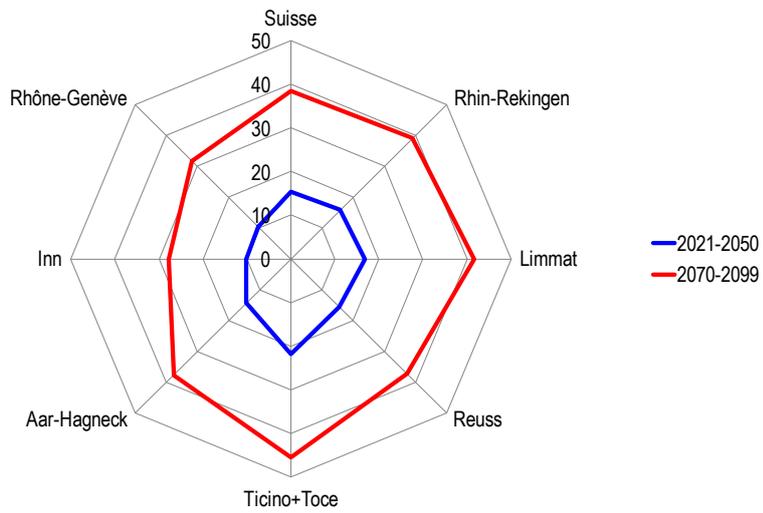
VAW 2011

Les changements climatiques se répercuteront de diverses façons sur les volumes d'eau stockés sous forme de neige. La hausse des températures hivernales d'environ 3 °C d'ici 2070–2099 (fig. 7) fera remonter la limite des chutes de neige de 500 m. Il faut ainsi s'attendre à une moindre persistance de la couverture neigeuse sur l'année et donc à une diminution des équivalents en eau maximaux du manteau neigeux. Etant donné que les précipitations hivernales augmenteront vraisemblablement au cours de ce siècle, on ne peut exclure que le manteau neigeux ne s'épaississe en très haute altitude, comme on a pu l'observer durant les hivers proches de l'an 2000. La somme des surfaces enneigées l'hiver est toutefois appelée à diminuer, de même que l'épaisseur du manteau neigeux dans les régions situées à basse comme à haute altitude. Les réserves d'eau stockées sous forme de neige vont décroître (fig. 19), avec les conséquences que l'on sait sur les débits et la répartition de ces derniers sur l'année (voir chap. 6).

Réserves de neige

**Fig. 19** Diminution en pour cent du volume d'eaux de fonte stockées sous forme de neige (voir fig. 16) pour tous principaux bassins versants du pays et pour les deux périodes de projection

*Le Tessin sera particulièrement touché.*



Zappa et al. 2012

## 6 > Les débits

*A court terme (2035), les débits mesurés en Suisse évolueront peu, à l'exception de quelques augmentations passagères dans les régions fortement englacées. A long terme (2085), la plupart des cours d'eau devraient voir leur débit diminuer légèrement, à l'exception du Tessin et du Toce, pour lesquels la diminution devrait atteindre quelque 10 %.*

*Dans l'espace alpin, le réchauffement constitue le principal facteur influant sur la distribution saisonnière des débits: la limite des chutes de neige va remonter, alors que les réserves d'eau de fonte, ainsi que le volume et la surface des glaciers diminueront peu à peu.*

*La distribution saisonnière des débits (régime des eaux) va se modifier dans presque toute la Suisse, avec, dans de nombreuses régions, des débits plus importants en hiver et moindres en été. Même les cours d'eau de grande taille verront leurs débits se modifier en ce sens.*

*Dans de nombreuses régions du Plateau, la période de crues se déplacera et/ou s'allongera. La région du Rhin, par exemple, verra apparaître un deuxième maximum saisonnier en hiver, alors que dans nombre d'autres régions, les crues gagneront en force et en fréquence.*

*Sur le Plateau, les périodes d'étiage seront nettement plus marquées et dureront plus longtemps (en été), même pour les grands cours d'eau. Dans les Alpes, une partie des étiages ne se produira plus en hiver mais à la fin de l'été.*

*Les conséquences pour la gestion des eaux seront de divers ordres:*

- > sur le Plateau et dans le Jura, il faudra revoir les mesures en place de protection contre les crues;*
- > des étiages plus marqués et des besoins d'eau accrus en période estivale, alors même que les étés deviendront plus secs et plus chauds, recèlent un potentiel de conflits entre les utilisateurs. Il faudra revoir les réglementations légales régissant les divers domaines concernés (prélèvements d'eau, déversement d'eaux de refroidissement, règlements de régulation de lacs, etc.);*
- > il faudra éclaircir les besoins supplémentaires en réservoirs (à usages multiples).*

### 6.1 Cycle de l'eau et bilan hydrique

Les ressources en eau renouvelables disponibles dans une région donnée comprennent les eaux qui s'écoulent dans les cours d'eau. Les débits de ces cours d'eau sont fonction du bilan hydrique régional, qui tient compte des précipitations, de l'évaporation et de la variation des réserves d'eau.

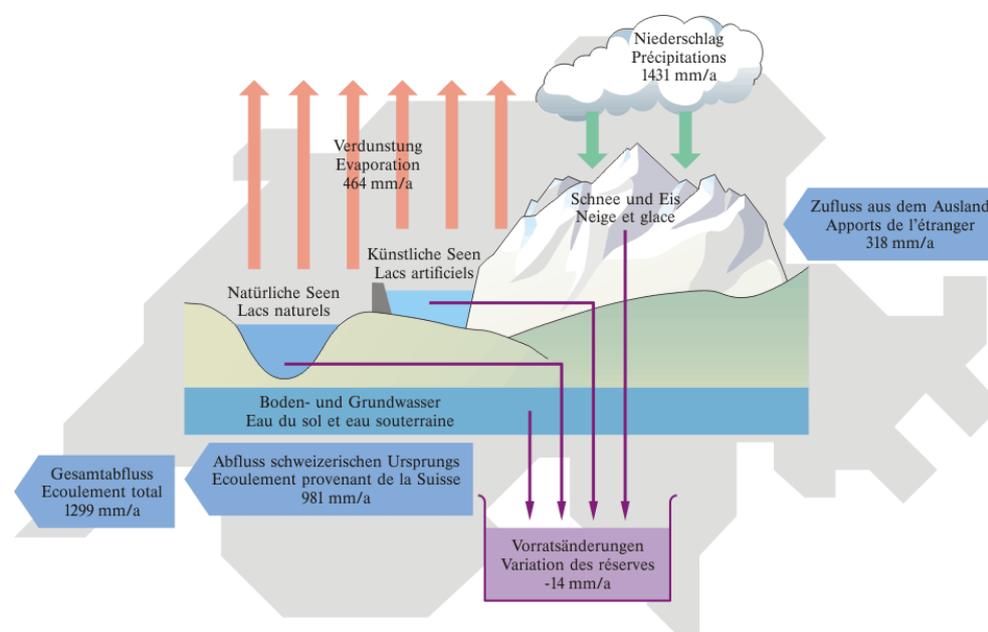
$$\text{Débits} = \text{précipitations} - \text{évaporation} - \text{variation des réserves}$$

Grâce aux longues séries de mesures établies par MétéoSuisse, la division Hydrologie de l'OFEV et la Commission d'experts pour la cryosphère de l'Académie suisse des

sciences naturelle (EKK/SCNAT), le bilan hydrique de la Suisse est bien documenté. Au cours du 21<sup>e</sup> siècle, les précipitations annuelles moyennes ont atteint 1431 mm, dont un tiers s'est évaporé et deux tiers a quitté la Suisse via les grands cours d'eau (fig. 20). Les précipitations et les débits ont fortement varié d'une année à l'autre, mais si l'on considère l'entier du 21<sup>e</sup> siècle, les précipitations ont légèrement augmenté alors que les débits restaient les mêmes, l'évaporation ayant augmenté dans les mêmes proportions (Hubacher & Schädler 2010).

**Fig. 20** Bilan hydrique moyen de la Suisse de 1901 à 2000

1 mm réparti sur la superficie de la Suisse équivaut à 41,3 millions de m<sup>3</sup> d'eau.



Hubacher & Schädler 2010

La situation météorologique et la topographie influent fortement sur le déroulement et l'intensité des précipitations. La façon dont évolueront les précipitations et les températures en Suisse se trouve décrite au chapitre 3. La température détermine la limite des chutes de neige, soit l'altitude à partir de laquelle la pluie se transforme en neige.

#### Précipitations

> *Impacts des changements climatiques:* pour chaque degré de température en plus, la limite pluie-neige s'élève de 150 m. Cela signifie que la surface recouverte de neige se réduira toujours davantage et que les réserves d'eaux de fonte accumulées pendant l'hiver diminueront constamment. Dans le même temps, néanmoins, une plus grande part de précipitations tomberont sous forme liquide et feront gonfler immédiatement les débits ou contribueront à reconstituer les stocks d'eau du sol ou d'eau souterraine. La Fig. 18, au chapitre 5, montre l'évolution des parts de précipitations tombant sous forme liquide ou solide dans les régions d'altitude. Cette proportion influe de façon décisive sur la distribution saisonnière des débits (régime des eaux).

L'évaporation est fonction de l'énergie disponible ou des températures ainsi que de l'eau présente dans le sol. Une hausse des températures accroît l'évapotranspiration potentielle. Mais pour que l'évaporation réelle augmente effectivement en été, il faut qu'il y ait suffisamment d'eau dans le sol.

Evaporation

> *Impacts des changements climatiques*: des étés caniculaires tels que celui de 2003 pourraient devenir plus fréquents à l'avenir (Meyer 2012, Schär et al. 2004). Dans de nombreuses régions de Suisse, l'évaporation effective pourrait ainsi diminuer en été, du fait de l'assèchement des sols. Elle augmentera toutefois légèrement le reste du temps si bien que, considérés sur toute l'année, les changements dans l'évaporation ne seront au final pas si importants, surtout au regard des réserves en eau disponibles.

Les réservoirs d'eau sont constitués des lacs naturels et artificiels, des glaciers, de la couverture neigeuse, de l'eau du sol et de l'eau souterraine. S'ils sont pour certains très abondants en Suisse (tab. 1), ces réservoirs n'évolueront que très peu à longue échéance, à l'exception des glaciers dont les volumes sont appelés à diminuer considérablement (fig. 15, chap. 4). Les modifications subies par les réservoirs s'exprimeront différemment selon les saisons: le manteau neigeux, l'eau souterraine et l'eau du sol s'accumulent en hiver, alors qu'en été tous les réservoirs, à l'exception des barrages et de certains lacs naturels, perdent de leur volume. Ces modifications dans les réservoirs influenceront sur nos ressources en eau et sur les débits. Les variations saisonnières seront particulièrement marquées dans les bassins versants de petite taille mais comportant une vaste surface glaciaire et d'importantes réserves d'eau sous forme de neige. La modification des réserves est le principal facteur influant sur les régimes, soit sur les variations des débits à moyenne et à haute altitude (fig. 21). Plus les bassins versants sont situés en altitude et plus les variations saisonnières sont marquées.

Modification des réservoirs

**Tab. 1 > Réservoirs d'eau en Suisse**

Réservoir	[km <sup>3</sup> ]	[mm]
Lacs (portions situées en Suisse)	130	3147
Glaciers en 1850	100	2421
Glaciers en 2008	57	1380
Ouvrages de retenue	4	97
Eau souterraine	150	3630
Réserves maximales de neige (env. avril) (y c. parts situées à l'étranger)	13	240
Eau du sol, disponible pour la végétation (y c. parts situées à l'étranger)	9	170

Schädler 1985, Zappa et al. 2012, Farinotti et al. 2009, OFEV

> *Impacts des changements climatiques*: les changements climatiques auront un impact considérable sur la taille des réservoirs en fonction des saisons; la couverture neigeuse est appelée à diminuer toujours plus, aussi bien dans son extension que dans son épaisseur et sa durée, sauf dans les régions de très haute altitude. Il fondra d'autant moins de neige au printemps et en été, ce qui se répercutera directement sur les débits. D'autre part, les glaciers – réserves abondantes constituées au fil des siècles

cles – sont appelés à fondre à un rythme accru. Cette fonte accélérée injectant davantage d'eau dans le cycle hydrologique, les débits commenceront par s'accroître dans les bassins versants fortement englacés. Mais alors que les surfaces englacées diminueront au fil des décennies, les apports des glaciers se réduiront graduellement jusqu'à disparaître complètement. Dans l'ensemble, toutefois, les apports du manteau neigeux sont nettement plus importants (voir chap. 5 et point 6.4).

## 6.2 La distribution saisonnière des débits et leur évolution future

Les études Aschwanden & Weingartner (1985) ainsi que Weingartner & Aschwanden (1992) ont décrit seize régimes typiques illustrant la distribution saisonnière des débits de tous les cours d'eau suisses (fig. 21). A l'aide d'un modèle hydrologique détaillé, le modèle PREVAH (Viviroli et al. 2009), et sur la base des scénarios climatiques décrits au chapitre 3, Köplin et al. (2012) ont procédé à la modélisation hydrographique de 189 bassins versants à méso-échelle. Ils ont pu établir les types de régimes aussi bien pour la période de référence (CTRL) que pour le court terme (2035) et le long terme (2085). Les considérations exposées ci-après se fondent sur les moyennes calculées par Köplin et al. (2012) à partir de dix modélisations par période considérée.

Régimes des eaux

A part dans quelques bassins versants, les régimes sont en train de subir des modifications très marquées. Prenons l'exemple de la Simme (fig. 22), qui est passée d'un régime *nival de transition*, avec des maxima en mai et des minima en hiver, à un nouveau type de régime comportant toujours un maximum en mai mais dont les minima se produisent à la fin de l'été (comme pour l'actuel type nivo-pluvial jurassien).

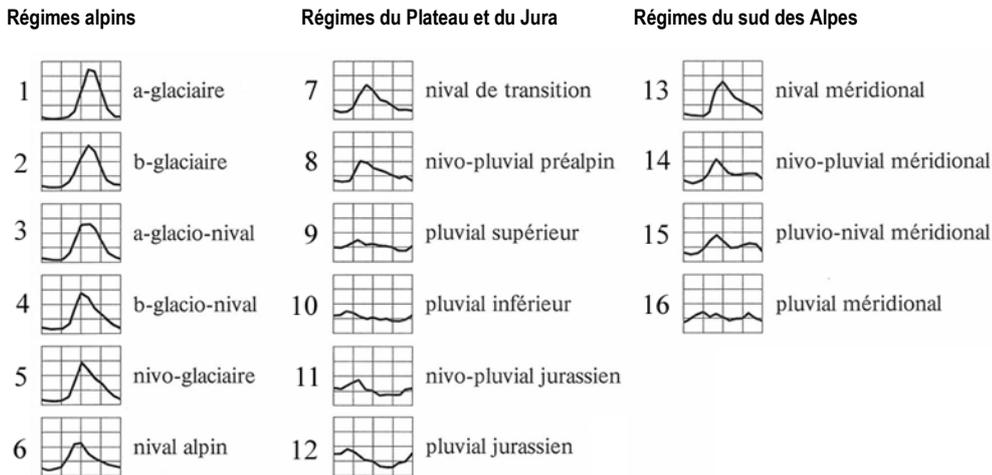
.....

*Les coefficients de Pardé permettent de comparer l'évolution saisonnière des débits de différents bassins versants. Ils expriment le rapport du débit moyen d'un mois donné au débit annuel moyen.*

.....

Coefficients de Pardé

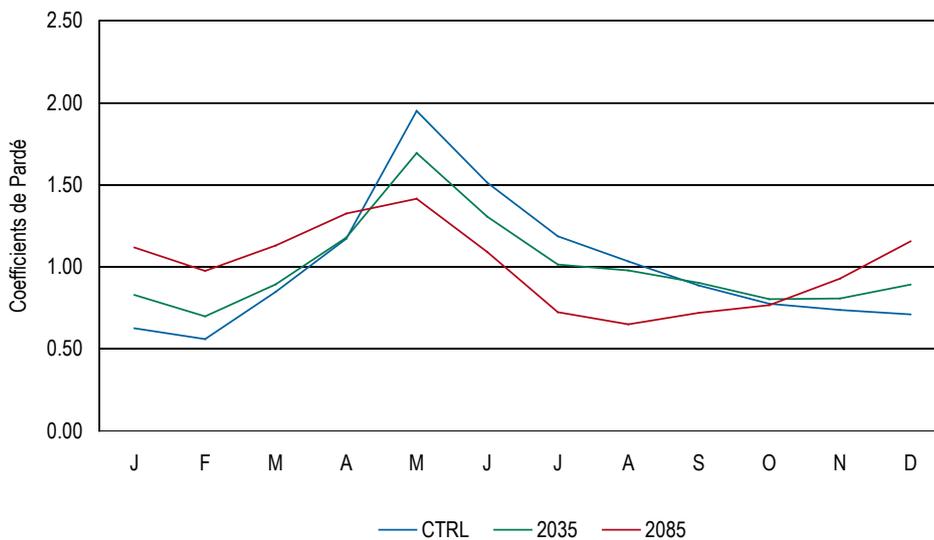
**Fig. 21 Représentation des débits mensuels (coefficients de Pardé) de seize régimes caractéristiques en Suisse**



D'après Weingartner & Aschwanden (1992)

**Fig. 22 Passage du régime caractéristique du bassin versant de la Simme jusqu'à son embouchure dans la Kander d'un régime *nival de transition* (CTRL, 2035) à un nouveau régime (2085) proche du nivo-pluvial jurassien**

Superficie 596 km<sup>2</sup>, altitude moyenne 1600 m, englacement pendant la période de référence 2 %.

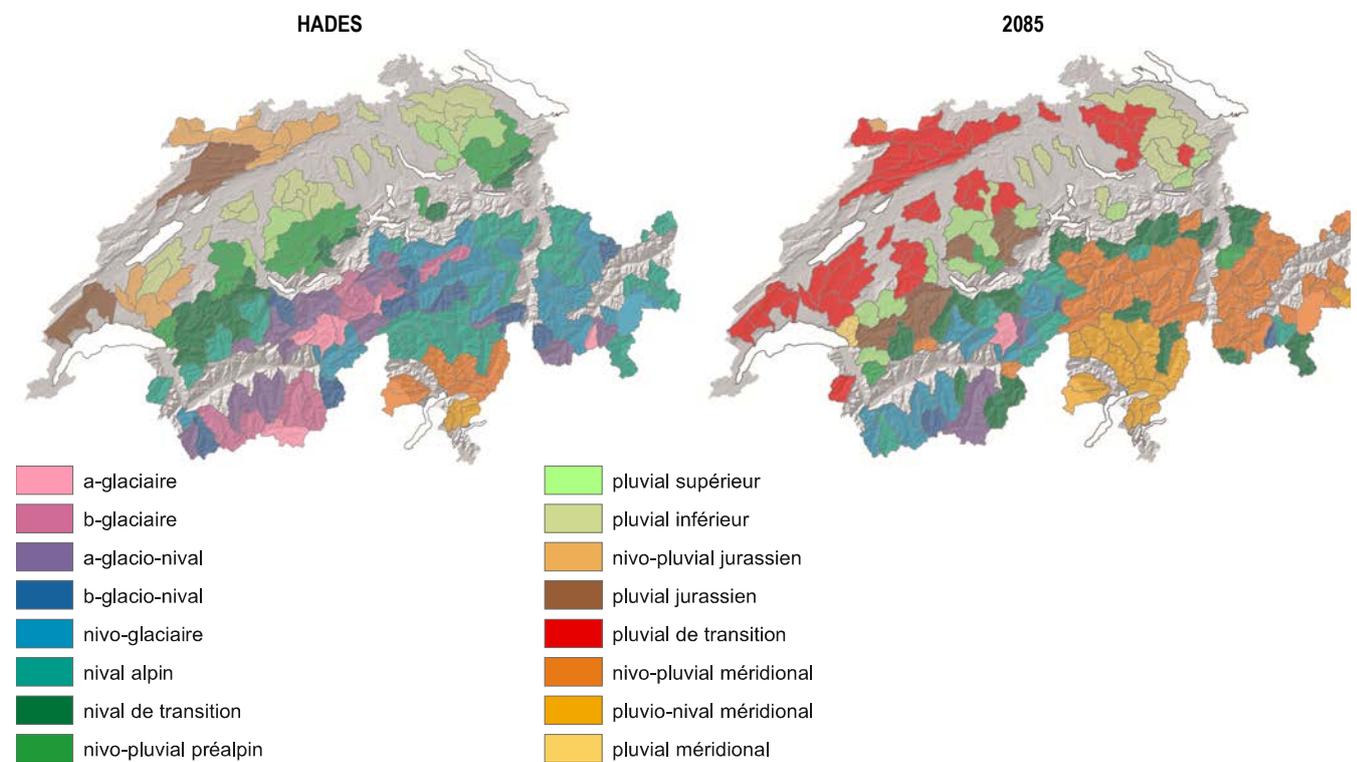


Les deux cartes reproduites ci-dessous représentent l'ensemble des zones étudiées, soit 63 % de la superficie du pays (fig. 23), et permettent de se faire une idée générale de la répartition des régimes et de leur modification depuis la seconde moitié du 20<sup>e</sup> jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Les régimes glaciaires qui caractérisaient une grande partie des régions de haute montagne sont appelés à disparaître complètement à long terme, sauf dans le bassin versant de la Massa, qui comprend le plus grand glacier des Alpes, celui d'Aletsch (Grosser Aletschgletscher). Avec la montée des températures, de nombreux autres régimes alpins se rapprocheront comme on pourrait s'y attendre de régimes typiques d'altitudes moins élevées. Ce n'est toutefois pas le cas des régions situées dans le centre, le sud et l'est du massif alpin suisse (y compris l'Engadine), où ils évolueront vers des régimes typiques du sud des Alpes. Sur le Plateau et dans le Jura, on assistera à l'émergence d'un type de régime jusqu'ici inconnu dans nos contrées, dit *pluvial de transition*, avec un maximum en hiver et un minimum marqué en août (voir fig. 24). Les bassins versants concernés, alimentés principalement par les pluies, pourraient réagir avec une grande sensibilité aux sécheresses estivales. Comme ce régime connaît son minimum au cœur de l'été, où l'on rencontre la plus grande probabilité de fortes chaleurs, les conséquences d'une période de sécheresse risquent d'être très graves, avec des périodes d'étiage extrême (Meyer et al. 2011a, Meyer 2012).

#### Déplacement des régimes

**Fig. 23 > Régimes des eaux de 189 bassins versants de méso-échelle en Suisse**

A gauche, classification de l'Atlas hydrologique de la Suisse (HADES) pour la période 1950–1980 (Weingartner & Aschwanden 1992) et à droite pour l'horizon 2085



Données tirées de Köplin et al. 2011

**Fig. 24 Représentation des coefficients de Pardé pour le nouveau type de régime *pluvial de transition***

Ce type de régime se caractérise par un minimum marqué en août et un maximum en janvier, ainsi que par un maximum secondaire en mars.

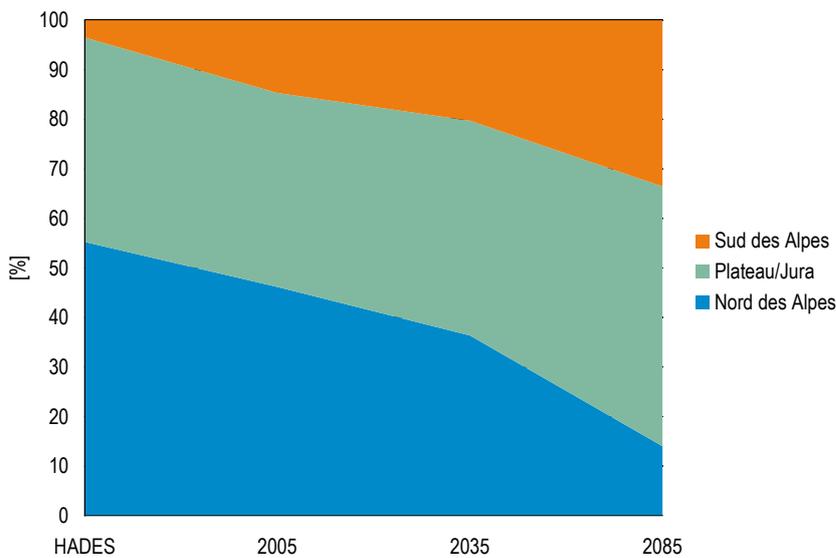


La fig. 25 synthétise les changements drastiques survenant dans la répartition des régimes d'écoulement jusqu'en 2085: nous devons nous attendre à une forte avancée des régimes d'écoulement de type méridional, plutôt rares aujourd'hui. Les régimes du nord des Alpes qui prédominaient jusqu'ici, avec un maximum en été et un minimum en hiver, sont appelés à disparaître alors que 20% environ des bassins versants passeront à un régime de type *nivo-pluvial méridional*. Cela pourra conduire à un rehaussement du niveau des crues moyennes en hiver et à une diminution des débits en été, avec une multiplication des étiages à la fin de l'été. Quant aux régimes typiques du Plateau et du Jura, ils resteront à peu près aussi nombreux mais se déplaceront sensiblement (fig. 23). Ils feront place à un nouveau type de régime, dit *pluvial de transition*. Quant aux régimes de type jurassien, ils disparaîtront presque complètement et ne seront plus observés que par endroits dans les Préalpes.

**Nouvelle répartition des régimes d'écoulement**

**Fig. 25 Modification de la fréquence des régimes d'écoulement en Suisse pour les principaux groupes de régimes selon la fig. 21**

*Pendant la période 1950–1980 (HADES), plus de 50 % des bassins versants se caractérisent par des régimes typiques du nord des Alpes et seuls 5 % sont de type subalpin. Dès la période de référence (2005), des modifications apparaissent, qui feront qu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, 20 % des régions auront des régimes typiques du nord des Alpes et 30 % de type subalpin alors que plus de 50 % passeront à un régime typique du Plateau et du Jura.*



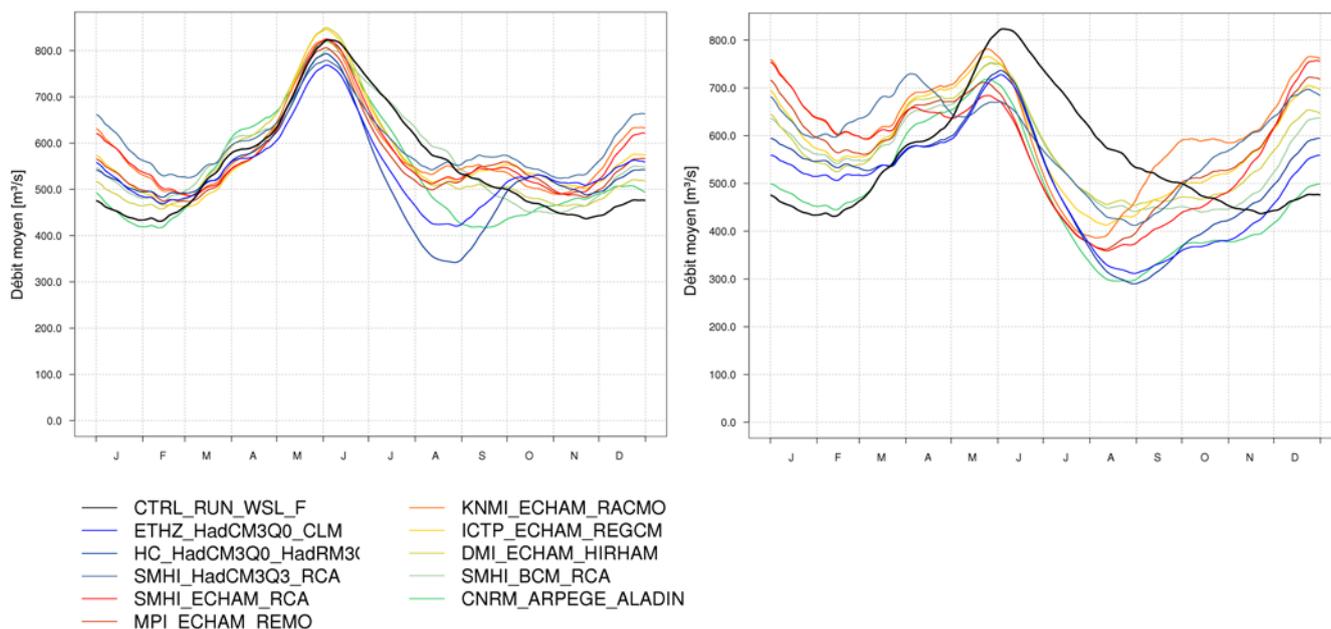
Comment les changements observés au niveau des bassins versants de taille moyenne influenceront-ils sur les régimes d'écoulement des grands cours d'eau? Dans le cadre de leur étude publiée en 2012, Zappa et al. ont effectué des projections pour les débits de tous les principaux bassins fluviaux de Suisse. La fig. 26 montre les impacts futurs de la modification du régime des eaux des bassins versants de l'Aar sur le régime d'écoulement de ce cours d'eau: après une période de plus grande régularité, avec une légère hausse des débits en automne et en hiver, des changements plus importants se dessinent à long terme. Le cours d'eau connaîtra deux maxima, un au début de l'été et un deuxième, tout à fait nouveau et légèrement moindre, en décembre. Le débit minimal se déplacera quant à lui à la fin de l'été et, avec une valeur de 300 à 450 m<sup>3</sup>/s, il sera inférieur aux anciens minima de l'hiver.

Modifications à l'échelle  
des grands bassins versants

Pour les grands bassins versants caractérisés aujourd'hui par des régimes d'écoulement typiquement alpins, comme celui du Rhône en Valais, on assistera également à des changements importants: les maxima de l'été s'accroîtront encore de manière provisoire, avant de décroître à nouveau vers la fin du siècle, pour survenir plus tôt dans l'année. Les cours d'eau concernés charrieront nettement moins d'eau en été et, outre le minimum hivernal, un deuxième minimum apparaîtra en août, avec des débits comparables à ceux mesurés aujourd'hui en hiver. Les débits enregistrés pendant les mois de juin à août seront nettement inférieurs à ceux connus aujourd'hui, alors qu'un deuxième maximum apparaîtra pendant la transition automne-hiver.

**Fig. 26 > Projections pour les débits de l'Aar à son embouchure dans le Rhin**

La ligne noire correspond à la période de référence, les lignes colorées aux dix scénarios climatiques.  
A gauche: court terme vers 2035, à droite: long terme vers 2085.



Zappa et al. 2012

### 6.3 Quels bassins versants réagiront le plus fortement aux changements climatiques?

Une autre question se pose, celle de savoir quels bassins versants réagiront de façon particulièrement marquée aux changements climatiques et pour quelles raisons. S'aidant de l'outil de l'analyse typologique (cluster analysis), Köplin et al. (2012) ont déterminé quels bassins versants allaient se comporter de façon semblable en termes d'évolution des températures, des précipitations et des débits, et quelles étaient leurs caractéristiques communes. Ces analyses ont été menées pour les deux horizons 2035 et 2085. Les chercheurs ont réparti les bassins versants en sept types de réaction (clusters), numérotés de C1 à C7 (voir fig. 27). Chaque type regroupe entre 31 et 41 régions, à l'exception des types C3 et C7 qui n'en comprennent que neuf, respectivement cinq. Leurs caractéristiques essentielles sont décrites ci-après (Köplin et al. 2012):

- > **C 1:** Régions du Plateau et du Jura. Légère augmentation des précipitations, peu de changement au niveau des débits, diminution des réserves de neige.
- > **C 2:** Régions du Plateau/des Préalpes et du sud du Tessin. Légère diminution des précipitations, légère diminution des débits annuels moyens mais augmentation en hiver, diminution marquée des réserves de neige.
- > **C 3:** Quelques régions des Préalpes occidentales. Peu de changements dans les précipitations et les débits annuels moyens, mais augmentation graduelle des débits en hiver. Diminution marquée des réserves de neige à long terme.

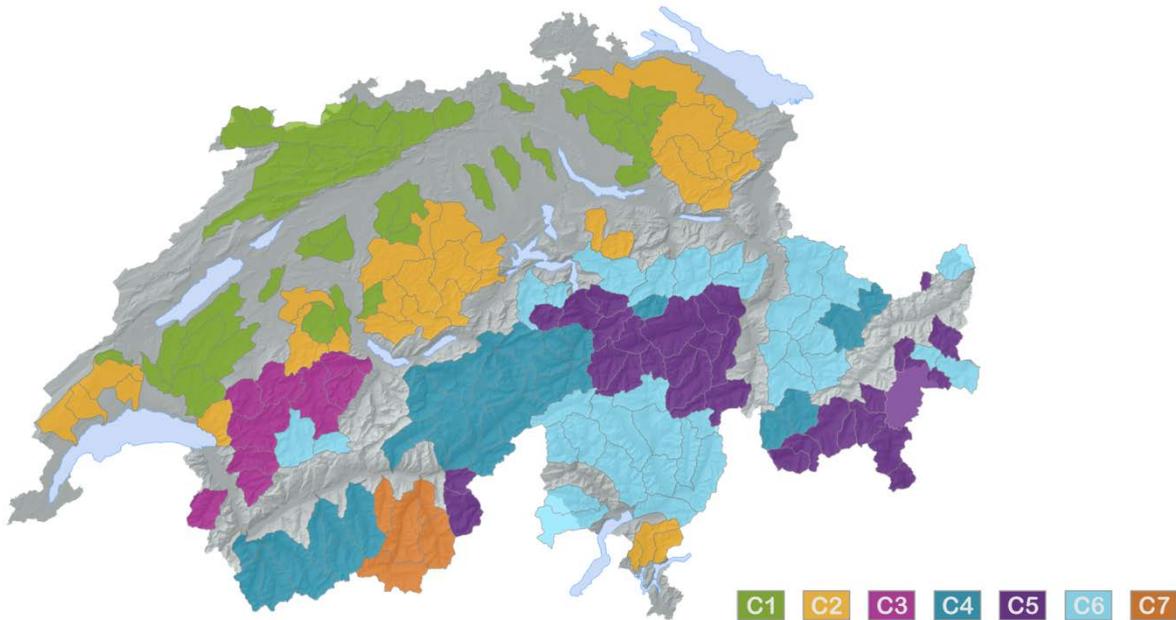
Types de réaction

- > **C 4:** Régions de haute altitude moyennement englacées situées en Valais et dans le centre des Grisons. Peu de changement au niveau des précipitations, mais débits sensiblement plus importants en moyenne, surtout en hiver. Diminution des réserves de neige, eaux de fonte glaciaires en régression avec la diminution des surfaces englacées.
- > **C 5:** Régions de haute altitude peu englacées situées en Suisse centrale, au centre des Grisons et en Engadine. Très peu de changement au niveau des précipitations, diminution des débits annuels moyens, surtout à long terme, mais forte augmentation en hiver. Diminution très marquée des réserves de neige, fonte des glaciers diminuant à long terme.
- > **C 6:** Régions de moyenne altitude peu englacées dans toutes les Alpes. Recul des précipitations à long terme, recul des débits annuels moyens surtout à long terme, mais fort accroissement en hiver. Diminution très marquée des réserves de neige.
- > **C 7:** Quelques régions du Valais central méridional situées en très haute altitude et fortement englacées. Diminution des précipitations à long terme, débits d'abord en augmentation, puis en forte régression à long terme avec légère augmentation en hiver. Diminution marquée des réserves de neige, eaux de fonte des glaciers d'abord en forte augmentation, puis en rapide diminution.
- > L'évaporation augmente d'abord légèrement partout, puis plus fortement.

Si l'on compare la répartition spatiale des types de réaction avec celle des types de régime modifiés à long terme (fig. 23), on remarque des concordances. Chaque type de réaction présente une évolution caractéristique sur l'année des modifications subies par les différentes composantes du régime d'écoulement. Certains types de bassins versants verront la distribution saisonnière de leurs débits essentiellement déterminée par des processus d'accumulation et de fonte des neiges décalés dans le temps. L'altitude à laquelle ils sont situés est déterminante pour la modification des débits, notamment parce qu'englacement et altitude sont étroitement corrélés. Il est clair que du fait du réchauffement, l'englacement est lui aussi déterminant pour la réaction, tant en termes de débits saisonniers que de débits annuels. Il en découle que chaque modélisation hydrologique s'étendant sur une période prolongée doit prendre en compte de façon explicite la modélisation des surfaces englacées.

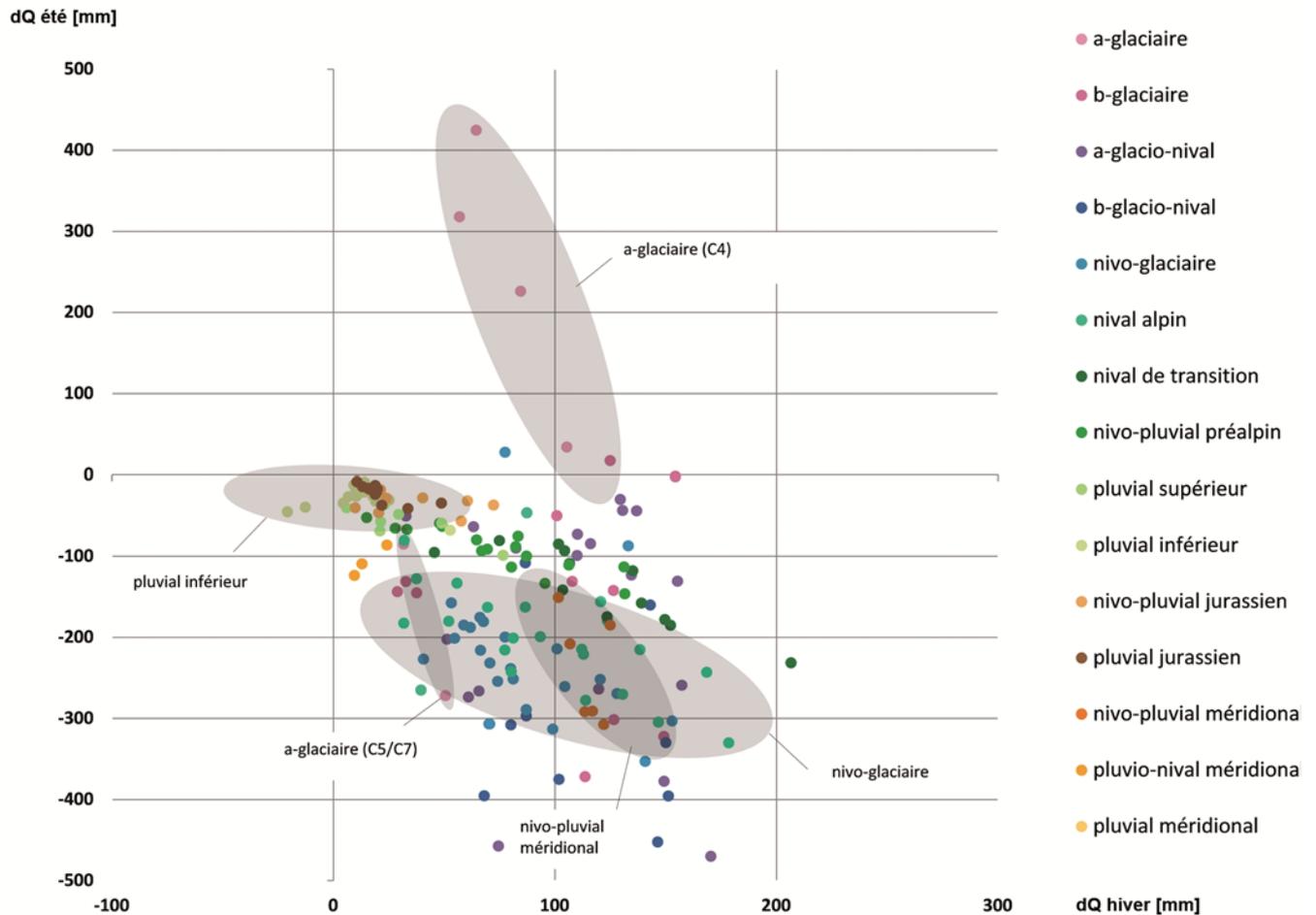
**Fig. 27 Répartition des bassins versants en sept types (clusters) C1 à C7 se comportant de façon semblable en termes d'évolution des températures, des précipitations et des débits**

*L'analyse tient compte simultanément des modifications à court et à long terme.*



**Fig. 28** Evolution du débit hivernal moyen (dQ hiver: décembre – février) par rapport à la modification du débit estival moyen (dQ été: juin – août) pour l'ensemble des 189 bassins versants examinés, avec indication des régimes enregistrés entre 1950 et 1980

Les zones grisées regroupent des régions qui, à l'origine, présentaient des régimes semblables.



Köplin et al. 2011

D'une façon générale, en raison notamment du rehaussement de la limite des chutes de neige mais aussi du fait de l'augmentation généralisée des précipitations pendant les mois d'hiver (décembre à février), les débits augmenteront fortement dans la quasi totalité des régions, alors qu'ils décroîtront nettement pendant l'été (juin à août), à quelques exceptions près (fig. 28). Cette situation reflète les modifications subies par les régimes d'écoulement tels que représentés dans les fig. 22 à fig. 25. Les modifications globales des composantes du régime des eaux sont abordées au point 6.4 ci-après.

6.4

## Régime des eaux et ressources en eau

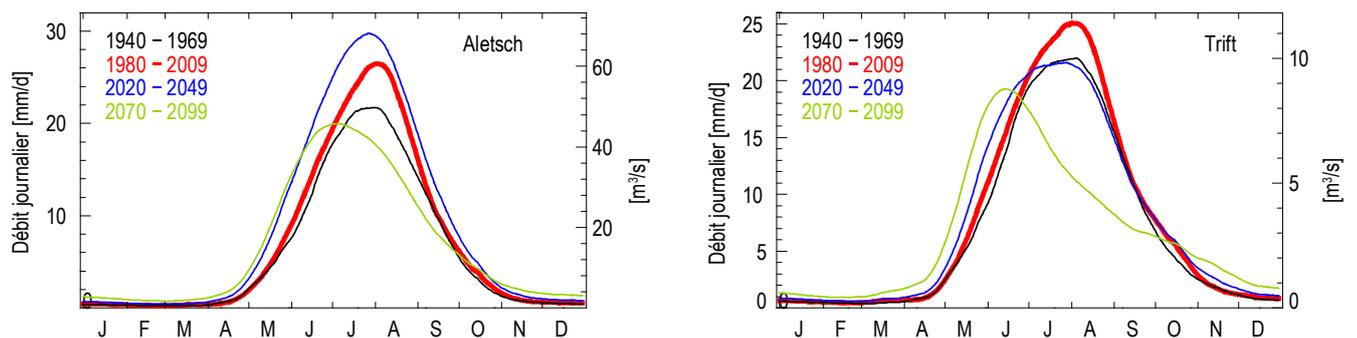
Les bassins versants situés en altitude et fortement englacés réagissent de façon particulièrement marquée à l'augmentation des températures. Non seulement les glaciers fondent davantage en été, mais la saison de fonte démarre plus tôt, dès la fin du printemps, pour se terminer plus tard en automne. La surface englacée se réduira au fil du temps, si bien que la part des eaux de fonte aux débits mesurés diminuera elle aussi.

Forte réaction des bassins versants très englacés

La fig. 29 montre les modifications des débits saisonniers, à l'exemple du bassin versant du glacier du Trift, dans l'Oberland Bernois, et des glaciers d'Aletsch (Grosser Aletschgletscher, Mittelaletschgletscher et Oberaletschgletscher), plus grands et situés plus en altitude, en Valais. Depuis les années 1940, les débits estivaux mesurés dans la région d'Aletsch ont constamment augmenté et continuent de le faire. Le moment du débit maximum estival s'est décalé légèrement de début août vers le mois de juillet. Cette situation est appelée à se modifier radicalement à long terme. Les débits maximums saisonniers descendront sous les valeurs de 1940–1969, alors que les surfaces englacées passeront de 123 km<sup>2</sup> à 39 km<sup>2</sup>. De plus, le maximum saisonnier se décalera vers le mois de juin. Etant donné que la part d'eaux de fonte glaciaires et neigeuses restera importante (voir fig. 30), on aura toujours affaire à un régime de type glaciaire. Dans le secteur du glacier du Trift, situé à plus basse altitude, les débits maximaux appartiennent déjà au passé. Dans un avenir proche déjà, il faut s'attendre à une diminution des débits estivaux, tout particulièrement de juillet à septembre.

Grands glaciers

**Fig. 29** > Evolution dans le temps des débits saisonniers dans le bassin versant des glaciers d'Aletsch (surface englacée 123 km<sup>2</sup>, altitude moyenne 2925 m) et du glacier du Trift (18 km<sup>2</sup>, 2570 m), en moyenne sur trente ans



VAW 2011

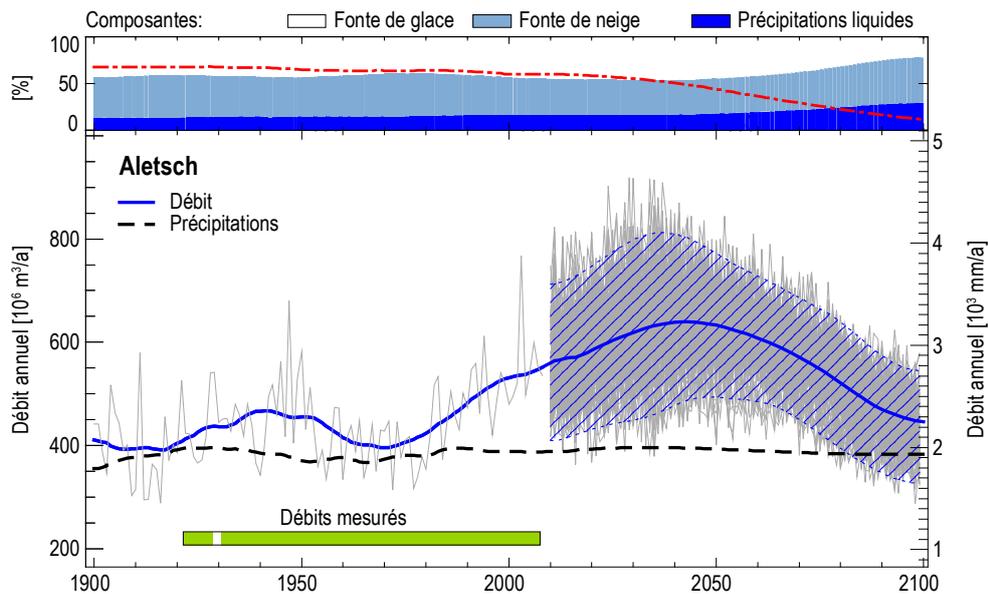
A l'exemple du glacier d'Aletsch, les volumes d'eau qui s'écoulent tendent à augmenter depuis les années 1970 (fig. 30). Ils atteindront leur maximum en 2050 puis diminueront à nouveau, mais conserveront jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle un niveau élevé par rapport à 1900. Remarquons que les débits annuels ne descendront pas au-dessous des niveaux répertoriés en 1900, dans la mesure où les précipitations ne diminueront pas de façon marquée, et que tant en valeur absolue que relativement aux précipitations, l'évaporation, qui se situe actuellement aux alentours de 2000 mm/a, ne se modifiera en effet que très peu à ces altitudes.

Selon la taille et le type de glaciers, le maximum passager des débits annuels provenant de régions fortement englacées se produit à différentes périodes (fig. 31). Les petits glaciers de Gries, du Trift et de Silvretta ont d'ores et déjà atteint leurs valeurs maximales, par contre, les grands glaciers ne l'atteindront que vers 2050. Il est intéressant de noter que vers l'an 2100, les débits mesurés dans les bassins versants du glacier de Morteratsch et surtout du glacier de Gries devraient en partie descendre bien au-dessous des valeurs enregistrées vers 1900 (Farinotti et al. 2011). Pour le glacier de Gries, c'est notamment lié à la diminution des précipitations annuelles (chap. 3).

Petits glaciers

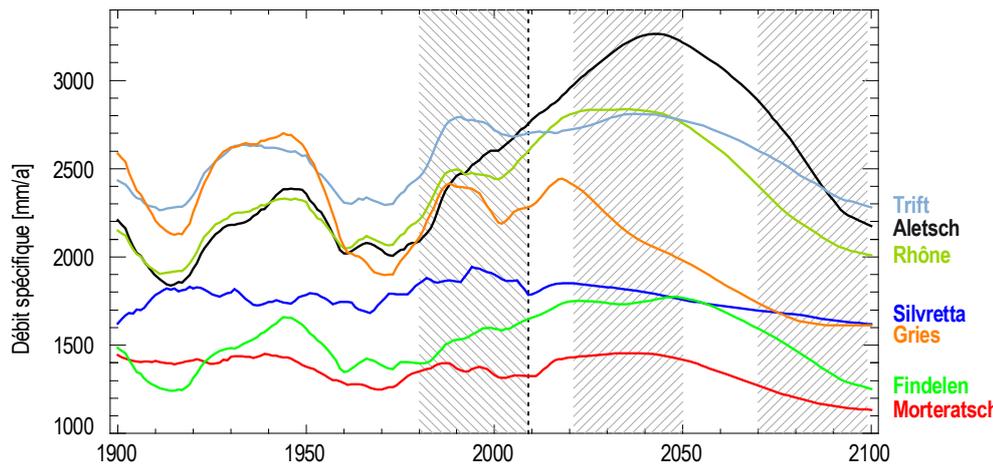
**Fig. 30** Débits annuels enregistrés à la station de mesure de l'OFEV de Massa, près de Blatten (Naters), qui mesure les débits dans le bassin versant des glaciers d'Aletsch depuis 1922

Dans la partie supérieure figurent les parts à attribuer à la fonte de neige (bleu ciel), à la fonte de glace (blanc) et à l'écoulement direct de la pluie (bleu foncé). Le traitillé rouge correspond au degré d'englacement du bassin versant. Les débits augmenteront à l'avenir sous l'effet de l'accélération de la fonte des glaciers, puis seront déterminés dans une toujours plus large mesure par la fonte des neiges. La surface hachurée correspond à la plage d'incertitude liée aux scénarios climatiques.



**Fig. 31 Evolution des débits spécifiques dans les bassins versants englacés sous revue**

La valeur moyenne de la marge d'incertitude est indiquée pour chaque région pour la période 2009–2100 (voir fig. 30). Les surfaces hachurées correspondent à la période de référence et aux deux périodes de projection.



VAW 2011

Les eaux d'écoulement représentent une part essentielle de nos ressources en eau utilisables. Dans les 189 bassins versants de taille moyenne que compte la Suisse, les débits resteront relativement stables en moyenne interannuelle: à court terme, la moitié environ des régions devraient voir une augmentation (+52 mm en moyenne) et l'autre moitié une diminution (-33 mm), ce qui, additionné, donne une augmentation moyenne de 12 mm. A long terme, toutefois, on s'attend dans 80 % des régions à une diminution d'environ 75 mm par rapport à aujourd'hui. Cette situation est due notamment à un léger recul des précipitations, accompagné d'un léger renforcement de l'évaporation. Dans les 20 % restants (régions majoritairement situées en altitude), on devrait voir une augmentation de 205 mm par rapport à aujourd'hui. Etant donné les incertitudes liées aux modélisations, il faut considérer cette dernière valeur avec prudence.

Zappa et al. (2012) se sont intéressés à la façon dont les changements intervenant dans les différents bassins versants partiels se traduisent à l'échelle des principaux bassins versants et à celle du pays. D'une manière générale, on peut dire que les changements dépeints plus haut sont confirmés.

Le tab. 2 et la fig. 32 montrent comment les ressources en eau renouvelables (débits moyens) se modifient pour chacun des principaux bassins versants. Les changements prévus sont tout d'abord modestes, se situant d'une part dans la plage d'incertitude inhérente aux modèles, et d'autre part bien en-deçà de la variabilité naturelle. Le seul changement notable se produit au sud des Alpes, où les ressources en eau devraient continuer de décroître jusque dans un avenir lointain, étant donné la diminution des précipitations. Il faut remarquer à cet égard que le bassin versant du lac Majeur (Tessin et Toce) est particulièrement pluvieux.

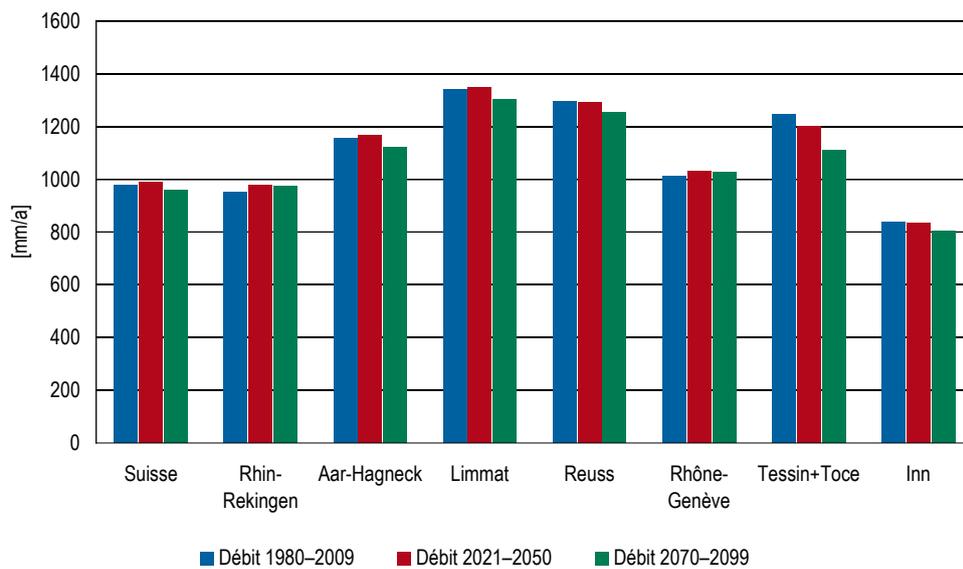
Evolution des débits dans les bassins versants de moyenne et de grande taille

**Tab. 2 > Evolution des débits moyens dans les principaux bassins versants de Suisse, compte tenu des apports de l'étranger**

	Débit [mm/a]	Débit [m³/s]	Variation [%]	
	1980–2009	1980–2009	2021–2050	2070–2099
Suisse	977	1658	1,1	-2,0
Rhin-Rekingen	950	443	2,8	2,7
Aar-Hagneck	1155	187	1,0	-2,9
Limmat	1340	102	0,6	-2,7
Reuss	1294	141	-0,2	-3,2
Rhône-Genève	1011	270	1,8	1,5
Tessin + Toce	1245	265	-3,5	-11,0
Inn	839	61	-0,5	-4,2

Zappa et al. 2012

**Fig. 32 Evolution des ressources en eau dans les principaux bassins versant du pays**



Zappa et al. 2012

6.5

## Débits extrêmes

La méthode utilisée pour élaborer les scénarios climatiques, à savoir la méthode Delta change, ne permet pas de faire varier la fréquence des futures périodes de sécheresse ou de précipitations extrêmes. Meyer et al. (2011a, 2012b) n'ont ainsi identifié quasi aucune modification dans la durée des périodes de sécheresse (nombre de jours avec précipitations < 1 mm/d). Etant donné toutefois que l'occurrence des périodes de sécheresse ou de crue dépend non seulement de la répartition des précipitations mais aussi de l'interaction d'un ensemble complexe de facteurs hydrologiques saisonniers et journaliers – régime des eaux souterraines, constitution et fonte du manteau neigeux, etc. – les modélisations utilisées permettent quand même de prédire l'évolution probable des situations d'étiage ou de crue. Les changements dans le régime d'écoulement tels qu'ils sont décrits dans les chapitres précédents sembleraient ainsi indiquer une possible plus grande prédisposition aux événements extrêmes. Ces changements dans les prédispositions ressortent par exemple aussi des centiles ne se présentant qu'exceptionnellement (10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles) dans les scénarios de débits (fig. 33, fig. 34).

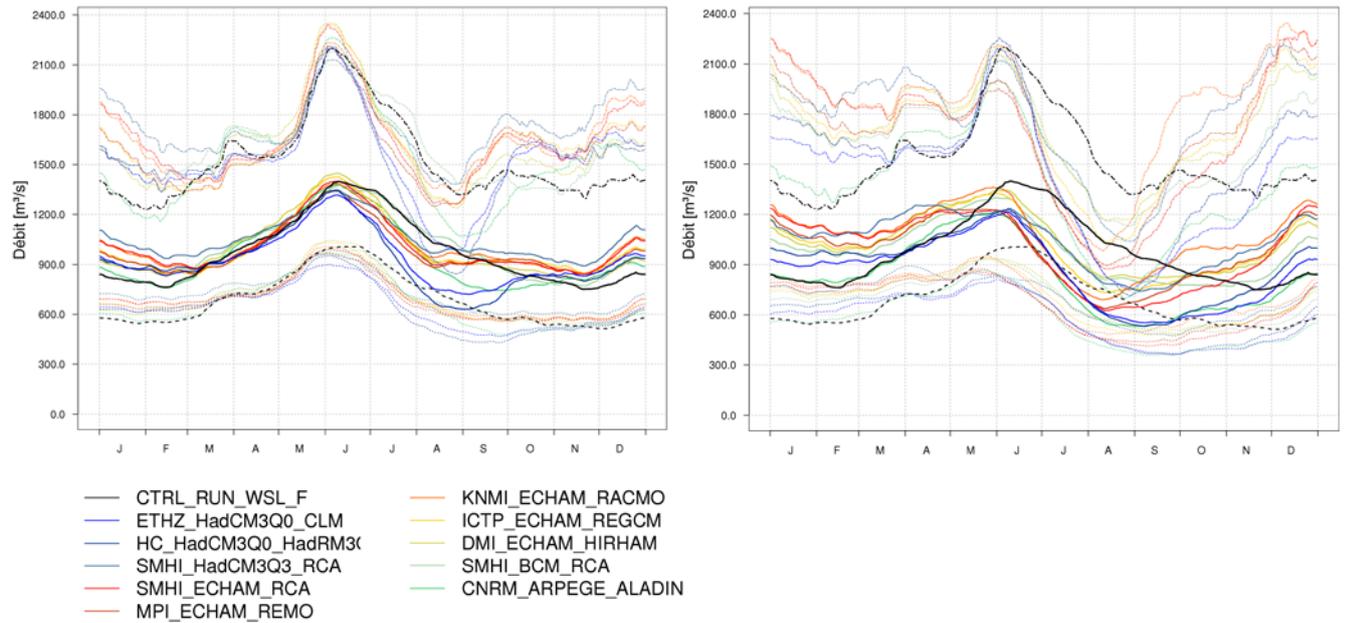
On peut voir dans la fig. 33 que pour le Rhin à proximité de Bâle, la prédisposition aux étiages ne se limite désormais plus à l'hiver, mais concerne désormais aussi la fin de l'été, avec peut-être dans un lointain avenir un abaissement marqué du 10<sup>e</sup> centile (en automne). La prédisposition aux crues se modifie elle aussi fondamentalement à la fin du 21<sup>e</sup> siècle: alors que les crues ne se produisaient jusqu'ici qu'en été, il faudra désormais aussi s'y attendre en hiver. Cela concerne en particulier le cours moyen et inférieur du Rhin, où la majeure partie des crues se produisent d'ores et déjà en hiver.

Rhin près de Bâle

La situation est différente dans les bassins versants situés en altitude et comportant des glaciers (fig. 34). Dans ces régions, où l'on observe aujourd'hui des étiages marqués en hiver, la situation pourrait s'améliorer, quand bien même les débits devraient en général diminuer à la fin de l'été. Les crues ne devraient pas elles non plus subir de grands changements, étant donné que les étés plus secs ne renforcent pas la prédisposition aux précipitations extrêmes et que le sous-sol des bassins versants concernés devrait être relativement sec.

**Fig. 33** > Débit du Rhin près de Bâle

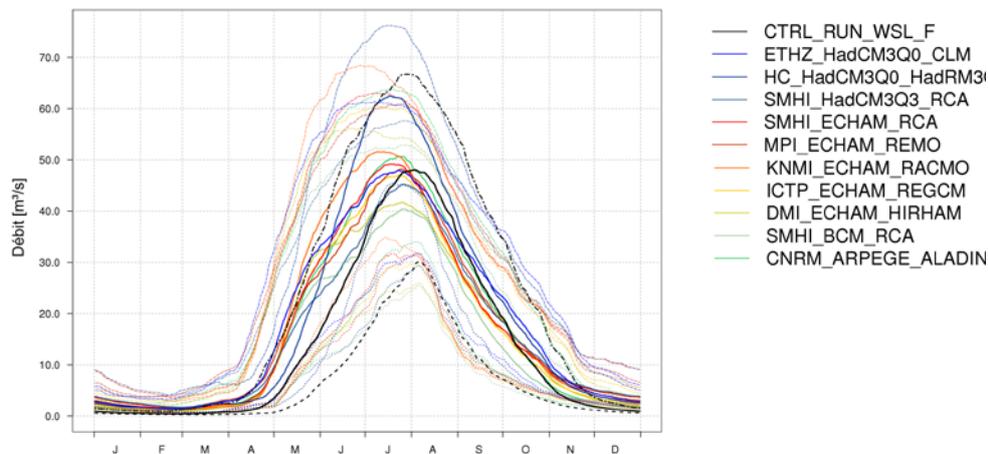
Représentation des 10<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles pour la période de référence (en noir) et pour les dix scénarios climatiques (en couleur); à gauche à court terme, vers 2035, et à droite à long terme, vers 2085.



Zappa et al. 2012

**Fig. 34** > Débit de la Massa près de Blatten (Naters)

Représentation des 10<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles pour la période de référence (en noir) et pour les dix scénarios climatiques (en couleurs) à l'horizon 2085.



Zappa et al. 2012

### 6.5.1 Etiages

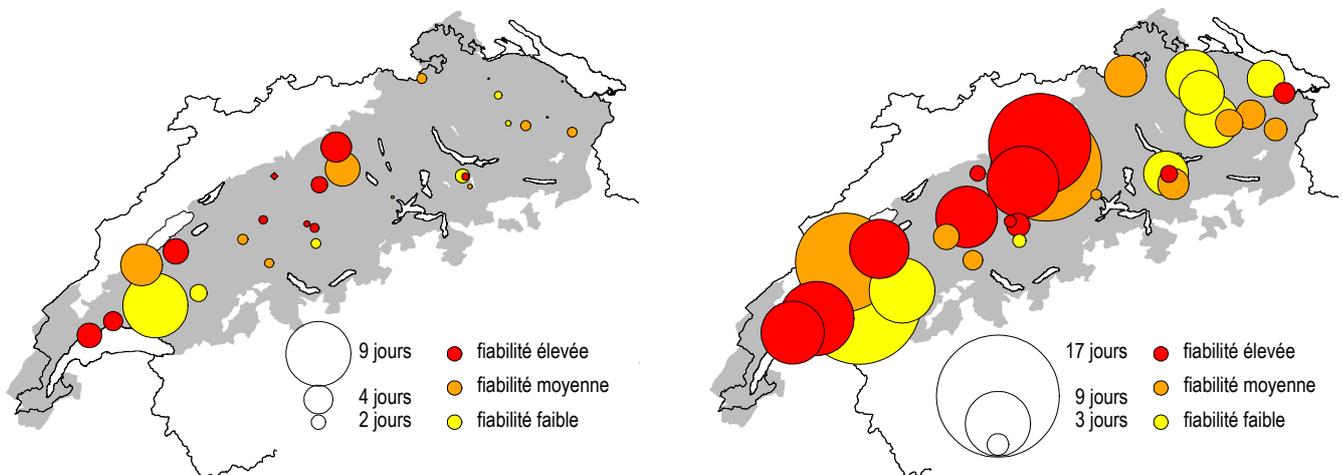
L'évolution des étiages a été étudiée pour 29 bassins versants du Plateau suisse sur la base d'un système de modélisation spécifiquement axé sur la simulation des étiages et prenant en compte une modélisation correcte du débit de base (Meyer 2012a, b).

#### Débits inférieurs au 95<sup>e</sup> centile ( $Q_{347}$ ):

Le nombre de jours pendant lesquels une valeur-seuil n'est pas atteinte constitue une donnée particulièrement intéressante pour l'exploitation des eaux et pour l'évaluation de l'impact des étiages sur les écosystèmes. Cette valeur-seuil est définie en fonction de la problématique traitée et s'avère déterminante pour les résultats. Le seuil défini dans la législation suisse pour l'estimation des débits résiduels est le 95<sup>e</sup> centile, soit le débit  $Q_{347}$ . Ce débit  $Q_{347}$  correspond au débit qui est atteint ou dépassé en moyenne pendant 347 jours par an; la période annuelle moyenne *durant laquelle ce débit n'est pas atteint* est donc de 18 jours. Or il est très probable que cette période s'allonge à l'avenir sur le Plateau central (fig. 35); on a ainsi calculé qu'elle pourrait durer 17 jours supplémentaires vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Si un allongement de 17 jours est possible sur le Plateau, il n'atteindra toutefois vraisemblablement que neuf jours. Dans l'est du Plateau, cet allongement pourra atteindre neuf jours mais ne dépassera sans doute pas trois jours. Cet allongement de la durée des étiages signifie que le débit  $Q_{347}$  pourra être bien plus bas à l'avenir. Quant à savoir si cette diminution des débits minimaux équivaldra à un assèchement des cours d'eau, il est impossible de le savoir avec certitude car cela dépend étroitement des caractéristiques morphologiques de leur lit. La diminution des débits pourra également se répercuter sur la qualité des eaux (conditions de déversement des eaux usées, déversement d'eaux de refroidissement, etc.). De plus, il se pourrait que les petits cours d'eau du Plateau ne puissent plus servir de source fiable pour les prélèvements d'eau.

#### Augmentation des jours d'étiage

Fig. 35 > Comparaison de la durée moyenne des débits inférieurs au 95<sup>e</sup> centile pendant la période de référence avec les durées correspondantes des périodes de projection: à gauche à court terme (2035), à droite à long terme (2085)



#### Moyenne arithmétique minimale des débits moyens sur sept jours consécutifs:

Cette valeur de référence correspond au débit d'étiage d'une période de sécheresse ininterrompue, en été dans le cas qui nous occupe. Meyer et al. (2012b) ont montré dans leur analyse que dans toutes les régions du Plateau examinées, les valeurs moyennes calculées pour une période complète diminuent pour les deux périodes de projection. A court terme (2035), cette diminution sera particulièrement marquée dans le centre et l'ouest du Plateau. A longue échéance (2085), elle concernera en particulier l'est et l'ouest du Plateau. Dans nombre de bassins versants, il faut s'attendre à ce que la moyenne sur une période entière diminue de 20 % dans un avenir proche et de 40 % dans un avenir lointain, avec des variations relativement importantes entre les diverses régions concernées et surtout d'une année sur l'autre.

#### 6.5.2 Crues

L'analyse des débits de crue montre que le phénomène tend à s'aggraver, particulièrement à long terme. Les observations effectuées dans la région du Rhin antérieur ont ainsi montré qu'un évènement décennal au cours de la période de référence correspond à un débit d'environ 550 m<sup>3</sup>/s, mais qu'à longue échéance, cette valeur passera à environ 700 m<sup>3</sup>/s (Köplin et al. 2011). Les modélisations de Zappa et al. (2012) confirment ce résultat, avec des augmentations de 10 à 50 % par rapport à la période de référence (selon le scénario considéré).

Pour les grands bassins versants aussi, on a identifié des débits de crue dotés d'une brève période de récurrence. La fourchette d'évolution à long terme des pointes de crues dotées d'une période de retour de 20 ans (HQ20) pour l'Aar près de Hagneck sera comprise entre -8 et +12 %. Il semblerait par ailleurs que les bassins versants situés à plus basse altitude connaîtront un accroissement marqué des pointes de crue à brève période de récurrence.

Naef (2011) relève que les régions caractérisées par des surfaces étendues réagissant avec retard aux précipitations sont particulièrement sujettes aux crues extrêmes causées par des précipitations très abondantes et persistantes. Si ces régions n'ont certes pas connu de crues extrêmes jusqu'ici, il se pourrait qu'elles réagissent un jour de façon non linéaire à une longue période de fortes précipitations, ce qui conduirait à des crues d'une ampleur inédite. Il est malheureusement impossible aujourd'hui d'émettre des prévisions concrètes concernant l'évolution des épisodes pluvieux extrêmes à très longue période de récurrence dans les Alpes (CH2011, 2011).

Potentiel de crues

## Conclusions

A court terme (2035), le volume d'eau global disponible annuellement en Suisse ne se modifiera que légèrement, si l'on excepte les augmentations passagères des débits que connaîtront les régions fortement englacées. A long terme (2085), les ressources disponibles et renouvelables diminueront légèrement, surtout au Tessin (moins environ 10%). Les régimes d'écoulement, soit la répartition des débits sur l'année, sont en revanche appelés à se modifier fortement dans presque toute la Suisse. Il faut ainsi s'attendre à des débits nettement renforcés en hiver et sensiblement diminués en été, sauf dans les régions où subsisteront des glaciers. Sur la majeure partie du Plateau, la saison des crues potentielles se déplacera du début de l'été vers le semestre hivernal et s'allongera en partie. La propension aux crues moyennes (dans les Préalpes et les Alpes) et aux fortes crues (sur le Plateau et dans le Jura) pourrait se renforcer dans bon nombre de régions. En ce qui concerne les étiages, on diagnostique deux tendances opposées en fonction des régions: les cours d'eau des Préalpes et des Alpes pourraient voir leurs débits d'étiage augmenter quelque peu et survenir vers la fin de l'été plutôt qu'en hiver; dans la plupart des régions du Plateau, on devrait en revanche assister à une nette diminution des débits et à une forte prolongation des périodes d'étiage. Les impacts des changements climatiques sur les débits auront également des conséquences en termes de gestion des eaux, car ils accroissent les risques de pénurie d'eau en été, avec les conflits d'intérêt qui en découlent entre les divers utilisateurs. Il faudra revoir la réglementation des divers domaines concernés (prélèvements d'eau, déversement d'eaux de refroidissement, régulation des lacs, etc.). Il s'agira par ailleurs de vérifier les besoins supplémentaires en réservoirs (à usages multiples). De plus, l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des périodes d'étiage et l'augmentation des débits hivernaux pourraient entraver plus fréquemment la navigation sur le Rhin.

## 7 > Température des eaux

---

*La température de l'air est le principal facteur influant sur la température des eaux. Les cours d'eau, eux, se verront influencés à double titre: par la hausse de la température de l'air, mais aussi par les changements intervenant dans la répartition saisonnière des débits. Un air plus chaud et des débits moindres en été exerceront une pression accrue sur l'écologie des cours d'eau et sur les divers usages qui sont faits de ceux-ci. D'autres études visant à modéliser les températures des eaux seront nécessaires et devront tenir compte des modifications des régimes d'écoulement.*

---

### 7.1 La température de l'air, principal facteur influant sur la température des eaux

La température constitue un critère essentiel de la qualité des eaux. Elle-même est la résultante d'une multitude de facteurs, parmi lesquels la température de l'eau à la source et celle des affluents, les apports provenant des glaciers et du manteau neigeux, les échanges thermiques avec le sous-sol et, bien plus important encore, avec l'atmosphère. Les paramètres déterminants en la matière sont le bilan de rayonnement, les précipitations et l'évaporation, ainsi que la condensation. La température de l'air est un bon indicateur du bilan de rayonnement et des échanges de chaleur sensible et latente et se prête donc bien pour prédire la température de l'eau. D'autres processus, plus difficiles à évaluer, jouent eux aussi un rôle: les turbulences dans l'écoulement des eaux, les zones d'ombre, l'infiltration d'eaux souterraines, l'exfiltration dans le sous-sol, etc. Sauf pour les torrents alpins présentant une forte déclivité, le facteur du frottement est négligeable.

La température de l'eau à la source est presque constante sur l'année. Elle correspond à la température annuelle moyenne de l'air et, sauf pour les sources thermales, elle est fonction de l'altitude. Au fil du cours d'eau, l'eau traverse une grande diversité de milieux et se trouve exposée en permanence aux variations de la température de l'air et à d'autres facteurs d'influence. A mesure qu'elle s'éloigne de sa source, l'eau se réchauffe graduellement jusqu'à atteindre sa température d'équilibre, autour de laquelle elle va ensuite osciller jusqu'à la prochaine embouchure. Cette température correspond à celle que l'eau atteindrait à un moment donné si elle se trouvait en équilibre avec le milieu environnant. Cet équilibre n'est toutefois quasiment jamais atteint car l'eau possède une capacité thermique plus élevée que l'air et elle réagit avec un temps de retard aux modifications de l'environnement. S'ajoute à cela le caractère montagneux de la Suisse, qui fait que l'eau subit des changements d'altitude importants et donc que la température de l'air varie elle aussi fortement.

Si le cours d'eau traverse des lacs, ceux-ci font office de tampons thermiques, notamment pour les changements à court terme de la température de l'eau, et d'accu-

mulateurs thermiques. La différence de température de l'eau peut ainsi atteindre 5 °C entre l'emplacement où elle entre dans un lac et celui où elle en ressort (lac des Quatre-Cantons), les plus grandes différences étant enregistrées en été (Pfammatter 2004). La différence de température est fonction de la durée de séjour dans le lac, elle-même fortement corrélée au volume d'eau total.

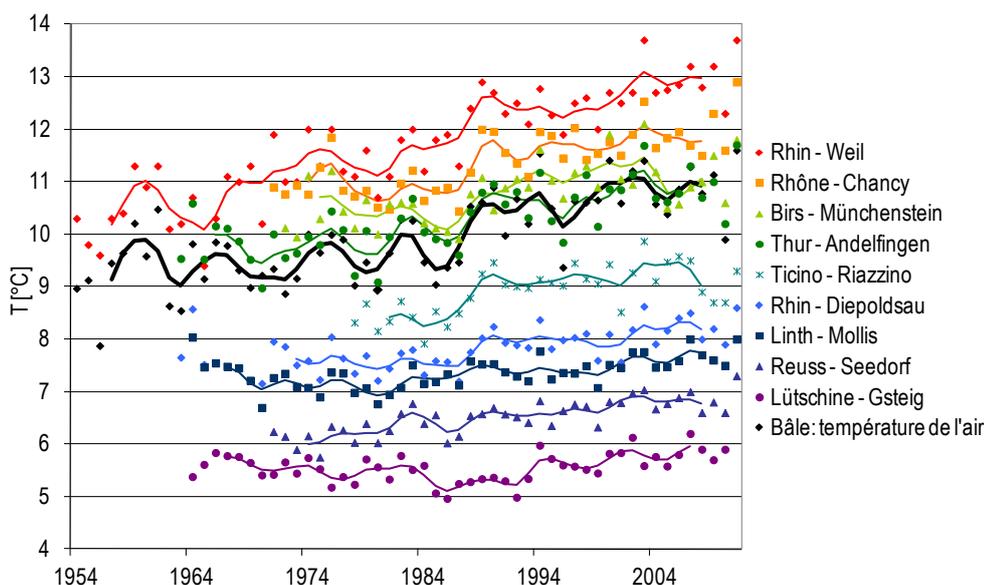
## 7.2 Température des cours d'eau: un bref historique

Les cours d'eau suisses se sont sensiblement réchauffés ces dernières décennies, la température moyenne de l'eau évoluant en parallèle avec la température moyenne de l'air. Cette corrélation est toutefois moins marquée pour les cours d'eau que pour les lacs car le régime d'écoulement constitue pour les premiers un facteur important. La plupart des stations de l'Office fédéral de l'environnement, qui exploite un réseau étendu de mesure des températures des cours d'eau (en particulier depuis 2004: 70 stations), ont enregistré un réchauffement compris entre 0,1 et 1,2 °C en 40 ans (1970–2010). Toutes les stations montrent une nette augmentation de la température de l'eau (jusqu'à +1 °C) entre 1987 et 1988, qui s'explique par un accroissement de la température de l'air (fig. 36): depuis 1988, en effet, toutes les températures annuelles moyennes se sont situées au-dessus de la moyenne établie de 1961 à 1990 (fig. 1, chap. 3). Cette hausse des températures des eaux est moins évidente dans les régions fortement englacées (Jakob 2010).

Hausse de la température des cours d'eau

**Fig. 36 Evolution de la température des eaux sur ces dernières décennies pour neuf stations et pour Bâle (temp. de l'air)**

*Pour les stations où la température moyenne des eaux est basse (Lütschine près de Gsteig, p. ex.) le fort accroissement constaté entre 1987 et 1988 est moins marqué. On notera également la plus faible variabilité interannuelle des températures mesurées par ces stations. Les deux s'expliquent par l'effet stabilisateur exercé par les glaciers.*



Nous allons nous intéresser ci-après (fig. 37), sous l'angle qualitatif, au rapport existant entre les températures mensuelles de l'eau et de l'air dans trois régions typiques présentant des régimes d'écoulement différents (études menées par Pfammatter 2004). Il s'agit d'une forte simplification du système, mais elle est très révélatrice quant aux estimations futures de l'effet des changements climatiques sur la température des eaux. Les cours d'eau du Plateau (Broye ou Birse, p. ex.) sont alimentés en majeure partie par des sources et par les eaux souterraines. Pour ce type de cours d'eau, on trouve en règle générale un rapport linéaire entre la température de l'air et celle de l'eau, ce qui signifie concrètement que les mécanismes de réchauffement et de refroidissement en œuvre dans le bassin versant concerné s'équilibrent. Dans les régions où les cours d'eau alpins prennent leur source (Lütschine près de Gsteig, Rhône près de Sion), caractérisées par des régimes d'écoulement alpins, le degré d'englacement ainsi que l'extension et l'épaisseur du manteau neigeux jouent un rôle de premier plan. Jusqu'à 0 °C environ, le rapport peut être considéré comme linéaire. Au-dessus, l'eau de fonte de la neige et des glaciers vient s'ajouter à l'eau de source et aux eaux souterraines, ce qui atténue le rapport des températures air/eau. Dans le cas des stations de mesure installées en aval d'un lac (Aar près de Berne, p. ex.), l'effet de stockage de la chaleur exercé par le lac induit un décalage dans le temps (hystérèse): si avril et octobre se caractérisent tous deux par une température de l'air comparablement douce, la température moyenne de l'eau en octobre est plus chaude de plusieurs degrés.

Influence des eaux de fonte sur la température des cours d'eau

### 7.3 Evolution des températures de l'eau

La température moyenne de l'air est appelée à augmenter encore sur l'ensemble des saisons, ce qui entraînera inévitablement une augmentation de la température moyenne de l'eau. On ne dispose pas encore de chiffres précis concernant ce phénomène, mais des études sont en cours. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'EPFL (Laboratoire de mécanique des fluides et d'hydrologie) élabore par exemple une base de données homogénéisée destinée à la modélisation des températures de l'eau en Suisse. Dans le cadre du programme national de recherche PNR 61, le projet «Gestion intégrée de la qualité de l'eau de rivière» examine l'évolution future de la température des eaux (Fonds National Suisse 2010) et des projets similaires sont en cours en Allemagne et aux Pays-Bas. Des procédés statistiques ou déterministes entrent en ligne de compte pour la modélisation de la température des eaux (Pfammatter 2004, Huwald et al. 2010), mais des études récentes ont montré que les modèles de régression basés sur la température de l'air sont insuffisants, notamment pour les modifications à court terme de la température de l'eau. Ce type de modèles n'en restent pas moins prometteurs pour la question des effets du réchauffement de l'air sur la température des eaux, étant donné qu'on ne s'intéresse pas aux valeurs journalières et que la méthode est relativement facile à mettre en œuvre, à condition de disposer de suffisamment de données.

Nouveaux projets de recherche

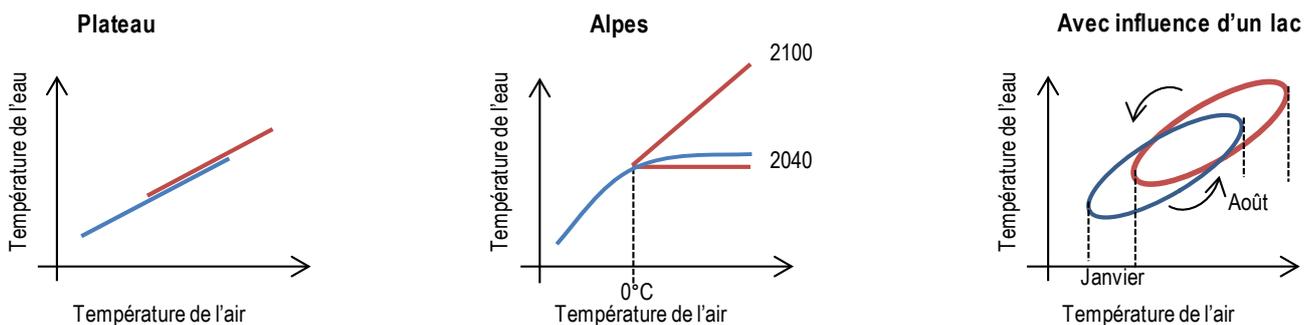
Il est possible d'élaborer des hypothèses sur la base des trois types de cours d'eau choisis (fig. 37). Ce dont on est sûr, c'est que la température des eaux subira l'influence des changements climatiques, et ce à double titre: premièrement du fait du réchauffement de l'air et deuxièmement du fait de modifications dans la répartition saisonnière des débits. Sur le Plateau, tout d'abord, on admet que le rapport linéaire vaudra également sous un climat plus chaud. Mais des niveaux d'eau peu élevés et des

Hypothèses concernant l'avenir

lits de rivière larges renforceront la tendance des cours d'eau à se réchauffer (OFEV, OFEG, MétéoSuisse 2004). Les périodes d'étiage devenant plus fréquentes (Meyer et al. 2011a), il faut s'attendre à ce que la température de l'eau réagisse fortement au réchauffement de l'air. Dans les régions fortement englacées, en revanche, la fonte des glaciers va probablement s'accélérer (jusqu'en 2040 env.). Cela pourrait diminuer la sensibilité à la température de l'air, voire entraîner une baisse des températures de l'eau. Dans le sillage de la disparition des glaciers, au cours de la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle, les débits devraient fortement diminuer en été et la température de l'eau augmenter de façon significative. Pour les stations influencées par la présence d'un lac, il faut s'attendre à un décalage de l'hystérèse, dont la forte diminution des débits estivaux pourrait modifier la forme. L'augmentation des volumes charriés en hiver et au printemps pourrait induire un réchauffement de l'eau. Ces diverses modifications se répercuteront certainement sur l'exploitation des eaux (déversements d'eau de refroidissement par l'industrie) et la pêche, notamment en été. Le réchauffement a déjà entraîné un retrait des truites dans des régions situées 100 à 200 m plus en altitude (Hari et al. 2006). La réduction des débits et le réchauffement de l'eau diminuent fortement les teneurs en oxygène et favorisent la dissémination de maladies des poissons comme la maladie rénale proliférative (PKD), aggravant la mortalité piscicole.

**Fig. 37 > Rapport entre les moyennes mensuelles de température de l'air et de l'eau**

Le régime d'écoulement d'un cours d'eau détermine la nature du rapport entre température moyenne de l'air et de l'eau (en bleu), d'où la nécessité d'en tenir compte dans l'évaluation des effets du réchauffement climatique (en rouge). Il existe bien sûr aussi des formes mixtes. Pour les bassins versants alpins, on part du principe que les glaciers auront disparu d'ici 2100. Les flèches figurant dans le schéma des bassins versants influencés par un lac montrent dans quel sens évoluent les températures de l'eau dans le cadre de l'hystérèse.



## 8 > Conclusions

---

Les efforts concertés du projet CCHydro ont permis pour la première fois d'établir des scénarios quantitatifs fiables quant aux futures modifications du cycle hydrologique sur l'ensemble du territoire suisse. L'élaboration de nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse, soutenue également par le projet CCHydro, constituait l'un des éléments clés pour pouvoir obtenir des résultats comparables et cohérents dans les différents modules du projet. Par là-même, la comparabilité des résultats est assurée également avec d'autres projets tant nationaux qu'internationaux (voir chap. 1).

### 8.1 Mesures d'adaptation

Alors même que la part d'incertitude des scénarios d'évolution du climat dans les Alpes suisses demeure importante, notamment pour ce qui touche aux précipitations, le projet CCHydro permet désormais d'établir des prédictions claires concernant l'évolution future du régime des eaux en Suisse. Les ressources en eau du pays ne subiront globalement que des changements mineurs et la Suisse restera le château d'eau de l'Europe. Cependant, une modification sensible de la distribution saisonnière des débits pourrait conduire à des déficits temporaires au niveau local ou régional, qui exigeront une adaptation des stratégies de gestion des eaux. Nous renvoyons sur ce point au postulat Hansjörg Walter «Eau et Agriculture. Les défis de demain», qui charge le Conseil fédéral d'élaborer un rapport présentant une stratégie de gestion durable de l'eau qui tienne compte des besoins des différents groupes d'utilisateurs. La stratégie devra fournir des ébauches de mesures et de solutions tant pour surmonter des événements à court terme, par exemple une pénurie d'eau passagère au niveau local, que pour relever des défis à long terme, par exemple la manière dont le Conseil fédéral entend réagir à la raréfaction générale des ressources en eau, notamment en raison des changements climatiques. Au moment où doit paraître le présent rapport, celui demandé par le postulat Walter se trouve en cours d'élaboration. Les propositions qu'il contient visent des mesures tant intersectorielles que sectorielles. A cet égard, le suivi permanent (monitoring) comme la détection précoce des changements touchant les eaux continueront de jouer un rôle de premier plan.

Dans le contexte de l'adaptation aux changements climatiques, le Conseil fédéral a approuvé au printemps 2012 le premier volet de sa stratégie «Adaptation aux changements climatiques en Suisse». Il y formule une série d'objectifs et y décrit les défis du jour, en définissant les champs d'action des divers secteurs concernés (OFEV 2012). Dans le domaine de la gestion des eaux, ce sont ainsi quatorze champs d'action qui ont été identifiés, présentant chacun un degré d'urgence spécifique. Le projet CCHydro fournit les bases hydrologiques essentielles qui devront permettre de concrétiser sous la forme d'un plan d'action les interventions et les objectifs possibles mentionnés dans la stratégie d'adaptation.

## 8.2

**Perspectives**

Le projet de recherche CCHydro a identifié les thématiques suivantes, qui requerront des recherches supplémentaires:

- > Quel est le degré d'incertitude des modèles climatiques régionaux, et quelle est la fiabilité des scénarios d'émissions?
- > Comment les fortes précipitations sont-elles appelées à se modifier et, avec elles, les crues rares (ampleur, lieu, moment)?
- > Comment les périodes de sécheresse se modifieront-elles, avec les étiages extrêmes qui en découlent?
- > Comment les variables indispensables aux modèles hydrologiques comme le rayonnement, la nébulosité, l'hygrométrie et la vitesse des vents vont-elles se modifier?
- > Comment évolueront les débits d'étiage dans les Préalpes et les Alpes, où les périodes d'étiage survenaient jusqu'ici en hiver?
- > Comment évoluera la température de l'eau, en lien avec la modification des régimes d'écoulement et l'évolution des débits d'étiage?

Outre ces questions hydrologiques, les chercheurs ont identifié des lacunes dans les données destinées à la modélisation, mais aussi au contrôle des résultats:

- > Les propriétés pédologiques importantes sur le plan hydrologique ne sont pas connues pour l'ensemble du territoire.
- > On ne collecte pas pour l'heure de données concernant l'humidité du sol et l'évaporation.
- > Les indications concernant les réserves d'eau sous forme de neige (équivalent en eau du manteau neigeux), particulièrement en altitude et pendant la période de fonte, comportent une grande marge d'incertitude.

Les méthodes de modélisation du cycle de l'eau évoluent en permanence. On ne sait par ailleurs toujours pas dans quelle mesure les paramètres de modélisation obtenus par comparaison des résultats de modélisations avec la réalité mesurée pourront être appliqués à l'avenir à des conditions climatiques et hydrologiques modifiées.

## 8.3

**Bilan**

Le projet de recherche «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro) a permis de rassembler les bases hydrologiques essentielles à la réflexion stratégique et à la prise de décisions. Grâce à des partenaires hautement qualifiés, il a été possible d'élaborer une solide base de connaissances, permettant pour la première fois d'évaluer pour l'ensemble de la Suisse les impacts futurs des changements climatiques sur les différents composants du cycle hydrologique. Une mise en réseau et une coordination efficaces ont été en tout temps assurées avec d'autres études en cours, comme celle consacrée aux effets des changements climatiques sur l'utilisation de la force hydraulique ou le Programme national de recherche 61 «Gestion durable de l'eau». Il est essentiel que les recherches se poursuivent sur ces diverses thématiques, et que l'on continue d'appliquer cette approche pluridisciplinaire qui a amplement fait ses preuves.

## > Bibliographie

### Rapports de projets partiels

Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Arnold J., Pall P., Schär C. 2011a: Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz. 14 p.

Huwald H., Tomasic N., Parlange M.B. 2010: Stream temperature evolution in Switzerland under climate change scenarios – Feasibility study. Laboratory of Environmental Fluid Mechanics and Hydrology. EPFL: 24 p.

Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011: Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten. 43 p.

Linsbauer A., Paul F., Haeberli W. 2012: Grossräumige Modellierung von Schwundzenarien für alle Schweizer Gletscher. Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete. Rapport final CCHydro, résultats du projet partiel CCGlinCH. 18 p.

Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2011a: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021–2050 und 2070–2099. 42 p.

Naef F. 2011: Untersuchung über die Auswirkungen der Zunahme der Hochwasserhäufigkeiten in neuerer Zeit und in Zukunft. 50 p.

VAW 2011: Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900–2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. 77 p.

Zappa M. et al. 2012: Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete der Schweiz (en préparation).

### Autres publications

AdaptAlp 2011: Adaptation to Climate Change in the Alpine Space – Work Package Water Regime (WP4). Summary Report. 24 p.

AlpWaterScarce 2011: Water Management in a Changing Environment – Strategies against Water Scarcity in the Alps – Project Outcomes and Recommendations. 76 p.

Aschwanden H., Weingartner R. 1985: Abflussregimes in der Schweiz. Pub. Gewässerkunde Nr. 65. Geographisches Institut der Universität Bern: 238 p.

Bernhard L., Zappa M., Bosshard T. 2011: Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete Alpenrhein und Engadin – Technical Report. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf.

Bosshard T. 2011c: Hydrological climate-impact modeling in the Rhine catchment down to Cologne. Thèse de doctorat de l'EPFZ 19861.

Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Schär C. 2011b: Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2777–2788.

CH2011, 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich: 88 p. ISBN 978-3-033-03065-7 (résumé français: Les scénarios du changement climatique en Suisse CH2011).

CHR 2010: Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin – Results of the RheinBlick 2050 Project. Report No 1–23 of the CHR: 212 p.

CIPC 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. Bilan établi par la Commission pour la protection contre les crues (CIPC) de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux (ASAE), revue Eau énergie air 99: p. 55–57.

Farinotti D., Huss M., Bauder A., Funk M. 2009: An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change* 68: 225–231.

Farinotti D., Usselman S., Huss M., Bauder A., Funk M. 2011: Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.8276.

Fonds national suisse de la recherche scientifique 2010: Gestion durable de l'eau. Portrait du Programme national de recherche PNR 61. Berne: 54 p.

Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J., Vidale P.L. 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of geophysical Research* 111.

GIEC 2008: Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse. Berlin.

Haeberli W., Hoelzle M. 1995: Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology* 21: 206–212.

Hänggi P., Bosshard T., Weingartner R. 2011: Swiss discharge regimes in a changing climate. In: Hänggi P.: Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz, thèse de doctorat de l'Université de Berne: 77–100.

Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. 2006: Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12: 10–26.

Hubacher R., Schädler B. 2010: Bilan hydrologique de grands bassins versants au 20<sup>e</sup> siècle. Planche 6.6. In: Weingartner R., Spreafico M. (éd.): Atlas hydrologique de la Suisse (HADES). Office fédéral de l'environnement, Berne.

- Huss M., Farinotti D., Bauder A., Funk M. 2008: Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes* 22(19), 3888–3902, doi:10.1002/hyp.7055.
- Jakob A. 2010: Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern – Langzeitbeobachtung. *GWA* 3/2010. p. 221–231.
- Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2010: How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences* 27: 111–119.
- Köplin N., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2012: Reducing hydrological climate-impact studies to their most important components: Assessment of a comprehensive set of mesoscale catchments in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* (submitted).
- Laternser M., Schneebeli M. 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps 1931–1999. *International Journal of Climatology* 23: 733–750.
- Linsbauer A., Paul F., Hoelzle M., Frey H., Haeberli W. 2009: The Swiss Alps without glaciers – a GIS-based modelling approach for reconstruction of glacier beds. *Proceedings of Geomorphometry 2009*. Zurich: 243–247.
- MétéoSuisse 2012a: Le climat aujourd’hui – Tendances en Suisse. [www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat\\_aujourd'hui/tendances\\_en\\_suisse.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui/tendances_en_suisse.html) (mars 2012).
- MétéoSuisse 2012b: Le climat aujourd’hui – Tendances par station. [www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat\\_aujourd'hui/evolution\\_aux\\_different\\_stations.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui/evolution_aux_different_stations.html) (mars 2012).
- Meyer 2012: Die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf Sommerniedrigwasser im Schweizer Mittelland basierend auf einer multi-variablen Kalibrierung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Thèse inaugurale présentée à la Faculté des sciences naturelles de l’Université de Berne.
- Meyer R., Schädler B., Viviroli D., Weingartner R. 2012b: Implications of projected climate change on summer low flow in the Swiss Plateau. *Hydrol. Sci. J.* (submitted).
- Meyer R., Viviroli D., Schädler B., Weingartner R. 2011b: Die Rolle des Basisabflusses bei der Modellierung von Niedrigwasserprozessen. In: *Klimaimpaktstudien Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 55(5): 244–257.
- Meyer R., Viviroli D., Schädler B., Weingartner R. 2012a: Multi-variable calibration for a sound modeling of low flow under future climates. *Hydrol. Proc.* (submitted).
- Naef F., Margreth M., Schmockler-Fackel P., Scherrer S. 2007: Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Revue Eau énergie air*.
- NELAK 2012: Nouveaux lacs créés par la fonte des glaciers en haute montagne: formation en fonction du climat et défis posés à une utilisation durable (projet NELAK du PNR 61, Géographie physique, Université de Zurich, en cours d’impression).
- OcCC 2008: Le climat change – que faire? Nouveau rapport du GIEC et les conséquences pour la Suisse. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques. Berne: 47 p.
- Oerlemans J., Giesen R.H., van den Broeke M.R. 2009: Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology* 55.
- OFEFP, OFEG, MétéoSuisse 2004. Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Cahier de l’environnement n° 369. Office fédéral de l’environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne: 174 p.
- OFEV 2012: Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d’action. Premier volet de la Stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne: 81 p.
- Paul F., Linsbauer A. 2012: Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines and a DEM. *International Journal of Geographical Information Science*.
- Paul F., Maisch M., Rothenbuehler C., Hoelzle M., Haeberli W. 2007: Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. *Global Planet Change* 55(4): 343–357.
- Pfammatter F. 2004: Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fliessgewässern. Travail de diplôme.
- Prein A.F., Gobiet F., Truhetz H. 2011: Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 20: 383–395.
- ProClim, OcCC (éd.) 2011: Que valent les modèles climatiques? Climate Press. Informations sur le sujet de la recherche sur le climat et le changement global n° 30.
- Rapports glaciologiques (1881–2011): Les glaciers des Alpes suisses. *Annuaire de la Commission d’experts pour la cryosphère de l’Académie suisse des sciences naturelle (SCNAT)* 1–128. Edité depuis 1964 par les Laboratoires de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l’EPFZ. <http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>.
- Schädler B. 1985. Der Wasserhaushalt der Schweiz. Mitteilung der Landeshydrologie.
- Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.

Schürch M. 2011: Groupe de travail «Eaux souterraines et climat». Effets du changement climatique sur les eaux souterraines. GWA 3/2011: 177–182.

Serquet G., Marty C., Dulex J.-P., Rebetez M. 2011: Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical research letters* 38.

SSH, CHy (Hrsg.) 2011: Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique. Rapport de synthèse. Matériaux pour l'hydrologie de la Suisse n° 38. Berne: 28 p.

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: 1209–1222.

Volken D. 2010: Projektbericht. CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Bd. 54: 143–146.

Weingartner R., Aschwanden H. 1992: Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits. In: Atlas hydrologique de la Suisse, planche 5.2, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

WGMS, Haeberli W., Gärtner-Roer I., Hoelzle M., Paul F., Zemp M. 2009: Glacier Mass Balance Bulletin No. 9 (2006–2007), CSU (FAGS) / IUGG (IACS) / UNEP / UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich.

Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F. 2006: Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* 33.

Zumbühl H.J., Steiner D., Nussbaumer S.U. 2008: 19th century glacier representations and fluctuations in the central and western European Alps: an interdisciplinary approach. *Global and Planetary Change* 60: 42–57.

# > Index

## Figures

<b>Fig. 1</b> Ecart à la norme constatés pour les températures annuelles moyennes entre 1961 et 1990 en Suisse	23	<b>Fig. 12</b> Evolution des glaciers de la région d'Aletsch jusqu'en 2090	36
<b>Fig. 2</b> Répartition spatiale des écarts constatés pour les précipitations annuelles des derniers 50 ans par rapport à la période 1961–1990	23	<b>Fig. 13</b> Extrait de la modélisation à l'échelle de la Suisse pour la région d'Aletsch sur la base du modèle de diminution de l'épaisseur	37
<b>Fig. 3</b> Répartition spatiale des modifications constatées dans les précipitations annuelles entre 1982 et 2011 en Suisse	24	<b>Fig. 14</b> Glacier de Silvretta	37
<b>Fig. 4</b> Emissions globales de gaz à effet de serre, Evolution des températures, Evolution des précipitations	25	<b>Fig. 15</b> Evolution des volumes d'eau stockés dans les glaciers suisses (bassins versants du Rhône et du Rhin, Engadine et Tessin) depuis la fin du petit âge glaciaire	39
<b>Fig. 5</b> Variations annuelles des signaux de changement climatique pour les températures et pour les précipitations pour la station de Berne/Zollikofen et pour les deux périodes de projection 2021–2050 (en haut) et 2070–2099 (en bas)	26	<b>Fig. 16</b> Quantités annuelles d'eaux de fonte provenant de la neige dans les principaux bassins versants de Suisse (moyennes établies sur la période 1980–2009, en km <sup>3</sup> )	40
<b>Fig. 6</b> Répartition spatiale des changements observés dans les précipitations pour les périodes 2021–2050 et 2070–2099 par rapport à la période 1980–2009	27	<b>Fig. 17</b> Evolution sur l'année des équivalents en eau du manteau neigeux (lignes de couleur, en mm) estimés en Suisse pour la période 2070–2099 par rapport à la moyenne établie sur la période 1980–2009 (en noir), sur la base des différentes chaînes de modèles climatiques	41
<b>Fig. 7</b> Evolution du climat en Suisse pour les périodes 2021–2050 et 2070–2099 selon le scénario d'émissions A1B	28	<b>Fig. 18</b> Part des précipitations neigeuses dans les précipitations totales pour diverses régions fortement englacées, avec indication de l'altitude moyenne	42
<b>Fig. 8</b> Modification attendue dans la répartition des températures estivales par rapport à 1961–1990	29	<b>Fig. 19</b> Diminution en pour cent du volume d'eaux de fonte stockées sous forme de neige (voir Fig. 16) pour tous principaux bassins versants du pays et pour les deux périodes de projection	43
<b>Fig. 9</b> Le glacier d'Aletsch photographié en 1880, puis en 2010, de l'hôtel Belalp	32	<b>Fig. 20</b> Bilan hydrique moyen de la Suisse de 1901 à 2000	45
<b>Fig. 10</b> Variations de longueur du glacier du Trient et du glacier d'Aletsch (Grosser Aletschgletscher)	33	<b>Fig. 21</b> Représentation des débits mensuels (coefficients de Pardé) de seize régimes caractéristiques en Suisse	48
<b>Fig. 11</b> Evolution relative des surfaces entre 1985 et 2100 pour chaque bassin versant séparément et pour toute la Suisse, conformément au modèle de diminution des épaisseurs utilisé pour la modélisation à l'échelle de la Suisse	35	<b>Fig. 22</b> Passage du régime caractéristique du bassin versant de la Simme jusqu'à son embouchure dans la Kander d'un régime <i>nival de transition</i> (CTRL, 2035) à un nouveau régime (2085) proche du nivo-pluvial jurassien	48
		<b>Fig. 23</b> Régimes des eaux de 189 bassins versants de méso-échelle en Suisse	49
		<b>Fig. 24</b> Représentation des coefficients de Pardé pour le nouveau type de régime <i>pluvial de transition</i>	50

<p><b>Fig. 25</b> Modification de la fréquence des régimes d'écoulement en Suisse pour les principaux groupes de régimes selon la Fig. 21</p> <p><b>Fig. 26</b> Projections pour les débits de l'Aar à son embouchure dans le Rhin</p> <p><b>Fig. 27</b> Répartition des bassins versants en sept types (clusters) C1 à C7 se comportant de façon semblable en termes d'évolution des températures, des précipitations et des débits</p> <p><b>Fig. 28</b> Evolution du débit hivernal moyen (dQ hiver: décembre – février) par rapport à la modification du débit estival moyen (dQ été: juin – août) pour l'ensemble des 189 bassins versants examinés, avec indication des régimes enregistrés entre 1950 et 1980</p> <p><b>Fig. 29</b> Evolution dans le temps des débits saisonniers dans le bassin versant des glaciers d'Aletsch (surface englacée 123 km<sup>2</sup>, altitude moyenne 2925 m) et du glacier du Trift (18 km<sup>2</sup>, 2570 m), en moyenne sur trente ans</p> <p><b>Fig. 30</b> Débits annuels enregistrés à la station de mesure de l'OFEV de Massa, près de Blatten (Naters), qui mesure les débits dans le bassin versant des glaciers d'Aletsch depuis 1922</p> <p><b>Fig. 31</b> Evolution des débits spécifiques dans les bassins versants englacés sous revue</p> <p><b>Fig. 32</b> Evolution des ressources en eau dans les principaux bassins versant du pays</p> <p><b>Fig. 33</b> Débit du Rhin près de Bâle</p> <p><b>Fig. 34</b> Débit de la Massa près de Blatten (Naters)</p> <p><b>Fig. 35</b> Comparaison de la durée moyenne des débits inférieurs au 95<sup>e</sup> centile pendant la période de référence avec les durées correspondantes des périodes de projection: à gauche à court terme (2035), à droite à long terme (2085)</p> <p><b>Fig. 36</b> Evolution de la température des eaux sur ces dernières décennies pour neuf stations et pour Bâle (temp.de l'air)</p> <p><b>Fig. 37</b> Rapport entre les moyennes mensuelles de température de l'air et de l'eau</p>	<p>51</p> <p>52</p> <p>54</p> <p>55</p> <p>56</p> <p>57</p> <p>58</p> <p>59</p> <p>61</p> <p>61</p> <p>62</p> <p>66</p> <p>68</p>	<p><b>Tableaux</b></p> <hr/> <p><b>Tab. 1</b> Réservoirs d'eau en Suisse</p> <p><b>Tab. 2</b> Evolution des débits moyens dans les principaux bassins versants de Suisse, compte tenu des apports de l'étranger</p>	<p>46</p> <p>59</p>
--	---	---	---------------------