

PNR 61 – Synthèse thématique 1
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

Ressources en eau de la Suisse

Ressources disponibles et utilisation – aujourd'hui et demain

Astrid Björnsen Gurung et Manfred Stähli



Gestion durable de l'eau
Programme national de recherche PNR 61



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

PNR 61 – Synthèse thématique 1
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

Ressources en eau de la Suisse

Ressources disponibles et utilisation – aujourd'hui et demain

Astrid Björnsen Gurung et Manfred Stähli

Mentions légales

Auteurs:

D^r Astrid Björnsen Gurung, WSL

D^r Manfred Stähli, WSL

Recommandations relatives aux citations: Astrid Björnsen Gurung; Manfred Stähli (2014): Ressources en eau de la Suisse: Ressources disponibles et utilisation – aujourd’hui et demain. Synthèse thématique 1 dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l’eau», Berne.

Conceptualisé et publié avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l’eau».



Gestion durable de l'eau
Programme national de recherche PNR 61



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Comité de direction: P^r em. Christian Leibundgut (président), Université de Fribourg-en-Brigau; P^r Günter Blöschl, Technische Universität Wien; P^r Dietrich Borchardt, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig; Ulrich Bundi (jusqu'à 2013), autrefois Eawag, Dübendorf; P^r Bernd Hansjürgens, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig; P^r Bruno Merz, GeoForschungsZentrum, Potsdam; P^r em. (Universität Wien) Franz Nobilis, conseiller ministériel auprès du Lebensministerium (Sektion Wasser, Hydrographisches Zentralbüro), Vienne

Conseil consultatif: D^r Christoph Böhnner, Service des forêts et du paysage, Canton de Lucerne; Katharina Dobler (jusqu'à 2013), Office des affaires communales et de l'organisation du territoire, Canton de Berne; D^r Anton Kilchmann, Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux (SSIGE); Roger Pfammatter, Association suisse pour l'aménagement des eaux (ASAE); Irène Schmidli (jusqu'à 2011), autrefois Office des eaux et des déchets, Canton de Berne; Moritz Steiner, Service de l'énergie et des forces hydrauliques, Canton du Valais; Adèle Thorens Goumaz, conseillère nationale VD, Verts; Luca Vetterli, Pro Natura Ticino; Hansjörg Walter, conseiller national TG, UDC; Martin Würsten, Service de l'environnement, Canton de Soleure

Déléguée de la division IV du Conseil national de la recherche: P^r Nina Buchmann, EPF Zurich

Représentant de la Confédération: PD D^r Stephan Müller, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne

Coordinatrice du Programme: D^r Barbara Flückiger Schwarzenbach, Fonds national suisse FNS, Berne

Chargée d'échanges de connaissances: D^r Patricia Fry, Wissensmanagement Umwelt, Zurich

Porte-parole: D^r Bruno Schädler, Université de Berne

Vidéo, arrêts sur image et citations: Patricia Fry, Wissensmanagement Umwelt; Renata Grünenfelder, Halbbild Halbtou

Mise en page et graphiques: Esther Schreier, Ilaria Curti, Bâle; Guido Köhler, Atelier Guido Köhler & Co., Binningen

Impression: PrintMediaWorks, Schopfheim im Wiesental

Papier: LuxoSatin, certifié FSC, 135 g/m² (contenu), 250 g/m² (couverture)

Traduction(s): Trad8, Delémont

Photos de couverture: Patricia Fry, arrêts sur image tirés des projets SACFLOOD, HYDROSERV, NELAK, GW-TEMP, WATERCHANNELS. Photos de fond Beat Ernst, Bâle

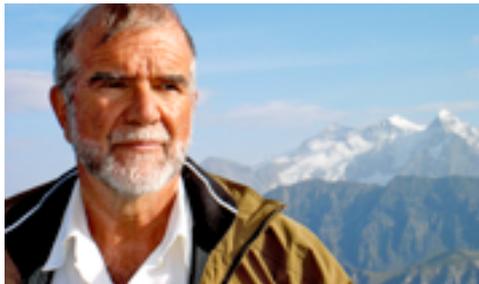
Illustrations et citations: sauf par indication contraire, les illustrations et citations utilisées proviennent des clips vidéo du PNR 61 «Aperçu» et «Perspectives», cf. www.pnr61.ch. L'abréviation du projet PNR 61 indiquent la source correspondante dans chaque cas. Les citations reflètent l'opinion des personnes à l'écran.

Pour ce qui a trait aux résultats de recherche mentionnés, la responsabilité en échoit aux équipes de recherche concernées; pour les synthèses thématiques et les recommandations, la responsabilité incombe aux auteurs concernés dont les conclusions ne doivent pas nécessairement correspondre aux opinions du Fonds national suisse, des membres du comité de direction ou du Conseil consultatif.

Table des matières

| | |
|-----------|---|
| 4 | Avant-propos |
| 6 | Résumé |
| 7 | Summary |
| 8 | Les ressources en eau de la Suisse: situation actuelle |
| 8 | Disponibilité et distribution de l'eau |
| 12 | Pénurie d'eau |
| 16 | Crue |
| 17 | Etat écologique |
| 21 | Gestion actuelle des ressources en eau |
| 21 | Approvisionnement en eau potable |
| 22 | Gestion de l'énergie |
| 25 | Agriculture |
| 27 | Zones d'habitation et de circulation |
| 28 | Industrie et commerce |
| 28 | Exploitation de matières premières |
| 29 | Navigation |
| 29 | Tourisme |
| 30 | Gouvernance de l'eau et infrastructure hydraulique |
| 33 | Changement climatique et évolution de la société: les répercussions sur les ressources naturelles en eau |
| 33 | Modifications liées au climat et conséquences jusqu'en 2050 et 2085 |
| 34 | Précipitations et évaporation |
| 36 | Glaciers |
| 38 | Eau de surface |
| 39 | Eau souterraine |
| 41 | Débit |
| 44 | Eaux de surface |
| 45 | Sollicitations futures de la société et de la nature |
| 45 | Evolution du paysage et de l'utilisation du sol |
| 47 | Surfaces d'habitation et de circulation, infrastructures et navigation |
| 48 | Gestion de l'énergie |
| 49 | Agriculture |
| 52 | Evolution de la forêt |
| 53 | Tourisme |
| 53 | Protection des eaux |
| 54 | Conclusions |
| 56 | Index des illustrations |
| 56 | Index des tableaux |
| 56 | Bibliographie |
| 67 | Remerciements |
| 68 | Annexe |
| 68 | Qu'est-ce que le PNR 61? |
| 68 | Les 16 projets de recherche du PNR 61 |
| 70 | Produits du PNR 61 |

Avant-propos



Pr em. Dr Christian Leibundgut

Le Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61) a été lancé en 2008 afin de jeter **les bases d'une stratégie d'avenir visant à garantir les ressources hydriques et l'économie de l'eau en Suisse.**

Il est apparu dès le départ que le changement climatique et les évolutions sociales, notamment l'urbanisation croissante de la Suisse et les ouvertures de marché à l'international, pèsent considérablement sur les ressources en eau. En outre, des facteurs politiques et économiques, souvent imprévisibles et dont les conséquences sont difficilement évaluable, entravent l'utilisation durable de l'eau à laquelle l'on aspire.

Ce vaste programme a permis de synthétiser et de consolider le potentiel élevé que recèle la recherche sur l'eau en Suisse. Les facteurs d'influence ne pouvant être qu'en partie maîtrisés, il conviendrait d'affiner les connaissances scientifiques existantes par le biais de la recherche, de les associer au plan stratégique et de les orienter vers un objectif commun afin de jeter les bases d'une stratégie nationale de l'eau. Cette démarche implique un **changement de paradigme** de manière à passer d'une observation partielle des problématiques liées à l'eau à une considération globale des systèmes et des bassins hydrologiques. Les ressources en eau doivent dès lors être prises en compte dans un contexte global intégrant à la fois les autres ressources et les champs d'action sociaux, parmi lesquels la production énergétique, la production agricole et forestière sans oublier les synergies notamment générées par la force hydraulique, la correction et la revitalisation des cours d'eau, le développement de l'urbanisation et l'implantation d'activités artisanales et industrielles, le tourisme et le secteur des loisirs.

Ce programme privilégie une **approche transdisciplinaire**. La recherche a dès le début impliqué les parties prenantes et mis l'accent sur les modalités concrètes de mise en œuvre des résultats obtenus. Des groupes d'utilisateurs expérimentés ont ainsi contribué à l'élaboration d'outils concrets, notamment des guides et des modèles. Cette méthode de travail conceptuelle inhérente au programme, fondée sur une approche d'intégration et d'échange entre recherche et application, est de nature à faciliter une mise en œuvre concrète aux effets durables.

Une gestion durable de l'eau ne peut être conçue et réalisée, sur un plan conceptuel, qu'en tenant compte d'autres domaines de la vie et de l'économie. C'est la raison pour laquelle **l'approche globale et intégrée** est fondamentalement au cœur des travaux relatifs au PNR 61; elle joue un rôle déterminant dans une gestion efficace de l'eau et dans la politique de l'eau y afférente en Suisse (gouvernance de l'eau).

Nul ne pouvait se douter, au premier stade du programme, que les «facteurs d'influence incontrôlables» se manifesteraient aussi rapidement. La politique énergétique européenne a notamment amorcé une transition énergétique accélérée, laquelle aura des conséquences considérables également sur le secteur de l'eau en Suisse. **La stratégie de l'eau** que nous visons a été temporairement ajournée, aussi manque-t-il un solide pilier sur la base duquel effectuer une pesée des intérêts incluant d'autres domaines politiques (la politique énergétique notamment), dans une vision intégrée et solidement ancrée à tous égards.

Cette évolution montre à quelle vitesse les facteurs d'influence et les forces en présence peuvent changer et souligne la nécessité de déployer en temps utile une démarche de prévention.

Le PNR 61 s'est consacré aux aspects centraux de l'économie des eaux en Suisse dans le cadre de **16 projets**. **Quatre synthèses thématiques** reprenant les points importants avaient pour but de coordonner les résultats du projet à l'intention des experts de la Confédération, des cantons et sur le terrain **et de tirer les conclusions générales**. Des résultats de recherches menées à l'externe ont également été intégrés de manière à obtenir **une vue d'ensemble de l'utilisation durable de l'eau en Suisse à l'avenir**. Ces éléments sont exposés dans **la synthèse globale**.

Les cinq rapports de synthèse à présent disponibles de ce Programme national de recherche constituent un aide-mémoire des plus intéressants sur l'utilisation et la gestion de l'eau en Suisse. Ils montrent comment le secteur de l'eau pourrait être organisé à l'avenir en Suisse, les devoirs qui nous incombent et les mesures de prévention à conseiller.

Un grand merci à tous ceux qui se sont impliqués dans ce programme avec enthousiasme tout au long de ces années: aux chercheurs, aux membres du comité de direction et du Conseil consultatif, à la chargée d'échanges de connaissances, à la coordinatrice du programme et aux autres collaborateurs du FNS, aux représentants de l'OFEV et des autres offices fédéraux, aux cantons, aux régions, aux communes et aux associations, ainsi qu'aux auteurs des synthèses.

Le président du comité de direction du PNR 61

Christian Leibundgut





A gauche: les montagnes comme capteurs de nuages. (Photo DDPS)

Au milieu: les marais, des réserves d'eau efficaces. (Photo Ariel Bergamini)

A droite: les producteurs d'énergie hydraulique seront touchés par les conséquences du changement climatique. (FUGE)

Résumé

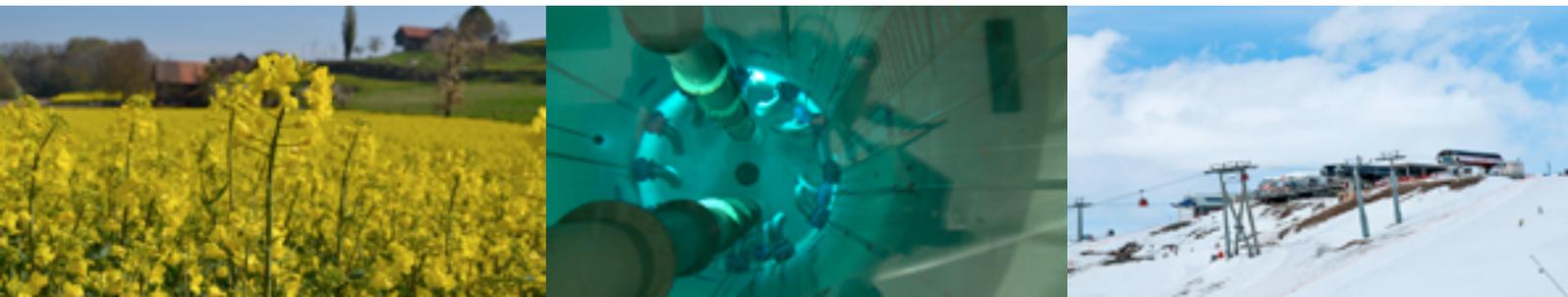
En Suisse, le massif des Alpes et ses sommets culminant jusqu'à 4810 m d'altitude forment **une barrière climatique** qui entraîne les masses d'air humide en altitude. La Suisse bénéficie dès lors de précipitations pluvieuses et neigeuses supérieures à la moyenne [1]. Le pays est considéré comme **le château d'eau de l'Europe**, car d'importants fleuves y prennent leur source. Les effets déjà tangibles du changement climatique, conjugués aux évolutions démographiques, économiques et politiques, pèsent considérablement sur les ressources en eau et leur utilisation en Suisse. La présente synthèse thématique décrit les **principes régissant les ressources en eau actuelles et leur utilisation** en Suisse et esquisse **les futures conditions cadres** climatiques et sociales. Elle montre clairement que les ressources en eau sont limitées et que des ajustements s'imposent dans de nombreux secteurs, principalement la gestion de l'eau et de l'électricité, l'industrie et le commerce, l'agriculture, la navigation et le tourisme. Afin de disposer, à l'avenir également, de ressources en qualité et en quantité suffisantes, la recherche sur l'eau en Suisse se doit de proposer, en plus de connaissances systémiques fiables, des grands principes pour définir des objectifs sociaux et poser les bons jalons.

Même si le volume d'eau disponible chaque année ne diminue que faiblement d'ici à la fin du siècle, **les ressources en eau des régions alpines** évolueront sensiblement, dans le temps et dans l'espace, sous l'effet du changement climatique, en particulier après 2050. La baisse de la capacité de stockage de la neige et des glaciers aura en particulier des répercussions sur le tourisme hivernal et sur l'énergie hydraulique. Les exploitants des centrales hydroélectriques doivent s'adapter à de nouveaux régimes de débits, à une plus grande capacité de charriage et à de nouvelles situations de dangers, autant d'évolutions résultant de la fonte des glaciers et de l'apparition de nouveaux lacs glaciaires.

Sur **le Plateau**, les futures conditions climatiques entraîneront, d'une part, une augmentation des risques de crues et, d'autre part, une forte diminution des débits en fin d'été, ce qui devrait en particulier limiter dans le temps la navigation sur le Rhin. En outre, le changement climatique influera indirecte-

ment sur de nombreuses **réserves d'eau souterraine** qui seront à l'avenir exposées plus souvent à des épisodes de sécheresse prolongée en été. Si le PNR 61 a permis de recenser avec une plus grande précision les nappes aquifères abondantes en Suisse, en particulier dans les régions karstiques, il démontre simultanément que nombre d'entre elles ne sont pas utilisables en raison de restrictions d'ordre technique, économique, écologique ou juridique. Dans **les zones** à forte densité de population **du Plateau, la demande croissante** et les nouveaux apports de polluants ont une incidence supérieure à celle du climat sur la quantité et la qualité des ressources hydriques. Les eaux souterraines utilisables à long terme y sont insuffisantes, en particulier pendant les périodes de sécheresse prolongée.

Compte tenu de la diversité des usages de l'eau ayant une incidence sur les cours d'eau de la Suisse, qui plus est sur un territoire restreint, **la gestion durable de l'eau** ne doit pas s'intéresser uniquement aux ressources en eau et à la préservation d'une eau de qualité, mais prendre **en considération l'ensemble de l'espace réservé aux eaux** qui produit, préserve et stocke la ressource «eau». Située à l'amont d'importants fleuves et cours d'eau, la Suisse endosse par ailleurs une responsabilité envers les pays limitrophes. **Outre une stratégie suisse de gestion de l'eau, il convient également d'adopter une vision transfrontalière de l'utilisation future de l'espace et des ressources** qui fasse une place de choix aux ressources hydriques et à leur utilisation. Dans cette perspective, la Suisse peut s'appuyer sur plusieurs séries de mesures et sur des banques de données fournies. En comblant les lacunes en matière de données (p. ex. humidité du sol ou charriage) et en intensifiant la collaboration entre les différents acteurs, les connaissances systémiques pourraient être encore développées et mieux utilisées au profit de la gestion durable de l'eau. Une chose est sûre: grâce aux montagnes, la Suisse bénéficiera également à l'avenir de précipitations abondantes et de forts débits. En tant que communauté, **nous nous devons de poser aujourd'hui les jalons pour les générations futures**. Les projets du PNR 61 ont mis à disposition les connaissances nécessaires et élaboré les instruments les mieux adaptés.



Summary

The Alps are an obstacle. With summits of up to 4,810 metres above sea level, they function as a barrier pushing water-saturated air up into cooler spheres, thereby triggering above-average rainfall and snowfall [1]. As many important rivers originate in Switzerland, the country is referred to as the «water tower» of Europe. Climate change has already altered this setting. At the same time, demographic, economic and political drivers influence water availability and demand in Switzerland.

This thematic synthesis presents the **foundations of today's water availability and management** in Switzerland and outlines the **anticipated future situation** with regard to climate and society. The synthesis makes clear that even in Switzerland water resources can become scarce and, as a consequence, call for adaptation measures. **Water management agencies and hydropower companies will be particularly affected alongside industry, agriculture, shipping and tourism.** In order to provide sufficient water of adequate quality also in future, Swiss water research is asked to generate sound systems knowledge. Of equal importance though is the provision of expertise to formulate social targets and, closely related, the development of appropriate steering instruments to reach those targets.

Even though the annual water availability will not significantly decrease until the end of the century, climate change will affect the spatial and temporal **water availability in Alpine areas**, particularly in the second half of the century. The dwindling storage capacity of snow and glaciers will notably have an impact on winter tourism and hydropower production. Operators of hydropower plants will have to cope with altered discharge regimes, increased sediment supplies and new hazards triggered by melting glaciers and emerging glacial lakes.

On the **central plateau** (Mittelland), the future climate will alter flood hazards in general and increase the number of low-flow situations in late summer, affecting, for instance, shipping on the river Rhine. Indirectly, **groundwater storage** will be affected and will reach critical levels during **the more frequent summer droughts**. Although the research conducted by NRP 61 succeeded in quantifying Switzerland's groundwater storage capacities, which

are abundant particularly in Karst areas, the results reveal that many of those vast groundwater resources cannot be exploited due to technical, economic, ecological and legal restrictions. In the densely populated **regions of the central plateau**, it is not so much the changing climate but the **growing user demands** and new polluting factors that affect water availability and quality. The amount of groundwater that can be sustainably used on the plateau is insufficiently described, especially during extended drought events.

Due to the wide range of overlapping user demands that have an impact on rivers and lakes in Switzerland, **sustainable water management** cannot solely focus on water quantity and quality but **needs to encompass the entire aquatic system**, i.e. the system that generates, sustains and stores the water. Moreover, the locational advantage of Switzerland entails a high responsibility towards downstream neighbours. Accordingly, **a cross-border vision for future spatial planning and resource use** – within which water availability and management plays a central role – **needs to be developed in addition to a Swiss water strategy**. To this end, Switzerland can take stock of long-term monitoring data and extensive databases. The closure of knowledge gaps (e.g. soil moisture or sediment transport) and increased cooperation could enhance system knowledge as a whole and thereby facilitate the expansion of sustainable water management and use.

No doubt, mountains will trigger ample precipitation and run-off also in future. **Yet, today's society needs to set the course for the generations to come.** With this in mind, the projects of NRP 61 have elaborated the necessary knowledge and suitable tools.

A gauche et à droite: face au changement climatique, l'agriculture et le tourisme devront s'adapter. (AGWAM)

Au milieu: puits de prélèvement des eaux souterraines. (GW-TEMP)

A droite: Mont-Lauchaux. (Photo Emmanuel Rey)

Les ressources en eau de la Suisse: situation actuelle

La Suisse est privilégiée: en plus de précipitations régulières, le pays bénéficie d'énormes réserves d'eau qui représentent six fois le volume annuel de précipitations. La loi fédérale sur la protection des eaux garantit la protection des ressources en eau et des milieux naturels, préservant ainsi leur utilisation. Le présent chapitre explique clairement que les utilisations des ressources en eau varient non seulement dans le temps et dans l'espace, mais qu'elles peuvent également être sensiblement réduites sous l'effet des apports en substances nutritives et polluantes ou de la température. Pour disposer d'une vision globale des ressources hydriques de la Suisse, il convient de prendre en compte, outre les impératifs de la société et de l'économie, les besoins de l'écosystème.

Disponibilité et distribution de l'eau

Avec un volume de 363 km³ environ, la Suisse dispose de réserves d'eau abondantes. Si l'on divise le volume d'eau renouvelé chaque année (40 km³) par le nombre d'habitants (8 millions), l'on obtient un volume d'eau de 5000 m³ d'eau par personne. C'est certes beaucoup. Cependant, il n'est pas possible de capter toute cette eau et de la mettre à disposition au bon endroit, au bon moment, dans la quantité et la qualité requises. Les ressources en eau effectivement disponibles varient considérablement selon les saisons, la topographie et le sous-sol. Pour les utiliser, il faut déterminer leur volume et leur qualité. En Suisse, la surveillance des eaux de surface et des eaux souterraines par un vaste réseau de stations de mesure permet de détecter à temps les fluctuations de niveaux, les impuretés et autres modifications problématiques et de prendre les contre-mesures qui s'imposent.

Réseaux de mesures

Si la quantité et la qualité des ressources en eau sont généralement bien enregistrées, la coordination, la mise en réseau et la disponibilité des données gagneraient quant à elles à être améliorées [2]. Des efforts en ce sens sont déployés au niveau fédéral pour mettre en place un système d'observation de l'environnement à l'échelle de la Suisse (RSO). Les réseaux de mesures ci-après sont particulièrement importants dans le cadre de la gestion durable de l'eau.

Le **réseau de base** de l'Office fédéral de l'environnement mesure les niveaux d'eau ainsi que les débits des eaux de surface et sert de référence pour la protection contre les crues, l'utilisation de l'énergie hydraulique et l'étude des conséquences du chan-

gement climatique. En outre, la Surveillance nationale continue des cours d'eaux (**NADUF**) fournit des informations sur la qualité de l'eau. Les mesures effectuées portent notamment sur la température de l'eau et la concentration en nutriments et en polluants. Le réseau de mesures de l'Observation nationale de la qualité des eaux de surface (**NAWA**) est beaucoup plus dense; la Confédération et les cantons y documentent l'état et l'évolution des eaux à l'aide de paramètres physico-chimiques et biologiques. En collaboration avec la Confédération, les universités, les entreprises de distribution d'eau et les cantons, l'Observation nationale des eaux souterraines (**NAQUA**) enregistre des données quantitatives et qualitatives, établissant ainsi des bases pour la protection coordonnée des eaux souterraines suisses. Dans le cadre du programme NAQUA, le module **ISOT** a été créé pour observer les isotopes dans le cycle de l'eau. Différentes institutions prennent part au niveau national aux mesures d'isotopes dans l'eau de pluie, les cours d'eau, les lacs, les glaciers, la neige et l'eau souterraine [3]. Les mesures d'isotopes permettent l'enregistrement des volumes d'eau, des voies d'écoulement et des temps de séjour aux différents stades du cycle de l'eau. Indispensable à la réalisation de nombreuses prévisions et modélisations, le système intercantonal de mesure et d'information **IMIS** fournit des informations sur la hauteur de la couverture de neige et d'autres paramètres climatiques à des altitudes élevées dans toutes les Alpes suisses. Les données transmises toutes les heures servent à différentes prévisions (enneigement, risques d'avalanche, débit et dangers naturels). La surveillance des sédiments est également importante pour l'évaluation des risques mais aussi pour la renaturation des eaux. Sous l'égide de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), **SOLID** est l'un des rares réseaux de mesures du volume des sédiments du monde privilégiant une approche à grande échelle et à long terme [4]. En outre, l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) réalise régulièrement des mesures indirectes de l'intensité du charriage au moyen système Swiss Plate Geophone dans plusieurs bassins versants. Les données climatiques des précipitations, du rayonnement et de la vapeur d'eau, telles qu'elles sont relevées par le réseau automatique de mesure au sol (**SwissMetNet**) et, depuis des décennies, par le réseau manuel de mesures des précipitations de MétéoSuisse, sont également utiles pour le cycle de l'eau. Pour l'évaluation de l'état écologique des eaux de surface, le **système modulaire gradué** a été développé en collaboration avec la Confédération, les cantons et l'Institut de recherche sur l'eau (Eawag) [5] (ill. 1).



La Suisse dispose d'un grand nombre de données concernant les ressources en eau, leur état et leur répartition. Il subsiste toutefois des **lacunes**. Les données sur l'évaporation et l'humidité du sol, qui seraient importantes pour de nombreux modèles hydrologiques et pour les prévisions des périodes de sécheresse (cf. DROUGHT-CH), ne sont accessibles, en Suisse que ponctuellement dans le cadre de projets distincts (SwissFluxnet pour l'évaporation, SwissSMEX pour l'humidité du sol). Exigeantes du point de vue technique, les observations liées au charriage et au transport de sédiments sont également insuffisantes, tout comme les observations de l'état écologique des cours d'eau. Généralement, les données des régions alpines sont moins fiables que celles du Plateau. En plus de la question de l'accessibilité, cela est dû au fait que les programmes de mesure à long terme sont souvent créés pour répondre à des problèmes spécifiques (p. ex. la fertilisation excessive). **Les données relatives à la demande et à la consommation** sont souvent insuffisantes, y compris à l'échelle cantonale, et se fondent essentiellement sur les volumes des concessions, des estimations et des projections. Ce constat est également valable pour la consommation d'eau des canaux d'irrigation traditionnels dans le Valais (MONTANAQUA [6]).

Précipitations, évaporation et débit

Avec un volume annuel de précipitations de 60 km³ environ, la Suisse bénéficie de fortes précipitations. Il est très difficile de faire des commentaires sur les modifications des précipitations au cours du siècle dernier, en rai-

son de la forte variabilité naturelle [7]. De plus, les **précipitations** annuelles moyennes oscillent entre des valeurs maximales > 2300 mm/an dans les Alpes bernoises et valaisannes, des valeurs élevées dans le Tessin et des valeurs minimales (800-900 mm/an) dans le Seeland, la région du lac de Constance, la région de Bâle, mais aussi dans le Valais et en Engadine [8]. Les précipitations sont moins importantes en hiver qu'en été [1]. Deux tiers des précipitations tombent sous forme de pluie, un tiers sous forme de neige [9].

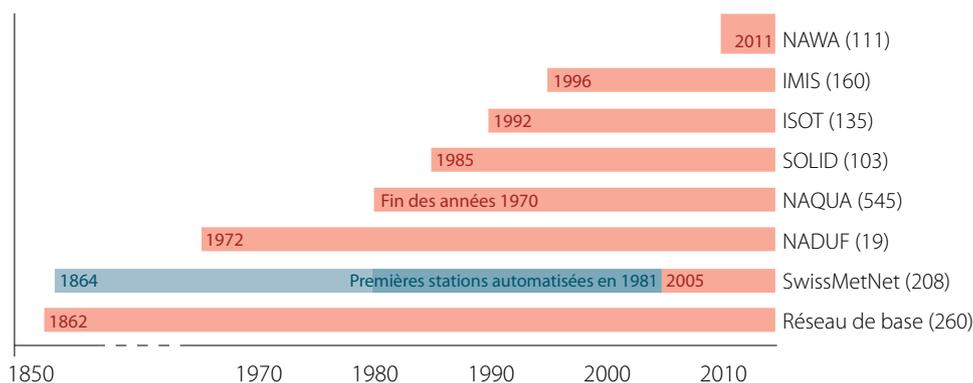
La **neige**, composante clé du système climatique, a fait l'objet de nombreuses recherches, y compris en relation avec le réchauffement climatique. Non seulement la présence de neige est influencée par le climat, mais elle a elle-même une incidence sur le climat. Etant donné que la couche de neige réfléchit les rayons du soleil bien plus que ne le ferait le sol à nu, l'air reste frais au-dessus des paysages enneigés. Il ne faut pas oublier que le stockage des précipitations sous forme de neige retarde les écoulements, ce dont profitent les écosystèmes et l'homme. Des séries de mesures échelonnées sur plus de 100 ans indiquent que les températures moyennes en hiver augmentent au détriment de la quantité de neige [10].

Un tiers des précipitations annuelles (20 km³) s'évapore. Le volume, le lieu et le moment de l'évaporation dépendent de la saison, du terrain, de l'altitude, de la végétation, de la nature et de l'affectation du sol ainsi que du type de précipitations. Sur le Plateau et dans le Jura, le pourcentage d'évaporation atteint 50%, voire 70% dans certains cas des précipitations de la

A gauche: les mesures réalisées au moyen de trappes à sédiments sur l'Erlenbach enregistrent le volume de sédiments transportés par charriage. (Photo Dieter Rickenmann, WSL)

Au milieu: le site de Rietholzbach est l'une des régions d'Europe la mieux étudiée au niveau hydrologique. (DROUGHT-CH)

A droite: la quantité d'eau qui s'infiltré dans un sol ou qui s'en évapore est mesurée grâce à un lysimètre. La photo a été prise dans l'installation souterraine de Rietholzbach. (DROUGHT-CH)



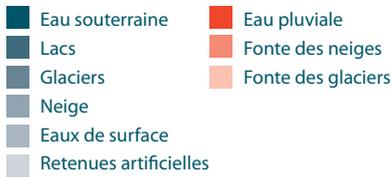
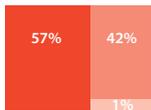
III. 1: les séries de données des différents paramètres des eaux suisses sont parfois très anciennes. Le nombre entre parenthèses se réfère au nombre de stations de mesure. (A. Björnson)

Volume de réserve 100%



Fleuves = 0,25 km³

Débit total annuel 11%



III. 2: Le débit annuel de la Suisse correspond à environ 11% du volume total des réserves. (A. Björnson sur la base des chiffres des références [7, 27])

région. Dans les régions alpines, les pourcentages d'évaporation sont faibles et ne représentent plus que 10% des précipitations dans les Hautes-Alpes. Les effets de l'évaporation selon l'altitude s'expliquent d'abord par la présence prolongée, en surface, de neige et par les températures moins clémentes. Souvent, les sols alpins sont également plus plats et présentent des associations végétales limitées voire inexistantes, avec des phases de croissance plus courtes. L'évaporation est faible au niveau des surfaces de rochers et de glace. De même, les sols plats du Jura et les surfaces affectées à l'habitat, à l'industrie et à la circulation présentent de faibles valeurs d'évaporation. On compte, parmi les régions à forte évaporation, les collines boisées du Plateau, le Tessin et les zones bordant le lac Léman. Les lacs ont également de fortes valeurs d'évaporation [11]. Plus de la moitié de l'évaporation se produit pendant les mois d'été, de juin à août.

Deux tiers des précipitations annuelles (40 km³) s'écoulent dans des canaux [8], qui se composent en moyenne de 57% d'eau de pluie, 42% de fonte de neige et de 1% de fonte de glaciers. Environ la moitié du débit provient du sous-sol. Le débit et la répartition temporelle de l'écoulement de l'eau dépendent du volume de précipitations, mais aussi de l'altitude qui influence la conservation de la neige et de la glace. L'eau de fonte libérée au printemps et en été influence le débit. En Suisse, les différents modèles de débit sont répartis en 16 régimes [12], sensiblement influencés par le changement progressif du climat. L'homme a lui aussi une influence sur le débit. Il a en effet réaménagé de nombreux lacs et fleuves pour éviter les crues, gagner des terres cultivables et produire de l'énergie. En parallèle, l'utilisation du sol influence aussi les débits.

Réserve d'eau

L'on entend par réserve d'eau une quantité d'eau qui est stockée durant une période plus ou moins longue avant de s'écouler ou de s'évaporer. Parmi les principales réserves, citons les eaux souterraines, les lacs naturels, les glaciers et la couche de neige. Mais les bassins de retenue (p. ex. pour les centrales, l'enneigement, l'eau d'extinction, l'arrosage), les réservoirs d'eau potable, l'eau de surface, les marais et les régions humides contribuent aussi au processus de réserve (ill. 2). En règle générale, les réserves sont alimentées par les précipitations, qui compensent en partie les pertes de réserves dues au débit. Chaque année, les réserves diminuent d'environ 1 km³ en raison de la fonte continue des glaciers. Le volume d'eau des fleuves suisses n'a pas été quantifié jusqu'ici, ceux-ci n'étant pas considérés comme des réserves. Le volume estimé de 0,25 km³ est très faible par rapport aux autres réserves et indique clairement qu'en cas de fortes précipitations, ce sont surtout le sol et les autres réserves qui doivent absorber l'eau

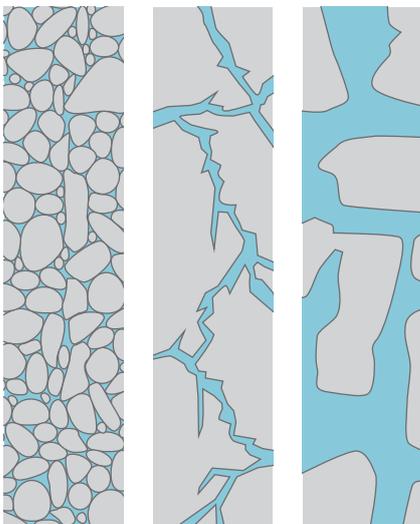
pour éviter les inondations.

Les glaciers, très importants du point de vue hydrologique, représentent une réserve d'eau particulière. Les Alpes bénéficient de précipitations relativement importantes; elles tombent en hiver et, selon l'altitude, toute l'année sous forme de neige. Elles sont conservées sur de longues périodes. Les glaciers suisses conservent environ 55 ± 15 km³ (NELAK [13]), les glaciers alpins au total environ 80 ± 20 km³ (NELAK [14, 15]), les glaciers les plus importants et les plus épais se trouvant en Suisse (à Aletsch, Gorner et Fiesch). Depuis la fin du petit âge glaciaire vers 1850, le volume des glaciers a cependant diminué d'une bonne moitié [9] et continue à diminuer. Les glaciers retardent le débit des précipitations hivernales qui alimentent les débits seulement au printemps et en été. En été surtout, l'eau de fonte fournit une part importante du débit qui est lui-même essentiel pour l'eau souterraine, l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture et l'écologie des cours d'eau.

Environ un tiers des précipitations en Suisse est aujourd'hui stocké temporairement sous forme de neige [9]. Selon la météorologie de l'hiver précédent, la couche de neige conserve chaque année de 4 à 20 km³ d'eau au moment où elle est le plus étendue, en mars [16, 17]. Bien que la capacité de stockage soit assez faible, l'incidence climatique est considérable, car la limite de la neige, le nombre de jours d'enneigement et l'épaisseur de la couche de neige dépendent fortement de la température et, partant, du climat. La part de l'eau de fonte est également considérable dans le débit total (ill. 2).

Représentant 130 km³ d'eau, les lacs suisses constituent la deuxième plus grande réserve d'eau. L'eau contenue dans les quelque 200 lacs d'accumulation, soit environ 4 km³ [17], est certes négligeable dans le bilan global, mais elle est importante pour la gestion de l'énergie. A l'exception du lac de Constance et du lac de Walenstadt, tous les grands lacs suisses sont régulés, c'est-à-dire qu'ils peuvent contribuer à préserver un équilibre, en particulier en cas de crues et de fonte de neige ou de glacier et qu'ils alimentent aussi suffisamment les grands cours d'eau du Plateau en cas de sécheresse prolongée. En plus de ses grands lacs, la Suisse dispose de plus de 6668 petits lacs, dont une grande partie se situe au-dessus de 2200 m d'altitude [18]. Un chiffre élevé, mais sans comparaison avec le passé. Au cours des 200 dernières années, plusieurs centaines de milliers de petits cours d'eau ont disparu. Les lacs, petits lacs et petits cours d'eau jouent un rôle déterminant comme réserves mais aussi comme milieux naturels et espaces de repos [19].

Avec un volume d'environ 150 km³, l'eau souterraine constitue la plus grande réserve d'eau de la Suisse. La principale réserve d'eau souterraine, d'un volume de 120 km³, se trouve dans les aquifères karstiques, tandis que les aquifères fissurés contiennent environ 20 km³



III. 3: à partir de la gauche: les aquifères de roche meuble, fissurés et karstiques se distinguent par leur morphologie et permettent, par conséquent, des utilisations de techniques différentes.



et les sols meubles 10 km^3 (ill. 3). Ce volume est certes considérable, mais quelle en est la part réellement utilisable?

Le type d'aquifère détermine la profondeur de la réserve d'eau et, par là même, les **possibilités d'exploitation technique**. Tandis que les aquifères contenus dans les roches meubles sont à proximité de la surface, les aquifères fissurés et karstiques se situent à de grandes profondeurs. Les débits de soutirage qu'il faudrait atteindre ne seraient pas suffisamment rentables, l'exploitation de ces réserves n'est pas envisageable [20]. Cela est également valable pour les gisements d'eau souterraine situés dans les moraines, les graviers argileux et les sables fins [21].

La **qualité** de l'eau souterraine dépend de l'aquifère et de l'eau infiltrée. Si celle-ci est contaminée, elle ne pourra pas être utilisée comme eau potable. En Suisse, les surfaces de production d'eau potable diminuent sous l'effet de l'urbanisation croissante (zones dédiées à l'habitat, l'industrie et aux voies de communication), la qualité de l'eau souterraine ne pouvant plus être garantie. De même, les substances utilisées dans le cadre de l'agriculture et la pollution des eaux de surface influencent aussi la qualité de l'eau souterraine. L'ampleur de sa dégradation n'a été que peu quantifiée jusqu'à présent, car les aquifères non utilisables pour la production d'eau potable ne sont généralement plus analysés. L'eau souterraine servant à la production de chaleur ou au refroidissement ne pourra être utilisée pour l'approvisionnement en eau potable que de manière restreinte. Cependant, les cantons appliquent des méthodes différentes pour évaluer le risque de pollution que représentent les installations de prélèvement et de rejet.

La **température** est également un facteur déterminant pour la qualité. L'étude du projet PNR 61 GWTEMP, qui comporte cinq séries de mesures effectuées sur une période de 20 ans, a montré une augmentation de la température de l'eau souterraine de $0,7$ à $1,1^\circ \text{C}$, ce qui correspond approximativement à l'augmentation des températures de l'air et de l'eau de rivière [22, 23]. Même la brusque hausse des températures à la fin des années 1980 s'est répercutée sur la température de l'eau souterraine [24]. En revanche, dans les eaux souterraines uniquement alimentées par les précipitations, l'augmentation des températures devrait être atténuée et ralentie par

la zone non saturée [25], et d'autres facteurs comme les débits, l'utilisation du sol et les propriétés intrinsèques de l'aquifère devraient aussi jouer un rôle essentiel à cet égard [24]. Une augmentation de la température de l'eau souterraine karstique de $0,5^\circ \text{C}$ par an a également été observée au cours des 22 dernières années (SWISSKARST [26]).

Les ressources en eau souterraine peuvent donc être limitées par les possibilités d'exploitation technique, la rentabilité, l'impact sur l'environnement et la qualité de l'eau. L'on désigne par **débit de sécurité** le volume d'eau moyen qui peut être prélevé chaque année du sous-sol sur le long terme. Il s'agit des réserves renouvelables, celles qui se reconstituent grâce aux précipitations et à l'infiltration de l'eau des cours d'eau. Pour la Suisse, leur volume représente 18 km^3 (ill. 4) [9]. Selon la loi fédérale sur la protection des eaux (art. 43), il ne doit pas y avoir de réduction notable du volume des eaux souterraines ni d'effet écologique négatif dans le cadre de l'exploitation à long terme. Afin d'éviter toute surexploitation, des quotas de concession sont fixés pour le prélèvement d'eau souterraine. Cependant, les connaissances demeurent souvent insuffisantes sur les ressources réellement utiles. Dans la pratique hydrogéologique, il est courant que l'exploitation des ressources en eau souterraine par des puits de prélèvement donne lieu à l'utilisation de près de 20% du renouvellement naturel [20], ce qui est également acceptable en général. Pour déterminer de manière fiable le volume utile à long terme, il faut procéder à une étude différenciée tenant compte des spécificités locales.

A l'instar des cours d'eau de surface, l'eau souterraine présente des variations selon les saisons, influencées par les infiltrations des précipitations et de l'eau de fonte ou encore par les infiltrations de l'eau des cours d'eau. Dans un **régime d'eau souterraine** alimenté par les eaux pluviales dans les sols meubles du Jura et du Plateau, par exemple, les eaux souterraines atteignent leur niveau maximal aux mois de janvier à mars et leur niveau minimal en fin d'été. Si, en revanche, une réserve d'eau souterraine se trouve dans le bassin versant d'un fleuve dont le débit est marqué par la fonte estivale de neige et de glaciers, l'eau souterraine en profite aussi (régime d'eau souterraine nivo-glaciaire importé). Ce phénomène, typique des Préalpes et du versant sud des

A gauche: environ un tiers des précipitations en Suisse est aujourd'hui stocké temporairement sous forme de neige. (NELAK)

Au milieu: un nouveau lac au pied du glacier du Gauli dans l'Oberland bernois (août 2012). Dans la zone plane de niveau supérieur, un autre lac va probablement se former dans les 10 à 20 ans à venir. (Photo Michael Bütler)

A droite: représentant 130 km^3 d'eau, les lacs suisses constituent la deuxième plus grande réserve d'eau. (IWAGO)

Nappes d'eau souterraine



III. 4: part renouvelable, actuellement exploitée, des ressources en eau souterraine en Suisse. (A. Björnsen)



A gauche: le confluent de l'Aar, de la Reuss et de la Limmat, également appelé «château d'eau», a transporté en 2011 moins de la moitié du volume d'eau par rapport aux années normales. (Photo WSL, Nadine Hilker)

Au milieu: dégâts causés par la sécheresse sur les betteraves à sucre. (Photo Jürg Fuhrer)

A droite: les crues provoquent d'importants déplacements de matériaux charriés. (SACFLOOD)

Alpes, présente un niveau d'eau souterraine maximal en mars et avril et un niveau minimal en hiver [21] (→ voir SWISSKARST p. 14).

L'eau de surface de la Suisse disponible pour les plantes est estimée entre 5 et 7 km³ [27]. Il n'existe pas de statistiques fiables sur les réserves d'eau sous forme de permafrost (dans le sol au-dessus de 2500 m d'altitude et dans les glaciers rocheux). Le volume de l'eau devrait être relativement faible et sans importance à moyen terme pour le cycle de l'eau [28].

Pénurie d'eau

Malgré ses ressources hydriques considérables, la Suisse peut elle aussi être confrontée à la sécheresse et la pénurie d'eau, avec des conséquences sur les écosystèmes, l'économie et la population. Comme en témoigne l'année 2003, les Alpes ne sont pas à l'abri de la sécheresse pendant les étés caniculaires (DROUGHT-CH [29]). Les effets de la canicule ont touché l'environnement (p. ex. débits réduits, fonte des glaciers et chutes de rochers), l'économie (baisse de production dans les secteurs agricole et énergétique) et la société (conséquences sanitaires et hausse de la mortalité), mais ils n'ont pas été exclusivement négatifs (DROUGHT-CH [30]). En comparaison avec les siècles passés, les grandes sécheresses ont été rares au XX^e siècle (1947, 1949 et 1976) [31]. Selon les scénarios climatiques, la fréquence de la sécheresse devrait augmenter dans les décennies à venir. D'une manière générale, les impacts climatiques attendus sur les écosystèmes sont plus prononcés dans les régions plus basses, sur les versants exposés au sud et sur les sous-sols calcaires [32].

Le terme sécheresse se rapporte exclusivement à la ressource disponible («trop peu de ressources pour l'utilisation souhaitée»). Il s'agit ici d'un déficit de précipitations limité dans le temps et dans l'espace (sécheresse météorologique), d'une humidité du sol insuffisante (sécheresse agricole), d'un faible débit ou de niveaux d'eau souterraine peu élevés (sécheresse hydrologique) (DROUGHT-CH [33]). Les facteurs responsables de la sécheresse agricole sont l'absence ou l'insuffisance de précipitations et une forte évaporation due aux propriétés et à l'utilisation du sol, qui influencent la retenue d'eau.

La pénurie désigne un déséquilibre entre les ressources à disposition et les besoins en eau [17]. Elle apparaît dès que les besoins sont supérieurs aux ressources disponibles. La pénurie d'eau dépend par conséquent non seulement du climat et de la météorologie, mais aussi du besoin des écosystèmes et des autres utilisations (énergie hydraulique, pêche, agriculture et approvisionnement en eau potable). Ce besoin varie notamment suite à des modifications de l'exploitation. Pour une entreprise agricole, par exemple, il change avec le passage de la gestion de l'irrigation à la sécurisation des revenus.

«Pour ce qui est des sécheresses, il en existe différents aspects. On pense souvent à un manque de précipitations. Pourtant, pour l'agriculture, l'humidité du sol joue un rôle plus important.»

Sonia Seneviratne
DROUGHT-CH
EPF Zurich



Plus d'informations  DROUGHT-CH sur www.pnr61.ch

En Suisse, la sécheresse agricole apparaît surtout en été, quand l'humidité du sol est faible et que l'évaporation d'eau est temporairement plus importante que le volume des précipitations. En revanche, l'étiage des cours d'eau peut se produire également en hiver. Au cours des dernières décennies, l'on a également observé une sécheresse hivernale accrue dans le Tessin [34], ce qui accroît considérablement le risque d'incendies de forêt au printemps. Pour faire face au manque de précipitations, le canton de Tessin a développé un système de prévention des incendies de forêt [35]. En revanche, les précipitations annuelles n'ont pas présenté d'évolution tendancielle, en raison notamment de la forte augmentation des précipitations à l'automne [36].

Du fait de la diversité physiographique de la Suisse, la sécheresse et la pénurie d'eau ne se limitent souvent qu'au niveau local ou régional (DROUGHT-CH [37]). Dans certaines **régions**, comme les vallées sèches intralpines, le volume des précipitations est resté très faible pendant des siècles. Pour éviter la pénurie d'eau, des systèmes d'irrigation sophistiqués ont été développés (les bisses). D'autres régions, en particulier les régions de production situées à l'ouest et à l'est du Plateau, sont aujourd'hui davantage confrontées à la pénurie d'eau. Ces dernières années, les mesures d'interdiction des prélèvements d'eau se sont multipliées dans les régions où les agriculteurs sont tributaires des prélèvements d'eau dans les fleuves préalpins ou les aquifères proches des fleuves. La pénurie d'eau peut également se produire dans les régions ayant des ressources d'eau souterraine peu abondantes ou superficielles [17, 20]. Les problèmes de sécheresse du Jura s'expliquent principalement par les sous-sols calcaires à travers lesquels l'eau s'écoule très rapidement. En revanche, le débit de base dans l'eau souterraine karstique n'est pratiquement pas affecté par des périodes de sécheresses prolongées, même en cas de diminution du débit des sources voire de tarissement des sources dans les petits systèmes karstiques (→ voir DROUGHT-CH p. 14).

Bien qu'en comparaison internationale l'irrigation joue un rôle secondaire dans **l'agriculture** suisse, des situations de pénurie peuvent là aussi être constatées. Dans la région du lac Léman, au-dessus du Seeland, au pied du Jura, dans le Weinland zurichois jusqu'au lac de Constance, de plus en plus de cultures arables et de prairies artificielles, ainsi que les cultures spéciales, sont aujourd'hui irriguées en grande partie par des réseaux d'irrigation locaux. Ainsi, l'on constate d'ores et déjà une pénurie nécessitant des mesures de restriction et d'interdiction des prélèvements pendant les années sèches, dans les régions comportant uniquement des ruisseaux (p. ex. le Jura, le canton de Vaud, certaines parties du Seeland et en Suisse orientale) ou des rivières de bassins versants pluviaux (p. ex. Broje, Thur)[17]. En revanche, les régions bénéfici-

ant de précipitations abondantes des Préalpes engrangent en moyenne de meilleures récoltes pendant les années de sécheresse [38]. Cependant, les pertes de récoltes causées par la sécheresse ou d'autres événements extrêmes ne génèrent pas forcément dans toute la Suisse de fortes réductions de revenus pour les producteurs. Les prix indicatifs à la production fixés par secteurs, les facilités à l'importation (p. ex. fourrage) accordées par l'administration et les aides financières peuvent fortement limiter les fluctuations de revenus. Si les pertes divergent fortement au niveau local ou régional, une telle compensation économique ne sera guère bénéfique pour l'entreprise individuelle.

En plus de l'agriculture, d'autres secteurs comme l'énergie hydraulique, la sylviculture, l'approvisionnement en eau potable, les sociétés de navigation, la pêche et le tourisme réagissent vivement à la pénurie d'eau (DROUGHT-CH [30, 37]). **La production d'énergie hydraulique** n'a pas été limitée uniquement pendant la canicule légendaire de 2003, mais également en 2011, où la sécheresse s'est manifestée de février à juin, puis à nouveau à l'automne. L'étiage des rivières a provoqué l'arrêt des petites centrales, tandis que les centrales plus importantes n'ont pu être exploitées qu'avec une puissance limitée. Il a fallu importer de l'électricité et compenser l'énergie manquante par des lacs d'accumulation. De par l'existence du marché européen de l'électricité et de la fluctuation des prix, de tels reculs de production peuvent provoquer un manque à gagner important pour les producteurs d'électricité, quoique pas nécessairement (DROUGHT-CH [30]). **Les petits et très petits systèmes d'approvisionnement en eau potable**, utilisés uniquement comme eau de source et non reliés au réseau, peuvent également connaître des difficultés d'alimentation en cas de sécheresse prolongée. En 2003, 50 petites communes du Tessin mal reliées au réseau ont été contraintes d'utiliser temporairement d'autres ressources en eau, par exemple par le raccordement à d'autres systèmes d'approvisionnement en eau, par le prélèvement d'eau dans les lacs via des installations de filtrage et de désinfection improvisées ou par l'approvisionnement par camions-citernes. Dans des situations particulièrement critiques, l'approvisionnement en eau a dû être limité à certaines heures de la journée. Des restrictions similaires ont été appliquées à l'automne 2011 dans différentes régions de Romandie. **La navigation sur le Rhin** est directement influencée par les faibles niveaux d'eau. Les niveaux d'eau sont plutôt bas à la fin de l'automne. Au cours de l'automne 2011, marqué par la sécheresse, ceux-ci étaient encore plus bas que la normale. Dans le port rhénan de Bâle, les cargos n'ont pu transporter qu'environ 30% de leur cargaison habituelle pour éviter de s'échouer [17].

«Les sources karstiques comptent parmi les dernières sources à s'assécher. De ce fait, elles représentent une importante ressource durant les longues périodes de sécheresse.»

Pierre-Yves Jeannin
SWISSKARST
ISSKA



Plus d'informations  SWISSKARST
sur www.pnr61.ch

Projet SWISSKARST du PNR 61: le karst, une ressource sous-estimée

Le karst joue un rôle important dans la gestion de l'eau en Suisse, près de 20% de la surface du pays, surtout dans le Jura et dans les Préalpes, se composant de karst (ill. 5). L'on trouve également des aquifères karstiques à quelques centaines de mètres sous la surface dans d'autres parties du pays. Etant donné que les précipitations peuvent s'infiltrer facilement dans le sous-sol calcaire poreux, les eaux stagnantes sont rares et les rivières peu profondes dans les régions karstiques. Du moins en surface. Dans le sous-sol, les choses sont différentes: selon les estimations de SWISSKARST, 6,6 à 9,1 km³ de précipitations s'infiltrent chaque année dans le sous-sol karstique et contribuent ainsi pour moitié au renouvellement annuel des eaux souterraines de la Suisse. C'est beaucoup. Un système compliqué de fissures (crevasses) et de galeries draine les masses de rochers fissurés, et représente simultanément une réserve d'eau importante, dont le volume est estimé entre 60 et 120 km³ en raison de la porosité du calcaire. Ces chiffres correspondent à un pourcentage de 60 à 80% du volume total de l'eau souterraine de la Suisse. Si cette eau souterraine atteint la surface, elle alimente souvent des sources très abondantes. Alors que les petites sources karstiques ont un débit de 5 à 100 litres par seconde, les grandes sources atteignent un débit annuel moyen de 1 à 7 m³ par seconde (p. ex. l'Orbe à Val-orbe, Valais). Cependant, l'exploitation de l'eau karstique n'est pas simple: d'une part, il est difficile de trouver un point adapté pour les pompes d'eau souterraine dans le labyrinthe du réseau de conduites d'eau souterraine, d'autre part la qualité de l'eau n'est pas toujours garantie parce que les apports de polluants se propagent très rapidement dans les aquifères karstiques ramifiés. Pour l'évaluation et la documentation des aquifères karstiques, SWISSKARST a développé une approche pratique et l'a appliquée à un tiers de la superficie du pays. D'ici à 2018, c'est toute la Suisse qui devrait être couverte (**voir www.swisskarst.ch**) [47, 48].

Projet DROUGHT-CH du PNR 61: la mémoire à long terme du sol

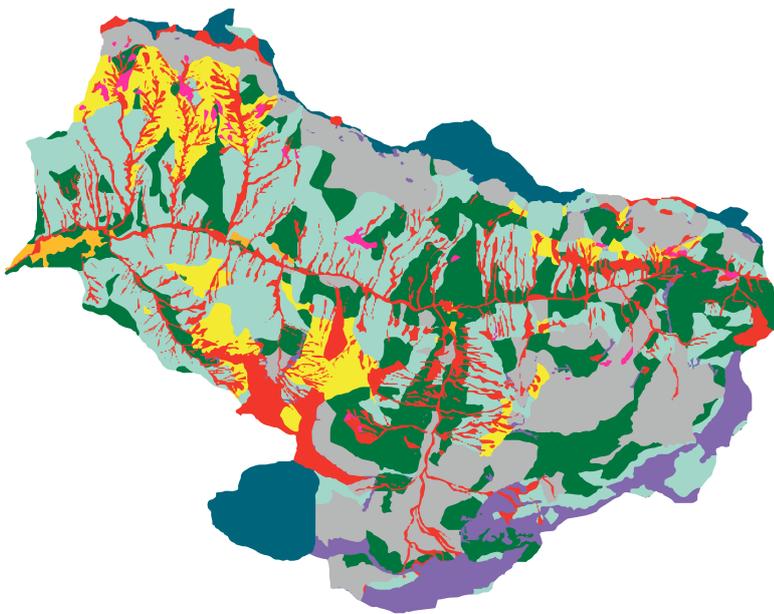
Il est possible de se prémunir contre les effets de la sécheresse, sous réserve d'en être informé suffisamment tôt. Les réserves d'eaux de surface constituent un bon indicateur. Si les précipitations peuvent varier fortement à court terme, la sécheresse du sol et l'étiage des fleuves évoluent généralement sur plusieurs semaines voire mois, car l'humidité du sol et l'eau souterraine réagissent lentement et à retardement aux anomalies climatiques [49]. Les systèmes complexes, comme les sols profonds du Plateau et du Tessin du Sud, retardent mieux le dessèchement que les sols moins épais des Alpes. Les systèmes complexes ont également besoin de plus de temps pour retrouver leur équilibre. Les ressources en neige jouent un rôle similaire. Le projet DROUGHT-CH utilise ces temps de réaction pour les prévisions de sécheresse. Ainsi, un modèle développé par l'EPF Zurich a permis de déterminer avec précision l'humidité du sol au jour le jour, deux semaines à l'avance [50]. De plus, un modèle opérationnel de l'Institut WSL a traité des informations sur les quantités de neige pour améliorer la prévision de l'étiage. Il a mis en évidence que l'étiage des grands lacs du Plateau en juin 2011 ne dépendait pas uniquement du déficit de précipitations alors constaté, mais également des ressources en neige inférieures à la moyenne au printemps [51]. Le constat selon lequel la sécheresse de l'été 2003 n'est pas la plus importante dans les conditions climatiques actuelles est également riche d'enseignements. Si le printemps 2003 avait été aussi sec qu'en 2011, la canicule aurait été beaucoup plus grave [52, 53]. Sur la base des nouveaux enseignements, il est possible aujourd'hui de prévoir trois semaines à l'avance les bas niveaux des eaux, les prévisions pour les grands bassins versants situés sous les lacs préalpins étant les plus fiables. La plate-forme expérimentale basée sur Internet de DROUGHT-CH (**www.trockenheit.ch**) propose des estimations sur la situation de sécheresse actuelle et des prévisions sur plusieurs jours [37].

Projet SACFLOOD du PNR 61: de l'abondance à la lassitude?

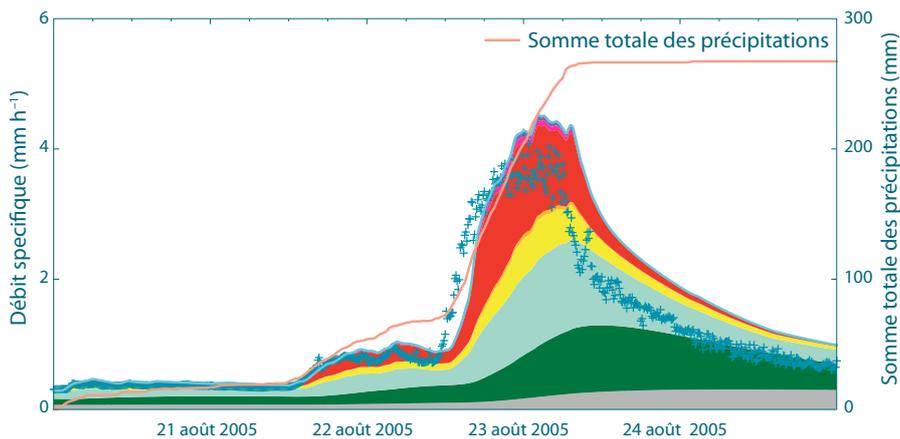
Les mesures de protection contre les crues en Suisse sont conçues pour pouvoir également maîtriser les crues rares. Les estimations quant à l'ampleur et à la date de tels événements est une tâche ardue, car non seulement les intempéries entrent en jeu, mais le sous-sol, souvent méconnu, apporte aussi son lot de surprises. Le fait que de fortes précipitations provoquent une crue dans une région et la façon dont celles-ci s'écoulent dépendent essentiellement de la capacité d'accumulation du sous-sol. Si celui-ci est peu perméable, de courtes précipitations orageuses suffisent à provoquer une crue. En revanche, il faudra des précipitations abondantes sur une longue période pour provoquer une crue sur un sol plus épais ou un sous-sol capable d'accumuler des réserves. Si le sol est déjà gorgé d'eau, ces réserves du sol sont épuisées, le débit risque d'augmenter brusquement. La topographie escarpée des Alpes n'entraîne pas forcément un ruissellement rapide des précipitations. Au contraire, les débits dans les régions alpines présentant des surfaces étendues avec des chutes de rochers, des glissements de terrain ou des moraines sont souvent retardés ou atténués [54]. L'un des exemples typiques de ce phénomène est le bassin versant du Schächen (ill. 6). Le projet SACFLOOD a développé des méthodes pour enregistrer les modalités d'accumulation de différentes surfaces dans les bassins versants des Alpes et pour prévoir ensuite le schéma du débit en cas de précipitations extrêmes. Par exemple, la probabilité de crues dans les bassins versants du Schächen (109 km², ill.7) et du Rhin postérieur (54 km²) dans des conditions extrêmes a été étudiée à l'aide d'essais d'arrosage, de mesures du débit et de modèles. Avec la même méthode, il est possible d'identifier, dans d'autres régions, des bassins versants qui réagissent avec un régime de débit accru en cas de fortes précipitations. Des instructions destinées à la pratique seront mises à disposition.



III. 5: les régions karstiques en Suisse se trouvent principalement dans le Jura et dans les Préalpes. (Graphique SWISSKARST)



III. 6: cartographie du bassin versant du Schächen (109 km²) avec les zones qui contribuent de façon différente aux débits et aux dangers concomitants de crue. Les surfaces violettes, rouges, orange et jaunes réagissent plus vite aux fortes précipitations, les surfaces turquoise, vertes et grises avec un léger retard. Leur influence est prise en compte dans le modèle précipitations-débit. (Graphique Maarten Smoorenburg, SACFLOOD, Rapport final)



III. 7: contributions modélisées des réserves du sol, de tailles diverses, à la crue du Schächen du 22 août 2005. Les pluies prolongées et abondantes ont conduit au fait que même des surfaces capables d'accumulation et réagissant avec retard (turquoise, vert) ont largement contribué au débit. C'est seulement par ces contributions, qui se sont superposées aux surfaces réagissant très rapidement (violet, rouge, jaune), que le phénomène a entraîné une crue exceptionnelle. La courbe orange représente la somme totale des précipitations. (Graphique Maarten Smoorenburg, SACFLOOD, Rapport final)



A gauche: Schächenthal (UR). Grâce au PNR 61, les capacités de stockage et les régimes de débit dans les bassins versants des Alpes sont mieux connus. (SACFLOOD)

Au milieu: des essais d'arrosage ont permis de déterminer la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sous-sol. (SACFLOOD)

A droite: les crues sont certes un facteur de destruction, mais elles sont aussi utiles pour l'écologie des cours d'eau. L'image montre une frayère à truites de rivière. (SEDRIVER)

Crue

La crue détruit les infrastructures et les surfaces cultivables et empêche l'utilisation des eaux. En Suisse, la crue est surtout un phénomène survenant en été, mais des crues se produisent également au printemps et à l'automne. En hiver, le risque de crue est moindre parce que les précipitations sont généralement moins intenses et stockées sous forme de neige et de glace. Les coûts de réparation des dégâts causés par les crues peuvent être limités par une maîtrise des processus et par le développement de modèles qui améliorent la prévisibilité ainsi que la planification de mesures de protection. Les résultats obtenus dans le cadre du projet PNR 61 SACFLOOD peuvent également être transposés à d'autres régions de Suisse.

La grande majorité des crues est provoquée par de fortes pluies. En revanche, les crues catastrophiques résultent avant tout d'une combinaison de **facteurs**: si une forte pluie «s'abat» alors que la fonte des neiges ou des précipitations avaient déjà rempli les réserves [39]. Les crues les plus importantes des régions alpines se produisent dans les Préalpes exposées au nord-ouest et dans le sud de la Suisse. Dans les vallées intra-alpines, les fortes précipitations sont beaucoup plus rares. Les régions karstiques sont concernées par les crues, car les aquifères karstiques ont la propriété d'atténuer ou d'amplifier un phénomène. Malgré cela, seul un petit nombre de projets de recherche traite des processus liés aux dangers naturels dans les régions karstiques. Le rôle du karst est également souvent négligé pour le dimensionnement de mesures de protection contre les crues [40]. Seules des études récentes analysent le lien entre les systèmes karstiques et les crues [41, 42].

Des études historiques ont montré que les périodes de fortes crues alternaient avec des périodes de crues rares. Des phases de crues fréquentes se sont produites dans la région alpine suisse entre 1560 et 1590 et autour de 1760. Le XIX^e siècle surtout a été très marqué par les crues. La période de 1910 à 1972 a été relativement calme, et s'est terminée par les crues de la Reuss (1977) et de la Thur (1978) [43]. Les trois dernières décennies ont également été marquées par des crues provoquant des dégâts considérables. Au cours de la même période, la densité de construction et la concentration d'apports le long des

cours d'eau a considérablement augmenté [44] avec, par conséquent, une amplification du potentiel de dégâts. En comparaison avec les périodes passées, la fréquence des crues des dernières années n'a cependant rien d'exceptionnel [45, 46].

La **protection contre les crues** s'est renforcée en Suisse à partir de 1700, suite au développement des agglomérations. Le risque de crues a fortement diminué au cours des XIX^e et XX^e siècles à la faveur de mesures d'urbanisme, surtout dans les larges vallées où la pression urbaine était la plus forte, mais aussi dans les **montagnes** (p. ex. aménagement de torrents). Les importantes corrections de cours d'eau ont non seulement contrecarré la puissance destructrice de l'eau mais aussi transformé des fonds de vallées marécageux en terres arables fertiles. A partir de 1850, la construction des voies ferrées et des routes a également joué un rôle décisif dans les nombreuses corrections de fleuves [39].

Malgré des efforts et des investissements importants, le risque de crue ne peut être éliminé. Les crues et les glissements de terrain, coulées de boues et éboulements qu'elles peuvent entraîner génèrent chaque année des **coûts de réparation** de 329 millions de francs en moyenne [61]. Les dégâts dus au charriage au niveau des infrastructures et des zones arables coûtent à eux seuls environ 110 à 125 millions de francs par an [62] (→ voir SACFLOOD p. 14).

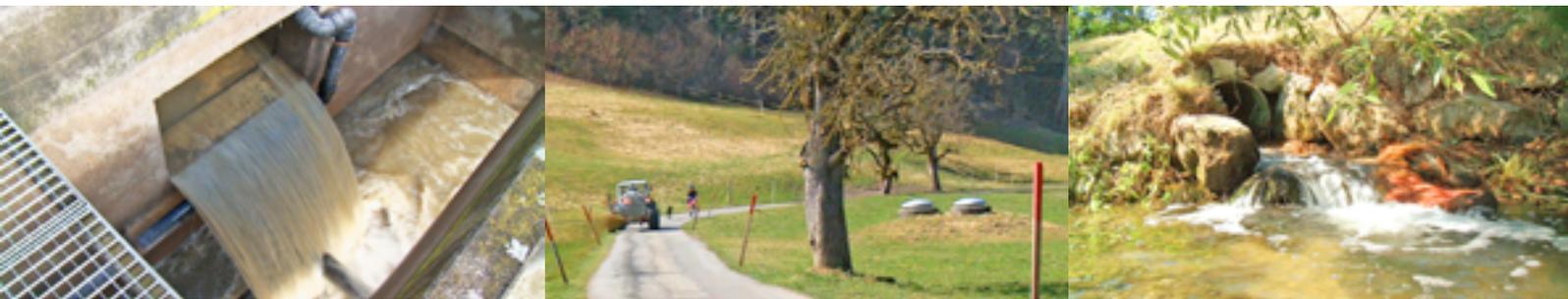
Ce qui pénalise les uns avantage les autres. Les crues sont certes un facteur de destruction, mais elles sont aussi utiles pour **l'écologie des cours d'eau**. Les grandes crues mobilisent les sédiments, modifient le débit, creusent le lit des fleuves et emportent les particules fines, qui autrement obstruent le fond du lit (colmatage) et gênent les organismes ainsi que l'alimentation de l'eau souterraine. De plus, les crues empêchent le développement des algues et marquent la biodiversité et le paysage.

«Nous avons été surpris de découvrir que ce bassin versant abrupt stocke une énorme quantité de précipitations qui ne s'écoulent que plus tard.»

Felix Naef
SACFLOOD
EPF Zurich



Plus d'informations  SACFLOOD
sur www.pnr61.ch



Etat écologique

Qualité de l'eau

Outre le volume d'eau, la qualité de l'eau joue un rôle important dans la gestion de l'eau et la préservation des différents écosystèmes. Grâce à la loi sur la protection des eaux ainsi qu'aux améliorations techniques du traitement des eaux usées, la qualité de l'eau des cours d'eau suisses s'est améliorée de nombreux égards depuis le début des années 1990 [55]. De même, l'état des grands lacs préalpins est considéré comme bon dans une large mesure [1], de sorte qu'ils peuvent être utilisés sans restriction pour la préparation de l'eau potable [56]. La qualité de l'eau souterraine peut aussi être qualifiée de bonne dans l'ensemble. Même l'eau souterraine karstique est souvent utilisée pour couvrir le besoin en eau potable [57].

Si le bilan sur la qualité de l'eau est globalement positif, il subsiste des **différences géographiques**. Si l'on suit les cours d'eau des Alpes jusqu'à la frontière, la pression anthropique des nutriments, des métaux lourds et autres polluants augmente au fil du parcours. Ainsi les apports d'azote sont corrélés avec le nombre d'habitants (davantage d'eaux usées) et les surfaces utilisées pour l'agriculture intensive [55]. Il en va de même pour le phosphore, toutefois les fleuves alpins et préalpins ne charrient la plupart du temps que des quantités faibles ou négligeables de phosphore dissous. Certains petits lacs du Plateau présentent cependant encore de fortes concentrations en phosphore, malgré un assainissement technique (ventilation). Dans les lacs de taille moyenne à grande, les teneurs en phosphate ont fortement reculé et se stabilisent à un niveau constant. L'assainissement durable des lacs est compliqué par les phosphates qui se sont déposés dans les sédiments pendant des décennies et peuvent à nouveau se dissoudre dans l'eau. Bien que les effets visibles de la sur-fertilisation aient largement disparu, les lacs en tant qu'écosystèmes n'ont pas retrouvé leur état d'origine avant l'eutrophisation, ce que montrent entre autres le nombre de variétés de corégones et la diversité génétique présente dans les variétés de corégones [58].

Dans les **cours d'eau**, la surfertilisation (azote et phosphore) a eu des effets moins importants que dans les lacs du fait du renouvellement beaucoup plus rapide de l'eau. Comme

le montre l'analyse des mesures NADUF, les concentrations en nitrates et en azote total ont diminué dans presque tous les postes de mesure jusqu'en 2012 et ont augmenté à court terme, conséquence possible des années de sécheresse 2003 et 2005 (ill. 8) [55]. A la différence des lacs, les apports ponctuels et diffus de micropolluants dans les cours d'eau provoquent des concentrations plus élevées car la dilution est plus faible. Rapportés au parcours des cours d'eau, les principaux apports diffus de micropolluants proviennent de **l'agriculture** (engrais, pesticides, perturbateurs endocriniens). Une analyse récente de l'OFEV montre que les produits phytosanitaires et les métaux lourds (zinc, cuivre, cadmium, chrome, nickel, mercure) représentent les polluants les plus déversés de façon diffuse dans les eaux de surface. Sur le Plateau, les cours d'eau sont pollués par un grand nombre de **pesticides**, et le seuil de 0,1 µg/l fixé par l'Ordonnance sur la protection des eaux est atteint, voire nettement dépassé [59]. De fortes pollutions peuvent notamment être observées dans les petits cours d'eau. Du printemps à l'automne, les cours d'eau sont fortement pollués, la pollution la plus forte apparaissant pendant les mois d'été de juin et juillet [60]. Pour diminuer les apports en **métaux lourds**, des mesures ont été prises il y a longtemps: améliorations dans l'industrie, développement de stations d'épuration et introduction de l'essence sans plomb. Ces mesures produisent leurs effets, comme en témoignent la concentration et la teneur en métaux lourds, qui diminuent très nettement jusqu'à 7% par an dans la majorité des stations [55].

Les principales **sources ponctuelles** sont les stations d'épuration qui déversent les eaux communales ou industrielles épurées dans les rivières. De récentes évaluations du programme NAWA mené par les cantons indiquent que la teneur en nitrate et en carbone se trouve dans une bonne, voire très bonne fourchette dans 80 à 90% des cas. Pour le phosphate, ces valeurs sont un peu inférieures (environ 70%). Aujourd'hui, les micro-impuretés (p. ex. perturbateurs endocriniens, produits phytosanitaires, biocides, cosmétiques ou produits chimiques ménagers) représentent le principal défi. Une partie de ces matières peut intervenir dans l'équilibre hormonal des êtres vivants et affecter leur système de régulation [63]. Les additifs alimen-

A gauche: grâce aux améliorations techniques du traitement des eaux usées, la qualité de l'eau des cours d'eau suisses s'est améliorée de nombreux égards depuis le début des années 1990. (IWAQA)

Au milieu: des engrais, des pesticides et des perturbateurs endocriniens provenant de l'agriculture polluent les cours d'eau. (GW-TREND)

A droite: les principales sources ponctuelles sont les stations d'épuration qui déversent les eaux communales ou industrielles épurées dans les rivières. (RIBACLIM)

taires (surtout les édulcorants comme l'acé-sulfame), qui sont très peu décomposés, sont également mesurés en très fortes concentrations [64]. Au cours des prochaines années et décennies, la situation devrait s'améliorer avec le développement et les transformations ciblées des stations d'épuration. D'autres efforts sont nécessaires pour réduire également les apports de matières provenant de sources diffuses.

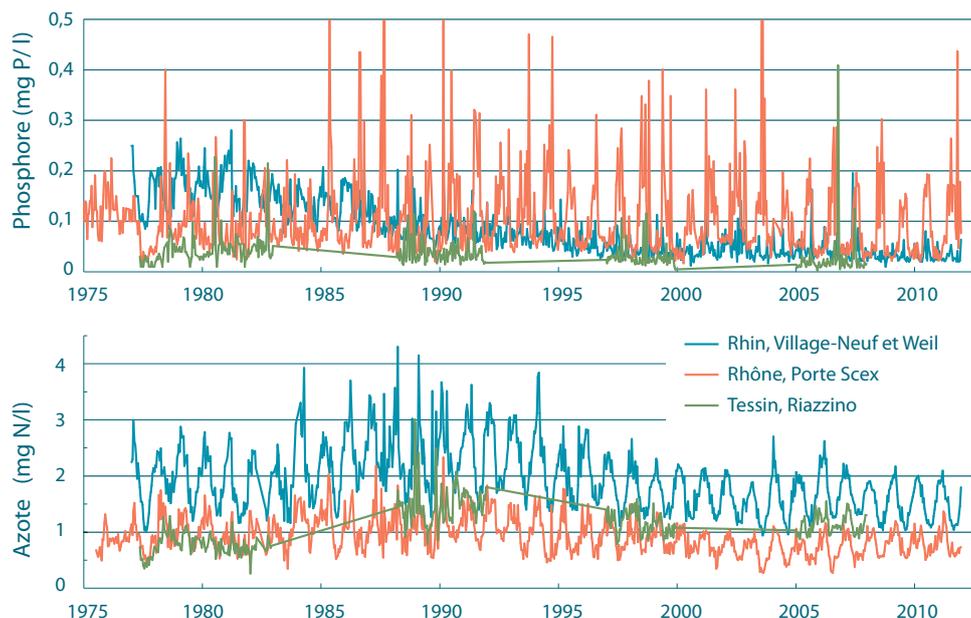
Un schéma géographique se dégage aussi concernant la **qualité de l'eau souterraine**. Malgré une bonne qualité générale, l'eau souterraine contient, surtout dans les zones urbaines ainsi que dans les zones d'agriculture intensive, des traces de substances étrangères indésirables. Les concentrations en nitrate des engrais de ferme et chimiques sont bien documentées. Après une période de plusieurs années marquée par une baisse des concentrations, celles-ci ont à nouveau nettement augmenté entre 2003 et 2006, en première ligne dans certaines zones du Plateau et du Jura où dominent l'agriculture ainsi que la production fourragère et l'élevage (ill. 9). Cette recrudescence s'explique par les conditions météorologiques exceptionnelles et l'augmentation des jachères hivernales. La pollution des eaux souterraines par des composés organiques volatils (COV, p. ex. les carburants, combustibles et lubrifiants ainsi que les solvants) reflète la densité de l'urbanisation. Sans être alarmante, cette situation demande néanmoins à être surveillée.

L'on trouve aussi des apports de polluants dans les vallées des grands fleuves, où se constitue l'eau souterraine, principalement par l'infiltration de l'eau des fleuves, dont la qualité peut directement influencer l'eau souterraine (→ voir RIBACLIM p. 40). L'on y a détecté, par exemple, des composés organiques et des composés pharmaceutiques dans des proportions de l'ordre du ng/l.

Le programme de mesures NAQUA a également repéré des pesticides, principalement dans l'eau souterraine des bassins versants où les sols sont essentiellement affectés à l'agriculture intensive ou à l'urbanisation. Du fait de l'utilisation accrue de produits de protection des toits plats et des enduits de façades contre les racines ainsi que le développement d'algues et de champignons, de plus en plus d'eau polluée s'infiltré également dans les zones d'habitation. Le Plateau est particulièrement concerné, de même que les vallées principales du Valais, du Tessin et du Jura (ill. 9).

Les **aquifères karstiques** et fissurés réagissent de façon plus sensible aux impuretés que les aquifères dans les dépôts de sols meubles qui disposent d'un effet filtrant plus important. Sur certains sites, le traitement est plus coûteux en raison de fortes fluctuations de la turbidité lors de précipitations ou à cause d'impuretés bactériennes. Dans les couches supérieures du Jura, de profonds forages, qui ne permettent pas toujours d'atteindre le but poursuivi, sont nécessaires à l'utilisation de l'eau karstique. Une vision complète de la qualité de l'eau souterraine karstique fait toutefois encore défaut à l'heure actuelle [26].

III. 8: concentrations en azote total et en phosphore total dans des échantillons proportionnels à l'écoulement, prélevés toutes les deux semaines dans des stations sélectionnées de la Surveillance nationale continue des cours d'eau jusqu'en 2011 (NADUF, www.naduf.ch). (Graphique Ursi Schoenenberger, Eawag, et Peter Waldner, WSL)



L'utilisation de l'**eau souterraine comme eau potable** n'est pas directement compromise en Suisse. Au cours des dernières décennies, de nombreux captages d'eau souterraine ont cependant été abandonnés, les teneurs en polluants étant trop élevées pour envisager une utilisation en tant qu'eau potable. Aujourd'hui encore, des captages sont souvent abandonnés au lieu d'être assainis. La part que représente cette pratique dans la qualité de l'eau souterraine examinée actuellement et majoritairement bonne ne peut pas être quantifiée, car aucune étude n'existe sur ces gisements d'eau souterraine, et bien souvent, les captages d'eau souterraine concernés ne sont plus échantillonnés [56]. Etant donné que beaucoup de gisements abondants se trouvent dans des zones très utilisées, les efforts pour la protection des cours d'eau doivent être maintenus de manière cohérente.

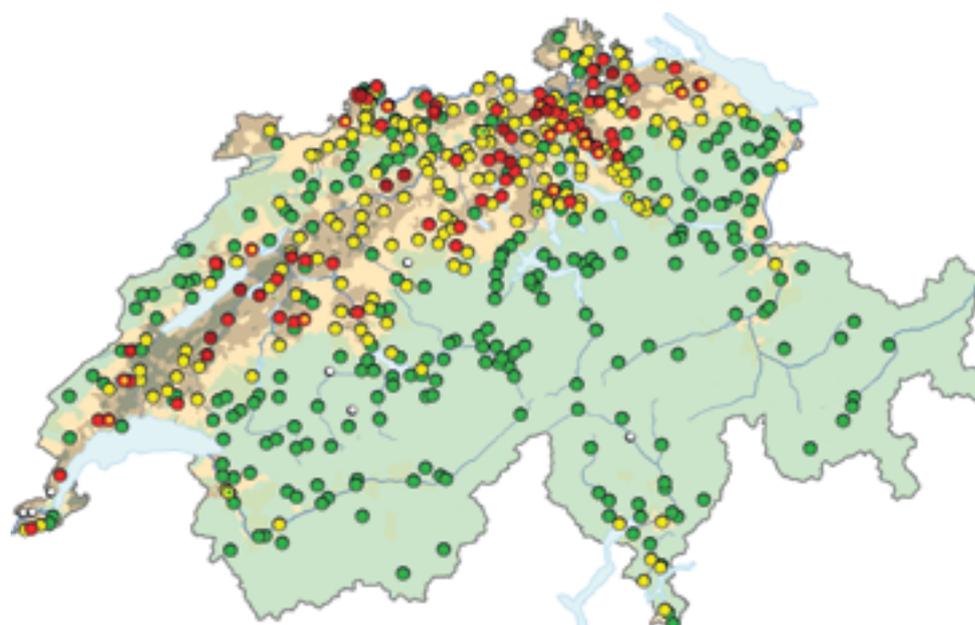
Espaces de cours d'eau

Le terme **espace de cours d'eau** se rapporte au besoin d'espace des eaux de surface, à l'instar notamment des réserves d'oiseaux aquatiques et migrateurs et des paysages marécageux. Selon l'article 36a de la loi fédérale révisée sur la protection de l'eau, les espaces de cours d'eau doivent être définis avant 2018 et sont explicitement considérés comme protégés.

En amont de l'espace de cours d'eau se trouvent environ 80 000 **sources et groupes de sources** [65], qui appartiennent à des aquifères

de quelques hectares seulement. En parallèle, 500 à 1000 grands débits de source, situés pour la plupart dans les régions karstiques, contribuent pour 50 à 70% au débit total [66]. Les petits cours d'eau (chiffre de classement des fleuves 1 et 2, c.-à-d. les petits ruisseaux en amont) représentent 80% du **réseau de cours d'eau**, long de 65 000 km [60]. Près des trois quarts de tous les cours d'eau se trouvent dans les Alpes.

Les cours d'eau et les plans d'eau sont utilisés de multiples manières, au détriment des paysages, des milieux naturels et des espèces mais ils sont également souvent modifiés. Sur le parcours total d'un cours d'eau, 54% des espaces de cours d'eau sont considérés comme naturels ou proches de l'état naturel, 24% comme peu affectés et 22% comme fortement affectés ou enterrés en tant que cours artificiels [67]. La Singine et la Maggia comptent parmi les derniers cours d'eau qui coulent presque à l'état naturel [68]. De plus, 101 000 obstacles artificiels au passage affectent le milieu naturel [67, 69]. Les cours d'eau du Jura et du Plateau sont les plus fortement aménagés. Suite à la loi révisée sur la protection des eaux, la part des tronçons remaniés a tendance à diminuer du fait des renaturations. Aujourd'hui, les aménagements des berges des lacs intègrent souvent des installations portuaires et des murs visant à empêcher leur érosion. De tels aménagements affectent le processus d'autonettoyage des **lacs** et le milieu naturel de nombreuses espèces animales.



III. 9: les plus fortes concentrations en nitrates de l'eau souterraine se trouvent sur le Plateau qui fait la part belle à l'agriculture. (Graphique Observation nationale de l'eau souterraine NAQUA, Office fédéral de l'environnement)

Concentration en nitrates

- 10 mg/l
- 10-25 mg/l
- 25-40 mg/l
- >40 mg/l
- Valeur maximale
- Valeur moyenne
- Station non échantillonnée

Part des cultures

- 1%
- 1-5%
- 5-20%
- 20-40%
- >40%



A gauche: l'embouchure prolongée artificiellement du Rhin alpin dans le lac de Constance empêche les dépôts de sédiments à proximité des berges qui pourraient augmenter le risque de crue par dépôt sédimentaire. (Photo DDPS)

Au milieu: harle bièvre. (Photo Werner Scheuber)

A droite: héron cendré. (Photo Michael Gerber)

Le paysage des cours d'eau en Suisse a fortement évolué au cours du siècle dernier. Plus de 190 000 hectares de terres ont été drainés dans le cadre d'améliorations des sols et de mesures de création d'emplois. Dans le seul canton de Zurich, la surface des **zones humides** a diminué de 91% au cours des 150 dernières années [70]. Les zones humides constituent non seulement le milieu naturel d'espèces animales et végétales spécifiques, mais aussi d'importantes zones de tampons hydrologiques et climatiques [68]. Avec l'adoption de l'initiative de Rothenthurm en 1987, la protection des zones humides d'importance nationale a été légalement ancrée dans la Constitution. L'on prévoit un effondrement de ces systèmes dans la seconde moitié du siècle en raison de l'interconnexion insuffisante et de la petite taille des marécages et marais subsistants [70].

Les conséquences écomorphologiques des centrales d'accumulation et hydroélectriques sont nettement plus visibles. De nombreuses retenues représentent un obstacle à la migration des poissons et d'autres organismes. Tandis que les sédiments sont retenus en amont, le milieu naturel d'espèces endémiques et invasives est influencé, en aval, par la modification du régime de débit, du charriage et des dépôts de sédiments. Cependant de tels «troubles» ne sont pas sans utilité pour la société.

Parallèlement à l'utilisation du sol et au climat, des facteurs écologiques modifient également les espaces des cours d'eau suisses. Le **castor** par exemple a été implanté à partir des

années 1950 et s'est établi presque partout, avec une population d'environ 2000 animaux, le long des grands fleuves de l'Aar, du Rhin, du Rhône, de la Thur et de la Broye. Il est toujours protégé par le droit confédéral. Quelque 90% des activités des castors sur les terres cultivées se déroulent à moins de 10 m d'un cours d'eau. Grâce à la délimitation de l'espace réservé aux eaux selon l'Ordonnance sur la protection des eaux, il est possible d'offrir suffisamment de place aux castors.

Les populations de harles bièvres et de hérons cendrés se sont reconstituées depuis les années 1960 après avoir été presque exterminées par la chasse. Le **harle bièvre** vit aujourd'hui en tant que population génétiquement autonome de 1200 couples nicheurs environ dans les Alpes suisses. Etant donné que le harle bièvre se nourrit principalement de petits et moyens poissons, il peut, dans les cours d'eau aménagés, mettre en péril certaines espèces de poissons qui n'ont plus de possibilité naturelle de repli. Le **héron cendré** a été mis sous protection en 1925 et sa population se maintient à un niveau stable de quelque 1400 couples sur le Plateau et dans le Tessin. Il se nourrit de poissons, de souris et de batraciens [72]. Les poissons qui appartiennent aussi au régime alimentaire du cincle plongeur et du martin-pêcheur sont un élément important de la chaîne alimentaire. Pour les préserver, les cours d'eau, bien qu'utilisés par l'homme, doivent être aménagés et mis en réseau de façon naturelle. Ils doivent aussi offrir suffisamment de place pour garantir la reproduction naturelle de toutes les espèces.

Gestion actuelle des ressources en eau

L'eau, l'une des matières premières les plus précieuses de la Suisse, est utilisée de diverse manière. Ce chapitre décrit les utilisations actuelles et leurs effets sur les ressources en eau disponibles, la qualité de l'eau et l'espace des cours d'eau. Dans un contexte de changement climatique et social, ces connaissances mettent en évidence des conflits d'utilisation potentiels. De plus, l'analyse indique que les connaissances actuelles sur la gestion de l'eau en Suisse sont insuffisantes dans la mesure où elles reposent essentiellement sur des projections et des estimations. Il convient de synthétiser les données disponibles et de combler les lacunes pour garantir la protection et la gestion des cours d'eau.

En matière d'utilisation de l'eau, l'on opère une distinction entre consommation et exploitation. Quand des prélèvements d'eau conduisent au retrait momentané d'eau du circuit et à la réintroduction ultérieure, éventuellement à un autre endroit, nous parlons en règle générale de **consommation d'eau**. Cette définition englobe par exemple la consommation d'eau potable, l'eau d'irrigation ou l'eau de refroidissement qui s'évapore dans les tours de refroidissement des centrales nucléaires. **L'exploitation de l'eau** consiste en revanche à réintroduire sans délai l'eau propre dans l'environnement, pour autant qu'elle en ait été prélevée. L'utilisation pour la production d'énergie hydraulique, pour le refroidissement de débit et pour le transport en sont des exemples types.

En Suisse, la gestion de l'eau est considérée comme durable du point de vue quantitatif dès lors que son utilisation ne dépasse pas les ressources renouvelables. Le renouvellement des réserves d'eau correspond à la différence entre les précipitations annuelles et l'évaporation, soit un volume d'eau disponible d'environ 40 km³ d'eau par an. Il est possible de déterminer si la gestion de l'eau est durable uniquement en tenant compte des particularités locales. Un examen exclusif de la consommation et de la gestion de l'eau ne suffit cependant pas à définir une **gestion durable de l'eau**. En sus des impératifs sociaux et économiques, les besoins écologiques doivent également être pris en compte. L'objectif de gestion durable de l'eau réside dans le maintien des propriétés essentielles de la ressource eau, de sa stabilité et de sa capacité naturelle de régénération.

La **gouvernance durable de l'eau** désigne un processus dans lequel tous les acteurs compétents concrétisent les objectifs de la durabilité, élaborent une interprétation commune des problèmes actuels et une vision pour l'avenir et modifient, sur cette base, les normes, institutions et pratiques existantes de la gouvernance de l'eau. Cette démarche permet

de gérer les ressources en eau de manière à atteindre un niveau suffisant de bien-être économique et social sans affecter les écosystèmes hydrologiques de façon irréversible.

Au total, plus de 2 mrd de m³ d'eau sont consommés chaque année en Suisse dans différents secteurs et à des fins publiques (ill. 11) [9, 73]. Ce volume correspond à environ 3,7% des précipitations ou 5,4% de l'eau renouvelable de la Suisse [28, 74].

Les chiffres donnent l'impression que seule une petite fraction des ressources en eau disponibles serait réellement utilisée. Si l'on tient compte de la puissance de refroidissement pour les centrales nucléaires ou l'utilisation pour la production hydroélectrique, un autre tableau se dessine: les exploitants de centrales hydroélectriques utilisent chaque année 248 fois plus d'eau que n'en consomment tous les autres secteurs confondus. Par rapport aux ressources disponibles, il est vrai que la Suisse consomme peu, mais utilise beaucoup (ill. 12). La consommation d'eau est soumise à des **fluctuations** annuelles et quotidiennes qui dépendent fortement des secteurs. Dans la région du Valais Crans-Montana-Sierre par exemple, mais également dans d'autres sites touristiques, l'on observe un premier pic de consommation en été (irrigation et consommation d'eau potable) et un second en hiver (eau potable et production de neige artificielle). Les pics de consommation journalière ont lieu en fin d'après-midi, dès que les touristes reviennent de leurs excursions (randonnées en été, sports d'hiver) (MONTANAQUA [6]). En règle générale, les infrastructures hydrauliques doivent être conçues pour faire face à ces pics de consommation.

Approvisionnement en eau potable

Les données sur le prélèvement d'eau potable et d'eau industrielle sont collectées par la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux et déterminées par les systèmes d'approvisionnement en eau. La principale réserve d'eau potable est l'eau souterraine, qui fournit 80% de l'eau potable. Les 20% restants proviennent de l'eau des lacs. L'eau souterraine est, en règle générale, la plus appropriée pour fournir de l'eau potable et industrielle, étant donné qu'en s'infiltrant dans le sol l'eau subit plusieurs processus d'épuration. Quelque 25 à 30% de l'eau potable sont obtenus à partir de filtres de rives (RIBACLIM [75, 76]).

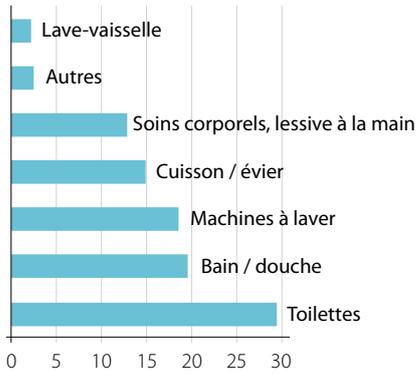
Pour l'approvisionnement en eau potable, seuls 2% (0,94 km³) de l'eau renouvelable sont utilisés (ill. 13). Les ménages consomment environ la moitié de l'eau potable distribuée par les services d'approvisionnement publics (447 millions de m³). Le commerce et l'industrie absorbent 300 millions de m³ supplémentaires. Des quantités considérables font l'objet de déperditions (2006: 115 mio

«Nous avons développé une bonne méthode pour la planification des infrastructures qui tient compte d'objectifs très divers.»

Judit Lienert
SWIP
Eawag



Plus d'informations  SWIP
sur www.pnr61.ch



III. 10: en Suisse, la consommation d'eau des ménages s'élève entre 160 et 170 litres d'eau potable par personne et par jour en moyenne. Presque 30% de ce volume est imputable aux chasses d'eau [81].

de m³ [77]; 2012: 127 mio de m³ [78]) ou s'écoulent de plus de 22 000 bouches de fontaine. Une faible part est consommée par l'agriculture (31 à 36 mio de m³) [73, 79]. Malgré une croissance continue de la population, la consommation d'eau potable recule depuis les années 1980. La consommation moyenne actuelle est de 325 litres par personne et par jour. Ce chiffre inclut la consommation des ménages, qui représente de 160 à 170 litres environ par habitant et par jour (ill. 10) [80]. L'une des raisons de la baisse de consommation d'eau s'explique par l'évolution structurelle de l'économie. Les secteurs industriels qui consommaient beaucoup d'eau ont disparu, ont délocalisé leur production à l'étranger ou recyclent l'eau. Chez les ménages, les technologies d'économie d'eau et les modifications de comportement ont contribué au recul de la consommation (ill. 10).

Gestion de l'énergie

En comparaison européenne, l'énergie hydraulique est très fortement utilisée en Suisse et constitue l'un des principaux piliers de l'alimentation en électricité. En plus des centrales hydroélectriques et des centrales d'accumulation par pompage installées dans les hautes montagnes, les centrales au fil de l'eau du Plateau contribuent aussi largement à la production d'électricité. Parallèlement, l'eau est essentielle au refroidissement des centrales nucléaires et elle constitue une source d'énergie de plus en plus importante pour les échangeurs de chaleur.

L'énergie hydraulique est utilisée depuis 1879 pour la production d'électricité [82], et la plupart des centrales hydroélectriques ont été construites entre 1955 et 1970. Depuis, la production hydroélectrique intérieure n'a que faiblement augmenté. Les centrales électriques à accumulation utilisent environ 200 lacs de barrage artificiels avec un volume de

réserve de près de 4 km³. 1278 centrales produisent aujourd'hui environ 36 000 GWh par an, les très grosses centrales (14%) générant à elles seules plus de 90% de la production électrique. Ainsi, l'énergie hydraulique suisse contribue pour environ 54% à la production intérieure d'électricité [83]. Près de la moitié de la production hydroélectrique provient de centrales au fil de l'eau et de centrales d'accumulation.

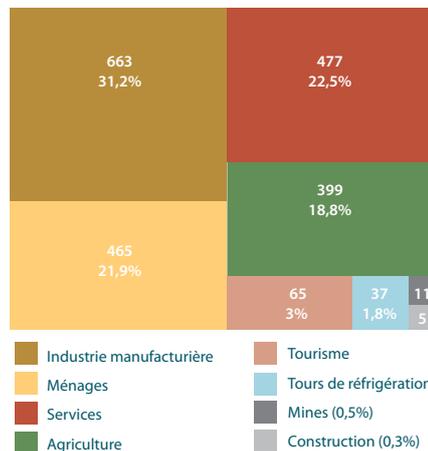
La comparaison entre la consommation d'électricité en Suisse et la consommation d'énergie révèle que l'énergie hydraulique intérieure ne couvre qu'environ 10% de la consommation d'énergie brute. L'abandon de l'énergie nucléaire et les plans européens de décarbonisation augmentent encore les attentes envers l'énergie hydraulique; des plans de développement de l'énergie hydraulique sont déjà disponibles (voir p. 48 et suivantes). Cependant, la production d'énergie hydraulique atteint ses limites. Sur les 1488 points de prélèvement d'eau (concessions), 95% servent à l'utilisation de l'énergie hydraulique. Il n'est pas possible de quantifier précisément le volume d'eau des fleuves et des ruisseaux utilisé pour la production hydroélectrique, en raison de l'insuffisance de la base de données, mais elle est estimée à environ 550 000 millions de m³ par an [9]. En d'autres termes, le débit total annuel est turbiné quatorze fois environ pour la production d'électricité, mais les disparités régionales sont naturellement importantes. Pour la région de Crans-Montana-Sierre, par exemple, environ 90% du volume d'eau utilisé est affecté à l'énergie hydraulique et turbiné deux fois, tandis que les 10% restants sont utilisés pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et la production de neige artificielle. L'eau des lacs d'accumulation est également vendue à d'autres fins, par exemple aux communes (approvisionnement en eau potable), aux exploitants de terrains de

III. 11 (à gauche): la consommation annuelle d'eau des différents secteurs en Suisse atteint 2152 mio de m³ (y compris l'eau potable, l'eau de source, l'eau souterraine et l'eau de surface). (A. Björnsen, avec des chiffres tirés de [73])

III. 12 (à droite): comparatif du volume de consommation annuelle d'eau (2152 mio de m³) avec l'utilisation pour le refroidissement par écoulement des centrales nucléaires (1643 mio de m³) et la production électrique (550 000 mio de m³) en Suisse. (A. Björnsen, avec des chiffres tirés de [9], [65] et [73])

Consommation d'eau par secteur

en mio m³/a
2122 mio m³/a = 100%



Utilisation d'eau pour la production hydroélectrique

en mio m³/a

Consommation annuelle d'eau
Consommation pour le refroidissement





golf (irrigation) ou aux stations de ski (production de neige artificielle) (MONTANAQUA [6]). En théorie, l'énergie hydraulique continuera à se développer. L'utilisation actuelle ne représenterait qu'environ 30% du potentiel énergétique total de l'eau si tous les cours d'eau étaient utilisés pour la production d'électricité [9]. Mais les obstacles écologiques, économiques, sociales et d'aménagement de territoire posent des **limites** strictes au développement dans une Suisse fortement urbanisée, et ce pour une bonne raison: plus de 90% des rivières adaptées à la production d'énergie hydraulique sont déjà utilisées. Cependant, la Confédération estime, dans le cadre de la **Stratégie énergétique**, que la production hydroélectrique actuelle pourrait être augmentée de 10% d'ici à 2050, sans assouplissement des conditions environnementales et de protection des eaux [84]. Les méthodes d'application ainsi que leur portée relèvent finalement d'une décision de société et d'une pesée des intérêts entre l'économie et la protection de l'environnement.

Les conséquences de la production hydroélectrique sur **l'écologie des cours d'eau** et le **paysage** sont indéniables. Ainsi, les fluctuations journalières et annuelles du débit influencent la **migration des poissons**. Dans les centrales avec dérivation, la vitesse d'écoulement réduite dans le **débit résiduel** agit

sur la force de traction et de cisaillement du cours d'eau, de sorte que les sédiments s'accumulent, le lit du fleuve se colmate, ce qui entraîne un risque de charriage accru en cas de débits de pointe [85]. Par ailleurs, l'énergie hydraulique est une **forme de production électrique respectueuse de l'environnement et du climat** qui assure de plus en plus les missions de régulation et d'équilibrage pour la sécurisation de la stabilité du réseau. Les centrales électriques à accumulation contribuent à la protection contre les crues en atténuant les pics de crues et préviennent non seulement les dégâts mais aussi les coûts consécutifs [86, 87]. Jusqu'ici, les centrales hydroélectriques n'ont pas été rémunérées pour ces services ni pour la diminution de rendement y associée.

La loi révisée sur la protection des eaux aide à dépasser les conflits d'objectifs existants, en prescrivant par exemple que le **régime de charriage** naturel soit garanti autant que possible (art. 43). De plus, elle prescrit **l'assainissement des parcours de débits résiduels** des concessions d'utilisation de la force hydraulique existantes ainsi que la mise en œuvre, en conformité avec la loi, des dispositions sur le débit résiduel dans les concessions nouvelles et renouvelées. La mise en œuvre de ces dispositions est liée à de grands défis juridiques, économiques et écologiques

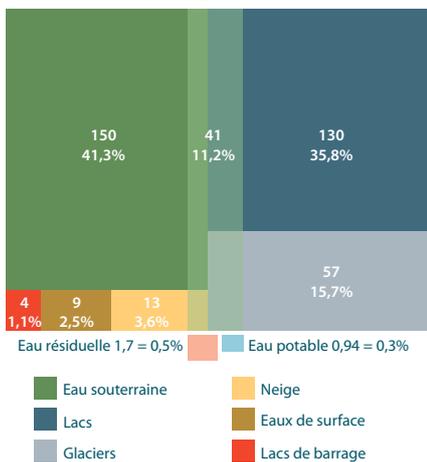
L'abandon de l'énergie nucléaire et les plans européens de décarbonisation augmentent les attentes envers l'énergie hydraulique.

A gauche: photo Lisa Rigendinger

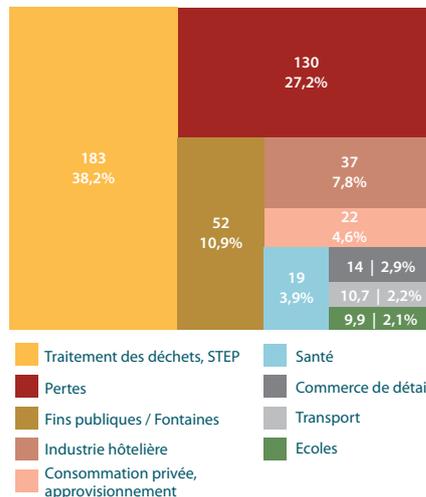
Au milieu: Essence Design

A droite: NELAK

Eau renouvelable
Volume de l'eau potable
en mrd m³/a
363 mrd m³ = 100%



Consommation d'eau Services
en mio m³/a
477 mio m³/a = 100%



III. 13 (à gauche): seuls 2% de l'eau renouvelable sont distribués par les services d'approvisionnement publics en eau potable. C'est pratiquement le double qui, avec l'eau des routes et l'eau météorique, parvient dans la station d'épuration des eaux usées. (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [79])

III. 14 (à droite): consommation totale annuelle d'eau pour différentes prestations de service de 477 millions de m³ (hors tourisme). Les volumes d'eau proviennent de l'approvisionnement public (eau potable) ainsi que de l'approvisionnement propre. (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [73])

Projet WATERCHANNELS du PNR 61: l'eau marque les milieux naturels et le paysage

Les canaux d'irrigation historiques du Valais et des Grisons conduisent l'eau des ruisseaux de montagne vers les prairies, terres arables et vignes sèches et font ainsi partie intégrante du paysage. Le projet WATERCHANNELS a étudié les effets de l'arrosage et du ruissellement sur la biodiversité des prairies, des oiseaux et de la forêt ainsi que les systèmes d'utilisation qui s'y rattachent. Dans les prairies de fauche, les différents types d'irrigation n'ont pas eu d'effet sur le nombre de variétés de plantes et d'escargots, ni sur la répartition à petite échelle des éléments nutritifs et des variétés de plantes, si l'irrigation est effectuée dans des proportions identiques et au même rythme [88, 89]. Par ailleurs, l'arrosage a conduit à l'apparition de nouvelles variétés d'herbes [88], ce qui pourrait avoir des effets négatifs sur la biodiversité d'autres organismes. Parmi les plantes, les espèces généralistes profitent de l'arrosage. La multitude d'habitats a diminué à proximité immédiate des prairies [90]. Des mesures comme la fréquence d'utilisation et la fertilisation peuvent influencer beaucoup plus fortement la composition des espèces que le type d'irrigation [38]. Ainsi l'irrigation par pulvérisation des prairies autrefois non irriguées a une forte influence sur l'intensité d'utilisation et ainsi sur la présence d'oiseaux. C'est en Engadine que le nombre d'oiseaux nichant au sol (p. ex. l'alouette des champs, le pipit des arbres, le traquet des prés) a le plus fortement diminué, là où la végétation et l'utilisation ont également évolué [91]. Sur les surfaces forestières, l'irrigation passive améliore les propriétés du sol grâce aux canaux ouverts et stimule la croissance des arbres [92]. Cette situation a pour effet de multiplier les habitats et d'entraîner ainsi une biodiversité accrue dans les vallées sèches intra-alpines, où l'on observe depuis des années la disparition d'arbres liée à la sécheresse [93].

Non seulement la nature, mais aussi la société profite des canaux ouverts: l'hétérogénéité du paysage et la multitude d'habitats contribuent de manière décisive à l'attrait de l'espace. Les constructions spectaculaires et le système de régulation différencié relié à l'irrigation représentent un héritage culturel important, sans pouvoir toujours garantir une gestion durable de l'eau. Les consortages de bisses doivent plutôt se renouveler et s'ouvrir aux agriculteurs, aux cercles de protection de la nature et du patrimoine et aux associations de tourisme qui agissent avec efficacité pour pouvoir continuer à exister face au durcissement de la concurrence dans le domaine de la gestion de l'eau [94].

Projet AGWAM du PNR 61: l'agriculture sous perfusion

Selon les modèles de calcul, il faudrait à l'agriculture suisse en moyenne 154 mio de m³ d'eau d'irrigation par an pour éviter une perte de rendement due à la sécheresse. Pendant les années sèches, cette valeur peut toutefois être décuplée. Si l'on part du principe qu'une part importante de l'eau reste inutilisée dans de nombreux systèmes d'irrigation actuels, les valeurs correspondant au besoin doivent en outre être corrigées à la hausse. De grandes parties du Plateau, la région bordant le lac Léman ainsi que différentes vallées alpines (p. ex. les vallées du Rhin et du Rhône, voir aussi la ill. 15) ont des besoins particulièrement élevés. Une estimation des besoins en irrigation calculés en fonction des surfaces montre que les cantons de Berne, de Vaud et des Grisons présentent les plus grands besoins [95].

Le projet AGWAM a calculé l'augmentation des besoins en irrigation que le changement climatique occasionnera d'ici à 2050 environ, en prenant pour exemple la région de la Broye. Ce volume ne pourrait pas non plus être couvert, au cours d'une année moyenne affichant un haut niveau de production, par les prélèvements effectués dans les cours d'eau de la région. Seule une adaptation de l'exploitation (choix des cultures, traitement du sol) et de l'organisation de l'espace combinée à une affectation efficace de l'eau utilisable permettrait de couvrir les besoins d'une agriculture productive sans apport supplémentaire en provenance de grands réservoirs (p. ex. le lac de Neuchâtel).

Projet IWAGO du PNR 61: vers une gestion intégrée de l'eau

L'interaction des différents acteurs et institutions dans la gestion de l'eau suisse est régulée par une multitude de lois, décrets, règlements et accords informels. Ces règles peuvent être rassemblées sous le terme gouvernance de l'eau.

Le degré d'utilisation accru de l'eau occasionne de plus en plus de conflits entre les différents impératifs d'utilisation et de protection. Par ailleurs, les défis à venir, comme le changement climatique et la croissance de la population, appellent des planifications et des solutions intégratives à long terme.

Le projet IWAGO analyse de nombreux cas régionaux et cantonaux et décrit trois modèles d'évolution possibles vers une gestion intégrée de l'eau qui reflètent les forces et les faiblesses de la Confédération. La «voie suisse» recommandée est une voie médiane: tout d'abord une analyse préliminaire globale doit déterminer les problèmes et les potentiels dans les bassins versants hydrologiques. La gestion intégrée de l'eau ne doit être mise en œuvre que là où elle s'avère utile et avantageuse. L'impulsion est donnée par la Confédération, mais l'organisation concrète relève de la responsabilité des cantons et des autres acteurs [96].

et ne sera pas finalisée en 2015 dans tous les cantons [18]. L'article 39 prévoit d'éviter ou d'éliminer le **marnage** par des travaux de construction. Sur demande, des mesures d'exploitation peuvent aussi être ordonnées. Le rinçage et la vidange des zones de retenue ne doivent pas non plus affecter l'écosystème du cours inférieur et sont soumis à autorisation. La nouvelle loi sur la protection des eaux offre ainsi une chance de concevoir l'énergie hydraulique de façon plus écologique.

Les centrales thermiques consomment de l'eau de surface dans les tours de refroidissement. Pour les centrales de Leibstadt et Gösigen, la consommation d'eau annuelle s'élève à environ 39 millions de m³, tandis que 1643 millions de m³ supplémentaires sont utilisés comme eau de refroidissement en continu [65]. A l'été 2003, les autorisations relatives à l'eau de refroidissement prélevée dans les cours d'eau ont dû être contrôlées par les autorités cantonales à cause des températures élevées de l'eau. Pour pouvoir respecter les prescriptions de température de l'eau de refroidissement rejetée dans l'Aar, les centrales nucléaires de Beznau et Mühleberg ont dû réduire temporairement leur puissance [17].

Agriculture

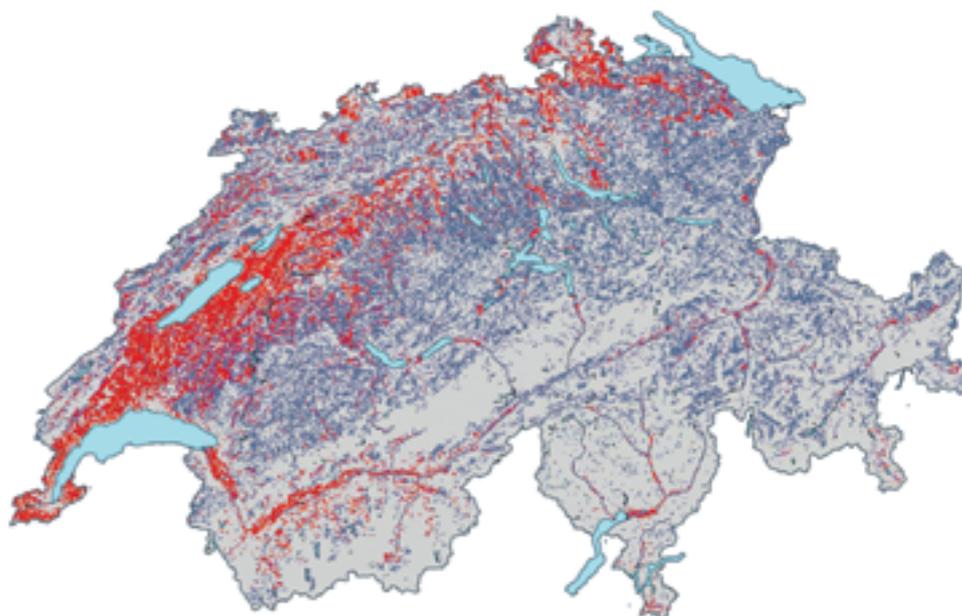
L'agriculture suisse a besoin de 400 millions de m³ d'eau environ par an. Il est possible d'évaluer approximativement le volume utilisé ainsi que le but de l'affectation à l'aide des concessions. Des données précises manquent concernant la consommation. Seulement un tiers de l'eau utilisée pour l'agriculture sert à l'irrigation, et la surface irriguée est encore très faible en Suisse. Cependant l'irrigation peut être importante localement. Il convient d'atténuer les futures pénuries d'eau et de désamorcer les conflits d'utilisation en procédant à des **ajustements dans la gestion et**

l'organisation de l'espace et en optimisant l'affectation de l'eau utilisable.

Dans l'agriculture suisse, ce n'est pas l'irrigation (140 à 170 millions de m³) [97], mais l'eau s'écoulant librement des bornes-fontaines et abreuvoirs privés (200 millions de m³) qui constitue la principale utilisation de l'eau. Temporairement inutilisée, cette eau de source rejoint généralement un cours d'eau et n'est consommée qu'en faible quantité [65]. L'eau dans l'agriculture sert aussi à l'abreuvement, au refroidissement ainsi qu'au nettoyage des produits alimentaires, des équipements, des étables et des installations de production [73] (ill. 16).

L'irrigation est cruciale quand elle est indispensable à la croissance et au rendement des plantes cultivées. En plus de la garantie du rendement en quantité, la garantie de la qualité ainsi que la sécurité et la continuité de la livraison sont également des facteurs importants. Seuls 3 à 5% des surfaces agricoles utiles sont irriguées de façon saisonnière (environ 55 000 ha) [97, 98, 99]. La plupart du temps, il s'agit de petites surfaces ou de zones vraiment sèches. En première position, du point de vue de la surface et du besoin global en eau, se trouve l'irrigation des prés. La majeure partie de l'eau d'irrigation est affectée à l'irrigation des bisses dans le canton du Valais, où les prés en particulier sont irrigués et arrosés, mais aussi les plantations de vignobles et de vergers. L'irrigation des prés est une tradition dans les vallées intra-alpines sèches du Valais et en Engadine, mais elle est également pratiquée sur le Plateau. Au total, ce sont environ 27 000 ha de prés qui sont irrigués en Suisse, soit plus d'un tiers de la surface agricole irriguée (ill. 17).

L'importance de l'irrigation varie très fortement **d'une région à l'autre**. La partie occidentale du **Seeland de Berne**, le grenier à légumes de la Suisse, est très irriguée et jouit,



III. 15: besoins en irrigation des terres agricoles (1980-2006). L'évaluation est basée sur une valeur seuil pour l'évaporation relative (rapport entre l'évapotranspiration actuelle et potentielle) de 0,8. Les surfaces colorées sont celles dont la valeur est inférieure (rouge = besoins en irrigation) ou supérieure (bleu = pas besoin d'irrigation) à la valeur seuil pour 33% des années. Les surfaces grises ne sont pas cultivées. (Graphique Fuhrer et Jasper 2009)

Au-dessous de la valeur seuil (partie relative de la surface)

■ Non (74%)
■ Oui (26%)



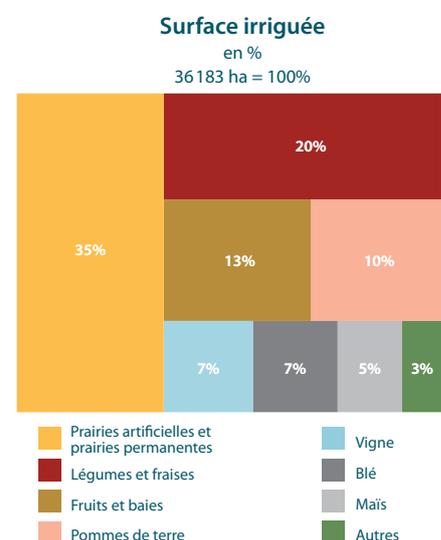
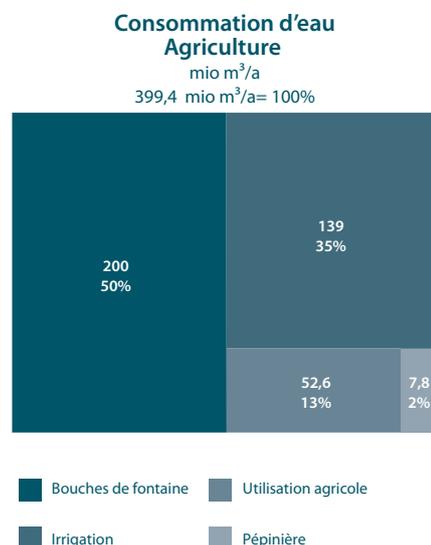
A gauche: l'irrigation des prés occupe la première place du point de vue de la surface et du besoin global en eau. (WATERCHANNELS)
Au milieu: irrigation par les bisses dans le canton du Valais. (WATERCHANNELS)
A droite: la partie occidentale du Seeland de Berne, le grenier à légumes de la Suisse, est très irriguée. (DROUGHT-CH)

avec l'est du Seeland de Berne et le Seeland de Fribourg, de conditions optimales pour les cultures maraîchères et l'agriculture. La région est favorisée par des ressources en eau apparemment inépuisables provenant des grands lacs et de l'Aar, qui atteignent les surfaces d'exploitation par le réseau de canaux intérieurs [100]. Dans le **Valais** en 2010, plus d'un quart (10 803 ha) des terres agricoles étaient irriguées, la moitié concernant des prairies artificielles et des prairies permanentes [99]. De plus, des fruits, des légumes et des vignes sont également irrigués dans le Valais. En revanche, une autre enquête estime la surface agricole régulièrement irriguée dans le Valais à plus du double (25 000 ha) [97]. Dans le Valais, l'irrigation s'effectue majoritairement par l'arrosage (74% des exploitations), pour une faible part par ruissellement (16%) ou par l'irrigation au goutte-à-goutte (10%) [38]. Dans le canton des **Grisons**, les prairies sont également irriguées, mais dans une moindre mesure (2633 ha), 80% des surfaces irriguées étant des prairies permanentes. L'irrigation est effectuée majoritairement par arrosage, la part du ruissellement étant estimée à 8% [99]. L'irrigation des prairies influence non seulement la productivité, mais elle peut aussi avoir des effets considérables sur le paysage et la biodiversité (→ voir WATERCHANNELS p. 24). Outre les prairies de l'espace intra-alpin, l'irrigation concerne surtout les **cultures de grande valeur** comme les légumes, les fruits

et les baies, mais aussi les cultures arables comme les pommes de terre et le maïs (ill. 17). Pendant les années sèches, les régions où ce type de cultures domine présentent des besoins en irrigation en forte augmentation par rapport aux régions composées essentiellement de prairies permanentes [95]. Au niveau national, la plupart des exploitations tirent **l'eau d'irrigation des ruisseaux, des rivières et des lacs** (37% des exploitations). Nombreuses sont celles qui utilisent **l'eau souterraine** (30%) ou **l'eau potable** de l'approvisionnement public (25%) [99] (ill. 18). L'irrigation à base d'eau souterraine n'est pas sans risques aux niveaux économique et écologique, car l'eau souterraine se trouvant au-dessus de forages peut être contaminée et des problèmes de salinisation et d'infiltration peuvent également survenir. De même, l'utilisation d'eau potable pour l'irrigation (comme elle est pratiquée dans la région de Crans-Montana-Sierre (MONTANAQUA [6]) est discutable. Pour les fruits et légumes qui arrivent crus sur le marché, l'eau d'irrigation doit répondre aux exigences hygiéniques de l'eau potable [97]. (→ voir AGWAM p. 24). **L'utilisation du sol** influence le régime des eaux par la réaffectation et le drainage. Depuis 1945, l'espace naturel des cours d'eau est de plus en plus restreint par les drainages et les canalisations. L'utilisation et le traitement du sol ainsi que la fertilisation peuvent aussi avoir une influence sur l'infiltration, l'évaporation,

Ill. 16 (à gauche): l'agriculture suisse utilise chaque année environ 400 millions de m³ d'eau. (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [73, 79]).

Ill. 17 (à droite): surface irriguée en plein air dans les exploitations agricoles en % du total de 36 183 ha de surfaces irriguées. (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [99])



l'écoulement et l'apport de matières, toutefois uniquement dans une agriculture très intensive [101]. Si les cultures supplémentaires à l'automne, rendues possibles par la prolongation des périodes de végétation liée au changement climatique, peuvent retarder et réduire la reconstitution de l'eau souterraine (moins 3%), elles ne devraient toutefois avoir qu'une incidence négligeable [102].

Zones d'habitation et de circulation

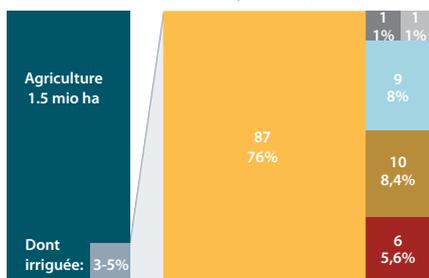
Les zones d'habitation représentent environ 7,5% de la surface de la Suisse, ce pourcentage se monte même à 16% sur le Plateau [103]. Les zones d'habitation sont importantes pour le régime des eaux, parce que 60% d'entre elles sont construites, bitumées ou bétonnées [104], ce qui a des conséquences sur l'évaporation, la qualité et le volume du débit. Sur les surfaces sans végétation ou pauvres en végétation, l'évaporation est généralement moins importante. Alors que pratiquement rien ne s'écoule d'une prairie, environ 80% de la pluie ruisselle sur une surface asphaltée pour s'écouler sans obstacles vers la canalisation. Quoi qu'il en soit, il est difficile de prouver l'influence de l'imperméabilisation sur les débits. Ainsi un débit accéléré en cas de fortes précipitations dans les zones habitées n'aggrave pas forcément le risque de crue. En effet, si l'eau est évacuée plus rapidement que sur une surface végétalisée, l'onde de crue dans le cours d'eau récepteur peut avoir disparu avant même que le débit de pointe naturel ne soit atteint. Ainsi, le fait que l'eau s'écoule plus rapidement dans les zones habitées permet parfois d'atténuer la crue. Il en va tout autrement des systèmes de canalisation engorgés, qui peuvent inonder les caves, les rues ou les surfaces en cas de fortes précipitations et qui doivent de ce point de vue être redimensionnés en fonction des évolutions climatiques futures. **Les infiltrations réduites dans le sol** diminuent aussi le volume des eaux de

surface. Cela réduit les débits en période de sécheresse ainsi que les taux d'évaporation et de renouvellement des réservoirs d'eau souterraine [85], ce qui pourrait augmenter le risque de sécheresse et de crues. Ce dernier point est particulièrement important au vu de l'augmentation des pluies torrentielles due au changement climatique. Simultanément, le risque existe, sur les surfaces de construction, industrielles et de transport imperméabilisées, que les nutriments et les polluants, qui pénètrent ponctuellement dans le sol par des fissures dans la surface imperméabilisée ou par des fuites dans les canalisations, soient moins dilués par l'eau de pluie et se trouvent en plus forte concentration dans le sol. Ce phénomène risque de réduire la capacité du sol à filtrer les différentes substances, de sorte que les nutriments et les polluants atteignent l'eau souterraine en plus forte concentration. Après des orages de chaleur, la hausse brutale de la température de l'eau a également des effets négatifs sur l'écologie des cours d'eau. En conséquence, l'imperméabilisation et l'urbanisation ont des effets non seulement sur le volume d'eau souterraine, mais également sur sa qualité [105]. L'impact des zones d'habitation sur **le renouvellement de l'eau souterraine** n'a été que peu étudié, les aquifères dans les zones d'habitation n'étant de toute façon pas utilisés pour la production d'eau potable.

Le réseau routier de la Suisse s'étend sur 87 000 km environ. Pour des raisons topographiques, de nombreuses routes se trouvent à proximité d'un cours d'eau. La qualité de l'eau de ces cours d'eau est dès lors influencée par **les eaux usées des routes**, dont une grande partie s'écoule sans traitement. Les pics de crues provoqués par les écoulements des routes peuvent occasionner des mutations morphologiques comme l'envasement, l'érosion, l'alluvionnement ou encore le déplacement de sédiments fins et obstruer le fond du lit du cours d'eau. Pendant un orage d'été, l'apport soudain de chaleur peut augmenter

Origine et volume de l'eau des surfaces irriguées

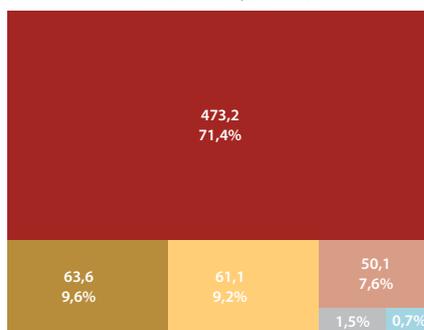
114 mio m³/a = 100%



Consommation d'eau Industrie

mio m³/a

663 mio m³/a = 100%



III. 18 (à gauche): seul un faible pourcentage de la surface agricole est irriguée en Suisse. La majeure partie de l'eau d'irrigation provient de l'irrigation par les bisses.

(A. Björnsen, avec des chiffres tirés de [97]).

III. 19 (à droite): la consommation d'eau annuelle de l'industrie de fabrication est de 663 millions de m³ au total.

(A. Björnsen, avec des chiffres tirés de [73])

la température du cours d'eau. Si ce phénomène est de courte durée (quelques heures), il ne pose en principe aucun problème pour la faune et la flore. Pendant les six mois d'hiver, **le salage des routes** peut fortement influencer la teneur en ions des petits cours d'eau, ce qui affecte avant tout les animaux dotés de branchies. Les dépôts de sédiments fins pollués sur les rives des lacs, dans les petits lacs ou dans les zones de bassins à faible courant sont également problématiques et sont souvent détectables par leur coloration noire et leur odeur. En particulier, les fortes concentrations de cuivre (jusqu'à 400 µg/l Cu) et de zinc (jusqu'à 2000 µg/l Zn) dans les eaux usées des routes posent problème. Les effets biologiques de tels polluants touchent en particulier les organismes peu mobiles ou liés à un site [106].

Le **réseau ferré** suisse qui s'étend sur 5000 km environ est nettement plus court que le réseau routier. Le domaine ferroviaire, c.-à-d. le terrain de la gare, les voies ouvertes et les espaces verts, occupe une surface d'environ 8500 ha et n'a que peu augmenté au cours des dernières années. Le trafic ferroviaire génère des émissions qui peuvent affecter la qualité de l'eau des cours d'eau par le biais des précipitations. Ces émissions sont essentiellement provoquées par des processus physiques d'usure sur les freins (principalement le fer), les fils de contact (cuivre), les roues et les rails. Le lessivage des **herbicides** (exclusivement du glyphosate depuis les années 1990) qui sont appliqués par pulvérisations manuelles aux abords des voies pour maîtriser la végétation en fait également partie. Les concentrations de polluants dans les eaux usées des chemins de fer sont nettement inférieures à celles présentes dans les eaux de chaussée drainées. Dans les endroits où elles sont collectées, les eaux usées des chemins de fer sont filtrées directement par le talus ou par une installation d'infiltration ou dirigées vers l'eau de surface. En zone urbaine, les eaux usées des chemins de fer sont partiellement acheminées vers la station d'épuration. Des études ont montré qu'en cas de faible débit (<10l/s) et d'écoulements importants provenant des voies ferrées, les concentrations en chrome, en cuivre et en zinc peuvent s'avérer problématiques, alors que le fer est inférieur à la valeur de tolérance pour l'eau potable. Les valeurs de glyphosate peuvent être jusqu'à 190 fois supérieures aux valeurs prescrites en matière de qualité des cours d'eau, si elles sont mesurées après la première pluie suivant l'application de l'herbicide [107]. Dans les petits cours d'eau récepteurs, de telles concentrations peuvent avoir des conséquences sur l'environnement.

Industrie et commerce

Bien que les surfaces des zones industrielles et commerciales augmentent en Suisse, la consommation industrielle d'eau est globa-

lement en recul [108], notamment grâce à la disparition de grands consommateurs et à la mise en œuvre de systèmes de recyclage et de technologies d'économie. En parallèle, l'on observe que l'approvisionnement en eau potable par le réseau public est de plus en plus remplacé par l'approvisionnement propre. Il n'en reste pas moins qu'avec une consommation annuelle supérieure à 1 milliard de m³ le secteur industriel et commercial reste de loin le principal consommateur d'eau en Suisse.

Si l'on compare les différents secteurs industriels, la **chimie** compte parmi les plus grands consommateurs. Elle a besoin d'eau pour la fabrication de produits chimiques et pour le traitement du pétrole et s'approvisionne presque exclusivement par ses propres moyens (cf. ill. 19). **Le secteur du papier** qui consomme encore des volumes d'eau importants s'approvisionne largement par ses propres moyens. **Le secteur des produits alimentaires** utilise de grandes quantités d'eau potable. Le groupe sectoriel de la **métallurgie** couvre ses besoins annuels en grande partie lui-même. **Le secteur du textile** joue un rôle secondaire. Les besoins du secteur de l'imprimerie, de la fabrication du plastique et du verre ainsi que la production d'énergie (sans énergie hydraulique ni eau de refroidissement) (= **autres secteurs**) sont couverts en grande partie par l'approvisionnement propre en eau de surface. La majeure partie est consommée par les tours de refroidissement dans les centrales nucléaires de Gösgen et Leibstadt. L'eau joue aussi un rôle important dans **le secteur de l'élimination**, où elle est utilisée pour le refroidissement des usines d'incinération des ordures ménagères ainsi que pour le traitement des eaux usées. Il ne faut pas sous-estimer la consommation d'eau dans **les autres secteurs de prestations de services** (commerce de détail, transports, piscines et parcs animaliers, restauration, instituts de formation, hôpitaux, maisons de retraite) ainsi que l'administration (surtout la climatisation des bâtiments) et les établissements financiers, dans lesquels la part de l'eau potable représente plus de 50% [65].

Exploitation de matières premières

Le gravier et l'eau vont de pair. Et la Suisse est riche en **gravier**, la seule matière première que notre sol produit en grande quantité. Près de 50 millions de tonnes de gravier et de sable sont extraites chaque année de 900 mines et carrières et 100 sites sur des lacs et des fleuves [109]. L'extraction de gravier est soumise à autorisation et ne doit pas influencer négativement le régime de charriage (NELAK [14]). Les dépôts fluviaux de la fin du quaternaire et de l'ère postglaciaire constituent les principales réserves de gravier. Il s'agit donc de ressources qui sont d'importants aquifères et qui sont très utiles pour l'approvisionnement en eau potable grâce à l'effet naturel d'épura-



tion. Les disparités régionales sont importantes d'un point de vue géologique. Dans les régions autrefois recouvertes par des glaciers, les dépôts de pierraille offrent de précieuses réserves de gravier. En revanche, il n'y a pratiquement aucune gravière dans le Jura et la vallée du Rhin à Saint-Gall. Dans les régions montagneuses, le gravier est extrait des matières de charriage et des dépôts des ruisseaux. Dans l'exploitation des gravières, le remblayage des excavations a des conséquences aussi importantes que l'extraction sur la qualité de l'eau souterraine. La loi sur la protection des eaux prescrit donc qu'une couche protectrice de matériau de 2 m d'épaisseur au minimum doit être maintenue au-dessus du niveau naturel maximal que peut atteindre la nappe d'eau souterraine en dix ans et que le renouvellement de l'eau souterraine doit être préservé. En ce qui concerne le remblayage des gravières, l'ordonnance sur le traitement des déchets interdit la création de décharges dans les nappes d'eau souterraine utilisables. En revanche, les matières inertes peuvent être déposées en marge de ces nappes. Les Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines signalent que le matériau de remblayage peut éventuellement contenir des déchets et risque de réduire l'alimentation des nappes d'eau souterraines ou limiter leur aération. L'extraction de gravier rend les eaux souterraines plus vulnérables vis-à-vis des apports de polluants et réduit d'environ 0,6% les ressources en eau souterraine utiles [110]. Le secteur du gravier englobe, outre l'extraction du gravier et du sable, la fabrication de ciment et de béton frais. L'eau est utilisée aussi bien pour la préparation du gravier que pour la production de béton. La consommation d'eau est estimée à 16 millions de m³ environ, la majeure partie étant couverte par l'approvisionnement propre et tirée des réserves d'eau souterraine (plus de 10 millions de m³ par an) [65, 109].

Navigation

Le fleuve constitue une voie de communication importante non seulement pour le tourisme mais également pour le fret international. En termes de volumes de marchandises, les ports rhénans traitent environ 15% du commerce extérieur et même 35% des produits pétroliers, ce qui correspond à un trans-

port de marchandises de 9 millions de tonnes par an. Grâce à la fonte des neiges et des glaciers au printemps et en été, le fleuve affiche un débit stable y compris pendant les mois de faibles précipitations. La canicule de 2003 a cependant clairement montré à quel point cette voie de communication est sensible. A l'inverse, les crues telles que celles de février 1999 et mai 1994 peuvent aussi provoquer l'interruption de la navigation pendant des semaines [111].

Tourisme

Partie intégrante du paysage, l'eau joue un rôle central pour le tourisme en général mais aussi pour **les activités de loisirs, les piscines et les thermes, pour l'irrigation des terrains de golf, la navigation touristique et l'enneigement** (ill. 20). Près de la moitié des établissements d'hôtellerie se trouvent dans les cantons de montagne des Grisons, du Valais, de Lucerne et de Suisse orientale. Prépondérants pour le **tourisme d'hiver**, ils dépendent de la présence naturelle de la neige [112]. Depuis les années 1980, les quantités de neige diminuent en Suisse, une évolution qui affecte en particulier l'exploitation des stations de ski situées à moins de 1300 m [113].

Pour permettre aux clients de planifier leurs vacances à la neige et garantir aux hôteliers des revenus essentiels à leur survie, des pistes sont enneigées artificiellement depuis 1990. Aujourd'hui, 39% des pistes de ski (environ 90 km²) sont enneigées artificiellement [114], bien moins que dans les pays voisins que sont l'Autriche (67%) et l'Italie (70%). Les domaines skiables suisses situés en altitude profitent encore et toujours d'une grande sécurité d'enneigement. Cependant, le volume d'eau nécessaire à la production de neige artificielle est estimé entre 8,4 et 17 millions de m³ par an [65, 85]. Pour couvrir les besoins en eau, des bassins de retenue sont aménagés en altitude. Si ceux-ci se trouvent en dessous des zones skiables, comme c'est le cas du lac de Tseuzier à Crans-Montana-Sierre, l'eau doit être pompée avant utilisation (MONTANAQUA [6]). L'eau potable n'est que rarement utilisée pour l'enneigement (0,2% de la consommation totale d'eau potable) [65], mais des volumes considérables peuvent être utilisés localement [115, 116]. Les détracteurs de cette méthode dénoncent le fait que de grands

A gauche: les zones d'habitation représentent environ 7,5% de la surface de la Suisse, ce pourcentage se monte même à 16% sur le Plateau. (IWAQA)

Au milieu: le réseau routier de la Suisse s'étend sur 87 000 km environ. Pour des raisons topographiques, de nombreuses routes se trouvent à proximité d'un cours d'eau. (Photo Reportair)

A droite: grâce à la fonte des neiges et des glaciers au printemps et en été, le Rhin affiche un débit suffisant y compris pendant les mois de faibles précipitations. (DROUGHT-CH)



A gauche: les parcs et les installations de loisirs doivent également être irrigués. Terrain de golf à Crans-Montana. (MONTANAQUA)

Au milieu: dans les lieux très touristiques tels que Crans-Montana, la consommation d'eau potable est soumise aux variations saisonnières du nombre de visiteurs. (MONTANAQUA)

A droite: piste de neige artificielle sur le Jakobs-horn pendant le mois de décembre 2011, pauvre en neige. (Photo DDPS)

volumes d'eau ne s'écoulent pas à cause de l'évaporation dans les bassins de retenue, pendant la production de neige artificielle et sur la piste, qu'ils retardent le débit, voire augmentent le risque de crue à petite échelle [117, 118]. En réalité, l'enneigement provoque une perte par évaporation de 10 à 30% du volume d'eau nécessaire [85, 119]. Si l'on inclut l'évaporation dans les lacs d'accumulation, la perte s'élève jusqu'à 50%. Etant donné que les cours d'eau présentent généralement un débit plus faible en hiver, le maintien du débit résiduel est important sur le plan écologique.

L'étude de dix domaines skiables bénéficiant d'un enneigement artificiel a révélé qu'au printemps et en été, plus de 360 litres d'eau par mètre carré se sont écoulés en plus par rapport à la neige naturelle. En raison de la compaction plus élevée du sol sous les pistes de ski, l'augmentation des écoulements peut conduire à l'érosion du sol, à des glissements de terrain plus importants ou à l'engorgement par l'eau des zones limitrophes des pistes [120].

Les aspects qualitatifs jouent également un rôle dans l'enneigement. Si une eau eutrophe est pompée dans les cours d'eau proches des vallées ou des lacs [116, 121], celle-ci peut avoir un rôle décisif sur la croissance et la composition des espèces des prés alpins. La pratique croissante consistant à construire des installations de stockage en altitude afin d'y stocker de l'eau oligotrophe a permis de réduire ce risque au cours des dernières années. De plus, la Suisse autorise le mélange de germes de cristallisation bactériens (Snomax), classé comme inoffensif pour la végétation. Des expériences en serre ont montré que certaines plantes réagissent toutefois par une croissance accélérée ou retardée au traitement avec le Snomax [122]. Pour les cours d'eau des Alpes, les éléments organiques primaires du Snomax sont également considérés comme sans risques, car ils se décomposent en quelques jours [123]. Il n'existe pas d'études sur les effets occasionnés par l'eau de fonte de la neige artificielle sur l'écologie des cours d'eau alpins. Il en va de même pour le maintien de durcisseurs de neige sur les pistes de ski, c'est-à-dire des sels qui retirent l'énergie thermique de la couche de neige et qui sont utilisés pour la préparation de pistes de course. Ces applications ne sont utilisées qu'exceptionnellement en Suisse [124].

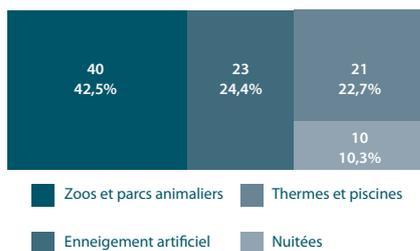
Gouvernance de l'eau et infrastructure hydraulique

La gouvernance de l'eau décrit les règles, normes et processus de collaboration qui régissent les activités en lien avec l'eau et, par là même, l'utilisation des ressources en eau. La gouvernance porte sur la gestion et la distribution de l'eau, mais aussi sur la protection des cours d'eau et la protection contre l'eau, un aspect qui revêt une réelle importance en particulier dans un contexte de fonte des glaciers et de formation de nouveaux lacs. Les instruments déterminants pour la gouvernance de l'eau sont les taxes et les concessions collectées pour la construction, l'exploitation et l'entretien des différentes infrastructures hydrauliques.

Selon l'**article 76 de la Constitution fédérale**, la Confédération pourvoit à l'utilisation rationnelle des ressources en eau, à leur protection et à la lutte contre l'action dommageable de l'eau. Elle fixe les principes applicables à la conservation et à la mise en valeur des ressources en eau, à l'utilisation de l'eau pour la production d'énergie et le refroidissement et à d'autres interventions dans le cycle hydrologique. Par des lois et des décrets, la Confédération légifère sur la protection des eaux, sur le maintien de débits résiduels appropriés, sur l'aménagement des cours d'eau et sur la sécurité des barrages. Les cantons et les communes gèrent les ressources en eau à leur disposition. Ils assurent, à ce titre, **l'approvisionnement en eau, l'élimination des eaux usées, la protection contre les crues, la protection des cours d'eau et les revitalisations, mais aussi l'énergie hydraulique**. La Suisse dispose d'une grande expérience dans l'approche intégrative de ces missions, mais sa mise en œuvre est compliquée par la fragmentation importante, des structures sectorielles dominantes et la gestion décentralisée des ressources en eau (IWAGO [96]). **La Stratégie de gestion de l'eau en Suisse**, annoncée par le Conseil fédéral et lancée en 2011 sur la base du postulat Segmüller (11.3914), représente une réponse politique à la problématique de la sécurité de l'eau et de la coordination de la gestion de l'eau. La mise en œuvre de cette stratégie globale de gestion de l'eau s'avère cependant ardue. A cet égard, les bénéfices d'une intégration accrue sont incontestés (→ voir IWAGO p. 24).

Consommation d'eau Tourisme

mio m³/a
95 mio m³/a = 100%



III. 20: chaque année, 95 mio de m³ d'eau sont consommés en Suisse pour les loisirs et le tourisme (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [73]).



Il faut également réfléchir à la gouvernance dans la **région des montagnes**. Les glaciers et lacs glaciaires, y compris ceux formés récemment suite à la fonte des glaciers, sont considérés comme des terres non cultivables. Ils relèvent à ce titre de l'autorité cantonale, et chacun est libre de les utiliser comme bon lui semble (randonnées, excursions à ski, rafting, etc.). Les glaciers et leurs lacs ne sont la propriété de personnes privées que dans de rares cas qui puisent leur origine dans des droits d'utilisation historiques ou dans d'anciennes définitions de frontières (p. ex. les glaciers du Rhône ou de l'Aar). Les utilisations spéciales, en relation notamment avec l'énergie hydraulique, les téléphériques ou les pistes de ski, sont soumises à une concession hydraulique ou à une autre autorisation officielle, fixant les droits d'utilisation et les devoirs (p. ex. pour les droits d'usage de l'eau, les prestations, les conditions, la redevance hydraulique, la durée de la concession et le droit de retour possible).

La disparition des glaciers et la formation de nouveaux lacs nous confrontent non seulement à de nouvelles conditions d'utilisation, mais aussi à la question de la responsabilité ou des sanctions pénales en cas d'endommagement des constructions ou des installations situées en contrebas ou de dommages corporels aux utilisateurs par suite de chutes de glace ou de rochers, de laves torrentielles ou d'ondes de crue. En principe, les cantons et les communes, qui disposent de quelques outils préventifs intégrant des mesures d'aménagement du territoire et d'aménagement hydraulique, sont responsables des dangers liés aux glaciers. En cas de sinistre, les victimes doivent cependant supporter seules les dommages, à défaut de responsabilité du propriétaire de l'ouvrage ou de responsabilité pour faute. Les propriétaires de l'ouvrage, notamment les exploitants de centrales hydrauliques, doivent en effet s'assurer que leur usine ne présente aucun défaut. Même en cas d'événements fortuits indépendants du comportement humain, la responsabilité causale s'applique. Cela signifie qu'en l'absence même d'une faute du propriétaire de l'ouvrage, ce dernier est responsable en cas de dommages corporels et de dégâts matériels causés par des défauts de l'ouvrage. La responsabilité du propriétaire de l'ouvrage n'est cependant pas mise en cause en cas de force majeure (p. ex. crues violentes et rares, laves torrentielles, ava-

lanches imprévisibles et importantes chutes de rochers). Les mesures de prévention contre l'action dommageable de l'eau font également partie de la mission de la collectivité et de l'exploitant de l'entreprise. S'agissant des lacs glaciaires, des obligations spéciales s'appliquent aux responsables des chemins de randonnée et aux exploitants de barrages. En cas de danger imminent, le niveau des lacs de barrage doit pouvoir être abaissé ou les lacs vidés. De plus, sur les grands lacs de barrage, un dispositif d'alarme eau doit être installé si la sécurité de fonctionnement du barrage n'est plus garantie (NELAK [14]).

L'eau est une ressource précieuse qui est considérée comme une matière première publique. Pour l'utilisation de l'énergie hydraulique, les cantons et les communes accordent aux entreprises privées un droit d'utilisation, c'est-à-dire une **concession** pour une durée maximale de 80 ans. En contrepartie, les concessionnaires versent une redevance pour l'utilisation spéciale appelée redevance hydraulique. A l'échelle de la Suisse, les **redevances hydrauliques** s'élèvent à environ 400 millions de francs par an [125].

L'infrastructure hydraulique est également précieuse. La gestion de l'eau en Suisse investit chaque année plus de 7 milliards de francs dans l'entretien des installations et la construction de nouveaux ouvrages [126]. L'énergie hydraulique représente le principal investissement en capital, suivi par l'approvisionnement en eau, l'élimination des eaux usées, l'aménagement des cours d'eau et la protection contre les crues (y compris les revitalisations), les drainages et les pompes (ill. 21).

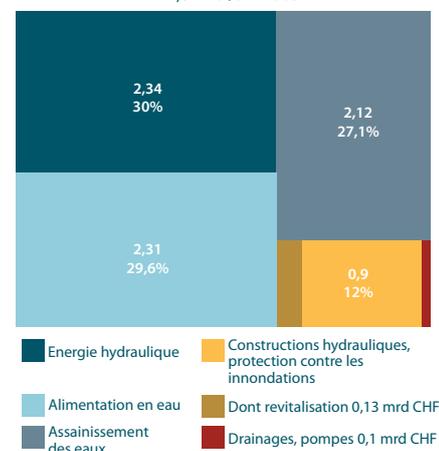
Les coûts d'exploitation liés à l'approvisionnement en eau et à l'élimination des eaux usées (mais pas le coût du capital) sont en principe couverts par les redevances qui sont basées sur le principe de causalité. Ainsi, 1 m³ d'eau potable coûte en moyenne CHF 1.85, ce qui correspond à 30 centimes environ par personne et par jour [81]. Les taxes sur les eaux usées, de CHF 1.80 par m³, se fondent également sur le principe de causalité. La loi prescrit que les taxes doivent couvrir non seulement l'entretien mais aussi l'assainissement et la construction de nouvelles installations. Pour maintenir la valeur des installations d'épuration des eaux et des canalisations, il faudrait

A gauche: la disparition des glaciers et la formation de nouveaux lacs confrontent les randonneurs, les entreprises et les autorités à de nouvelles conditions d'utilisation. (NELAK)

Au milieu: en principe, les cantons et les communes sont responsables des dangers liés aux glaciers. (NELAK)

A droite: s'agissant des lacs glaciaires, des obligations spéciales s'appliquent aux responsables des chemins de randonnée et aux exploitants de barrages. (NELAK)

Coûts de l'infrastructure
en mrd CHF/a
7,8 mrd /a = 100%



III. 21: coûts annuels d'exploitation et du capital pour les différentes infrastructures hydrauliques en Suisse. (A. Björnson, avec des chiffres tirés de [126, 127])



A gauche: les infrastructures hydrauliques suisses sont précieuses. (SWIP)

Au milieu: les taxes couvrent l'entretien, l'assainissement et le remplacement des installations. (SWIP, photo Max Maurer)

A droite: les spécialistes suisses disposent déjà d'une grande expérience dans l'approche intégrative de la gestion des eaux urbaines. (SWIP)

investir 2,2 mia de francs par an. Les recettes correspondantes ne s'élevant qu'à 1,7 milliard de francs, la couverture s'avère nettement insuffisante [128]. D'autres investissements sont nécessaires pour la mise en place de 100 nouvelles stations d'épuration des eaux usées, conformément au projet du Conseil fédéral. Les coûts d'investissement sont estimés à 1,2 milliard de francs, ce qui représente un coût annuel de 60 millions de francs [129].

De plus, dans la plupart des cantons, des **redevances de concession** pour le captage, la gestion et le prélèvement de l'eau doivent être versées aux cantons ou aux communes [17]. Les redevances obéissent à des règles différentes, car elles sont gérées par les cantons, la Confédération émettant des consignes. Certains cantons collectent une taxe unique, en fonction du volume pour les autorisations de prélèvement, alors que d'autres collectent des taxes annuelles pour la prestation autorisée ou pour la prestation et le volume.

Depuis le milieu des années 1980, seules les installations d'irrigation dans les vallées sèches intra-alpines, surtout dans le Valais, bénéficient encore de **subventions**. Cependant, la politique des subventions pourrait évoluer à l'avenir pour placer les producteurs dans des conditions identiques à celles en vigueur au sein de l'UE [97].

Concernant les **revitalisations de cours d'eau**, la Confédération met chaque année à disposition une enveloppe de 40 millions de francs. Ces fonds permettent d'encourager les revitalisations dans les cantons avec 35 à 80% de contributions fédérales. De plus, des mesures visant à atténuer les effets négatifs du marnage, à rétablir le régime de charriage et la libre circulation des poissons par l'application de surtaxes sont financées via Swissgrid, et l'on évoque ici une somme de 50 millions de francs environ.

Mais la Suisse ne peut régler à elle seule la gestion de l'eau. La **collaboration transfrontalière** dans le domaine de la gestion de l'eau est importante pour la Suisse et permet, outre la gestion commune, l'échange d'expertises internationales. Font partie des instances chargées de traiter les grands cours d'eau dotés d'un bassin versant dans les régions frontalières la Commission intergouvernementale pour le Rhin alpin (IRKA), la Commission internationale pour la protection du Rhin (CIPR), la Régulation internationale du Rhin (IRR), la

Commission internationale pour la protection des eaux du lac de Constance (IGKB), la Commission internationale pour la protection des eaux italo-suisse contre la pollution (CIPPAIS), la Commission internationale pour les eaux du lac Léman (CIPEL) chargée de la protection des eaux du lac Léman, du Rhône et de leurs affluents et la Commission internationale pour la pêche dans le Doubs [96]. Pourquoi est-ce si important? Le Rhin, par exemple, draine non seulement 68% de la surface de la Suisse, mais aussi les régions à forte densité de population réunissant presque 80% de la population totale. La part des eaux usées communales dans le Rhin à Bâle est de 5% en basses eaux. L'élimination des déchets du Rhin est prise en charge par les pays limitrophes mus par différents impératifs d'utilisation et de protection. Depuis 1963, la CIPR sert de base légale internationale. Elle s'engage depuis 1976 à exploiter les stations de mesure et à développer un système d'alerte et d'alarme. En 1987, en réaction aux suites dévastatrices de l'accident de la Schweizerhalle du 1^{er} novembre 1986 pour l'écologie du fleuve et la production d'eau potable, le programme d'action pour le Rhin intitulé «Programme d'Action Rhin», qui réduit par des programmes coordonnés des pays limitrophes la teneur en polluants, améliore les conditions hydrologiques, biologiques et morphologiques et doit sécuriser la production d'eau potable. L'obligation de déclaration des accidents majeurs a notamment été concrétisée, et une surveillance constante de la qualité de l'eau du Rhin a été convenue (RÜS Bâle) [64].

Changement climatique et évolution de la société: les répercussions sur les ressources naturelles en eau

La Suisse se trouve dans une situation confortable et n'a guère besoin de se soucier des ressources en eau. Des réserves importantes atténuent les effets des périodes de sécheresse, les volumes annuels nécessaires à l'eau potable et à l'irrigation sont donc relativement faibles. A l'échelle nationale, l'on part du principe que, malgré les évolutions climatiques, démographiques et économiques, l'eau sera disponible à l'avenir en quantité suffisante. Cependant, même si le volume des réserves et les débits annuels n'enregistrent pas de grandes modifications, la nouvelle donne environnementale, dans le temps comme dans l'espace, aura à l'avenir une incidence notable sur les réserves disponibles. Les modifications du paysage liées à la gestion de l'eau peuvent jouer un rôle non négligeable au niveau local. Les réserves du château d'eau dépendent aussi et surtout des exigences et utilisations de la société.

Modifications liées au climat et conséquences jusqu'en 2050 et 2085

Les Alpes subissent les effets du changement climatique. Au cours du siècle dernier, l'augmentation de la température dans les Alpes est deux à trois fois supérieure à la moyenne globale [130, 131]. Cette situation s'explique par le simple fait que les montagnes abritent beaucoup de neige et de glace. Contrairement au sol et à l'eau, la neige et la glace réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire et se réchauffent donc moins. Si la surface recouverte de neige et de glace diminue, la région affichera des températures supérieures. En d'autres termes, la diminution des surfaces de neige et de glace conduit à des effets de rétroaction positive, responsables d'un réchauffement plus fort en altitude qu'ailleurs. Par ailleurs, l'augmentation de la température entraîne une accélération du cycle de l'eau. Etant donné que l'arc alpin est influencé aussi bien par l'Atlantique que par la Méditerranée et qu'il est marqué aussi bien par des précipitations convectives que stratiformes [132], les scénarios climatiques pour la Suisse représentent un défi particulier, d'autant que la topographie complique également le recueil d'informations fiables. Pour obtenir un tableau des évolutions climatiques à venir en Suisse, des scénarios ont été publiés sous le nom CH2011, scénarios qui contiennent des informations quantitatives sur l'évolution prévisible de la température moyenne, des précipitations moyennes et sur une sélection d'indicateurs climatiques [133]. Les scénarios révè-

lent une incertitude assez importante, raison pour laquelle une certaine marge est définie dans le cadre du calcul de l'évolution de la température et des précipitations. Les scénarios reposent sur un grand nombre de modélisations climatiques du GIEC, du projet européen ENSEMBLES ainsi que sur des analyses et d'autres révisions du consortium CH2011. Le projet CH2011 a affiné ces modèles pour la Suisse du Nord-Est, de l'Ouest et la région au sud des Alpes pour trois fenêtres temporelles (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099). Dans le cadre du perfectionnement des scénarios climatiques antérieurs, le CH2011 a utilisé trois scénarios d'émissions, A1B, A2 et RCP3PD (au lieu d'A1B uniquement), pour les modèles de calcul et intègre ainsi dans l'examen une réduction potentielle du CO₂ à 450 ppm d'ici à la fin du siècle. Les observations suivantes s'appuient en grande partie sur les enseignements du CH2011.

L'augmentation de la température observée jusqu'ici en Suisse va se poursuivre et sera plus marquée encore que dans d'autres pays [134, 135]. Jusqu'en 2050, de nombreux effets ne se manifesteront que faiblement, mais il faut s'attendre à de profonds changements à compter de 2050. Même si l'évolution globale de la température se stabilise dans une fourchette de moins de 2° C par rapport aux valeurs pré-industrielles (scénario RCP3PD), les modèles prévoient un nouveau réchauffement pour la Suisse de 1,4° C vers la fin du siècle. Dans les scénarios excluant toute mesure d'intervention (A1B, A2), le réchauffement serait deux à trois fois plus important. Un tel réchauffement est attendu dans toutes les régions et tout au long de l'année, avec toutefois des impacts différents. Dans la seconde moitié du siècle, l'augmentation de la température sera plus marquée et variera selon les saisons. Selon tous les scénarios d'émission, la plus forte augmentation de température est attendue en été et en hiver; les plus fortes valeurs sont attendues dans les régions au sud des Alpes (augmentation de 1,77° C de la température estivale selon le scénario RCP3PD 2085; +4,83° C selon A2 2085; ill. 22). Les températures estivales augmentent plus fortement que les températures hivernales [133] parce que la nébulosité et l'humidité du sol sont plus faibles en été [133].

Par **extrêmes climatiques**, l'on entend les événements rares s'écartant nettement de la valeur moyenne [135], comme les périodes prolongées de chaleur, de sécheresse ou de froid ou les fortes précipitations. Les prévisions pour les modifications à venir concernant la fréquence, l'intensité, la durée et la dimension spatiale des extrêmes climatiques com-

«Dans l'absolu, il y aura toujours assez d'eau en 2050; néanmoins, des pénuries saisonnières et régionales pourraient survenir.»

Flurina Schneider
MONTANAQUA
Université de Berne



Plus d'informations  MONTANAQUA sur www.pnr61.ch

portent des incertitudes plus importantes que pour les modèles de températures et de précipitations. Déjà au cours des dernières décennies, la fréquence et l'intensité des **périodes de chaleur** ont augmenté en Europe centrale, tout comme en Suisse. Cette tendance va vraisemblablement se poursuivre et s'accroître. Ainsi, à la fin du XXI^e siècle, un été sur deux pourrait être au moins aussi chaud voire plus chaud que lors de la canicule légendaire de 2003 [136, 137]. Il est probable que la fréquence et la durée des **périodes de sécheresse** estivales augmentent également. En revanche, le nombre de jours et de nuits d'hiver froids ainsi que la durée et la fréquence des périodes de froid prolongées vont diminuer [135].

Précipitations et évaporation

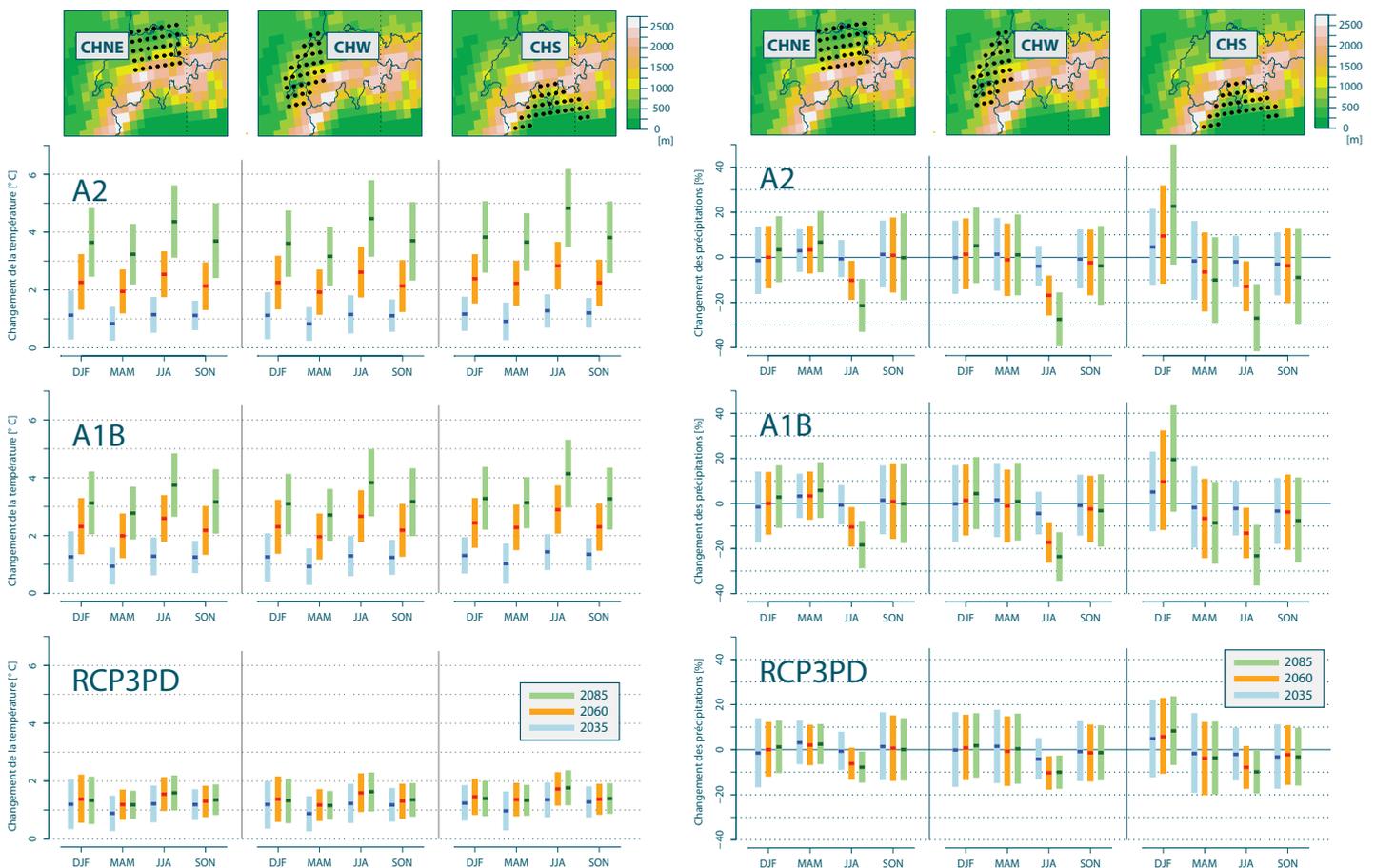
Les prévisions concernant les précipitations annuelles sont rassurantes: le volume devrait peu diminuer [138]. Toutefois, les prévisions sur les évolutions futures des précipitations liées à la position centrale qu'occupe la Suisse sont empreintes de grandes incertitudes. Alors que l'on prévoit une augmentation des précipitations en Europe du Nord, le volume de précipitations en Europe du Sud devrait fortement diminuer, principalement en été. Au printemps, en automne et en hiver, la Suisse se trouve dans la zone de transition entre deux régimes climatiques, ce qui complique l'établissement de prévisions.

Le volume de précipitations annuelles diminuera d'environ 7%. Si les précipitations devaient augmenter de 15 à 35% en hiver, celles-ci devraient diminuer de 20 à 40% en été partout en Europe [139]. La Suisse devrait donc disposer de beaucoup d'eau à l'avenir. Toutefois la répartition et l'intensité des précipitations prévues pourraient bien nous inquiéter.

Une augmentation des volumes moyens de précipitations est attendue au nord de l'arc alpin en automne et en hiver ainsi que dans certaines zones au printemps. Alors qu'**en été** les volumes moyens de précipitations diminuent dans toutes les régions de la Suisse, en particulier dans la Suisse du Sud et du Nord-Ouest (-30 à -50%), le risque de fortes précipitations augmente surtout dans la Suisse du Nord-Ouest et du Nord-Est. Pour **l'automne**, les modèles prévoient un renforcement des précipitations intenses et extrêmes dans toutes les régions. **En hiver**, le volume moyen de précipitations [132] ainsi que la fréquence des fortes précipitations devraient nettement progresser sous l'effet de l'intensité accrue des précipitations [135, 140]. Dans la Suisse du Sud également, les précipitations hivernales devraient augmenter, en particulier dans la seconde moitié du siècle [135].

L'influence du changement climatique sur la **présence de neige** s'exprime, dans l'espace comme dans le temps, par la montée de la limite des chutes de neige. Dans les régions de

III. 22: augmentation saisonnière de la température (à gauche) et modification future des précipitations saisonnières moyennes (à droite) pour les trois régions de Suisse selon les scénarios A2, A1B et RCP3PD pour 2035, 2060 et 2085. Dans un avenir lointain (2085, en vert), les températures hivernales (DJF) du scénario A2 dans la Suisse du Nord-Est (CHNE) devraient avoir augmenté de 3,6° C par rapport à qu'aujourd'hui. (CH2011)





basse et moyenne altitudes, c'est-à-dire aux altitudes proches du point de congélation, il faut s'attendre à davantage de pluie que de neige en hiver [135, 139, 141]. En moyenne, l'isotherme zéro degré se trouvait à environ 600 m d'altitude à l'hiver 1960, il se trouve à environ 900 m aujourd'hui et devrait s'élever à environ 1200 m d'altitude d'ici à 2050 [142]. Les conséquences de cette évolution sont également perceptibles en plaine parce que la fonte des neiges influence fortement les **écoulements**. La fonte des neiges contribue pour 42% à l'écoulement total hors de Suisse. Ce chiffre s'élève à seulement 20% pour le Plateau, mais à plus de 60% pour les régions montagneuses. Selon les modélisations (A1B; période de contrôle 1980-2009), la part des précipitations, qui s'accumulent en hiver sous forme de neige et contribuent plus tard aux écoulements par la fonte des neiges, diminuera de plus de 15% durant la première moitié du siècle. Cette tendance se renforcera encore considérablement pendant la seconde période du scénario (2070-2099). A volumes de précipitations similaires, les ressources en neige diminuent de plus de 35% [143]. Même si les précipitations hivernales augmentent et qu'il tombe globalement plus de neige dans les régions d'altitude, les réserves de neige devraient diminuer au printemps, les surfaces qui ne sont plus recouvertes de neige étant démesurément importantes par rapport à la surface totale recouverte de neige [28]. Concrètement, une augmentation de la température de 4° C jusqu'en 2071-2100 dans les régions situées autour de 1000 m d'altitude provoquera une réduction du volume de neige d'au moins 90%. A 2000 m d'altitude, 50% du volume de neige disparaîtra et à 3000 m, il restera encore 35% environ du volume de neige actuel. Ces chiffres concordent avec de nouvelles estimations qui prévoient une réduction à 20 à 70% de l'équivalent actuel neige-eau pour des altitudes 2000 à 2500 (A1B; période de référence 1971-2000) [144].

Le nombre de jours de couverture neigeuse diminuera, principalement au détriment des jours de neige au printemps. L'hiver viendra peut-être un peu plus tard et se terminera beaucoup plus tôt. De nouvelles modélisations pour les zones situées entre 1000 et 1500 m d'altitude prévoient une réduction de la couverture neigeuse de 24 jours (2020-2049) ou de 53 jours (2070-2099) [141].

Concernant les **précipitations**, les modèles climatiques prévoient une intensification des événements extrêmes dans l'espace alpin [141]. Au siècle dernier, les précipitations ainsi que les fortes précipitations ont augmenté pendant le semestre d'hiver [145, 146]. L'on prévoit également dans un avenir lointain (2070-2099, A1B, période de référence 1970-1999) un risque accru d'événements extrêmes, aussi bien pour les fortes précipitations que pour les périodes de sécheresse prolongée [135], la probabilité étant différente suivant les saisons et les régions. En automne, l'on s'attend à une augmentation des valeurs extrêmes de précipitations de 10% au maximum sur le versant nord des Alpes et de 20% sur le versant sud. En hiver et au printemps, l'augmentation oscille entre 0% et 20% sur les deux versants des Alpes. Selon les prévisions, des pluies abondantes sur une durée prolongée entraîneront, en hiver et au printemps, une augmentation du volume des précipitations. Pour l'été, les simulations de modèles ne permettent aucune affirmation. Au mieux, l'on peut déceler des tendances en hausse au nord des Alpes et en baisse au sud des Alpes [147]. S'il est impossible de prévoir de manière fiable **l'apparition d'orages** et de cyclones, l'on anticipe toutefois que la Suisse du Nord sera touchée à l'avenir par des cyclones et des orages d'hiver rares mais violents [135].

Au cours du siècle dernier, **l'évaporation** a augmenté en Suisse [148]. Avec la hausse de la température et la diminution des surfaces de neige et de glace, l'évaporation potentielle devrait également augmenter d'environ 20% d'ici à la fin du siècle [149]. Etant donné que dans de nombreuses régions, il pleut suffisamment pendant de longues périodes, l'évaporation réelle devrait continuer à augmenter légèrement [28], mais l'on observera de nettes disparités selon les régions, les altitudes et les saisons. Tandis que les taux d'évaporation vont augmenter en altitude et sur le versant sud des Alpes pendant l'été, ils diminueront dans les plaines du nord du Plateau et dans les vallées intra-alpines (scénario A2 pour 2071-2100) [149]. Quelles sont les raisons de cette évolution? Si l'on confronte les modèles d'évolution climatiques et d'évolution des forêts, ceux-ci prévoient une augmentation de l'évaporation moyenne de 5 à 10 mm par an dans le bassin versant du Rhône et du Tessin. A basse altitude (en dessous de 1200 m), les dégradations

A gauche: la fonte des neiges contribue pour 42% à l'écoulement total hors de Suisse. (NELAK)

Au milieu: déjà au cours des dernières décennies, la fréquence et l'intensité des périodes de chaleur ont augmenté en Europe centrale. (DROUGHT-CH)

A droite: les réserves du château d'eau suisse dépendent aussi et surtout des exigences et utilisations de la société. (Reportair)



A gauche: au siècle dernier, les précipitations ainsi que les fortes précipitations ont augmenté pendant l'hiver. (Photo Philippe Gyarmati)

Au milieu: des parts considérables du volume de glace actuel des glaciers suisses ($55 \pm 15 \text{ km}^3$) fondront avant le milieu du siècle. (NELAK)

A droite: nouveau lac glaciaire au pied du glacier du Rhône en août 2012. La surface du lac glaciaire devrait encore augmenter considérablement à l'avenir. (Photo Wilfried Haerberli)

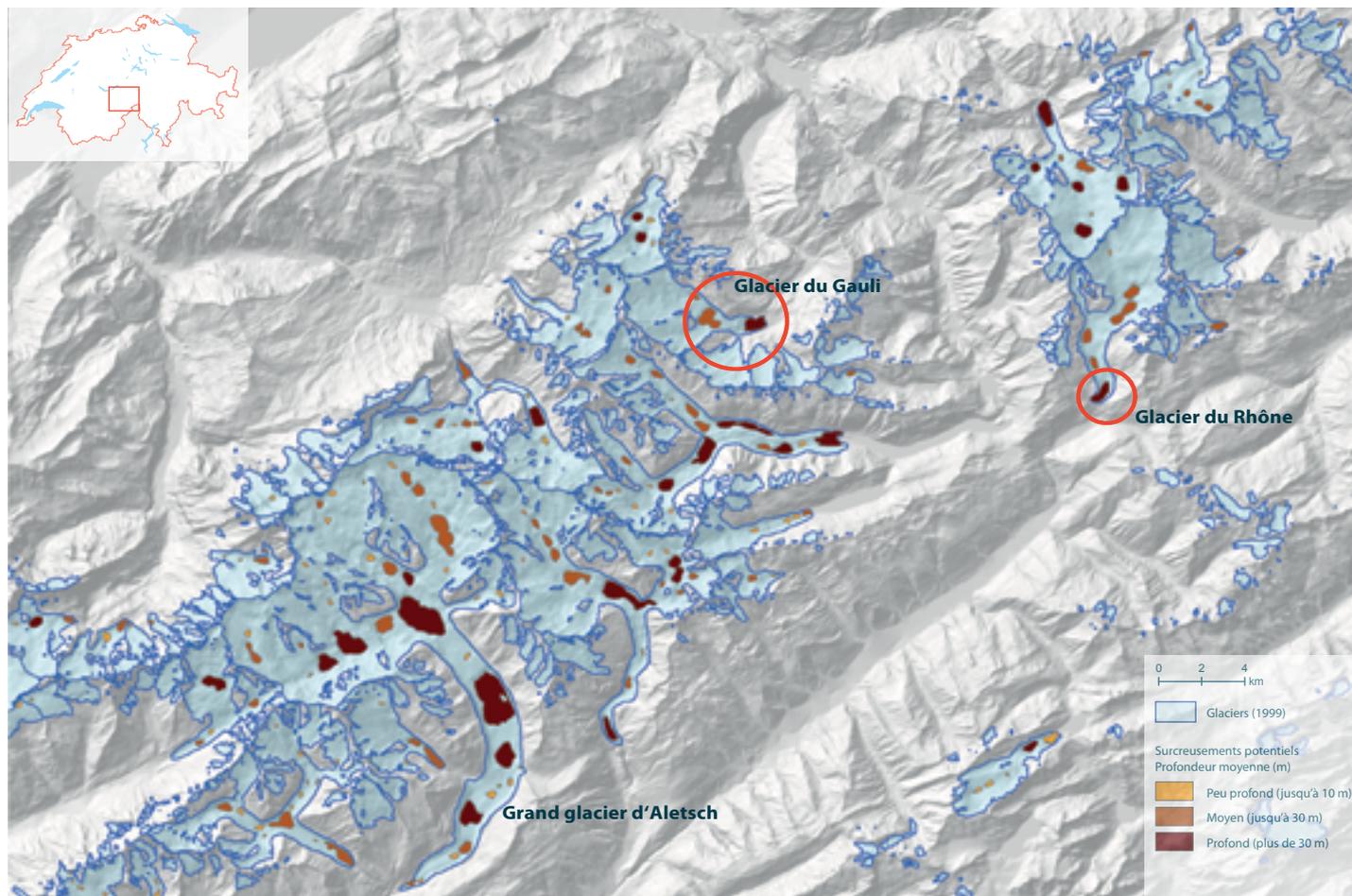
III. 23: surcreusements modélisés et lacs glaciaires potentiels dans les Alpes centrales suisses aujourd'hui recouvertes de glaciers. Le cercle vert délimite le glacier du Gauli (lac glaciaire déjà existant) et lac glaciaire amené à se former dans un avenir proche [154]. (NELAK)

tions des forêts provoquées par le stress de la sécheresse réduisent significativement les taux d'évaporation à long terme (2070-2100), mais cette diminution est compensée par la progression des surfaces boisées et l'augmentation concomitante des taux d'évaporation à une altitude supérieure (au-dessus de 1300 m d'altitude) [150]. L'allongement de la période de végétation et la production accrue de biomasse favorisent également l'évaporation par les plantes [151]. De manière générale, l'augmentation des taux d'évaporation en été, associée à une hausse des températures et du rayonnement, en Suisse pourraient aggraver encore la diminution de l'humidité du sol et augmenter le risque d'une sécheresse agricole [135].

Glaciers

Selon les dernières projections du NELAK, les glaciers des Alpes perdent actuellement environ 40 km^2 de leur surface restante par an (soit env. 1800 km^2) et environ 2 km^3 de leur volume ($80 \pm 20 \text{ km}^3$) [15]. Des parts considérables du **volume de glace actuel des glaciers suisses** ($55 \pm 15 \text{ km}^3$) fondront avant le milieu du siècle. Les grands glaciers continueront eux aussi de fondre dans la seconde moitié du siècle au point de se réduire à quelques traces de glace [152]. A long terme, cette évolution diminue l'eau de fonte des glaciers alimentant les cours d'eau.

L'absence de masse de glace stabilisatrice après le recul du glacier et, partant, l'absence de pression sur les flancs de la montagne augmentent le **risque de chutes de rochers et de laves torrentielles**. Les flancs de montagne ainsi libérés absorbent davantage le rayonne-



ment solaire que les glaciers, ce qui entraîne à nouveau un réchauffement de la température de l'air. Comme en témoignent les recherches approfondies menées dans le cadre du projet NELAK, la fonte des glaciers provoquera la formation de **nouveaux lacs** [152] au cours des prochaines décennies, lesquels accéléreront encore la fonte de la glace [153,154] (→ voir ill. 23 et NELAK, p. 40).

L'impact sur la qualité des écosystèmes alimentés par l'eau des glaciers est beaucoup moins visible que la perte de volume. L'eau de fonte des glaciers transporte beaucoup de sédiments fins et de matières dissoutes (p. ex. calcium, magnésium, bicarbonate et sulfate), elle est froide et généralement soumise à des fluctuations journalières et annuelles. A la fin de l'été, l'eau de fonte des glaciers contribue largement au débit de nombreux ruisseaux et cours d'eau [155].

La flore et la faune présentes dans les écosystèmes des Hautes-Alpes se sont adaptées à ces conditions. La fonte des glaciers aura pour effet de faire grossir et de réchauffer les ruisseaux alimentés par l'eau souterraine [156]. Si la couverture de glace est plus fine sur les ruisseaux de montagne et les petits lacs, elle influe à son tour sur les **conditions de lumière et de température** et détermine en outre la croissance des algues et des organismes qui en dépendent dans la chaîne alimentaire. En raison de l'espace restreint des paysages de haute montagne, l'augmentation de la température de l'eau de surface alpine conduit à la **disparition d'espèces** qui s'étaient réfugiées dans ces niches mais ne peuvent s'adapter à d'autres milieux naturels [157]. Conséquence probable: la diminution de la diversité des espèces dans la marge glaciaire, notamment en raison de la migration des espèces ayant besoin de chaleur. D'autres études ont démontré que la fonte des glaciers a des effets immédiats sur les sociétés de microbes dans la marge glaciaire; ceux-ci stimulent les processus géochimiques et les cycles des

éléments nutritifs et fournissent ainsi l'alimentation nécessaire à des organismes situés en amont dans la chaîne. Si les micro-organismes se modifient dans les sédiments des ruisseaux et des lacs alpins, il en résultera probablement une modification de la faune et de la flore [156].

Les glaciers façonnent considérablement **l'évolution du paysage**, et pas seulement en altitude. Comme cela a été démontré pour le val Roseg, le flux d'eau de fonte des glaciers refoule et repousse littéralement en hauteur l'eau souterraine sur les flancs de la vallée, où les sols mouillés offrent un milieu naturel unique aux animaux et aux plantes. Si cette eau en suspension s'infiltré sous forme de flux d'eau souterraine en hiver, elle maintient les températures des sédiments au-dessus de zéro pendant tout l'hiver, même si la température de l'air peut chuter à -18°C [155]. Si ce flux d'eau de fonte se tarit, l'écosystème se modifie également.

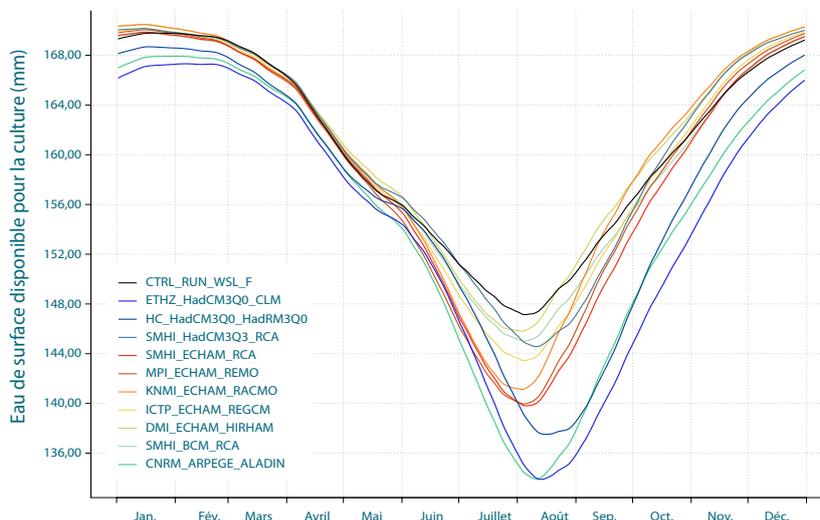
Conséquence immédiate de la fonte des glaces, les sédiments et les matériaux de charriage se déposent dans la marge glaciaire et sont transportés dans la vallée par les écoulements. Avec l'augmentation prévue des événements extrêmes, ces matériaux peuvent augmenter le **charriage** et remodeler le paysage de la rivière [158]. Le charriage est bien connu à Spreitgraben près de Guttannen dans l'Oberland bernois, où la fonte du permafrost a déclenché en 2009 une première lave torrentielle. Depuis, ce système de fosses ne connaît plus de répit et menace des zones urbaines, la route cantonale et une importante conduite de gaz [159]. Pour les habitants, mais aussi pour les exploitants de l'énergie hydraulique et les agriculteurs, cet aménagement du paysage généré par le climat représente un véritable défi. Simultanément, les **lacs glaciaires** ouvrent de nouvelles perspectives pour l'énergie hydraulique et le tourisme. Les lacs intéressants pour l'énergie hydraulique sont ceux qui se constituent dans les parties plus

«Le recul des glaciers, en Suisse et à l'échelle mondiale, vient clairement de l'augmentation de la température atmosphérique. Cela ne fait aucun doute.»

Wilfried Haeblerli
NELAK
Université de Zurich



Plus d'informations  NELAK
sur www.pnr61.ch



III. 24: projections de l'eau de surface de la Suisse dans un avenir lointain (dix scénarios climatiques en couleurs, 2070-2099) comparées à la période de contrôle (en noir, 1980-2009). On attend une baisse significative des réserves d'eau de surface, surtout à la fin de l'été et en automne. (Graphique CCHydro)

«Nous avons été surpris de constater que le niveau de la nappe phréatique avait fortement baissé (environ 10 m sur 10 km²) lors de l'essai de pompage effectué dans le canal de Hagneck, et alors qu'il restait encore énormément d'eau dans la rivière.»

Daniel Hunkeler
GW-TREND
Université de Neuchâtel



Plus d'informations GW-TREND
sur www.pnr61.ch

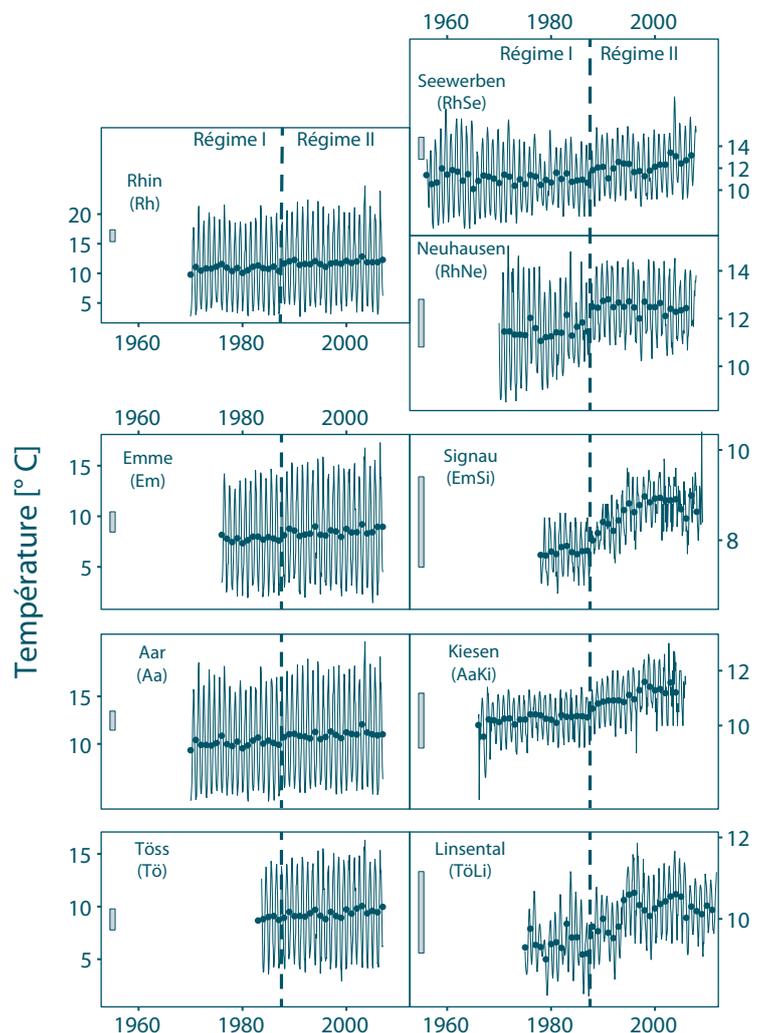
planes des glaciers de vallée. La fonction de réserve des lacs de barrage existants et à venir revêt une importance majeure pour le régime des eaux en Suisse, car ils devront reprendre la fonction de réserve des glaciers après leur fonte [153] (NELAK). Les avis divergent sur la capacité des nouveaux lacs glaciaires à compenser la valeur paysagère et l'attrait des glaciers disparus.

Eau de surface

Le changement climatique agit directement et indirectement sur l'eau de surface. La température, le type, la quantité et la répartition des précipitations ont un effet immédiat sur les structures du sol, les processus de dégradation, la végétation et les débits. Nombre de ces processus sont connus et modélisés. De grandes incertitudes subsistent toutefois concernant le volume d'eau en réserve dans le sol. Selon les résultats de CCHydro, **les réserves d'eau de surface** devraient peu évoluer dans un avenir proche. Cependant, sur le long terme, elles devraient considérablement diminuer à cause de températures plus élevées et des périodes de sécheresse plus longues pendant les mois d'été (ill. 24) [27]. Etant donné que l'eau de surface ne représente que 2% du volume total des réserves,

les modifications à venir des réserves d'eau de surface semblent insignifiantes pour le bilan global du régime des eaux de la Suisse [16]. L'eau de surface est importante sur les plans économique et écologique, car elle peut compenser les déficits de précipitations sur plusieurs semaines. Comme l'a montré une analyse dans le bassin versant du Rietholzbach, le déficit de précipitations au printemps 2003 a été compensé par l'excédent de précipitations observé sur des périodes antérieures, de sorte que le déficit est resté sans autre effet sur la période de sécheresse estivale suivante. La canicule de 2003 a quant à elle eu des effets jusqu'au printemps suivant sur les réserves du sol (DROUGHT-CH [53]). L'agriculture en particulier profite de la capacité de tampon du sol. Mais l'autre extrême existe aussi, quand les réserves emmagasinées dans le sol sont pleines. L'augmentation prévue des précipitations en hiver et la hausse des températures hivernales auront tendance à saturer fortement les sols en hiver et au printemps. Pendant cette période de l'année, le niveau accru de précipitations, en particulier lorsqu'il s'accompagne de fontes de neige, peut provoquer des crues sur le Plateau et dans le Jura [142].

III. 25: températures de l'eau de rivière (à gauche) et températures de l'eau souterraine (à droite). Entre 1980 et 2000, les températures de l'eau souterraine ont augmenté de 1 à 1,4° C à cause d'une augmentation – seulement légèrement plus forte – des températures de l'air et de l'eau de rivière. On remarque une augmentation de température plus substantielle de toutes les séries temporelles à la fin des années 1980. (Tiré de [24] GW-TEMP)





Eau souterraine

Dotée de quelque 150 km³ de réserves, la Suisse jouit d'une importante ressource d'eau souterraine, qui n'évoluera pas de façon significative avec le changement climatique. Cependant, ce n'est pas le volume de réserve qui est intéressant en premier lieu pour la gestion durable de l'eau souterraine, mais la réserve disponible, qui pourrait diminuer dans les petits aquifères locaux [20]. La sécheresse de 2003, pendant laquelle le niveau de l'eau souterraine a chuté à des niveaux historiquement bas à certains endroits, a montré qu'il peut y avoir des cas de pénurie et que les déficits d'eau souterraine ne peuvent pas toujours être compensés l'année suivante [160].

Un indicateur clé est le **renouvellement de l'eau souterraine** qui va subir un décalage d'une saison (voir le projet GW-TEMP du PNR 61). Tous les aquifères ne réagissent pas non plus de la même manière. Pour les eaux souterraines alimentées principalement par les infiltrations de précipitations, le changement climatique devrait se faire surtout ressentir sur les **eaux souterraines pluviales des sols meubles** du Jura et du Plateau. Les écarts entre les niveaux d'eaux maximaux de janvier à mars et les niveaux minimaux à la fin de l'été s'accroîtront encore sous l'effet du changement, en particulier si les rivières qui s'infiltrent sont à sec. Les aquifères karstiques en plaine seront également touchés (SWISSKARST [26]). Il est difficile de faire des prévisions pour les **eaux souterraines pluvio-nivales** dans les Préalpes et sur le versant sud des Alpes, l'infiltration dépendant fortement de la forme des précipitations, neige ou pluie. **Les eaux souterraines nivo-glaciales dans les Alpes**, dont les niveaux atteignent aujourd'hui leur maximum de mai à juillet avec la fonte des glaciers et de la neige, atteindront à l'avenir leur niveau maximal plus tôt dans l'année. La sécheresse hivernale dépendra fortement des volumes de neige ou de pluie. Dans les **systèmes karstiques alpins**, où l'infiltration est réduite pendant 3 à 6 mois par la couverture de neige, la sécheresse hivernale devrait être moins marquée à l'avenir. Mais de nombreux aquifères importants sont également alimentés par l'eau des rivières et affichent ainsi un régime importé. Ainsi les aquifères du Plateau peuvent également présenter un régime alpin et être touchés en conséquence par la fonte

précoce des neiges et la fonte des glaciers. Tandis que les modifications futures du régime des précipitations devraient agir de façon prépondérante sur le volume d'eau souterraine, l'augmentation de la température liée au changement climatique influence la **qualité de l'eau souterraine** (ill. 25). Tout comme les cours d'eau de surface, les schémas de fluctuation annuels (régime) ainsi que l'origine des infiltrations (eau de rivière ou précipitations) et la température de l'eau souterraine jouent un rôle à cet égard (→ voir GW-TEMP et RIBACLIM du PNR 61, p. 40).

A l'avenir, la température des eaux souterraines alimentées par l'eau de rivière augmentera dans les mêmes proportions que celle de la rivière elle-même [22, 24, 25]. Même si des incertitudes considérables subsistent en matière de prévisions, **l'augmentation de la température** devrait se situer dans une fourchette maximale de 1° C à 2,5° C (période de référence 1980-2009) (GW-TEMP [23]). L'évolution des valeurs extrêmes, c'est-à-dire l'influence des futures vagues de chaleur sur la qualité de l'eau souterraine, devrait en revanche s'avérer beaucoup plus importante que l'augmentation moyenne de la température. L'intensification des périodes de sécheresse estivales dans les petites et moyennes rivières génère par ailleurs une réduction des taux de débit et, par conséquent, une dégradation du rapport de dilution entre l'eau de rivière et l'eau usée épurée. Mais comme le projet RIBACLIM l'a démontré, cela ne conduit pas obligatoirement à une contamination de l'eau souterraine alimentée par les rivières.

Les **apports de substances** restent un sujet de préoccupation pour la qualité de l'eau souterraine à l'avenir. La saturation en azote sera peut-être même encore renforcée par le changement climatique (fortes précipitations). La teneur en nitrate est influencée en premier lieu par l'utilisation et la gestion des terres [161]. Des hivers plus humides et plus chauds permettent aux bactéries du sol de rester plus actives et de minéraliser davantage d'azote, lequel est ensuite transporté dans les cours d'eau et dans l'eau souterraine par le biais des précipitations du printemps [142]. Des concentrations élevées en nitrate peuvent apparaître après une nouvelle hausse du niveau de l'eau souterraine suite à une baisse due à la sécheresse [25].

A gauche: comme l'a montré une analyse dans le bassin versant du Rietholzbach, le déficit de précipitations au printemps 2003 a été compensé par l'excédent de précipitations observé sur des périodes antérieures. (DROUGHT-CH)

Au milieu: les données archivées ont permis d'examiner l'évolution de la température des eaux souterraines au cours de ces dernières décennies. (GW-TEMP)

A droite: l'augmentation de la température en raison des conditions climatiques peut influencer la qualité des eaux souterraines. (RIBACLIM)

Projet NELAK du PNR 61: les Alpes sans glaciers?

La Suisse a été le premier pays à recevoir récemment un modèle de terrain «sans glaciers» en version numérique haute résolution pour sa partie de haute montagne. Sur la base de mesures radar et de principes physiques fondamentaux, l'on calcule la couche de glace et le lit du glacier à partir de la topographie de la surface. Ces éléments permettent à présent d'estimer l'évolution future du paysage de haute montagne. Dans la zone actuelle des lits de glaciers, le modèle présente 500 à 600 dépressions fermées sur une surface totale de 50 à 60 km² environ, qui pourraient dans un avenir prévisible voir la formation de lacs d'un volume total de 2 km³, ce qui correspond à environ 3% du volume actuel des glaciers en Suisse [15, 153]. Il faut s'attendre à la formation de lacs présentant des volumes de plus de 50 millions de m³ dans les parties plus planes des glaciers d'Aletsch, du Gorner, d'Otemma, de Corbassière, du Gauli et de la Plaine Morte. D'autres lacs de ce type pourraient aussi faire l'objet de retenues artificielles. Ils compensent en partie la perte d'attrait due à la fonte des glaciers, présentent des avantages pour l'énergie hydraulique et pourraient jouer un rôle dans l'approvisionnement en eau au cours des étés très chauds et secs après le recul des glaciers. S'ils offriront également un fabuleux spectacle, ils n'en seront pas moins dangereux [153, 154], car la fonte des glaces réduit aussi la stabilité des flancs abrupts à long terme, ce qui peut provoquer des chutes de rochers de grande taille et des crues de grande ampleur [163]. Les crues et les laves torrentielles occasionnées par les débordements de lacs dans les hautes montagnes peuvent causer d'importants dégâts sur de grandes distances. Les débits de crue provoqués par des événements de cette ampleur peuvent ici dépasser de loin l'importance des inondations pluviales et prendre la forme de crues et de laves torrentielles consécutives à des ruptures de barrage [15]. Si la probabilité de telles catastrophes peut paraître encore faible aujourd'hui, elle augmente en corrélation avec l'augmentation des nouveaux lacs et la fonte continue de la glace [13].

Projet GW-TEMP du PNR 61: le changement climatique a-t-il des répercussions sur la température de l'eau souterraine?

La teneur en oxygène est un paramètre important pour la qualité de l'eau souterraine. Dans la plupart des aquifères étudiés, la concentration en oxygène chute sur le long terme. Ceci s'explique bien entendu par la hausse de la température de l'eau qui augmente les taux de destruction microbienne [23]. En quoi cela nous concerne-t-il? Les conditions d'oxydoréduction qui sont modifiées par les faibles concentrations en oxygène posent problème. Si l'oxygène est totalement supprimé, des hydroxydes de fer et de manganèse peuvent se dissoudre dans certaines circonstances sous l'effet de processus microbiologiques et se déposer à nouveau dans la pompe au contact de l'air ambiant. Un tel constat remet en question la possibilité d'utiliser l'eau souterraine pour produire de l'eau potable. D'une part, à cause d'une altération du goût et de l'aspect de l'eau, d'autre part à cause de problèmes techniques liés au prélèvement de l'eau souterraine (obstruction du filtre de la pompe) [22], comme cela s'est produit à la fin de l'été 2003 dans un captage d'eau potable à Thurtal. Mais la plupart des approvisionnements en eau exploitent de l'eau potable sans préparation, ils ne sont donc pas équipés pour le traitement d'eaux brutes pauvres en oxygène voire anoxiques [160].

L'évolution à long terme de la concentration en oxygène ne dépend pas uniquement de la température et peut varier fortement d'une eau souterraine à l'autre. Dans certaines eaux souterraines, 60 à 70% de la variabilité de la concentration en oxygène s'explique statistiquement par la température de la rivière et de l'eau souterraine. Dans d'autres eaux souterraines, l'influence de ce facteur est faible ou nulle [22]. Les crues constituent un facteur important, car elles agissent contre l'imperméabilisation (colmatage) du lit de la rivière, rincent littéralement le système avec de l'eau riche en oxygène ou remplissent les aquifères d'eau souterraine par des zones d'infiltration situées en amont. A l'avenir, les états anoxiques dans les aquifères alimentés par l'eau de rivière pourraient peut-être s'avérer plus nombreux, mais les crues régulières pourraient également rincer le système [164].

Projet RIBACLIM du PNR 61: la qualité de l'eau potable, une question brûlante

Près d'un tiers de l'eau souterraine provient de l'eau de rivière. Le projet RIBACLIM a étudié les évolutions liées au climat sur le parcours de l'eau entre la rivière et les nappes souterraines afin d'en tirer pour l'avenir des enseignements sur l'approvisionnement en eau et l'épuration d'eaux usées.

La température est importante parce que l'eau épurée rejetée dans les rivières présente généralement une teneur élevée en carbone organique qui est ensuite dégradé par les micro-organismes. La hausse des températures de l'eau souterraine stimule l'activité microbienne et se traduit par une raréfaction de l'oxygène, ce qui augmente le risque de diminution de la concentration en fer et en manganèse. Si à l'avenir le courant d'une rivière est plus faible pendant les mois d'été, la part d'eau usée augmente tout comme la température de l'eau. Ce phénomène a-t-il des répercussions sur la qualité de l'eau souterraine?

Comme l'ont démontré des études sur la Thur et des expériences complémentaires en laboratoire, la diminution des matières organiques dissoutes ne dépend pas de la température. En revanche, la diminution des matières organiques particulières dépend fortement de la température et détermine les processus d'oxydoréduction. On a ainsi pu observer dans la Thur, dont la température de l'eau dépassait 20° C, une absence totale d'oxygène [75, 165]. Quoi qu'il en soit, le risque est faible que cela entraîne une précipitation du fer et du manganèse (entartrage), car les conditions actuellement observables en période estivale font que le nitrate est présent en quantités suffisantes pour atténuer le processus d'oxydoréduction. Le problème pour la qualité de l'eau potable réside toutefois dans le fait que, dans des conditions de laboratoire, la carence en nitrate peut générer du nitrite et de l'ammonium [165].

Le milieu de l'oxydoréduction dans les systèmes de filtration sur berge dépend également du raccordement hydraulique de la rivière à l'eau souterraine et de la caractéristique du bassin versant. Les systèmes de filtration sur berge, caractérisés par un raccordement hydraulique direct de la rivière à l'eau souterraine et par un bassin versant sans bassin de rétention, présentent la plus forte vulnérabilité. Une augmentation importante à cet endroit de la température de la rivière pendant les futures vagues de chaleur peut accentuer la transformation de matières organiques particulières dans des proportions de nature à entraîner une destruction complète de l'oxygène dissous et dans tous les cas du nitrate, ce qui pourrait favoriser la dissolution du fer et du manganèse [75, 76].



Débit

Les modifications des précipitations, de l'évaporation et du volume de réserve sont décisives pour les futurs **débits**. Seule une faible part des précipitations s'écoule directement. La majeure partie est stockée provisoirement dans la couche de neige, dans les glaciers, dans les eaux de surface et les souterraines ou dans les lacs. Ces réserves expliquent en partie le fait que le débit moyen, tout comme le régime de débit, n'ont pratiquement pas changé dans les grands bassins versants au cours du siècle dernier [148] et le fait que les fortes précipitations ne provoquent pas automatiquement une augmentation des débits de pointe [147]. Si l'on se projette dans l'avenir, la Suisse devra s'adapter à des débits réduits et décalés par rapport aux saisons, mais aussi à des crues plus fréquentes [139, 162].

Suite à la baisse attendue des précipitations estivales de 21 à 28%, à la contribution réduite des glaciers ainsi qu'à la légère hausse du taux d'évaporation, le débit d'eau annuel devrait diminuer de 1,1%, et ce malgré une tendance à la hausse des précipitations hivernales [133]. La contribution des **glaciers** au débit ne doit pas être sous-estimée, même si les glaciers ne recouvrent qu'une petite partie de superficie de la Suisse et que leur contribution au débit annuel à l'échelle nationale, qui représente 1 à 2%, semble insignifiante. L'on penserait à tort que la disparition annoncée des glaciers et, avec elle, de la fonte des glaciers ne présenterait aucun risque. Cependant les glaciers

sont importants pour les petits comme pour les grands bassins versants. Dans les petits cours d'eau situés en altitude et à proximité des glaciers, le débit a augmenté sous l'effet de la fonte accrue des glaciers, si bien que les modifications du régime sont déjà visibles [166]. D'ici à la fin du siècle, le débit total dans les bassins versants de ce type aura fortement diminué. Dans vingt petits bassins versants situés au sud des Grisons par exemple, l'on prévoit une diminution du débit annuel de 23% [167]. Ces **modifications du régime** devraient également se remarquer de plus en plus dans les régimes nivaux [168]. En parallèle, l'eau de fonte des glaciers contribue à l'échelle interrégionale et de manière démesurée aux débits du Rhin, du Rhône, du Pô et du Danube, surtout à la fin de l'été, dès que la neige a disparu et que les précipitations dans le bassin versant contribuent seulement marginalement au débit (forte évaporation). Le Rhin à Bâle, par exemple, charrie normalement 9% d'eau de fonte de glaciers en août. En période de canicule, la part augmente pour atteindre pratiquement 23%. Pour les rivières situées dans des bassins versants comportant de nombreux glaciers, la situation est encore plus extrême. Le Rhône à Chancy, par exemple, est alimenté pendant les années normales par environ 37% d'eau de fonte des glaciers. En période de canicule, cette proportion augmente pour atteindre pratiquement 75%. Si cette part d'eau de fonte de glacier disparaît, le niveau descend sous un seuil cri-

A gauche: en 2003, la station de pompage de Forren, en Thurgovie, a dû être ventilée artificiellement, car des usagers avaient annoncé des dépôts (ocre ferreuse) dans le réseau de distribution, ce qui s'est révélé provenir d'un manque d'oxygène dans les eaux souterraines. (Photo Andreas Scholtis, Office de l'environnement du canton de Thurgovie)

Au milieu: ocre ferreuse dans des canalisations et des pompes d'eau souterraine. (Photo Canton d'Argovie, Office de la protection des consommateurs)

A droite: station de pompage d'eau potable. (Photo Max Maurer)

Tableau: modification des risques de crue à l'avenir en Suisse [avec des chiffres tirés de 43, 44, 133, 171, 172].

| | Hiver | Printemps | Eté | Automne |
|---|---|---|---|----------------------------------|
| < 1500 m Plateau, Jura pluvial | ++ Sols saturés Davantage de pluie Crue annuelle possible | ++ Fonte de neige et précipitations intenses Crue annuelle possible | – (+) Moins de précipitations Evaporation accrue Crue d'orage dans les petits bassins versants | ++ Sols saturés plus de pluie |
| > 1500 m Alpes (du Nord) | (+) Débits occasionnellement plus élevés | + Petites crues de fonte avec pointes plus fortes | ++ Crue annuelle | Peu de modifications |
| Versant sud des Alpes et région intra-alpines (Valais, Engadin) | + Crues plus fortes Davantage de pluie Intensités plus élevées | + Crues plus fortes Davantage de pluie Intensité plus importante | – Total des précipitations en hausse Débits de pointe moindres | + Crues plus fortes |

Projet GW-TREND du PNR 61: impact différencié du changement climatique sur l'eau souterraine

De nombreux secteurs dépendent de l'eau souterraine en Suisse: l'approvisionnement en eau potable, l'industrie et, de plus en plus, l'agriculture. Pendant les périodes sèches, les rivières et les régions humides profitent également de l'apport souterrain. Le projet GW-TREND a étudié le degré de fiabilité du fonctionnement de cet approvisionnement à l'avenir [173]. L'objectif de la recherche était de quantifier l'influence de la température et des précipitations sur les niveaux d'eau souterraine du Plateau. Elle s'est concentrée en particulier sur l'influence de périodes sèches ponctuelles ou récurrentes.

Les modélisations ont montré que le volume absolu du renouvellement direct d'eau souterraine va à peine évoluer à l'avenir, à l'inverse de sa répartition. En hiver et au printemps, le renouvellement direct augmentera avec la hausse prévue des précipitations. En été et en automne, le renouvellement de l'eau souterraine diminuera sous l'effet conjugué de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évaporation. Il faut étudier au niveau local si ce phénomène remet en question la sécurité de l'approvisionnement en eau potable. Les petits aquifères bien perméables (p. ex. dans les dépôts fluvio-glaciaires) peuvent se vider très rapidement. Mais les aquifères plus importants et plus profonds ou les systèmes moins perméables (p. ex. les sources de molasse) peuvent retenir l'eau plus longtemps et compenser les périodes sèches. Les aquifères de vallée qui s'étendent des Préalpes jusqu'au Plateau (p. ex. la vallée de la Töss ou l'Emmental) profitent souvent de la réserve dynamique dans la partie supérieure du cours d'eau. Mêmes les rivières, qui ne sont pas à sec à la fin de l'été, ne peuvent pas toujours remplir les aquifères. Si par exemple l'Aar a un niveau trop bas, le colmatage du lit de la rivière empêche le remplissage de l'aquifère du Seeland, même si le volume d'eau disponible est suffisant. Les aquifères réagissent donc de façon très différente au changement climatique. Grâce aux développements méthodologiques de GW-TREND, il est possible de déterminer plus précisément aujourd'hui la sensibilité avec laquelle ils réagissent à ces évolutions et si des mesures d'adaptation au climat sont nécessaires.

Projet MONTANAQUA du PNR 61: impact du changement climatique sur le sous-sol

Les interactions entre la fonte des glaciers et le débit se compliquent en particulier dans les régions karstiques, où les voies d'écoulement cachées de l'eau de fonte réservent des surprises. C'est le cas dans la région du glacier de la Plaine Morte dans l'Oberland bernois, où la glace et la fonte de neige, mais aussi les voies d'écoulement dépendent fortement de la saison et où l'abondance des sources karstiques évoluera de pair avec le changement climatique. Des colorations de l'eau de fonte par des traceurs fluorescents en 2011 et 2012 ont révélé que l'eau de fonte des glaciers s'écoule aussi bien dans le nord du canton de Berne que dans le sud du canton du Valais [121]. Jusqu'à la fin juin, l'eau de débit est dominée par la fonte de neige, à partir d'août elle est composée majoritairement d'eau de glacier, alors qu'en septembre et en octobre, c'est surtout l'eau de pluie qui s'écoule. Le fait que le système d'écoulement se modifie pendant la fonte des glaciers en été est un phénomène intéressant: au printemps, la majeure partie de l'eau de fonte s'infiltre dans le karst souterrain qui conduit l'eau vers de nombreuses sources karstiques (l'une d'elles se trouve au-dessus du lac de barrage de Tzeusier). Pendant l'été, un volume toujours plus important d'eau de fonte s'écoule à travers le système d'écoulement dans le glacier vers le nord, dans la vallée du Simmental; en hiver, le système d'écoulement estival est à nouveau bloqué par les chutes de neige et l'écoulement des glaciers. Les projections climatiques indiquent que le glacier de la Plaine Morte aura fondu en grande partie avant la fin du siècle. Du fait de la disparition des glaciers, les sources karstiques alimentées jusqu'ici par la fonte estivale des glaciers, se tariront à l'automne. Tout comme dans la vallée de Viège [174], des adaptations de l'infrastructure devraient donc être planifiées à temps pour garantir, à l'avenir aussi, l'approvisionnement en eau de la population locale et la production d'électricité.

Projet SEDRIVER du PNR 61: un avenir à la dérive?

Les régimes de débit modifiés et les pics de crue affectent directement le charriage. Qui s'en soucie? Les poissons bien sûr! Pour la truite de rivière (*Salmo trutta fario*) par exemple, la couche supérieure de gravier est un endroit adapté pour déposer ses œufs. Les femelles creusent des trous de 5 à 20 cm de profondeur, appelés frayères, dans lesquels elles enterrent leurs œufs de la fin octobre à début janvier, dans le substrat de gravier. Pour que les poissons déposent leurs œufs sur un banc de gravier, il faut que celui-ci réunisse les conditions requises en matière de température, de profondeur, de débit et de composition du lit de la rivière [175]. La présence d'un volume trop important de matériaux fins diminue la réussite de la reproduction. A cet égard, les crues jouent un rôle décisif en lavant périodiquement le substrat. Cependant, de fortes crues pendant la période de frai peuvent affecter sensiblement les frayères, en particulier dans les rivières dont le débit est habituellement faible pendant le semestre d'hiver, les précipitations tombant sous forme de neige. Dans de tels régimes de débit glacio-nivaux, comme il ressort des enseignements du projet SEDRIVER, les œufs sont enterrés à faible profondeur seulement (4 à 5 cm) et fortement menacés par le charriage et le processus d'érosion lié aux crues. Le déplacement du débit de pointe dans le temps et en altitude peut compromettre la survie de la truite de rivière. En été, en revanche, le futur charriage pourrait créer des habitats plus grands et, partant, mieux adaptés aux jeunes poissons [176].



tique pour l'écologie et l'économie (navigation, refroidissement). A Bâle, la part d'eau de fonte de glacier dans les eaux du Rhin au mois d'août augmentera pour atteindre 12% dans un avenir proche (2020-2040) puis diminuera à 2% avant la fin du siècle [169]. Par conséquent, les glaciers jouent un rôle important non seulement pour la Suisse, mais aussi pour les pays voisins. (→ voir MONTANAQUA p. 42). De nombreux modèles hydrologiques ne tiennent pas compte **des facteurs non climatiques**, par exemple le type et l'intensité de l'utilisation du sol, les mesures d'aménagement des cours d'eau ou le degré d'imperméabilisation du sol, qui peuvent atténuer ou renforcer la capacité de stockage de l'eau du sol et, partant, le débit. L'utilisation croissante d'engrais chimiques qui stimulent la croissance des plantes et augmentent immédiatement l'évapotranspiration, mais aussi les techniques d'irrigation agricole peuvent avoir une influence sur les débits des petits cours d'eau [170].

L'évolution de la température et de la quantité des précipitations devrait induire à elle seule une augmentation du volume et de la fréquence des **crues** en Suisse, surtout vers la fin du siècle [172]. Si, à l'avenir, il pleut plus qu'il ne neige au cours du semestre d'hiver, les pics et les volumes des crues devraient progresser [147, 172]. Dans les bassins versants où les débits sont fortement marqués par la fonte des neiges, les pics de crue se renforceront selon les saisons [162]. Les pics de crue seront également plus marqués si de fortes pluies coïncident avec la fonte des neiges au printemps ou si, en été, de fortes précipitations convectives tombent soudain sur des sols desséchés qui ne peuvent pas absorber cette eau [131]. Selon l'exposition et l'altitude, le risque de crue évolue différemment (tab. p. 41). Les incertitudes de ces projections sont toutefois assez importantes, en particulier en ce qui concerne les valeurs extrêmes des précipitations en été [43, 171]. Au-dessus de 2000 m, le risque de crue est faible, car les précipitations demeurent provisoirement sous forme de neige, prévenant ainsi les débits de pointe [177, 178].

Les débits faibles influencent aussi les **aquifères** alimentés par les rivières, le fond du lit des rivières étant plutôt colmaté et imperméable en période de bas débit. Les rivières alimentées par l'eau souterraine karstique profi-

tent, pendant l'étiage, de l'afflux provenant des profondeurs (SWISSKARST [179]). Les rivières du Jura et des Préalpes en particulier (p. ex. la Suze, l'Areuse, la Promenthouse, l'Ernon, etc.) charrient essentiellement de l'eau issue du système karstique pendant les périodes de sécheresse.

Les charges sédimentaires sont également importantes dans l'examen des débits. En raison du recul des glaciers et de la fonte du permafrost au-dessus de 2300 à 2400 m d'altitude mais aussi de la libération concomitante de roches meubles, il faut prévoir, à l'avenir, une augmentation des charges sédimentaires dans les bassins versants en altitude [4, 180]. Parallèlement aux pics de crue et aux charriages plus importants, les cours d'eau s'étendront également sur une plus grande superficie qu'aujourd'hui [44]. Pour une meilleure quantification du charriage dans les bassins versants alpins, le projet SEDRIVER du PNR 61 a développé le nouveau programme de simulation SedFlow, qui a été testé en détail à l'aide de séries de données portant sur deux rivières torrentielles. Jusqu'ici, de nombreux modèles ont surestimé l'ampleur du charriage. Etant donné que les rivières torrentielles présentent souvent des tronçons plus raides, le modèle SedFlow a été conçu de manière à prendre en compte les pertes d'énergie accrues (grosses pierres par rapport à la profondeur de l'eau), les cisaillements plus importants et critiques au début du charriage (la puissance nécessaire pour qu'une pierre commence «à rouler» sur le fond brut de la rivière) (SEDRIVER [181, 182]). A partir de ce modèle et sur la base de scénarios concernant les débits, il est alors possible de quantifier et de prévoir les charges sédimentaires respectives et les apports de sédiments par les affluents et ainsi dimensionner les mesures d'adaptation ou de protection. Ce même modèle a permis de démontrer que le matériau de charriage supplémentaire, qui arrivera à l'avenir dans la Hasliaare à partir des affluents, sera déjà redéposé dans les 2 à 4 premiers kilomètres et qu'il influencera le chenal de façon décisive [183]. Cela a des conséquences sur la section, mais aussi sur l'écologie des cours d'eau (→ voir SEDRIVER p. 42).

L'augmentation de la température de l'air agit non seulement sur les débits mais aussi sur la **qualité de l'eau**. Au cours du siècle dernier déjà, la température de l'air et la température de l'eau des grandes rivières suisses, mais aussi des petits torrents, avait augmenté, une évo-

A gauche et au milieu: essais avec des substances de marquage sur le glacier de la Plaine Morte. (A gauche: photo Flurina Schneider; au milieu: photo Emmanuel Rey)

A droite: prélèvement d'un échantillon d'eau dans le Simmental (au lieu-dit *bi de sibe Brunne*, «près des sept fontaines»). La substance de marquage révèle l'origine de l'eau. (Photo Emmanuel Rey)

«Où trouve-t-on des nappes d'eaux souterraines qui résistent aux périodes de sécheresse? A ces endroits, les eaux souterraines devraient avoir la priorité sur les autres utilisations de l'eau. Cela exige une coordination et une réflexion à l'échelle régionale.»

Daniel Hunkeler
GW-TREND
Université de Neuchâtel



Plus d'informations  GW-TREND
sur www.pnr61.ch

lution particulièrement marquée au cours des dernières décennies [28, 184]. L'évaluation des mesures de température réalisée dans le cadre du NADUF de 1974 à 1998 a révélé une augmentation de 0,4 à 0,8° C en 10 ans dans la majorité des points de mesure [55]. Pour les 50 prochaines années, il faut s'attendre à une nouvelle augmentation de la température de l'air de 2° C ou plus [55, 142]. La température des cours d'eau continuera à augmenter – ce phénomène s'intensifiant encore en été en raison des bas niveaux d'eau – et pèsera ainsi davantage sur l'écologie des cours d'eau et la gestion de l'eau [185]. La diminution des débits et la hausse de la température de l'eau réduisent la concentration en oxygène et favorisent la propagation de maladies chez les poissons et augmentent le taux de mortalité. En 2003, environ 85 000 poissons morts ont été ramassés et environ 120 000 poissons ont été déplacés [17]. La hausse de température permet aux espèces invasives de se répandre dans des milieux naturels jusqu'alors inadaptés. A l'inverse, les températures plus clémentes influencent le développement des œufs de poissons en hiver, sachant qu'une augmentation de la température de 1° C accélère la maturation de deux semaines [55]. Suite au réchauffement climatique, les truites ont migré de 100 à 200 mètres en amont au cours des 25 dernières années. On estime qu'une hausse des températures de 2° C d'ici à 2050 réduira les milieux naturels des salmonidés de 17 à 25% [111]. Pour la truite de rivière, l'espace colonisable se réduit, selon les modélisations, de 6 à 44%, ce qui entraînerait une disparition totale de la truite de rivière sur le Plateau [186]. En parallèle, les bas niveaux d'eau et la propagation des maladies chez les poissons causeront la disparition de nombreux animaux.

Eaux de surface

Le réchauffement climatique n'est pas non plus sans conséquences sur **les lacs**. Pour les grands lacs d'Autriche par exemple, l'on prévoit une augmentation de la température de surface de 2° C d'ici à 2050 [187]. Ceci a une influence décisive sur la formation de glace, l'approvisionnement en oxygène et la composition phytoplanctonique [188]. La hausse des températures de l'eau stabilise aussi la stratification des lacs du Plateau, au détriment de l'aération. Si le brassage en hiver est plus rare et plus court à l'avenir, le risque de carence en oxygène augmentera [111, 142].

Pour les cours d'eau des Hautes-Alpes, l'augmentation de la température agit indirectement sur le niveau de l'eau, lequel est largement influencé par la fonte des glaces et de la neige. L'impact de ces évolutions a été mis en évidence par des enregistrements effectués dans le Parc national suisse, où des étangs alimentés par des glaciers à plus de 2600 m d'altitude ont connu en quelques années seulement une augmentation de température allant jusqu'à 4° C du fait surtout de la moindre incidence de la glace des glaciers [189].

Mais la réduction de la couverture de glace pourrait aussi intensifier le brassage et avoir un effet positif sur l'aération de l'eau en profondeur. Concernant **l'approvisionnement en eau potable** à partir des lacs, les faibles concentrations en oxygène dans les eaux profondes ne sont pas considérées comme un problème, étant donné que le point de prélèvement pourrait être facilement déplacé dans une zone plus profonde. La prolifération de cyanobactéries, communément appelées algues bleues, qui peuvent affecter la qualité de l'eau à la faveur d'une hausse des températures, est plus problématique [160]. Dans les lacs présentant une teneur en carbone et des taux de sédimentation élevés, l'augmentation de la température peut accélérer la production de méthane dans les sédiments de façon exponentielle [190]. Toutefois, ce cas de figure se produit rarement en Suisse.

Le changement climatique agit sur **l'écologie des cours d'eau**, principalement par le biais de la hausse des températures de l'eau et la baisse des niveaux d'eau. L'augmentation de la température pourrait favoriser le développement d'espèces exogènes thermophiles, c'est-à-dire d'espèces animales et végétales qui n'existent pas dans la nature en Suisse et mettent en danger les espèces indigènes [191, 192, 193]. L'apparition de la méduse d'eau douce dans le lac de Constance depuis 1999 n'est qu'un exemple. Peu d'études sont consacrées à la prolifération des espèces exogènes sous l'effet du changement climatique.

Sollicitations futures de la société et de la nature

Parallèlement au changement climatique, le paysage, l'utilisation de l'espace et du sol agissent sur les cours d'eau et sur le régime des eaux. La végétation influence aussi bien la rétention d'eau dans le sol que son évaporation. De même, l'agriculture et l'urbanisation croissante marquent de leur empreinte le volume et la qualité des écoulements. Les **scénarios futurs** de l'utilisation de l'espace et du sol sont donc des outils importants pour la planification de la gestion durable de l'eau. Les scénarios du «système de la Suisse» sont définis par de nombreux facteurs, globaux et locaux, qui s'influencent mutuellement. Le changement climatique lui-même et les dangers naturels qu'il provoque ou les extrêmes climatiques marquent la perception, les décisions et le comportement de la société. Le marché mondial et la politique agricole européenne fixent les prix des produits agricoles, déterminant par là même la nécessité ou non d'irriguer. La disponibilité mondiale du pétrole et du gaz naturel, le Protocole de Kyoto ou l'accident de réacteur de Fukushima ont également un effet prépondérant sur la politique énergétique de la Suisse et aussi sur la gestion de l'eau y associée. Ce qui se passe hors de Suisse a des conséquences importantes pour l'utilisation de l'eau sur place.

Les **facteurs clés** pour la gestion durable de l'eau en Suisse que sont la démographie, la politique, l'économie et le comportement individuel et collectif ont surtout un effet sur les variables «besoin d'espace» et «utilisation du sol», mais aussi sur la quantité et le type de matières utilisées dans le régime des eaux. Est-il seulement possible de prévoir ces modifications? Malheureusement non. Et pourtant, la confrontation avec des futurs scénarios possibles est un outil important pour la planification d'une gestion durable de l'eau. Différents projets PNR 61 (SWIP, IWAQA, AGWAM) ont développé dans ce but des scénarios d'évolutions possibles pour la région du Mönchaltorfer Aa (ZH). Le **scénario boom** décrit une société économiquement florissante, techniquement avancée et marquée par une forte croissance de la population. Le besoin en eau potable augmente tandis que l'industrie et l'agriculture perdent en importance. Le **scénario doom** dépeint une Suisse affaiblie économiquement, avec une population en légère baisse. Le besoin en eau par habitant de la population se réduit de moitié, et l'état général des infrastructures hydrauliques est mauvais, avec les conséquences qui peuvent s'ensuivre pour l'environnement. Le **scénario de la qualité de vie** présente une Suisse compétitive avec une croissance modérée de la population, des normes environnementales élevées et un besoin en eau potable stable [194] (SWIP).

Indépendamment de ces différents scénarios, l'Office fédéral de la statistique décrit des scénarios sur **l'évolution démographique** à venir

[195]. Le scénario de référence moyen s'inscrit dans la continuité des évolutions des dernières années et intègre les tendances concernant la libre circulation des personnes dans l'UE. La population résidente permanente de la Suisse croît pour atteindre 9 millions de personnes d'ici à 2055 et se stabilise. Selon le scénario à tendance haussière, qui repose sur l'hypothèse d'une croissance favorable de la population, la population augmente pour s'établir à plus de 11 millions de personnes entre 2010 et 2060. Selon le scénario à tendance baissière, qui combine les hypothèses moins favorables à la croissance de la population, la population diminue à 6,8 millions de personnes en 2060. On ne prévoit pas de grandes vagues de réfugiés climatiques en Suisse [196]. Concernant l'approvisionnement en eau potable à l'avenir, la croissance de la population aura des répercussions qualitatives, en particulier du fait du besoin croissant en surface et des apports accrus de polluants [63, 197] (→ voir IWAQA p. 50). Le vieillissement prévu de la population influera sur la qualité de l'eau, du fait d'une consommation accrue de médicaments et d'additifs alimentaires. Toutefois, les apports supplémentaires peuvent être captés grâce aux mesures techniques engagées dans les stations d'épuration. Enfin et surtout, les valeurs et perceptions de la société, qui s'expriment au travers du comportement individuel et collectif, déterminent les modalités d'utilisation de l'eau, des cours d'eau et du paysage. La demande en paysages préservés aura tendance à augmenter en raison de l'évolution des revenus et de la population [17], ce qui favorisera d'une part l'état des cours d'eau et augmentera d'autre part la pression sur les surfaces, car l'exigence croissante de mobilité et d'espace augmente à son tour le besoin d'espace par habitant. (→ voir MONTANAQUA p. 50).

Evolution du paysage et de l'utilisation du sol

L'un des facteurs déterminants pour le maintien de la quantité et de la qualité de l'eau est la surface et son utilisation. L'utilisation des surfaces influence le régime des eaux aussi bien par les utilisations directes (p. ex. les prélèvements) qu'indirectes de l'eau (p. ex. les apports de polluants, drainages), qui ont un effet sur l'état biologique des cours d'eau, mais aussi sur les charges sédimentaires ou l'état écomorphologique. Cependant, l'influence directe de l'utilisation du sol est nettement plus importante. En Suisse, la surface habitable limitée de 13 000 km², une économie très développée et un niveau de vie élevé se traduisent par une forte pression d'utilisation à cause de la forte densité urbaine et d'une utilisation agricole intensive. Seuls 8% environ des cours d'eau ne sont pas influencés par l'utilisation du sol. Ceux-ci s'écoulent dans l'arc alpin ou dans des régions plus basses exclusivement boisées [62].

En réaction à la forte pression qui pèse sur



Le territoire est utilisé de nombreuses façons, ce qui très souvent modifie ou influence les réservoirs d'eau.

Toutes les photos: Reportair

l'utilisation de l'eau, la protection de l'environnement et du paysage revêt une grande importance en Suisse. La **loi fédérale sur l'aménagement du territoire** fixe le cadre juridique qui oblige les cantons et les communes à assurer conjointement une utilisation mesurée du sol. Actuellement, la politique de l'aménagement du territoire fait la part belle à la concentration décentralisée, autrement dit un réseau de zones urbaines compactes. Le **principe d'aménagement de la «protection du paysage»** comporte plusieurs éléments utiles pour la gestion de l'eau.

Un élément important de l'aménagement du territoire est la **statistique de la superficie**, qui quantifie périodiquement l'utilisation du sol. La plus grande partie de la surface en Suisse est encore utilisée par l'agriculture, suivie de la forêt, des surfaces non productives et des surfaces d'habitation (ill. 26). Plus l'utilisation du sol est élevée, plus l'impact sur les tronçons qui se trouvent en contrebas est grand. La prairie des Alpes, des Préalpes mais aussi du Jura, par exemple, influence le tronçon le plus long. En revanche, les autres utilisations du sol, plutôt au niveau régional (p. ex. les terres arables) ou seulement local (p. ex. les vignes) influencent une partie plus réduite du réseau des cours d'eau [198]. Les agglomérations du Plateau, qui affectent la qualité de l'eau de façon déterminante, en font également partie.

Les **surfaces d'habitation** augmentent fortement au détriment des surfaces agricoles et représentent aujourd'hui environ 7,5% de la superficie du pays. La plus forte croissance revient à la zone de bâtiments, suivie par les voies de communication, la superficie industrielle et commerciale et les espaces verts et lieux de détente [103]. Un objectif d'aménagement du territoire visant à stabiliser l'occupation de surfaces par habitant à 400 m² a certes été défini, mais la croissance de l'urbanisation ne s'arrête pas vraiment malgré les multiples efforts entrepris en ce sens, en partie à cause des nombreuses constructions de nouvelles infrastructures, mais aussi en raison de la croissance de la population et du besoin d'espace en constante augmentation.

La **surface de terres cultivées** diminue de 3% par an. Cette tendance va également se poursuivre à l'avenir. Sur les surfaces planes et bien desservies, l'utilisation agricole a été intensi-

fiée, tandis que les régions périphériques ont opté pour une agriculture extensive. Alors que les cultures à forte création de valeur (cultures maraîchères de plein champ) ont en partie augmenté, les surfaces consacrées à l'économie alpestre ont diminué. De nombreuses prairies du Jura, des Préalpes et du versant sud des Alpes ont disparu, tandis que de nouvelles surfaces de prairie sont apparues à proximité des fermes. Concernant le régime des eaux, les apports diffus de substances dans les régions utilisées de façon intensive resteront d'actualité. En revanche, une diminution du pacage sur les prés alpins peut réduire les apports de substances et l'écoulement de surface. Si des prairies des alpages sont remises en pâtures, ceci peut compacter la couche supérieure du sol et augmenter l'écoulement de surface en cas de fortes précipitations [199]. Par la diminution de la surface foliaire, le pacage entraîne des pertes d'évaporation plus faibles et ainsi des débits accrus [200].

Plus de 40% de l'eau potable consommée en Suisse provient de **la forêt**. C'est pourquoi la politique forestière 2020 vise notamment à ne pas porter atteinte aux sols des forêts et à l'eau potable. La forêt continue à s'étendre [103]. Les principales modifications sont liées à l'économie alpestre, où l'embroussaillage en particulier devient un problème [201, 202]. Hormis les modifications structurelles dans l'agriculture de montagne, l'on peut également envisager l'augmentation des températures annuelles moyennes comme une cause de cette évolution. La forêt joue un rôle important dans le régime des eaux parce que la canopée isole le sol des précipitations, entraîne une évaporation directe d'une partie des précipitations et absorbe l'humidité du sol. Dès lors, le sol des forêts est généralement plus sec avant la pluie et peut absorber plus d'eau que les prairies et les terres arables [203]. De plus, la forêt de sapins laisse par exemple s'évaporer presque deux fois plus d'eau que la prairie et réduit ainsi le débit [201].

Parmi les **surfaces non productives** qui représentent un quart de la Suisse, l'on compte les rochers, le sable, les éboulis (44,6%), les glaciers et le névé (10,9%), la végétation non productive (presque 27,6%) ainsi que les rivières et cours d'eaux (presque 16,9%). De telles surfaces, en particulier les zones humides, les marais et les prés marécageux, peuvent jouer

un rôle significatif dans l'extension de l'espace dévolu aux cours d'eau et le stockage du surplus d'eau. Ces surfaces sont également précieuses pour la biodiversité et comme espace de détente. La légère augmentation de la surface des cours d'eau est liée aux aménagements visant la protection contre les crues. La végétation des rives, les sites humides et la végétation buissonnante ont également légèrement progressé. De plus, dans différentes régions, de nouvelles espèces végétales se sont développées sur les rives sous l'effet de la renaturation des cours d'eau et des mesures d'amélioration du sol [103]. La loi révisée sur la protection des eaux prévoit de redonner d'ici à la fin du siècle davantage d'espace aux cours d'eau fortement rétrécis, ce qui nécessite un espace supplémentaire de 20 km² environ (ill. 26).

Surfaces d'habitation et de circulation, infrastructures et navigation

L'occupation des sols représente d'ores et déjà 407 m² par habitant en Suisse [103]. L'espace urbain continuera à s'étendre à l'avenir. L'on prévoit une augmentation des surfaces d'habitation sur le Plateau de 16% aujourd'hui à environ 20% [111], ce qui devrait avoir un effet sur l'eau souterraine et les apports de polluants. S'agissant des **surfaces de circulation**, la pression sur les cours d'eau augmentera encore à l'avenir en raison de la hausse prévue du transport individuel motorisé de 20% au maximum [106]. A l'inverse, les zones d'habitation profiteront au cours des prochaines décennies de nombreuses mesures de revitalisation mises en œuvre sur des cours d'eau autrefois rectifiés et canalisés.

Concernant l'approvisionnement en eau potable, le vieillissement de l'**infrastructure des eaux des habitats** est considéré comme l'un des défis majeurs. Il est difficile d'évaluer les effets liés au changement climatique sur l'hydrologie urbaine. Il ressort des modélisations que le changement climatique peut influencer considérablement l'évacuation d'eaux usées mélangées et les inondations d'eaux usées [104]. Cependant, l'approvisionnement en eau des zones urbaines est généralement considéré comme garanti à l'avenir [204], quoique à un prix plus élevé. Les coûts du secteur de l'approvisionnement en eau augmenteront à l'avenir en raison d'un besoin d'investissement accru, surtout pour les petits systèmes, ce qui aura des conséquences sur le prix de l'eau. Les coûts seront encore majoritairement supportés par les consommateurs. Il en va de même avec l'élimination des eaux usées, où les coûts devraient continuer à progresser en raison du besoin grandissant d'assainissement des réseaux de canalisation, de la modernisation des stations d'épuration en vue du traitement des nouvelles substances problématiques et des nouveaux défis en matière de protection des eaux. Le changement climatique pour-

rait aussi générer des coûts supplémentaires: les périodes de sécheresse prolongée en été pourraient abaisser les niveaux d'eau souterraine au point que les canalisations qui passent aujourd'hui à travers des zones saturées passeraient plus fréquemment à travers un sol non saturé, avec les conséquences qui en découlent sur l'infrastructure et le besoin d'assainissement [104].

Il faut également prévoir une augmentation des coûts dans le domaine de la **protection contre les crues et de l'aménagement des cours d'eau** [126]. Sur le long terme, le changement climatique dans les Alpes et les Préalpes peut affecter la stabilité de vastes terrains et, partant, augmenter les risques de glissement sous l'effet des précipitations hivernales croissantes et l'eau de fonte. La fréquence des éboulements et des mouvements de terrain augmentera probablement à l'avenir, et avec elle les coûts liés aux dégâts [205]. Pour garantir la sécurité des hommes dans les montagnes, il est nécessaire de consentir des investissements considérables dans la protection contre les événements extrêmes. Celle-ci comprend des mesures d'aménagement des cours d'eau, des installations de remplacement permettant de réguler l'eau des glaciers, la construction de nouvelles centrales hydrauliques ou des mesures de stabilisation des pentes. Du fait de l'intensification des crues, les dangers qui menacent les zones urbanisées, bâtiments, voies de circulation, infrastructures et surfaces agricoles ne seront plus les mêmes. Sont tout particulièrement exposées les zones urbanisées dotées de grandes surfaces imperméabilisées qui empêchent l'infiltration de l'eau [171]. Jusqu'à présent, les processus fondamentaux de l'hydrologie urbaine ont été peu étudiés en Suisse.

La continuité de la **navigation sur le Rhin** ne sera pas menacée par le changement climatique. La fiabilité dans le temps devrait cependant être affectée. Aujourd'hui, le Rhin affiche un débit stable. Au printemps et en été, il est alimenté par l'eau de fonte et les précipitations dans les Alpes, puis en automne et en hiver principalement par les précipitations dans les régions en plaine. Avec la fonte des glaciers, l'effet d'équilibrage diminue, de sorte que la probabilité de niveaux d'eau exceptionnellement faibles durant des périodes prolongées augmentera dans un avenir proche [111]. Pour les mois d'hiver en revanche, les prévisions annoncent moins de périodes de basses eaux avec un niveau d'eau extrêmement bas, ce qui aura des effets bénéfiques sur la navigation. Dans un avenir lointain, la situation, surtout au cours des mois d'été, s'aggravera au point de limiter la navigation sur le Rhin [17] (ill. 27). L'amélioration des prévisions relatives au débit et aux périodes de sécheresse prolongée facilitera la planification et permettra d'atténuer les défaillances du débit (→ voir DROUGHT-CH p. 14).

« Ces dernières décennies, nous observons une croissance relative forte des surfaces d'habitation et d'infrastructure. Les terrains bâtis sont plus nombreux, et l'eau ne peut pas s'y infiltrer. Elle s'écoule donc plus vite, et peut être souillée par des substances nocives, qui se déversent ensuite dans les cours d'eau. »

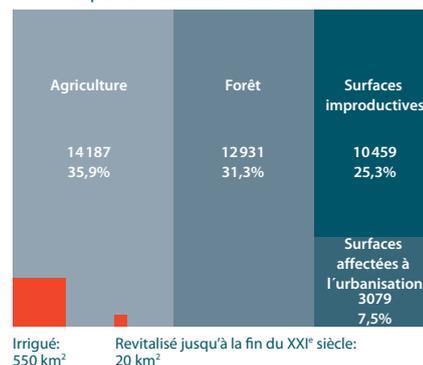
Christian Stamm
IWAQA
Eawag



Plus d'informations IWAQA
sur www.pnr61.ch

Utilisation de la superficie nationale

Superficie en km²
Superficie nationale 41 285 km² = 100%



III. 26: part des différents types d'utilisation de la superficie nationale totale de 41 285 km². (A. Björnson, avec des données tirées de [103])

Gestion de l'énergie

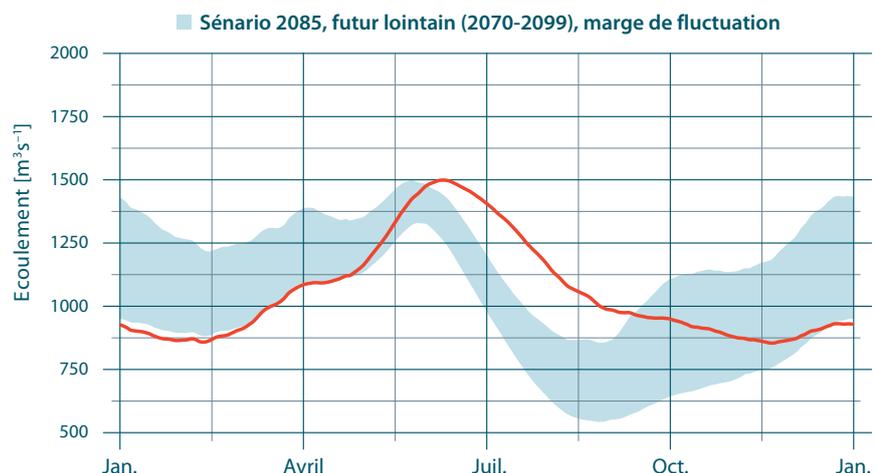
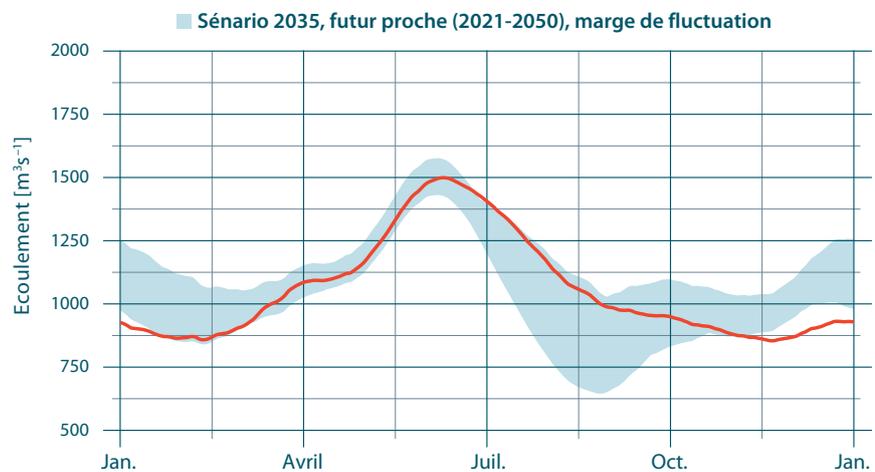
L'énergie hydraulique restera à l'avenir l'énergie renouvelable la plus importante et la plus efficace en Suisse (FUGE [206]). Mais comme l'énergie hydraulique fait partie d'un système dépendant du changement technologique, climatique et social, la Suisse doit trouver des solutions intelligentes et flexibles pour garantir l'approvisionnement futur en énergie.

A l'heure actuelle, le secteur de l'énergie est confronté à une **hausse constante de la demande en électricité**, qui ne peut plus être couverte par la production d'énergie nationale durant le semestre d'hiver [207]. Malgré une efficacité accrue, l'on prévoit une augmentation de la demande de 14% d'ici à 2035, de 17% d'ici à 2050. La progression de la demande en électricité s'explique par la croissance et la structure de la population (p. ex. le nombre de personnes âgées augmente) et par le mode de consommation (p. ex. surface habitable par habitant en hausse). Suite au changement climatique, la consommation d'électricité va vraisemblablement augmenter (moins de chauffage en hiver, plus de climatisation en été) si aucune contre-mesure n'est mise en place. Enfin les installations d'irrigation et d'enneigement, l'utilisation de nou-

velles technologies, les multiples sources de consommation et le remplacement des énergies fossiles dans les domaines du chauffage des locaux (pompes à chaleur) et de la mobilité (véhicules électriques) contribuent aussi à la consommation d'énergie [197, 208]. A la demande croissante d'électricité s'oppose un approvisionnement en énergie influencé d'une part par le changement climatique et la politique climatique, d'autre part par la diminution du débit d'extraction des combustibles fossiles.

Grâce à la fonte des glaciers, la **production d'énergie hydraulique** disposera à court terme de ressources en eau importantes, ce qui permettra une production accrue d'électricité en été. Mais dès la période 2021-2050, la production devrait diminuer de 4 à 6% en été et augmenter de 10% en hiver (par rapport à 1980-2009) [209]. La diminution du débit devrait générer, jusqu'en 2050, une baisse de 7% en moyenne de la production d'énergie hydraulique, la situation devant être encore plus marquée dans les centrales électriques du Tessin et du Valais du Sud. La production sera également limitée en raison des risques encourus par les installations de production hydraulique, dus à l'éboulement des rochers et aux laves torrentielles, à l'usure des conduites

Débit du Rhin à Bâle
(— Passé récent 1981-2009)



III. 27: modélisation sur l'année du débit moyen du Rhin à Bâle pour 2035 (en haut) et 2085 (en bas) en m^3/s . En bleu: débit calculé selon dix scénarios climatiques différents. En rouge: débit de la période de contrôle actuelle. (Graphique M. Zappa, WSL 2013)

et des machines imputable à l'augmentation du charriage et à l'envasement croissant des lacs d'accumulation (→ voir FUGE p. 50) [206]. Si la production électrique des **centrales au fil de l'eau** sur le Plateau est limitée par l'étiage à la fin de l'été et en automne, elle peut profiter en contrepartie des débits accrus en hiver et au printemps, étant donné que les turbines sont peu exploitées pendant cette saison. Globalement, l'on s'attend à une légère augmentation de la production électrique dans les centrales au fil de l'eau à l'horizon 2020-2050 [209]. La puissance de refroidissement des rivières dans le cadre de la production **d'énergie nucléaire** diminuera à l'avenir en raison de la hausse des températures de l'eau en été. Mais du fait de l'expiration des autorisations octroyées aux centrales nucléaires, ces restrictions devraient bientôt être caduques. Le Conseil fédéral et le Parlement ont décidé en 2011 de sortir de l'énergie nucléaire à moyen terme et de miser davantage sur le **développement de l'énergie hydraulique** [17, 210, 211]. Ainsi un développement massif de la production énergétique à partir d'énergies alternatives sera nécessaire d'ici à 2050, le potentiel total avec le développement de l'énergie hydraulique étant estimé à 4 TWh [211]. Le développement de l'énergie hydraulique dépend en outre du renouvellement des concessions à venir, des rétributions à prix coûtant et des futurs investissements dans les équipements [126]. Actuellement, le développement de l'énergie hydraulique est freiné par le fait que les sites adaptés sont déjà utilisés et que l'on accorde une grande importance à la protection du paysage. Étant donné que le marché européen de l'électricité influence le prix de l'électricité par des subventions, les investissements dans l'énergie hydraulique ne sont pas attractifs actuellement. L'expiration de nombreuses concessions, d'ici à 2050 notamment, empêche les exploitants de faire des investissements supplémentaires. Outre la production électrique, les centrales hydrauliques peuvent assumer **d'autres fonctions** dans le domaine de la protection contre les crues, l'irrigation ou l'approvisionnement en eau potable. Les centrales électriques à accumulation par pompage gagnent en importance parce qu'elles amortissent les fluctuations de production des énergies solaire et éolienne dues aux intempéries, à défaut de les éliminer entièrement. Cette flexibilité constitue une prestation de service qui pourrait être intégrée dans des solutions «Smart grids» et être mieux rémunérée, d'autant que l'énergie hydraulique dispose de la seule technologie qui soit suffisamment évoluée pour permettre un stockage massif de l'électricité sur une période allant de plusieurs heures à quelques jours [206] (FUGE). Pour développer à l'avenir une énergie hydraulique multifonctionnelle en Suisse, il convient de réaliser une analyse exhaustive des besoins et des ressources en Suisse et en dehors de Suisse.

Dans l'optique du développement de l'énergie hydraulique, c'est le renforcement des **grandes centrales électriques** existantes qui présente le plus grand potentiel. En effet, il est souvent possible d'augmenter considérablement leur production tout en limitant le nombre de conflits supplémentaires. En revanche, la construction de **petites centrales hydrauliques**, surtout dans des bassins versants non utilisés jusqu'alors, présente un potentiel de conflit considérable par rapport au volume d'énergie produit [212]. S'ils sont situés en amont des lacs de barrage actuels, les nouveaux **lacs glaciaires** pourraient contribuer à maintenir la production hydraulique à son niveau actuel [153] (NELAK). Ils pourraient ainsi être transférés dans les installations existantes, moyennant l'octroi de concessions hydroélectriques et une autorisation de prélèvement d'eau dans le cadre de la loi sur la protection des eaux (volume d'eau résiduelle [213]). La manière dont la Suisse va gérer cette situation reste encore à définir. La nouvelle estimation de la Confédération concernant le potentiel de développement de l'utilisation de l'énergie hydraulique part du principe que le potentiel pris en compte dans les perspectives énergétiques 2035 [214] peut être revu à la hausse. La mise en œuvre de ce potentiel de développement (grandes contre petites installations; utilisation modérée partout contre utilisation intensive dans les régions de moindre importance écologique) doit faire l'objet d'un débat sociopolitique qu'il s'agit encore de mener.

Agriculture

Outre la demande de produits nationaux, des facteurs tels que le climat, la politique agricole, les prix et l'utilisation de l'espace influencent de façon prépondérante l'évolution future de l'agriculture suisse et, partant, les cours d'eau. Les effets des apports diffus de substances sont notamment importants pour la qualité des cours d'eau, mais les pénuries d'eau d'irrigation, dans le temps et dans l'espace, peuvent survenir plus souvent à l'avenir et conduire à des conflits d'utilisation.

À court et moyen termes, **la politique agricole** déterminera davantage l'évolution de l'agriculture que le changement climatique. Il est toutefois difficile d'appréhender et de prévoir son impact. Dans ce contexte, la **Stratégie climat pour l'agriculture** [215] et le rapport du Conseil fédéral sur le **postulat «Eau et agriculture»** prennent en compte les aspects liés au climat dans leurs recommandations pour l'optimisation de la gestion de l'eau [17]. La stratégie climatique voit dans l'optimisation de la gestion de l'eau une stratégie d'adaptation qui permet notamment d'améliorer la rétention d'eau dans les sols, par un traitement du sol respectueux de sa structure, et d'éviter les états critiques de l'eau de surface. De plus, l'irrigation doit s'aligner sur la ressource hydrique disponible et être effectuée avec économie et efficacité. Il faut aussi

**Projet IWAQA du PNR 61:
la qualité de l'eau est principalement
influencée par l'homme**

La qualité de l'eau est et sera influencée par l'environnement et les conditions socio-économiques. En font partie les prélèvements d'eau tout comme l'utilisation des sols et les apports de substances y afférents. Des mesures sont nécessaires aujourd'hui afin de maintenir la qualité de l'eau pour les générations à venir – des mesures basées sur la compréhension d'un système qui associe le changement du climat, de la société et de l'utilisation du sol. Le projet IWAQA a contribué à cette compréhension du système en développant une série de modèles confrontant des scénarios climatiques et socio-économiques avec la qualité de l'eau et l'état écologique des cours d'eau. A la lumière de quatre scénarios socio-économiques, une série de variantes stratégiques a été formulée et expérimentée sur le bassin versant de la Mönchaltorfer Aa. Les modélisations indiquent clairement que l'état écologique et chimique des cours d'eau est et sera plus influencé par les activités de l'homme que par le changement climatique. Ce dernier se caractérisera en particulier par une hausse des températures de l'eau. Les modèles ont en outre montré que les apports de substances peuvent être davantage anticipés s'ils atteignent le système en continu. Les impuretés provenant de l'urbanisation et de l'agriculture et entraînées par de fortes pluies sont beaucoup plus difficiles à évaluer. Si l'on souhaite développer des stratégies et des mesures visant à maintenir la qualité de l'eau à l'avenir, il faut s'y attacher dès à présent. Afin de ne plus être confronté demain à ces problèmes, il convient dès aujourd'hui de les prévenir ou de les résoudre. La qualité de l'eau dépend du comportement de l'homme.

**Projet MONTANAQUA du PNR 61:
une seule ressource pour de nombreux
utilisateurs**

Le développement de la région Crans-Montana-Sierre montre à quel point l'évolution de la société et l'utilisation de l'eau sont étroitement liés. A la fin du XIX^e siècle, la vallée alors façonnée par l'agriculture s'est transformée en une station touristique (sports, santé), ce qui a déclenché une explosion de la construction dès 1960. Le besoin en eau a augmenté non seulement à cause de la croissance de la population, mais aussi à cause de l'intensification de l'agriculture et de la viticulture qui en découle [218]. A partir de 1957, la production hydraulique a posé des exigences mais elle a permis en contrepartie le développement industriel dans la vallée (usines d'aluminium à Sierre), ce qui a à nouveau réduit les besoins de l'agriculture. En conséquence, la pénurie d'eau a toujours été un thème récurrent.

Si les utilisations sont réparties dans l'espace et le temps, les différents impératifs d'utilisation ne conduisent pas obligatoirement à des conflits de ressources. Une analyse de la consommation d'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre indique un pic de la demande en été en raison de l'irrigation et la demande d'eau potable et un autre en hiver en raison de l'enneigement artificiel et la demande d'eau potable, en particulier en fin d'après-midi. L'eau stockée pour la production hydraulique représente près de 90% du volume d'eau utilisé et répond également à d'autres besoins. Elle est ainsi vendue à quelques communes en vue de l'approvisionnement en eau potable (hiver), de l'irrigation des terrains de golf et de la production de neige artificielle. Les deux dernières utilisations sont limitées dans le temps et plutôt insignifiantes au niveau régional. Cependant, comme l'enneigement artificiel a lieu à une période où les débits naturels sont de toute façon faibles, des lacs d'accumulation doivent absolument être mis à disposition à cet effet [6]. La situation devrait encore s'aggraver à l'avenir: comme les modélisations pour 2050 l'ont montré, la région devra s'adapter à un déficit d'eau au début de l'année (de janvier à mars) tout comme à la fin de l'été (août et septembre) pendant les années sèches. (ill. 29).

**Projet FUGE du PNR 61:
le changement climatique ferme-t-il
le robinet aux producteurs d'énergie
hydraulique?**

Des mesures de l'épaisseur de glace et des bilans des masses réalisés sur 50 glaciers des Alpes suisses sur la période 1900-2010 ont confirmé ce qui est déjà visible: les glaciers reculent. Ces chiffres précis permettent des modélisations pour l'avenir qui montrent que 90% du volume de glace actuel aura fondu avant la fin du siècle, 10 à 20 glaciers parmi ceux étudiés auront totalement disparu [219]. Cette fonte a des conséquences sur le débit qui a été étudié par le projet «Future glacier evolution and consequences for hydrology» (FUGE). La fonte des neiges augmentera d'abord les volumes de débit annuels et générera des valeurs maximales de débit entre 2030 et 2050. Puis les volumes diminueront pour ne plus influencer que très faiblement le débit annuel à la fin du siècle. Les débits de pointe se déplacent également dans le temps: alors que l'eau de fonte des glaciers en régime glacial conduit à des débits de pointe en plein été, ceux-ci vont s'atténuer après 2050 et se produire 1 à 2 mois plus tôt [220, 221].

Etant donné que l'eau de fonte des glaciers représente 1% seulement du volume total du débit, l'on pourrait en conclure que la disparition de cette ressource n'aurait qu'une influence insignifiante sur l'énergie hydraulique. Cependant, la plupart des centrales d'accumulation se trouvent en haute montagne, où la fonte des glaces représente une part beaucoup plus importante du débit. Les centrales du Valais de Mauvoisin, par exemple, seront exploitées à l'avenir avec un débit inférieur d'environ 18% par rapport à aujourd'hui. Toutefois des mesures micro-économiques peuvent équilibrer en partie ces pertes liées au changement climatique: si l'on évite une forte baisse du niveau d'eau, il est possible de produire davantage d'énergie à partir du même volume d'eau. L'augmentation de la production aux heures pleines atténue également les pertes économiques [222]. Les exploitants de centrales à accumulation se préoccupent non seulement des volumes d'eau en baisse, mais aussi des charges sédimentaires, du charriage et des risques qui augmenteront sous l'effet du changement climatique [223].



planter davantage de cultures et de variétés résistantes à la sécheresse [215]. La stratégie climatique privilégie ainsi des mesures d'adaptation «douces», c'est-à-dire simples à réaliser pour le producteur. Malgré tout, l'on peut supposer que la pression exercée par l'irrigation sur les cours d'eau, les lacs et l'eau souterraine s'accroîtra encore à l'avenir. Face à la baisse attendue des précipitations estivales en particulier, il faudra intensifier l'irrigation dans certaines régions, même sur des terrains et pour des cultures qui n'étaient pas initialement dépendantes de l'irrigation [216]. Pour le bassin versant de la Broye, par exemple, la consommation d'eau devrait progresser de 22 à 48% à l'horizon 2050. Le pic de la demande coïncide avec la saison pendant laquelle le débit des cours d'eau est également le plus faible dans de nombreux endroits [217] (AGWAM). Un démarrage précoce de la végétation pourrait encore aggraver la situation. Selon les périodes et les régions, l'agriculture et les autres utilisations peuvent entrer en concurrence [97], d'autant que, dans de nombreux endroits, l'irrigation fait appel à des ressources hydriques qui sont de toute façon déjà faibles en cas de périodes de sécheresse prolongée et qui sont par ailleurs utilisées par d'autres acteurs [18, 38]. Pendant les années normales, le besoin en eau d'irrigation pourrait quadrupler, y compris dans d'autres bas-

sins versants [224] (AGWAM). Dans les régions montagneuses en revanche, le besoin devrait être couvert dans la plupart des cas par les cours d'eau [225].

La réforme du système des paiements directs dans le cadre de **la politique agricole suisse 2014-2017**, qui prévoit une réallocation des paiements directs liés aux animaux aux contributions à la sécurité de l'approvisionnement en fonction de la surface, pourrait aussi avoir des effets positifs sur la qualité des cours d'eau. Dans les vallées et les montagnes, cette situation conduira à une diminution des cheptels et, en cas de surface utile légèrement plus faible, à une réduction de la charge en bétail [226], ce qui devrait réduire l'apport de nutriments et de polluants dans les cours d'eau. Cependant, les effets peuvent être très différents d'une région à l'autre [227].

Le développement continu de l'urbanisation conduit également à **une diminution de la surface des terres cultivables exploitées**. Cependant, il n'est pas possible de prévoir cette évolution avec certitude. Si la surface agricole continue à reculer, les apports de nutriments et de produits phytosanitaires seront réduits d'autant, ce qui contribuera à l'amélioration de la qualité des cours d'eau. La loi révisée sur la protection des eaux prévoit en outre l'exploitation, à l'échelle de la Suisse, d'environ 20 000 hectares sans engrais

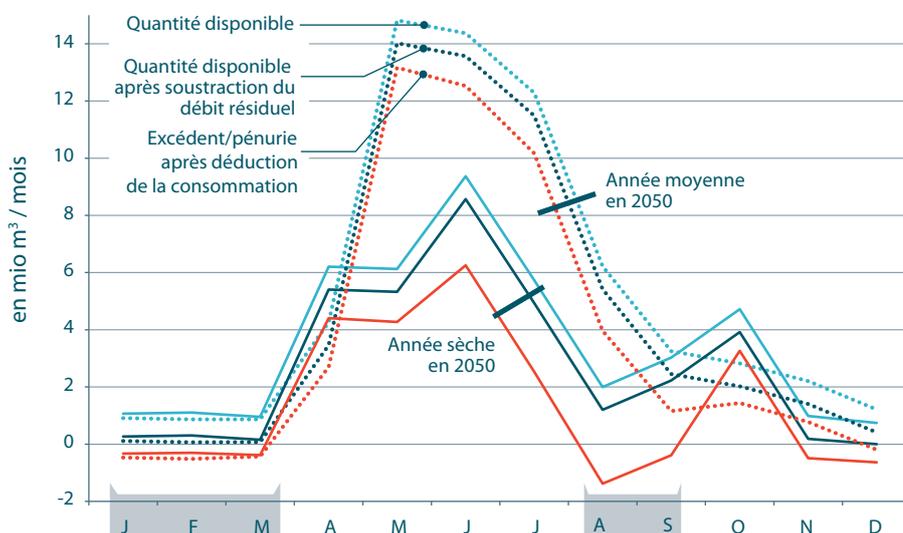
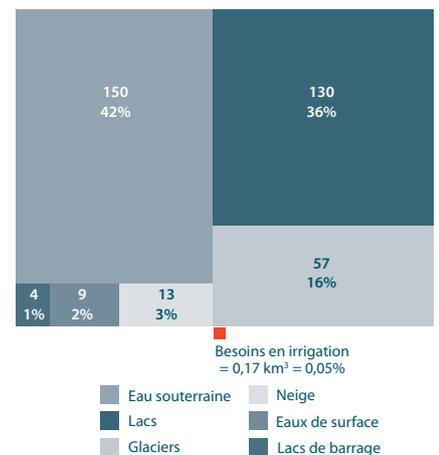
A gauche: lorsque des eaux d'irrigation sont prélevées dans la Petite Glâne au début de l'été et que les températures augmentent à la même période, de nombreux organismes aquatiques meurent. (AGWAM)

Au milieu: prélèvement mobile d'eau dans un canal de la vallée de la Broye. (Photo Jürg Fuhrer, Agroscope)

A droite: la forêt suisse changera beaucoup au cours de la seconde moitié du siècle, tant pour ce qui est de la composition des espèces que de la biomasse. L'équilibre hydrique sera également touché. (DROUGHT-CH)

Volume total des réserves et besoin en irrigation

en km³, totale 363 km³ = 100%



III. 28: le volume d'eau d'irrigation nécessaire à l'avenir semble négligeable avec environ 0,17 km³ par rapport au volume total des réserves. Localement, il faut cependant s'attendre à davantage de difficultés. (A. Björnsen)

III. 29: ressources en eau de la région Crans-Montana-Sierre pendant les années normales et sèches après 2050 [228]. (MONTANAQUA)

ni produits phytosanitaires sur les deux rives des ruisseaux et rivières. Cependant, les nouvelles directives ont peu d'effet sur la gestion actuelle des petits cours d'eau, l'emploi d'engrais et de pesticides y étant limité depuis longtemps par l'ordonnance sur les paiements directs et l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques.

Outre la politique agricole et l'utilisation du sol, le climat influencera l'agriculture plus particulièrement dans la seconde moitié du siècle.

Les augmentations de température provoquées par le changement climatique influent non seulement sur la productivité agricole, mais elles prolongent également la période de végétation et permettent ainsi une culture de plein champ supplémentaire ou une autre coupe de fourrage. En altitude notamment, où les problèmes de sécheresse estivale sont moins importants, la production végétale et animale est stimulée par la hausse de la température et par la prolongation de la période d'estivage. Globalement, l'importance des terres en altitude pour la production animale augmentera, en particulier dans les régions humides tout à fait utilisables (p. ex. l'Oberland bernois ou l'Obwald). Dans le domaine de la production fourragère, la productivité augmentera sur les sites ayant un approvisionnement en eau suffisant. La production animale profitera par conséquent de fourrages moins coûteux, de plus en plus produits en Suisse. La prolongation de la période de pacage et les nouveaux mélanges de plantes fourragères peuvent augmenter le potentiel de la production animale [111]. Il en va autrement dans les régions sèches et utilisées de façon moins intensive. Dans le Valais, les dégâts seront davantage dus à la sécheresse dans les prairies. Dans les Grisons du Sud aussi, les ressources en eau diminueront sensiblement. Le changement climatique augmente aussi les risques **d'événements extrêmes** [215], qui peuvent affecter la productivité, le rendement et la sécurité de rendement, mais qui pourraient également encore renforcer le problème du lessivage de l'azote. L'augmentation du nombre de jours de canicule peut avoir une

incidence négative sur l'élevage et la qualité du fourrage [229].

Evolution de la forêt

A l'avenir, le changement climatique aura un impact considérable sur l'évolution de la forêt, laquelle influencera à son tour les ressources en eau. **La politique forestière 2020** tient compte de cette réalité et prescrit un maintien des surfaces boisées. Si la composition des espèces, l'état du sol et sa capacité de rétention, l'évaporation ainsi que les débits concernés ne seront guère affectés pendant la première moitié du siècle, il faudra s'attendre à des changements tangibles durant la seconde moitié du siècle.

D'ici à 2050, l'on prévoit de manière générale une **croissance de la biomasse**, en particulier dans les bassins versants alpins abrupts et plutôt retirés [230]. Les conséquences de la sécheresse, notamment la fréquence accrue des incendies, sont attendues principalement dans les endroits de basse et moyenne altitudes des vallées alpines chaudes et sèches, du moins jusqu'à l'établissement d'espèces résistantes au stress de l'eau. Vers le milieu du siècle, la biomasse devrait s'accroître sous l'effet de la hausse des températures et de l'abaissement de la limite de la croissance liée à la température (scénario +2° C) en altitude (2200 m d'altitude) pour atteindre des valeurs historiques en 2100 [231]. Dans les forêts du versant nord des Alpes (p. ex. dans la vallée de Dischma), la situation est moins évidente. Tandis que la biomasse forestière diminue à l'avenir selon les scénarios A1B et A2, elle augmente pour le scénario +2° C. On anticipe une croissance significative au-dessus de 2200 m. La **composition des espèces** des forêts est importante pour le régime des eaux et pour la capacité de rétention du sol; elle est également très utile en plaine, parce qu'elle représente de par sa surface une part beaucoup plus vaste que les régions à proximité de la limite forestière [150]. A l'avenir, l'épicéa sera remplacé par le hêtre, arbre thermophile mais sensible à la sécheresse. Les périodes de sécheresse plus fréquentes et plus marquées

III. 30: potentiel de propagation actuel et à venir des épicéas (*Picea abies*) en Suisse, basé sur 36 combinaisons de modèles. Dans les surfaces claires, le potentiel de propagation de l'épicéa est très faible et dans les zones orange, il est lié à de fortes incertitudes. L'épicéa trouvera selon toute vraisemblance un habitat adapté dans les zones colorées en rouge, ce qui ne veut pas dire qu'il s'y sera établi d'ici à la fin du siècle. (© A. Psomas et N. Zimmermann/WSL, Programme de recherche Forêt et changement climatique)

Potentiel de propagation actuel des épicéas



Potentiel de propagation des épicéas en 2100



dans un avenir lointain (2070-2099) pourraient avoir un effet négatif sur l'état des forêts (ill. 30). Le chêne pourrait, quant à lui, continuer à prospérer en plaine.

Le changement des essences lié au climat, par exemple le hêtre remplaçant l'épicéa, pourrait influencer positivement sur la lutte contre les crues grâce à l'augmentation de la capacité de stockage d'eau au niveau des racines [232]. Les forêts dans les vallées sèches intra-alpines peuvent évoluer vers une végétation de steppe voire disparaître.

L'évaporation spécifique aux essences joue également un rôle. Les futures périodes de sécheresse affecteront principalement les forêts situées dans les plaines, où les températures et les taux d'évaporation potentiels seront les plus élevés. Les modèles indiquent que les forêts composées exclusivement de feuillus vont disparaître presque entièrement dans le bassin versant du Tessin d'ici à la fin du siècle et entièrement dans le bassin versant du Rhône. Dans la vallée du Rhône, les forêts mixtes seront elles aussi affectées. Par conséquent, l'évapotranspiration potentielle évolue avec l'altitude. Dans la seconde moitié du siècle, l'appauvrissement des forêts de feuillus en plaine réduira le taux d'évaporation dans les régions situées en dessous de 1300 m d'altitude.

Tourisme

Les réflexions sur l'évolution future du tourisme et sur les conséquences qui en résultent en matière de gestion durable de l'eau concernent en premier lieu le **tourisme d'hiver**. Tous les domaines skiables des Alpes seront touchés par la hausse des températures, en particulier ceux situés à moins de 2000 m d'altitude, qui doivent prévoir une diminution de la sécurité de l'enneigement [113, 141, 233]. Avec une augmentation de la température de 2° C d'ici à la fin du siècle, le nombre de domaines skiables suisses bénéficiant d'un enneigement garanti va se réduire d'un bon cinquième [171]. Pour les stations touristiques hivernales de Braunwald, Davos et Scuol, les modélisations prévoient que l'enneigement garanti sur les pistes situées à basse altitude tombera sous le seuil critique des 100 jours en 2030 [115]. Le tourisme de ski est particulièrement menacé dans les Alpes vaudoises et fribourgeoises, dans le Tessin ainsi qu'en Suisse centrale et orientale. Les domaines skiables du Valais et des Grisons sont concernés dans une moindre mesure [234].

Par comparaison avec les autres pays européens, la Suisse jouit d'un avantage concurrentiel grâce à ses stations de ski situées à plus haute altitude, mais elle devra tout de même s'adapter, que ce soit par un déplacement des stations vers des zones plus élevées, par l'utilisation accrue de canons à neige, par des investissements plus importants dans l'entretien des pistes de ski ou par le recouvrement des surfaces de glace. En hiver, le besoin en eau pour garantir l'enneigement et l'approvi-

sionnement en eau potable et sanitaire restera important à l'avenir.

Pour des raisons économiques, l'industrie du tourisme d'hiver s'est d'ores et déjà affranchie de la disponibilité de la neige naturelle [233, 235]. La stratégie d'adaptation au climat de la Confédération elle-même met l'enneigement artificiel au premier plan en tant que mesure d'adaptation [171]. Ainsi, la production de neige artificielle [115] mais aussi la consommation d'électricité vont augmenter [236]. La construction de bassins d'accumulation entend prévenir l'émergence de conflits d'utilisation [17].

Le **tourisme d'été** fait partie aussi bien des gagnants que des perdants. Si les étés plus chauds et plus secs incitent les touristes à séjourner en montagne, le paysage alpin risque de perdre de son attrait du fait du fort recul des glaciers. La part des installations de golf et de loisirs irriguées ne devrait guère augmenter.

Protection des eaux

Pour que les cours d'eau puissent évacuer les pics de crue, le charriage et le bois flotté sans dommages et drainer les zones urbaines et les terres cultivées, les cantons sont légalement tenus de prévoir suffisamment d'espaces pour les cours d'eau dans leurs plans directeurs et d'affectation. Selon **la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau**, référence en la matière, la protection contre les crues doit être en premier lieu garantie par des mesures d'aménagement du territoire. Les cantons sont de fait tenus d'identifier le besoin d'espace des cours d'eau. **La loi sur la protection des eaux** (art. 38) charge également les cantons de prévoir l'espace réservé aux eaux et de planifier les revitalisations dans leurs plans directeurs et d'affectation, ce qui crée certaines synergies avec la protection contre les crues. L'espace nécessaire aux extensions prévues des ruisseaux et des rivières représente environ 2000 ha d'ici à la fin du siècle (ill. 26). Les revitalisations sont des mesures de construction favorisant le rétablissement des fonctions naturelles d'un cours d'eau de surface aménagé, corrigé, couvert ou canalisé. Elles incluent également **la réduction des effets négatifs de l'utilisation de la force hydraulique** par la réduction du marnage, la réactivation du charriage et le rétablissement de la circulation des poissons, dont profiteront les tronçons de cours d'eau sur une longueur totale de 4000 km environ [237]. Les coûts s'élèvent à environ un milliard de francs. La planification et la mise en œuvre des mesures s'effectueront dans le cadre d'une phase d'assainissement de 20 ans, à laquelle est alloué un budget annuel moyen de 50 millions de francs, qui sera financé par une surtaxe sur les coûts de transfert [238], c'est-à-dire par les clients du réseau électrique. La **construction** d'environ 100 grandes **stations d'épuration** des eaux usées [64] apporte en outre une contribution décisive à la protection des cours d'eau.

Conclusions

Les ressources hydriques de la Suisse sont limitées

Avec un volume d'environ 40 km³ d'eau qui s'écoule chaque année hors de Suisse, le pays dispose de ressources hydriques considérables en valeur nominale. Le volume annuel moyen ne va pas évoluer fondamentalement sous l'effet du changement climatique. La Suisse reste un château d'eau.

Cependant, le bilan global des ressources hydriques disponibles n'est guère éloquent. La prise en compte de la variabilité temporelle et spatiale (→ voir p. ex. AGWAM, FUGE, NELAK) est primordiale pour la gestion durable de l'eau. De plus, des réserves importantes comme les glaciers et la neige diminueront de volume à l'avenir, ce qui influencera les débits et les prestations qui s'y rattachent. Enfin et surtout, la qualité de l'eau étant directement influencée par l'homme et l'environnement, l'on assistera à une diminution des ressources utiles. Si l'on évalue le volume réellement utilisable à un moment défini dans un lieu défini, l'on constate que la Suisse n'est pas toujours, ni partout, aussi riche qu'on le supposait jusqu'à présent.

Faible consommation, grande utilité

Par rapport à la ressource hydrique disponible, la consommation de la Suisse est modeste. Les ménages et les différents secteurs économiques consomment à peine plus de 5% du volume d'eau renouvelable.

Cependant, dès que les exigences d'utilisation se chevauchent ou que l'eau est utilisée de façon répétitive, l'intensité d'utilisation peut être très élevée selon les régions et la période. Le volume utilisé par l'énergie hydraulique par exemple représente 14 fois le débit annuel total. La même eau sert plus tard au refroidissement, à l'irrigation ou à la production d'eau potable. De nombreux secteurs économiques et ménages sont tributaires d'une ressource fiable et font valoir ce droit. Si cette fiabilité devait être menacée à l'avenir, il conviendrait d'en tenir compte dans la répartition et l'utilisation de la ressource.

Eau souterraine, à la fois surestimée et sous-estimée

Le sous-sol de la Suisse renferme environ 150 km³ de réserves hydriques. L'eau souterraine assure un rôle d'interface entre les différents écosystèmes aquatiques. Mais les réserves d'eau souterraine sont également significatives pour de nombreuses utilisations, en particulier l'approvisionnement public en eau potable qui provient à 80% de l'eau souterraine.

La richesse de l'eau souterraine est souvent surestimée, car le volume réellement utilisable est limité par des facteurs techniques, économiques, écologiques et juridiques. Le développement de l'urbanisation et l'agriculture

influencent le volume et la qualité dans une large mesure. Jusqu'ici, le volume utile à long terme n'a pas été quantifié assez précisément dans de nombreuses régions, en particulier dans les régions alpines et karstiques (voir p. ex. GW-TREND, SWISSKARST). De même, les restrictions qualitatives à l'utilisation de l'eau souterraine ne sont pas suffisamment documentées (p. ex. la qualité de l'eau souterraine dans les régions karstiques et dans les régions qui ne sont plus adaptées à l'utilisation de l'eau potable). Les ressources utiles à long terme devraient également être étudiées plus en détail à l'aune des probables périodes de sécheresse prolongée. (→ voir p. ex. GW-TREND p. 42, SWISSKARST p. 14).

Ressource hydrique disponible dans les Alpes: la moyenne reste inchangée, la répartition évolue

L'influence du changement climatique sur la cryosphère est d'ores et déjà visible et peut être prévue avec suffisamment de certitude.

Les composants clés de la ressource hydrique des Alpes sont la couche de neige et les glaciers qui vont se transformer sensiblement au cours de ce siècle. Pour les cours d'eau, plus que le volume annuel du débit spécifique, c'est surtout la répartition sur l'année qui va évoluer. Etant donné que le pic d'eau de fonte sera atteint plus tôt dans l'année, la période qui suit, caractérisée par de faibles volumes d'eau, sera plus longue. L'on s'attend à de faibles niveaux d'eau surtout à la fin de l'été, une fois le flux d'eau de fonte tari. Jusqu'ici, les discussions sur les évolutions futures de la ressource hydrique ont souvent porté sur les valeurs moyennes annuelles. Les variations de débit au cours de l'année seront plus importantes, suite à la fonte précoce et à l'augmentation des précipitations en hiver, ce qui peut parfois se répercuter sur la ressource hydrique. La Suisse a besoin d'idées novatrices pour stocker l'eau supplémentaire.

L'eau et le paysage, deux éléments en interaction constante

Composante à part entière du paysage, l'eau joue un rôle prépondérant dans la préservation du paysage rural. L'utilisation du sol et du paysage influence en effet les ressources hydriques de manière déterminante. Cependant, les interactions sont peu étudiées.

L'exploitation du sol a un effet direct sur la quantité, la qualité et l'écologie des cours d'eau (→ c.f. p. ex. WATERCHANNELS p. 24, HYDROSERV, IWAQA p. 50). L'aménagement du territoire et l'exploitation des surfaces doivent être intégrés dans le cadre de la gestion durable de l'eau, non seulement pour exploiter la ressource hydrique de façon économe mais aussi pour la préserver. L'hydrologie des bassins versants complexes a été peu étudiée en Suisse jusqu'à présent. Seules quelques rares études



quantifient l'influence de l'utilisation du sol (par ex. par des drainages, le compactage et l'imperméabilisation du sol) sur les débits, bien que cette utilisation du sol soit particulièrement importante sur le Plateau. Il en va de même pour les apports de substances, par lesquels «le paysage» influence indirectement la qualité de l'eau. De toute évidence, le régime hydrologique du Plateau sera nettement moins influencé par le changement climatique que les régions des Alpes et des Hautes-Alpes (→ voir p. ex. NELAK p. 40).

La question de l'eau concerne aussi les cours d'eau

La Suisse dispose d'une eau potable de qualité et elle a réussi au cours des dernières décennies à réduire de nombreux apports diffus de nutriments et de polluants grâce à des mesures d'optimisation de la protection des eaux. La construction de centrales d'épuration a permis de réduire les apports ponctuels de substances.

Ce n'est pas seulement la ressource eau qui compte, mais également l'écosystème qui génère, conserve, épure et utilise la ressource. Par conséquent, il ne faut pas uniquement garantir la gestion durable de l'eau, mais plutôt une gestion durable des cours d'eau pour permettre aux écosystèmes de jouer leur rôle. Une vision globale offre de réelles opportunités: trait d'union entre de nombreux écosystèmes, les cours d'eau reflètent l'état de l'environnement dans sa globalité et constituent, à ce titre, un système d'observation de l'environnement. Pour interpréter correctement les évolutions et comprendre les liens de cause à effet, il convient de mener des études sur le long terme. Celles-ci permettraient de définir l'état naturel (p. ex. SEDRIVER: truite de rivière) et de formuler des mesures d'adaptation au changement climatique (p. ex. → IWAQA p. 50).

Données au sujet de l'eau pour la Suisse: créer une vision d'ensemble et une responsabilité globale

La Suisse dispose de nombreuses séries de mesures et de banques de données. Le pays est non seulement riche en eau mais aussi en données sur l'eau, au moins concernant la quantité et, en partie également, la qualité. En période de changement climatique, la gestion durable de l'eau est une mission d'envergure nationale qui nécessite un renforcement

de la coordination et de la concertation sur les activités de gestion de l'eau (→ voir IWAGO p. 24). Les lacunes en matière de données doivent être comblées et les données disponibles synthétisées de sorte à constituer une base pour la protection et la gestion des cours d'eau. Les lacunes subsistent en particulier au niveau de l'interface entre l'exploitation du sol et la qualité de l'eau, mais également dans le domaine de l'utilisation de l'eau. Les connaissances sur l'utilisation actuelle et l'utilisation prévue de l'eau sont insuffisantes [239] et reposent largement sur des estimations et des projections. Elles comportent de grandes incertitudes en ce qui concerne le temps et l'espace.

Les données existantes doivent être traitées dans le cadre d'une collaboration renforcée entre la Confédération, les cantons, les communes et les offices pour garantir l'échange de l'ensemble des données et informations disponibles. Ces acteurs politiques seront de plus en plus amenés à conjuguer leurs efforts pour collecter de nouvelles séries de données, conformément à la proposition de la Commission hydrologique [2].

La Suisse n'est pas une île: elle doit faire partie intégrante d'une stratégie internationale des ressources

De par sa situation, la Suisse bénéficiera, à l'avenir également, d'un avantage considérable dans le domaine de l'eau, un avantage qui lui confère aussi des responsabilités.

La ressource, la gestion et la qualité de l'eau étant influencées dans une large mesure par les utilisations du sol et les exigences de la société, la gestion durable de l'eau doit s'inscrire dans une stratégie globale en matière de gestion des ressources et de l'espace. Le Rhin, l'Inn, le Tessin et le Rhône prenant leur source en Suisse, le pays partage ses cours d'eau avec d'autres pays européens. La Suisse peut exercer sa responsabilité de pays en amont pour élaborer et mettre en œuvre des principes de gestion de l'eau et des concepts visant à maintenir les performances des écosystèmes dépendant de l'eau. Pour que ceux-ci soient également profitables aux pays limitrophes, il est primordial d'intégrer dans cette démarche leurs expériences et besoins.

A gauche: la fluctuation temporelle et spatiale des ressources hydriques exigera des mesures d'adaptation dans de nombreux secteurs. (WATERCHANNELS)

Au milieu: le changement climatique sera nettement plus perceptible dans les régions des Alpes et des Hautes-Alpes que sur le Plateau, où ce sont principalement les droits d'utilisation des hommes qui influent sur l'équilibre hydrique. (NELAK)

A droite: en tant que ressource, l'eau est importante, mais l'écosystème aussi. (IWAQA)

Index des illustrations

- III. 1: séries de données des différents paramètres des eaux suisses.
- III. 2: débit annuel de la Suisse.
- III. 3: aquifères de roche meuble, fissurés et karstiques et leur morphologie.
- III. 4: part renouvelable, actuellement exploitée, des ressources en eau souterraine en Suisse.
- III. 5: régions karstiques en Suisse.
- III. 6: cartographie du bassin versant du Schächen.
- III. 7: contributions modélisées des réserves du sol à la crue du Schächen.
- III. 8: concentrations en azote total et en phosphore total dans les eaux courantes.
- III. 9: concentrations en nitrates de l'eau souterraine.
- III. 10: consommation d'eau des ménages en Suisse.
- III. 11: consommation annuelle d'eau des différents secteurs en Suisse.
- III. 12: comparatif du volume de consommation annuelle d'eau avec l'utilisation pour le refroidissement par écoulement et la production électrique.
- III. 13: utilisation de l'eau renouvelable par les services d'approvisionnement publics en eau potable.
- III. 14: consommation annuelle d'eau pour différentes prestations de service.
- III. 15: besoins en irrigation des terres agricoles (1980-2006).
- III. 16: consommation d'eau par l'agriculture suisse.
- III. 17: surfaces irriguées en plein air dans les exploitations agricoles (selon le type de culture).
- III. 18: pourcentage de la surface agricole irriguée en Suisse.
- III. 19: consommation d'eau annuelle de l'industrie de fabrication.
- III. 20: consommation d'eau annuelle pour les loisirs et le tourisme.
- III. 21: coûts annuels d'exploitation et du capital pour infrastructures hydrauliques en Suisse.
- III. 22: augmentation saisonnière de la température et modification future des précipitations pour trois régions de Suisse.
- III. 23: surcreusements modélisés et lacs glaciaires potentiels dans les Alpes centrales suisses.
- III. 24: projections de l'eau de surface de la Suisse dans un avenir lointain.
- III. 25: températures de l'eau de rivière et températures de l'eau souterraine depuis 1980.
- III. 26: part des différents types d'utilisation de la superficie nationale totale.
- III. 27: modélisation sur l'année du débit moyen du Rhin à Bâle.
- III. 28: volume d'eau d'irrigation nécessaire à l'avenir par rapport au volume total des réserves.
- III. 29: ressources en eau de la région Crans-Montana-Sierre après 2050.
- III. 30: potentiel de propagation actuel et à venir des épicéas en Suisse.

Tableau

Tableau: modification des risques de crue à l'avenir en Suisse.

Bibliographie

- [1] Spreafico M et Weingartner R (2005): Hydrologie der Schweiz – Ausgewählte Aspekte und Resultate. Rapports de l'OFEG, série Eaux n° 7, Berne. (uniquement en allemand).
- [2] Walther P (2013): Foresight Report Hydrological Research in Switzerland. Final Workshop Report, Olten (24.11.2011), Berne. (uniquement en anglais).
- [3] Seiz G et Foppa N (2007): Système national d'observation du climat (GCOS Suisse). Publication de MétéoSuisse et ProClim, 92 p.
- [4] Grasso A, Jakob A, Spreafico M et Béro D (2010): Monitoring von Feststofffrachten in schweizerischen Wildbächen. Wasser-Energie-Luft 102(1): 41-45. (uniquement en allemand).
- [5] Schlosser JA, Haertel-Borer S, Liechti P et Reichert P (2013): Système d'analyse et d'appréciation des lacs en Suisse. Guide pour l'élaboration de modules d'appréciation. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement 1326: 38 p.
- [6] Reynard E, Bonriposi M (2012): Water use management in dry mountains of Switzerland. The Case of Crans-Montana-Sierre Area. In: Nemenyi M and Heil B (eds). The impact of Urbanization, Industrial, Agricultural and Forest Technologies on the Natural Environment. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron: 281-301. (uniquement en anglais).
- [7] 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 1217: 76 p.
- [8] Schädler B et Weingartner R (2002): Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz: Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung. Wasser-Energie-Luft 94 (7/8), Baden. (uniquement en allemand).
- [9] Blanc P et Schädler B (2013): L'eau en Suisse – un aperçu. Commission suisse d'hydrologie CHy, Académie suisse des sciences naturelles, Berne. 31 p.
- [10] Scherrer SC, Wüthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R et Appenzeller C (2013): Snow variability in the Swiss Alps 1864-2009. International Journal of Climatology 33(15): 3162-3173. (uniquement en anglais).
- [11] Menzel L (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. PIK Report 54, Postdam, 30 p. (uniquement en allemand).
- [12] Aschwanden H et Weingartner (1983): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde 65, Berne. (uniquement en allemand).

- [13] Haerberli W, Paul F et Zemp M (2013): Vanishing glaciers in the European Alps. Dans: Fate of Mountain Glaciers in the Anthropocene. Pontifical Academy of Sciences, Scripta Varia 118: 1-9. (uniquement en anglais).
- [14] NELAK (2013): Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques Rapport de recherche PNR 61. Haerberli W, Bütler M, Huggel C, Müller H et Schleiss A (éd.). Zurich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 p.
- [15] Haerberli W et Linsbauer A (2012): Global Glacier Volumes and Sea Level – Effects of ice below the surface of the ocean of new local lakes on land. The Cryosphere Discussions 6: 5169-5179. (uniquement en anglais).
- [16] Société suisse d'Hydrologie et de Limnologie (SSHL) et Commission Hydrologique (éd.) (2011): Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique – Rapport de synthèse. Matériaux pour l'hydrologie de la Suisse 38, 28 p.
- [17] Office fédéral de l'environnement OFEV (2012): Gérer les pénuries locales d'eau en Suisse. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat. «Eau et agriculture. Les défis de demain» (postulat 10.353 déposé le 17 juin 2010 par Hansjörg Walter). Berne. 87 p.
- [18] Office fédéral de l'environnement OFEV (2013): Assainissement des débits résiduels: retard dans de nombreux cantons <http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=49177> (4.2.2014).
- [19] Baumgartner H (2012): 1001 nouveaux étangs. Environnement 2: 39-42.
- [20] Sinreich M, Kozel R, Lützenkirchen V, Matousek F, Jeannin P-Y, Löw S et Stauffer F (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz. Aqua & Gas 9: 16-28. (uniquement en allemand).
- [21] Schürch M (2010): Typologie des régimes d'eaux souterraines en Suisse. gwa 11: 955-965. (en allemand avec résumé en français).
- [22] Anonyme (2012). David M. Livingstone: «jedes Grundwasser hat seinen eigenen Charakter». Aqua & Gas: 8-9. (uniquement en allemand).
- [23] Figura S, Livingstone DM, Hoehn E et Kipfer R (2013): Le climat et l'eau souterraine: Rétrospective et perspective à travers des données historiques de la nappe phréatique. Aqua & Gas 7/8: 28-33.
- [24] Figura S, Livingstone DM, Hoehn E et Kipfer R (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. Geophysical Research Letters 38, L23401. (uniquement en anglais).
- [25] Schürch M (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser. gwa 3: 177-182. (uniquement en allemand).
- [26] ISSKA (2012): Projet SWISSKARST – Vers une gestion durable des eaux karstiques en Suisse, PNR 61 Rapport intermédiaire 2012. Institut suisse de spéléologie et de karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse, 47 p. (rapport non publié).
- [27] Bernhard L et Zappa M (2012): Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Einzugsgebiete. Rapport final CCHydrology. Projet partiel WHH-CH-Hydro. WSL Birmensdorf (uniquement en allemand).
- [28] Schädler B (2010): Anpassung an die Klimaänderung – Teilstrategie Wasser. Pour le compte de l'Office fédéral de l'environnement, Berne. (uniquement en allemand).
- [29] Kruse S, Seidl I et Stähli M (2010): Informationsbedarf zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz: Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen. Wasser Energie Luft 102: 305-308. (uniquement en allemand).
- [30] Kruse S et Seidl I (2013): Social capacities for drought risk management in Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences 13(12): 3429-3441. (uniquement en anglais).
- [31] Pfister C et Rutishauser M (2000): Les sécheresses estivales sur le Plateau suisse depuis 1525.
- [32] Theurillat JP et Guisan A (2001): Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. Climatic Change 50: 77-109. (uniquement en anglais).
- [33] Fundel F, Jörg-Hess S et Zappa M (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. Hydrology and Earth System Sciences 17: 395-407. (uniquement en anglais).
- [34] Rebetez M (1999): Twentieth century trends in droughts in southern Switzerland. Geophysical Research Letters 26(6): 755-758. (uniquement en anglais).
- [35] Pezatti GB, Zumbrunnen T, Bürgi M, Ambrosetti P et Conedera M (2013): Fire regime shifts as a consequence of fire policy and socio-economic development. An analysis based on the change point approach. Forest Policy and Economics 29: 7-18. (uniquement en anglais).
- [36] Reinard M, Rebetez M et Schlaepfer R (2005): Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland. Theoretical and Applied Climatology 82: 17-25. (uniquement en anglais).
- [37] Stähli M, Kruse S, Fundel F, Zappa M, Stahl K, Bernhard L et Seidl I (2013): DROUGHT.CH – auf dem Weg zu einer Trockenheits-Informationsplattform für die Schweiz. Wasser-Energie-Luft 105(2): 117-121. (uniquement en allemand).
- [38] Marbot B, Schneider M et Flury C (2013): Wiesenbewässerung im Berggebiet. Rap-

- port du programme de recherche Agri-Montana. Ettenhausen. 55 p. (uniquement en allemand).
- [39] Vischer DL (2003): Histoire de la protection contre les crues en Suisse – Des origines jusqu'au XIX^e siècle. Rapport de l'OFEV n° 5, série Eaux, Berne: 208 p.
- [40] Bezzola GR, Hegg C (éd.) (2008): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Office fédéral de l'environnement OFEV, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL Umwelt-Wissen 0825: 429 p. (uniquement en allemand).
- [41] Vouillamoz J, Malard A, Schwab-Rouge G, Weber E et Jeannin PY (2013): Mapping flood related hazards in karst using KARSYS approach. Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland). Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, held in Carlsbad, New Mexico, May 06-10, 2013: 333-342. (uniquement en anglais).
- [42] Malard A, Jeannin PY et Weber E (2014): Assessing the contribution of karst hydrological flows in the extremely high water events of the Suze River affecting the city of Bienne (Switzerland). Proceeding of the IAEG XII Congress – Torino, September 15-19, 2014 (uniquement en anglais).
- [43] Schädler B (2013): Umweltveränderungen und Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse Schweiz. Dans: Spreafico M et Viviroli D (éd). *Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 40: 41-46. (uniquement en allemand).
- [44] KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. *Wasser-Energie-Luft* 1: 55-57. (uniquement en allemand).
- [45] Schmocker-Fackel P et Naef F (2013): Historische Hochwasser. Dans: Spreafico M et Viviroli D (éd). *Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 40: 33-40. (uniquement en allemand).
- [46] Schmocker-Fackel P et Naef F (2010): Changes in Flood Frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(8):1581-1594 (uniquement en anglais).
- [47] Malard A et Jeannin PY (2013): Characterisation of karst aquifers in Switzerland: The KARSYS approach. *European Geologist* 35: 59-63 (uniquement en anglais).
- [48] ISSKA (2013): Estimation des ressources en eau (volume annuel écoulable) des aquifères karstiques suisses. OFEV, Berne (révision en cours).
- [49] Orth R et Seneviratne SI (2012): Analysis of soil moisture memory from observations in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D15, 16)(uniquement en anglais).
- [50] Orth R et Seneviratne SI (2013): Predictability of soil moisture and streamflow on sub-seasonal timescales: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 10963-10979. (uniquement en anglais).
- [51] Schmid M (2012): Verification of monthly probabilistic low-flow forecasts in the Swiss Rhine basin, thèse de master, EPF Zurich (uniquement en anglais).
- [52] Seneviratne SI, Orth R, Jörg-Hess S, Kruse S, Seidl, I, Stähli M, Zappa M, Seibert J, Staudinger M, Stahl K et Weiler M (2013): Evaluation du risque de sécheresse en Suisse: résultats du projet PNR 61 DROUGHT.CH. *Aqua & Gas* 9: 38-47.
- [53] Seneviratne S, Lehner I, Gurtz J, Teuling AJ, Lang H, Moser U, Greber D, Menzel L, Schrott K, Vitvar T, Zappa M (2013): Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event. *Water Resources Research* 48, W06526 (uniquement en anglais).
- [54] Anonyme (2013): Felix Naef: «Die Anforderungen an die Dimensionierung von Schutzmassnahmen werden steigen». *Aqua & Gas* 2: 8/9 (uniquement en allemand).
- [55] Hari R et Zobrist J (2003): Trendanalyse der NADUF-Messresultate 1974 bis 1998. EAWAG, Dübendorf. 200 p. (uniquement en allemand).
- [56] Eawag (éd.) (2009): *Wasserversorgung 2025 – Vorprojekt*. Dübendorf: Eawag. 198 p. (uniquement en allemand).
- [57] Office fédéral de l'environnement OFEV (2009): Résultats de l'observatoire national des eaux souterraines (NAQUA) État et évolution 2004 à 2006 Etat de l'environnement N° 0903. 144 p.
- [58] Vonlanthen P, Bittner D, Hudson AG, Young KA, Müller R, Lundsgaard-Hansen B, Roy D, Di Piazza S, Largiadere CR et Seehausen O (2012): Eutrophication causes speciation reversal in whitefish adaptive radiations. *Nature* 482: 357-363 (uniquement en anglais).
- [59] Wittmer I, Moschet Ch, Simovic J, Singer H, Stamm Ch, Hollender J, Junghans M et Leu Ch (2014): Plus de 100 pesticides dans les cours d'eau. Le programme NAWA Spez montre la forte pollution en pesticides de cours d'eau suisses. *Aqua & Gas* 3: 32-43 (en allemand avec résumé en français).
- [60] Munz N, Leu Ch et Wittmer I (2012): Pesticides dans les cours d'eau suisses: aperçu de la situation à l'échelle nationale. *Aqua & Gas* 11: 32-41.
- [61] Andres N, Badoux A et Hegg Ch (2013): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahr 2012: Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. *Wasser-Energie-Luft* 105(1): 55-61 (uniquement en allemand).

- [62] Badoux A, Andres N et Turowski JM (2013): Damage costs due to bedload transport processes in Switzerland. *Natural Hazards Earth System Sciences Discussion 1*: 4181-4222 (uniquement en anglais).
- [63] Rensch D (2009). Mikroverunreinigungen im Abwasser und Trinkwasser. PUSCH Dossier «Neue Herausforderungen im Wasserschloss Schweiz»: 6/7. (uniquement en allemand).
- [64] Ruff M, Singer H, Ruppe S, Mazacek J, Dolf R et Leu Ch (2013): 20 ans de surveillance du Rhin à Weil-am-Rhein: Succès et nouvelle orientation analytique. *Aqua & Gas 5*: 16-25.
- [65] Freiburghaus M (2009): Demande en eau de l'industrie suisse. Une enquête de la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), 43 p. (en allemand avec résumé en français).
- [66] Jeannin PY (2014): Rapport final SWISS-KARST.
- [67] Office fédéral de la statistique (OFS) (2012): L'environnement suisse: statistique de poche 2012. Neuchâtel. 37 p.
- [68] Seitz NJ (2013): Drainagen der Schweiz: Zeitlicher Verlauf, aktuelle Datenlage und Einfluss auf die Landschaftsentwicklung. Thèse de master à l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, 88 p (uniquement en allemand).
- [69] Zeh Weissmann H, Könitzer Ch et Bertiller A (2009): Ecomorphologie des cours d'eau suisses. Etat du lit, des berges et des rives. Résultats des relevés morphologiques. Version: avril 2009. Etat de l'environnement 0926. Office fédéral de l'environnement, Berne, 100 p.
- [70] Gimmi U, Lachat T et Bürgi M (2011). Reconstructing the collapse of wetland networks in the Swiss lowlands 1850-2000. *Landscape Ecology 26*: 1071-1083 (uniquement en anglais).
- [71] Konrad CP, Olden JD, Lytle DA, Melis TS, Schmidt JC, Bray EN, Freeman MC, Gido KB, Hemphill NP, Kennard MJ, McMullen LE, Mims MC, Pyron M, Robinson CT et Williams JG (2011). Large-scale flow experiments for managing river systems. *BioScience 61*(12): 948-959.(uniquement en anglais).
- [72] Office fédéral de l'environnement OFEV site Internet: <http://www.bafu.admin.ch/tiere/09262/index.html?lang=fr> (16.12.13).
- [73] Gander-Kunz Y (2013): Regionalisierung Kennzahlen Wassernutzung. Bericht zu den Auswertungen und Resultate. Rapport Hunziker Betatech pour le compte de l'Office fédéral de l'environnement OFEV (uniquement en allemand).
- [74] Office fédéral de l'environnement OFEV (2012): Adaptation aux changements climatiques en Suisse dans le secteur de l'eau – une contribution de l'Office fédéral de l'environnement à la stratégie d'adaptation du Conseil fédéral. 23 p.
- [75] Diem S, Schirmer M, von Rohr MR, Kohler H-P E, Hering JG et von Gunten U (2013): Qualité du filtrat de rive: Influences des variables climatiques, température et écoulement. *Aqua & Gas 11*: 14-21 (en allemand avec résumé en français).
- [76] Diem S, von Rohr R, Hering JG, Kohler H-P E, Schirmer M et von Gunten U (2013): NOM degradation during river infiltration: Effects of climate variables temperature and discharge. *Water Research 47*(17):6585-6595 (uniquement en anglais).
- [77] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) (2007): Résultats statistiques des services en eau en Suisse exercice 2006. Zurich.
- [78] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux SSIGE, (2013): Résultats statistiques des services en eau en Suisse exercice 2012. Zurich.
- [79] Freiburghaus M (2009): Demande en eau de l'industrie suisse. gwa 1001-1009 (en allemand avec résumé en français).
- [80] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) (2013): La consommation de l'eau potable en Suisse. Information sur l'eau potable 9.
- [81] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE) (2013): Consommation d'eau dans les ménages: étude de la SSIGE en collaboration avec l'OFEPF.
- [82] Caviezel-Padrutt E (2008): Das Ende der dunklen Nächte: Geschichte und Geschichten aus den Anfangszeiten des elektrischen Lichtes in Graubünden. *Bündner Monatsblatt, Coire*: 165 p. (uniquement en allemand).
- [83] Office fédéral de l'énergie (OFEN) (2013): Statistique des aménagements hydroélectriques de la Suisse (au 1.1.2013), Ittingen.
- [84] Office fédéral de l'énergie OFEN (2012): Le potentiel hydroélectrique de la Suisse: évaluation du potentiel de développement de la force hydraulique au titre de la stratégie énergétique 2050. 22 p.
- [85] Wehren B, Schädler B et Weingartner R (2010): Human Interventions. In: Bundi U: *Alpine Waters. Handbook of Environmental Chemistry. Vol 5: Series Water Pollution*. Springer Verlag. Berlin. 71-92 (uniquement en anglais).
- [86] Hauenstein W (2010): Der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband 1910-2010, ein Portrait. Ouvrage de l'association VS 67. 156 p. (uniquement en allemand).
- [87] Pfammatter R (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz – eine Auslegeordnung. *Wasser-Energie-Luft 104*(1): 1-9 (uniquement en allemand).
- [88] Riedener E, Rusterholz HP et Baur B (2013): Effects of different irrigation systems on the biodiversity of species-rich hay meadows. *Agriculture, Ecosystems and Environment 164*: 62-69 (uniquement en anglais).
- [89] Melliger RL, Riedener E, Rusterholz HP et Baur B (2014): Do different irrigation techniques affect the small-scale pattern of soil characteristics and plant species in mountain hay meadows? *Plant Ecology* (submitted) (uniquement en anglais).

- [90] Riedener E, Rusterholz HP, Baur B (2014): Small-scale habitat diversity affects the plant species richness of differently irrigated hay meadows (en cours d'élaboration) (uniquement en anglais).
- [91] Graf R et Korner P (2011): Veränderungen in der Kulturlandschaft und deren Brutvogelbestand im Engadin zwischen 1987/88 und 2009/10. Schweizerische Vogelwarte, Sempach (uniquement en allemand).
- [92] Feichtinger L, Eilmann B, Buchmann N et Rigling A (2014): Growth adjustments of conifers to drought and century-long irrigation in a xeric environment (en cours d'élaboration) (uniquement en anglais).
- [93] Rigling A, Bigler C, Eilmann B, Mayer P, Ginzler C, Vacchiano G, Weber P, Wohlgemuth T, Zweifel R et Dobbertin M (2013): Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology* 19: 229-240 (uniquement en anglais).
- [94] Schweizer R, Rodewald R, Liechti K et Knoepfel P (2014): Des systèmes d'irrigation alpins entre gouvernance communautaire et étatique – Alpine Bewässerungssysteme zwischen Genossenschaft und Staat. Zurich/Coire: Rüeeggler (en cours d'élaboration).
- [95] Fuhrer J (2010): Estimation des besoins en irrigation pour l'agriculture suisse. Rapport final de l'étude sur les besoins en irrigation en Suisse. Office fédéral de l'agriculture, 26 p.
- [96] Scheuchzer P, Walter F, Truffer B, Balsiger J, Chaix O, Kempfer T, Klinker A, Menzel S, Wehse H et Zysler A (2012): Auf dem Weg zu einer integrierten Wasserwirtschaft. Synthèse du projet IWAGO – Integrated Water Governance with Adaptive Capacity in Switzerland (Politique intégrée des eaux avec capacité adaptative en Suisse). Projet dans le cadre du PNR 61 «Gestion durable de l'eau» du Fonds national suisse (uniquement en allemand).
- [97] Weber M et Schild A (2007). Etat de l'irrigation en Suisse: Bilan de l'enquête 2006. OFAG, Berne: 17 p.
- [98] Fuhrer J et Jasper K (2009): Besoins en irrigation en Suisse. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART).
- [99] Office fédéral de la statistique (OFS) (2012): Agriculture suisse – entre modernité et tradition: recensement des exploitations agricoles: enquête complémentaire 2010. Communiqué de presse n° 0350-1203-20.
- [100] Bichsel Bigler Partner AG (2013): Teilbericht II zur landwirtschaftlichen Strukturverbesserung Seeland West – Landwirtschaftliche Planung. 17 p. (uniquement en allemand).
- [101] Fatichi S, Zeeman MJ, Fuhrer J et Burlando P (2014): Ecohydrological effects of management on subalpine grasslands: from local to catchment scale. *Water Resources Research* 50 148-164 (uniquement en anglais).
- [102] Spiess E, Prasuhn et Stauffer W (2011): Einfluss der Winterbegrünung auf Wasserhaushalt und Nitratauswaschung. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung: 149-154 (uniquement en allemand).
- [103] Office fédéral de la statistique (OFS) (2013): L'utilisation du sol en Suisse: Résultats de la statistique de la superficie. Neuchâtel. 23 p.
- [104] Maurer M, Chawla F, von Hirn J et Stauffer Ph (2012): Abwasserentsorgung 2015 in der Schweiz. Modulbericht. EAWAG, Dübendorf (uniquement en allemand).
- [105] Bannick C, Engelmann B, Fendler R, Frauenstein F, Ginzky H, Hornemann C, Ivonen O, Kirschbaum B, Penn-Bressel G, Rechenberg J, Richter S, Roy L et Wolter R (2008): Grundwasser in Deutschland. Reihe Umweltpolitik. Ministère fédéral de l'environnement, Berlin. 71 p. (uniquement en allemand).
- [106] Hürlimann J (2011): Effets des eaux de chausée sur les eaux de surface. *gwa* 11: 793-801 (en allemand avec résumé en français).
- [107] Braun Ch, Gälli R et Kammer Ch (2013): Belastung durch Gleisabwasser: Emissionen von Mikroverunreinigungen aus dem Bahnverkehr in Fließgewässern. *Aqua & Gas* 7/8: 40-49 (uniquement en allemand).
- [108] Freiburghaus M (2012): Les résultats statistiques 2010 sur les distributeurs d'eau suisses. *Aqua & Gas* 3: 54-59.
- [109] Kind E, Müller E, Vogt L et Suter B (2006): Kieshaushalt Schweiz: Eine ökonomische Betrachtung. Semesterarbeit ETH Zürich (uniquement en allemand).
- [110] Matousek F (2011): Die Gefährdung von nutzbarem Grundwasser durch die Kiesgewinnung in der Schweiz. Rechtlicher Rahmen, Erfahrungen und Risikobeobachtungen. Etude Dr. von Moos AG, 5 p. (uniquement en allemand).
- [111] OcCC (2007): Les changements climatiques et la Suisse en 2050. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques, ProClim. Berne, 168 p.
- [112] Office fédéral de la statistique (OFS) (2013): La statistique suisse du tourisme 2012. Neuchâtel. 60 p.
- [113] Steiger R (2010): The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research* 43: 251-262 (uniquement en anglais).
- [114] Remontées mécaniques suisses (2012): Faits et chiffres relatifs à l'évolution de la branche des remontées mécaniques. 21 p.
- [115] Rixen Ch, Teich M, Lardelli C, Gallati D, Pohl M, Pütz M et Bebi P. (2011): Winter tourism in the Alps: An assessment of resource consumption, snow reliability, and future snow making potential. *Mountain Research and Development* 31(3): 229-236 (uniquement en anglais).
- [116] Stöckli V (2012): Wasserwirtschaft in Davos – eine kurze Bilanz ihrer Nachhaltigkeit. Dans: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL (éd.): *Ressources alpines en neige et en eau d'hier, d'aujourd'hui et de demain*. Forum Wissen 2012: 37-42 (uniquement en allemand).

- [117] de Jong C et Barth T (2008): Challenges in Hydrology of Mountain Ski Resorts under Changing Climatic and Human Pressures. ESA Proceedings (éd.), Surface Water Storage and Runoff: Modeling, In-Situ data and Remote Sensing, Geneva (uniquement en anglais).
- [118] Wemple B, Shanley J, Denner J, Ross D et Mills K (2007): Hydrology and water quality in two mountain basins of the northeastern US: assessing baseline conditions and effects of ski area development. *Hydrological Processes* 21(12): 1639-1650 (uniquement en anglais).
- [119] de Jong, Masure P et Barth T (2008): Challenges of alpine catchment management under changing climatic and anthropogenic pressures. 4th Biennial Meeting of the iEMS (uniquement en anglais).
- [120] Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) (2002): Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten. Davos, 11 p. (uniquement en allemand).
- [121] Finger D, Hugentobler A, Huss M, Voinesco A, Wernli H, Fischer D, Weber E, Jeannin P-Y, Kauzlaric M, Wirz A, Vennemann T, Hüsler F, Schädler B et Weingartner R (2013): Identification of glacial melt water runoff in a karstic environment and its implication for present and future water availability. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3261-3277 (uniquement en anglais).
- [122] Stöckli V, Rixen Ch et Wipf S (2002): Zusammenfassung des Schlussberichts «Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten». SLF Davos (uniquement en allemand).
- [123] Office fédéral de l'environnement OFEV (ancien BUWAL) (1997). SNOMAXTM Informations concernant l'ordonnance sur les substances (Osubst), n° 28.
- [124] Schwörer C, Rhyner H, Rixen C, Schneebeili M et Iten B (2007): Chemische Pistenpräparation – Gundlagenbericht. [120] Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, 69 p. (uniquement en allemand).
- [125] Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) (2002): La redevance hydraulique. Rapports de l'OFEG, série Eaux n° 3. Berne. 28 p.
- [126] Moser D, Pfammatter R, Ribi F et Zysset A (2009): Überblick finanzielle Kerngrößen der Schweizer Wasserwirtschaft. Rapport d'experts pour le compte de l'Office fédéral de l'Environnement, OFEV. Ernst Basler + Partner. Zollikon, 18 p. (uniquement en allemand).
- [127] Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux SSI GE, (2012): Résultats statistiques des services des eaux en Suisse Exercice 2011. W15001. Zurich, 35 p.
- [128] Poldervaart P (2012): Eaux usées: Des sous pour nos égouts! *Environnement* 2: 12-15.
- [129] Office fédéral de l'environnement OFEV (2012): Micropolluants: fonds pour l'équipement des stations d'épuration en consultation <http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=fr&msgid=44263> (7.4.2014)
- [130] Rebetez M et Reinhard M (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. *Theoretical and Applied Climatology* 91: 27-34 (uniquement en anglais).
- [131] Beniston M (2012): Impacts of climate change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology* 412-413: 291-296 (uniquement en anglais).
- [132] Rajczak J, Pall P et Schär C (2013): Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118: 1-17 (uniquement en anglais).
- [133] CH2011 (2011): Les scénarios du changement climatique en Suisse CH2011, publié par C2SM, MétéoSuisse, l'EPF, le NCCR Climate et l'OcCC, Zurich, Suisse, 88 p.
- [134] OcCC (2008): Le climat change – que faire? Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques. Berne, 47 p.
- [135] GIEC (2007): Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA, 852 p. (uniquement en anglais).
- [136] Schär C, Vidale PL, Lüthi D, Frei C, Häberli C, Liniger MA et Appenzeller C (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332-336 (uniquement en anglais).
- [137] Beniston M et Stephenson DB (2004): Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change* 44: 1-9 (uniquement en anglais).
- [138] Bosshard T, Ewen T, Kotlarski S et Schär C (2009): The annual cycle of the climate change signal – An improved method for use in impact studies. *Geophysical Research Abstracts* 11, EGU2009-7095 (uniquement en anglais).
- [139] Beniston M, Stoffel M et Hill M (2011): Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European "ACQWA" project. *Environmental Science & Policy* 871, 10 p. (uniquement en anglais).
- [140] Frei Ch, Schöll R, Fukutome J, Schmidli J et Vidale PL (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models.

- Journal of Geophysical Research: Atmospheres 111 (D6): 1-22 (uniquement en anglais).
- [141] Steger CH, Kotlarski S, Jonas T et Schär Ch (2012): Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics* 41: 735-754 (uniquement en anglais).
- [142] Gander B (2009): Klimaänderung und Wasserversorgung: Information und Anpassungsstrategien. *gwa* 4: 241-249 (uniquement en allemand).
- [143] Zappa M, Luzi B, Fundel F et Jörg-Hess S (2012): Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. Dans: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL (éd.): *Ressources alpines en neige et en eau d'hier, d'aujourd'hui et de demain*. Forum Wissen 2012 19-27. (uniquement en allemand).
- [144] Beniston M, Keller F, Koffi B et Goyette S (2003): Estimate of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology* 76: 125-140. (uniquement en anglais).
- [145] Schmidli J et Frei C (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology* 25(6):753-771 (uniquement en anglais).
- [146] Frei Ch et Schär Ch (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in Alpine region. *Journal of Climate* 14: 1568-1584 (uniquement en anglais).
- [147] Schädler B, Frei Ch, Grebner D et Willi H-P (2007): Grundlagen zum Klima. *Wasser-Energie-Luft* 1: 58-60 (uniquement en allemand).
- [148] Hubacher R et Schädler B (2010): Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)* (uniquement en allemand).
- [149] Calanca P, Roesch A, Jasper K et Wild M (2006): Global warming and the summertime evapotranspiration regime in the Alpine region. *Climate Change* 79: 65-78 (uniquement en anglais).
- [150] Schattan P, Zappa M, Lischke H, Bernhard L, Thürig E et Diekkrüger B (2013): An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies. *Climate and Land Surface Hydrology*. Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden. *IAHS Publications* 359: 311-319 (uniquement en anglais).
- [151] Wipf S et Rixen C (2010): Winter climate change in arctic and alpine ecosystems: a review of snow manipulation experiments. *Polar Research* 29: 95-109 (uniquement en anglais).
- [152] Frey H, Haeberli W, Linsbauer A, Huggel C et Paul F (2010): A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Hazards and Earth System Sciences* 10(2): 339-352 (uniquement en anglais)
- [153] Haeberli W, Schleiss A, Linsbauer A, Künzler et Büttler M (2012): Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser-Energie-Luft* 2: 93-102 (uniquement en allemand).
- [154] Linsbauer A, Paul F et Haeberli W (2012): Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop Application of a robust approach. *Journal of Geophysical Research* 117:1-17 (uniquement en anglais).
- [155] Malard F (2003): Groundwater-Surface Water Interactions. Dans: JV Ward et U. Uehlinger (éds.). *Ecology of a Glacial Floodplain*. Kluwer Academic Publishers: 37-56 (uniquement en anglais).
- [156] Freimann R, Bürgmann H, Findlay SEG et Robinson CT (2013): Bacterial structures and ecosystem functions in glaciated floodplains: contemporary states and potential future shifts. *The International Society for Microbial Ecology Journal*: 1-13 (uniquement en anglais).
- [157] Lods-Crozet B, Oertli B et Robinson CT (2012): Long-term patterns of chironomid assemblages in a high elevation stream/lake network (Switzerland) – Implications to global change. *Proceedings of the 18th International Symposium on Chironomidae – Fauna norvegica Vol. 31*: 71-85 (uniquement en anglais).
- [158] Zah R, Maisch M, Uehlinger U et Rothenbühler C (2003): Glacial History and Floodplain Evolution. In: JV Ward et U. Uehlinger (éds.). *Ecology of a Glacial Floodplain*. Kluwer Academic Publishers: 17-36 (uniquement en anglais).
- [159] Tobler D, Kull I et Hählen N (2012): Gefahrenmanagement der Murgänge im Spreitgraben, Gutannen. *Bulletin suisse pour la géologie appliquée* 17(2): 53-61 (uniquement en allemand).
- [160] Kipfer R et Livingstone DM (2008): Wasserressourcen und Klimawandel. *EAWAG News* 65d/September 2008: 8-11 (uniquement en allemand).
- [161] Kilchmann A (2009): Strategische Herausforderungen für Wasserversorgungen. *PUSCH Dossier «Neue Herausforderungen im Wasserschloss Schweiz»*: 8/9 (uniquement en allemand).
- [162] Köplin N, Schädler B, Viviroli D et Weingartner R (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes* 28: 2567-2578 (uniquement en anglais).
- [163] Haeberli W et Hohmann R (2008): Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations. Dans: 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 29 June 2008-3 July 2008: 607-612 (uniquement en anglais).
- [164] Figura S, Livingstone D et Kipfer R (2013). Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multideca-

- dal timeseries from riverbank filtration sites. *Water Resources Research* 49 1-16 (uniquement en anglais).
- [165] von Rohr MR, Hering JG, Kohler H-PE et von Gunten U (2014): Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank infiltration. *Water Research* (submitted) (uniquement en anglais).
- [166] Huss M, Farinotti D, Bauder A et Funk M (2008): Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes* 22(19): 3888-3902 (uniquement en anglais).
- [167] Huss M, Usselman S, Farinotti D et Bauder A (2010): Glacier mass balance in the South-Eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde* 64(2): 119-140 (uniquement en anglais).
- [168] Köplin N, Schädler B, Viviroli D et Weingartner R (2010): How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences* 27: 111-119 (uniquement en anglais).
- [169] Huss M (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research* 47, W07511 (uniquement en anglais).
- [170] Karlsson IB, Sonenborg, Jensen KH et Refsgaard JC (2013): Evaluating the influence of long term historical climate change on catchment hydrology – using drought and flood indices. *Hydrological and Earth System Sciences* 10: 2373-2428 (uniquement en anglais).
- [171] Office fédéral de l'environnement 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. 64 p.
- [172] Köplin N, Schädler B, Viviroli D et Weingartner R (2013): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes* 28(4): 2567-2578 (uniquement en anglais).
- [173] Hunkeler D (2014): Ressources en eau souterraine sous conditions climatiques changeantes. Rapport final pour le PNR 61 «Gestion durable de l'eau». Neuchâtel, 18 p.
- [174] Finger D, Heinrich G, Gobiet A et Bauder A (2012): Projections for future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. *Water Resources Research* 48, W02521 (uniquement en anglais).
- [175] Riedl C et Peter A (2013): Timing of brown trout spawning in Alpine rivers with special consideration of egg burial depth. *Ecology of Freshwater Fish* 22(3): 384-397 (uniquement en anglais).
- [176] Junker J, Heimann FUM, Hauer Ch, Turowski J, Rickenmann D, Zappa M et Peter A (2014): Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment. *Hydrobiologia*. (soumis) (uniquement en anglais).
- [177] Weingartner R, Barben M et Spreafico M (2003). Floods in mountain areas –an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology* 282: 10-24 (uniquement en anglais).
- [178] Wehren B, Weingartner R, Schädler B et Viviroli D (2010): General characteristics of alpine waters. In: *Handbook of Environmental Chemistry* 6. Bundi U (éd). Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg: 17–58 (uniquement en anglais).
- [179] Jeannin PY (2014): Rapport final SWISS-KARST pour le PNR 61 «Gestion durable de l'eau». ISSKA. (Soumis).
- [180] Spreafico M et Grasso A (2013): Feststoffbeobachtung in der Schweiz. Dans: Spreafico M et Viviroli D (éd). *Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz*. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz 40: 25-31 (uniquement en allemand).
- [181] Rickenmann D, Heimann F, Böckli M, Turowski J, Badoux A et Bieler C (2014): Geschiebetransport-Simulationen mit sedFlow in zwei Gebirgsflüssen in der Schweiz. (Soumis) (uniquement en allemand).
- [182] Heimann FUM, Rickenmann D, Böckli M, Badoux A, Turowski JM et Kirchner JW (2014): Recalculation of bedload transport observations in Swiss mountain rivers using the model sedFlow. *Earth Surface Dynamics* (Soumis) (uniquement en anglais).
- [183] Rickenmann D, Heimann FUM, Turowski JM, Bieler C, Böckli M et Badoux A (2014): Simulation of bedload transport in the Hasliare Swiss mountain river in view of increased sediment input due to climate change. Submitted to the International Conference on River Flow 2014, September 3-5 2014, EPFL, Lausanne (uniquement en anglais).
- [184] Stähli M et Ritter M (2013): Hydrologische Trends in kleinen voralpinen Einzugsgebieten (affiche). Journée de l'hydrologie, 2-4 avril 2013, Berne (uniquement en allemand).
- [185] Meyer R, Schädler B, Viviroli D et Weingartner R (2011): Klimaänderung und Niedrigwasser – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Niedrigwasserverhältnisse im Schweizer Mittelland für 2021-2050 und 2070-2099. Rapport final CCHydro – Module 4, Université de Berne, Institut géographique, Berne (uniquement en allemand).
- [186] Notter B et Staub E (2009): Lebensraum der Bachforelle um 2050: Schätzung anhand eines GIS-basierten Modells. *gwa* 1: 39-44 (uniquement en allemand).
- [187] Dokulil MT (2013): Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia*. DOI 10.1007/s10750-013-1550-5 (uniquement en anglais).

- [188] Livingstone DM (2004): La couverture de glace des lacs et rivières: L'évolution du climat de source historique. *EAWAG News* 58: 19-22.
- [189] Robinson CT et Oertli B (2009). Long-term Biomonitoring of Alpine Waters in the Swiss National Park. *Eco.mont* 1(1): 23-34 (uniquement en anglais).
- [190] Delsontro T, McGinnis DF, Sobek S, Ostrovsky I et Wehrli B (2010): Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environmental Science et Technology* 44: 2419-2425 (uniquement en anglais).
- [191] Xuan L, Zhongwei G, Zunwei K, Supen W et Yiming L (2011): Increasing potential risk of global aquatic invader in Europe in contrast to other continents under future climate change. *PLoS ONE* 6(3) (uniquement en anglais).
- [192] Sorte CJB, Ibanez I, Blumenthal DM, Molinari NA, Miller LP, Grosholz ED, Diez JM, D'Antonio CM, Olden JD, Jones SJ et Dukes JS (2013): Poised to prosper? A cross-system comparison of climate change effects on native and non-native species performance. *Ecology Letters* 16: 261-270 (uniquement en anglais).
- [193] Ofenböck G (2013): Aquatische Neobiota in Österreich. Version 2013. Ministère fédéral autrichien de l'agriculture et des forêts, de l'environnement et de la gestion de l'eau, Section VII Eau, Vienne (uniquement en allemand).
- [194] Lienert J, Scholten L, Egger Ch et Maurer M (2014): Structured decision making for sustainable water infrastructure planning under four future scenarios. (Soumis) (uniquement en anglais).
- [195] Office fédéral de la Statistique (OFS) (2010): Les scénarios d'évolution de la population de la Suisse 2010-2060. Neuchâtel. 84 p.
- [196] Piguet E (2013): Umweltveränderungen und Migration in Entwicklungsländern. Fact Sheet Scnat, Berne, 4 p. (uniquement en allemand).
- [197] Aeberhard J (2012): Massvoller Ausbau der Pumpspeicherung ist nötig. PUSCH Dossier «Die Rolle der Wasserkraft in der Energiestrategie 2050»: 14/15 (uniquement en allemand).
- [198] Strahm I, Munz N, Leu Ch, Wittmer I et Stamm Ch (2013): L'utilisation du sol le long du réseau hydrographique: sources de micropolluants. *Aqua & Gas* 5: 36-44 (en allemand avec résumé en français).
- [199] Leitinger G, Tasser E, Newesely Ch, Obojes N et Tappeiner U (2010): Seasonal dynamics of surface runoff in mountain grassland ecosystems differing in land use. *Journal of Hydrology* 385: 95-104 (uniquement en anglais).
- [200] Inauen N, Körner Ch et Hiltbrunner E (2013): Hydrological consequences of declining land use and elevated CO₂ in alpine grassland. *Journal of Ecology* 101: 86-96 (uniquement en anglais).
- [201] Alewell C et Bebi P (2010): Forest Development in the European Alps and Potential Consequences on Hydrological Regime. *Ecological Studies* 212: 111-126 (uniquement en anglais).
- [202] Mueller MH, Weingartner R et Alewell C (2013): Importance of vegetation, topography and flow paths for water transit times of base flow in alpine headwater catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 1661-1679 (uniquement en anglais).
- [203] Lange B, Lüscher P et Germann PF (2012): Wurzeln erhöhen das Wasserspeichervermögen. *Wald und Holz* 10: 24 (uniquement en allemand).
- [204] Hohenwallner D et al. (2011): Water Management in a Changing Environment: Strategies against Water Scarcity in the Alps. Outcomes and Recommendations from the Alp-Water-Scarce Project 2008-2011. 74 p (uniquement en anglais).
- [205] Raetz H et Lateltin O (2003): Les mouvements de masse: glissements de terrain et éboulements. Dans: OcCC (éd.). Événements extrêmes et changement climatique: état du savoir et recommandations de l'OcCC. Berne: 73-76.
- [206] Gaudard L et Romero F (2013): The future of hydropower in Europe: Interconnecting climate, markets and policies (uniquement en anglais).
- [207] Office fédéral de l'énergie (BFE) (2013): Statistique de l'électricité 2012. www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=00768 (4.2.2014).
- [208] Académies suisses des sciences (2012): Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse? – Synthèse. Berne. 39 p.
- [209] Hänggi P, Weingartner R et Balmer M (2011): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz 2012-2050 – Hochrechnung. *Wasser Energie Luft* 103(4): 300-307 (uniquement en allemand).
- [210] Conseil fédéral (2013): Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050.
- [211] Volken T (2012): Die Wende in der Energiestrategie. PUSCH Dossier «Die Rolle der Wasserkraft in der Energiestrategie 2050»: 4/5 (uniquement en allemand).
- [212] Académies suisses des sciences (2012): Solutions possibles pour la Suisse dans les conflits entre les énergies renouvelables et l'utilisation du territoire – Résumé. Berne. 19 p.
- [213] Pfammatter R (2013): Workshop-Beitrag zu «Hochgebirge: Herausforderungen mit neuen Landschaften». 5^e symposium Adaptation au changement climatique 30.8.2013, Berne. www.proclim.ch/4dcgi/proclim/all/Event?2830 (4.2.2014) (uniquement en allemand).

- [214] Office fédéral de l'énergie OFEN (2011): Energieperspektiven 2050 – Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen. Fiche d'information parue le 10.6.2011 (uniquement en allemand).
- [215] Office fédéral de l'agriculture (OFAG) 2011. Stratégie climat pour l'agriculture – Protection du climat et adaptation au changement climatique pour une agriculture et une économie alimentaire suisses durables. Berne. 46 p.
- [216] Trnka M, Bartošová L, Schaumberger A, Ruget F, Eitzinger J. et Formayer H (2011): Climate Change and impact on European grasslands. *Grassland Science in Europe*: 39-51 (uniquement en anglais).
- [217] Fuhrer J, Tendall D, Klein T, Lehmann N. et Holzkämper A (2013): Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. ART Schriftenreihe 19, 56 p. (uniquement en anglais).
- [218] Schneider F (2013): Exploring water governance arrangements in the Swiss Alps from a perspective of adaptive capacity. *Mountain Research and Development* 33(3): 225-233 (uniquement en anglais).
- [219] Bauder A, Huss M et Gabbi J (2014). Future glacier evolution in Switzerland (en cours d'élaboration).
- [220] Farinotti D, Usselman S, Huss M, Bauder A et Funk M (2012): Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes* 26(13): 1909-1924 (uniquement en anglais).
- [221] Farinotti D, Bauder A, Huss M, Juvet G, Widmer F et Boes R (2011): Future glacier evolution and impact on the runoff regime in the catchment of alpine reservoirs: The Aletsch area, Switzerland. In: *Dams in Switzerland – Source for Worldwide Swiss Dam Engineering*, Swiss Committee on Dams: 283-289 (uniquement en anglais).
- [222] Gaudard L, Gilli M et Romerio (2013): Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management* 27: 5143-5156 (uniquement en anglais).
- [223] Pflieger G et Tonka L (2013): Assigning, delimiting, synchronising: turning scientific narratives into public problems in the environmental field. Rapport final, septembre 2013 (uniquement en anglais).
- [224] Anonyme (2012): Jürg Fuhrer: « Wäre die Wassermenge kontingentiert, würde der Verbrauch deutlich zurückgehen». *Aqua & Gas*: 10-11 (uniquement en allemand).
- [225] Fuhrer J (2012): Besoins en eau d'irrigation et ressources disponibles dans les conditions climatiques actuelles et futures. *Agroscope Reckenholz Tänikon ART*.
- [226] Flury C, Zimmermann A et Mack A (2012): Auswirkungen Agrarpolitik 2014-2017 auf die Berglandwirtschaft. Rapport du programme de recherche AgriMontana. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Ettenhausen (uniquement en allemand).
- [227] Huber R, Iten A et Briner S (2012): Développement du système des paiements directs et utilisation des terres en montagne. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (7/8): 354-359.
- [228] Reynard E, Graefe O, Rist S, Schaedler B, Schneider F et Weingartner R (2013): *MontanAqua. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes – Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais). Résultats finaux et recommandations. Publication Gewässerkunde 600, Berne.*
- [229] Fuhrer J et Calanca P (2012): Le changement climatique influence le bien-être des vaches laitières. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (132-139).
- [230] Brändli UB (éd.) (2010): *Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Berne (uniquement en allemand).*
- [231] Elkin C, Gutiérrez AG, Leuzinger S, Manusch C, Temperli Ch, Rasche L et Bugmann H (2013): A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. *Global Change Biology* 19(6): 1827-1840 (uniquement en anglais).
- [232] Lange B, Lüscher P, Germann PF, Thormann J-J et Zürcher K (2012): Hochwasserschutzwirkung von Tannen-Fichten-Wäldern. *Wald und Holz* 11: 31-34 (uniquement en allemand).
- [233] Steiger R et Stötter J (2013): Climate Change impact assessment of ski tourism in Tyrol. *Tourism Geographies* 15(4): 577-600 (uniquement en anglais).
- [234] Abegg B et al. (2007): Climate change impacts and adaptation in winter tourism. Dans: *Agrawala Shardul (éd.). Changements climatiques dans les alpes européennes: Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. Rapport OCDE, Paris.*
- [235] Pütz M, Gallati D, Kytzia S, Elsasser H, Lardelli C, Teich M, Waltert F et Rixen Ch (2011): Winter tourism, climate change, and snowmaking in the Swiss Alps: Tourists' attitudes and regional economic impacts. *Mountain Research and Development* 31(4): 357-362 (uniquement en anglais).
- [236] Abegg B (2012): Natürliche und technische Schneesicherheit in einer wärmeren Zukunft. Dans: *Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL (éd.): Ressources alpines en neige et en eau d'hier, d'aujourd'hui et de demain. Forum Wissen 2012 29-35 (uniquement en allemand).*
- [237] Göggel W (2012): Revitalisation des cours d'eau. *Planification stratégique. Un module de l'aide à l'exécution Renaturation des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique 1208: 42 p.*

- [238] Office fédéral de l'environnement OFEV (2011): Initiative parlementaire Protection et utilisation des eaux (07.492) – Modification des ordonnances sur la protection des eaux, l'aménagement des cours d'eau et l'énergie, de même que de l'ordonnance relative à la loi fédérale sur la pêche. Berne, 40 p.
- [239] Hartmann D et Meylan B (2013): Engpässen rechtzeitig vorbeugen: Wichtigste Ergebnisse der Studie «Wasserversorgung 2015» Aqua & Gas 9: 16–24 (uniquement en allemand).

Remerciement

Cette synthèse thématique a été menée à bien grâce à la disponibilité de nombreux chercheuses et chercheurs ainsi que de spécialistes pratiques qui ont fourni et analysé des éléments de réflexion. Citons notamment les membres du comité de direction PNR 61 et du conseil consultatif du programme, les équipes de projet PNR 61 et les responsables des autres synthèses: Klaus Lanz (TS2), Sabine Hoffmann (TS3) et Franziska Schmid (TS4). Nous tenons en particulier à souligner la contribution de Bruno Schädler et d'Irmi Seidl. Nous remercions enfin les personnes qui ont participé aux travaux de rédaction et de recherche: Jörg Balsiger, Marco Baumann, Claudia Bieler, Michael Bütler, David Finger, Matthias Freiburghaus, Ludovic Gaudard, Tobias Jonas, Felix Kienast, Manuel Kunz, Karina Liechti, Arnauld Malard, Jan Mazacek, Andreas Rigling, Christopher Robinson, Ursula Schönenberger, Jan Seibert, Patrick Stierli, Peter Waldner et bien d'autres.

Annexe

Qu'est-ce que le PNR 61?

Les programmes nationaux de recherche (PNR) ont pour vocation de fournir des éléments scientifiquement établis en vue de résoudre des problèmes urgents revêtant une importance nationale. Ils sont élaborés à la demande du Conseil fédéral et mis en œuvre par le Fonds national suisse. Les PNR font partie de la division IV intitulée «Programmes» (www.snf.ch).

Le PNR 61 «Gestion durable de l'eau» propose des bases scientifiques, notamment des outils, des méthodes et des stratégies visant à répondre aux défis futurs de l'économie des eaux. Il a bénéficié d'une enveloppe financière de 12 millions de francs, et la recherche a duré de 2010 à 2013. Que ce soit dans les objectifs, dans l'évaluation ou l'exécution du projet, l'accent a été largement mis sur la pratique et l'intégration des différents acteurs. Après une procédure de dépôt des requêtes en deux étapes assortie d'une expertise internationale, 16 projets ont finalement été approuvés (www.pnr61.ch).

Les 16 projets de recherche du PNR 61

Les projets de recherche ont analysé les effets des modifications probables du climat, de la société et de l'économie sur le régime des eaux, les valeurs hydrologiques extrêmes, la qualité de l'eau et l'hydrobiologie ainsi que les questions sur l'utilisation de l'eau y afférentes.

AGWAM: Pénurie d'eau, pour l'agriculture suisse également

Pr D^r Jürg Fuhrer

La hausse des températures, conjuguée à une baisse des précipitations en été, aura pour conséquence de rendre l'agriculture plus dépendante encore de l'irrigation, alors même que les réserves en eau diminuent. Sur la base de différents scénarios concernant le climat, les prix et la politique, des modélisations ont permis de mettre en lumière la marge de manœuvre dont dispose l'agriculture. Le projet formule des recommandations et des mesures adaptatives pour éviter les conflits et minimiser les répercussions sur l'environnement. ▶ p. 24

DROUGHT-CH: Sommes-nous préparés aux périodes de sécheresse?

Pr D^r Sonia Seneviratne

A l'avenir, il faudra s'attendre à des périodes de sécheresse et à des vagues de chaleur plus fréquentes. Le projet s'est penché sur les risques liés aux périodes de sécheresse en Suisse et sur les possibilités de les anticiper. Un prototype de plateforme d'information intitulée «Sécheresse» a été élaborée, celle-ci constituera une base pour les mesures adaptatives. ▶ p. 14

FUGE: Recul des glaciers – restera-t-il suffisamment d'eau pour la production d'énergie hydraulique?

Pr D^r Martin Funk

Des méthodes plus perfectionnées ont permis d'étudier et de modéliser la fonte de 50 glaciers suisses. Les prévisions de débit jusqu'en 2100 sont notamment importantes pour les centrales électriques. Des mesures adaptatives pour l'exploitation des centrales hydroélectriques ont été développées en collaboration avec les entreprises du secteur. ▶ p. 50

GW-TEMP: Comprendre les effets du changement climatique sur les eaux souterraines

D^r David M. Livingstone

L'augmentation de la température de l'eau peut compromettre la qualité des eaux souterraines. Des données historiques ont été analysées afin d'évaluer les répercussions de cette augmentation sur la qualité des eaux souterraines. Nous nous sommes basés sur des modèles statistiques pour les prévisions relatives aux températures des eaux souterraines. ▶ p. 40

GW-TREND: Pénurie d'eau souterraine due au changement climatique?

Pr D^r Daniel Hunkeler

L'accroissement des périodes de sécheresse peut réduire le volume des eaux souterraines. Les résultats permettent d'identifier les nappes aquifères qui sont particulièrement sensibles au changement climatique, de planifier des mesures et de mettre en place des programmes de surveillance. ▶ p. 42

HYDROSERV: Ressources hydrologiques durablement garanties

P^r D^r Adrienne Grêt-Regamey

Les services écosystémiques hydrologiques comme l'approvisionnement en eau potable, la régulation des crues, les loisirs et l'utilisation de la force hydraulique peuvent être mis à mal sous l'effet du changement climatique. Des mesures de nature politique ont pu être formulées grâce à une meilleure compréhension des services écosystémiques hydrologiques.

IWAGO: Vers une politique intégrative de l'eau

P^r D^r Bernhard Truffer

Des exemples issus de différents cantons et régions montrent les processus et les structures de régulation susceptibles d'encourager une approche de gestion de l'eau, plus globale et impliquant davantage les différents partenaires, dans le domaine de l'économie des eaux en Suisse afin de dégager des potentiels de synergie entre les différents secteurs. Sur la base des potentiels de synergie identifiés en collaboration avec les parties prenantes concernées, des stratégies ont été développées en vue du développement futur de la gestion de l'eau en Suisse. ► p. 24

IWAQA: Gestion intégrée de la qualité de l'eau de rivière

D^r Christian Stamm

Les changements sociaux et économiques mais aussi les modifications du climat ont un impact sur la qualité de l'eau de nos rivières. Le projet élabore des aides à la décision qui permettent d'évaluer et de réduire les effets négatifs sur l'écologie des cours d'eau. ► p. 50

MONTANAQUA: Gestion de l'eau en temps de pénurie et de changement global

P^r D^r Rolf Weingartner

La modification de l'offre et de la consommation d'eau liée au changement climatique et aux développements socio-économiques générera plus de conflits dans la distribution d'eau, notamment dans les régions arides. A la lumière de l'exemple de la région de Crans-Montana-Sierre en Valais, le projet montre comment il sera possible, en collaboration avec les responsables locaux et les personnes intéressées, d'élaborer des solutions garantissant une gestion et une distribution de l'eau optimales et équilibrées. ► p. 42 et 50

NELAK: Des lacs comme conséquence de la fonte des glaciers: chances et risques

P^r D^r Wilfried Haeblerli

La fonte des glaciers peut provoquer la formation de nouveaux lacs. Afin d'évaluer les chances et les risques liés à ces nouveaux lacs, les aspects pertinents liés aux risques naturels, à la force hydraulique, au tourisme et à la législation ont été examinés et discutés avec les personnes intéressées. ► p. 40

RIBACLIM: L'eau potable provenant des rivières est-elle encore suffisamment propre?

P^r D^r Urs von Gunten

Un tiers de l'eau potable provient des cours d'eau, qui s'infiltrent par les rives dans les eaux souterraines. Les processus appliqués dans les zones riveraines sont d'une importance de premier plan pour la propreté de l'eau. Le projet examine les incidences du changement climatique sur ces processus d'infiltration et sur la qualité des eaux souterraines au moyen d'expériences en laboratoire et sur le terrain. ► p. 40

SACFLOOD: Comment évolue le danger lié aux crues dans les Alpes?

D^r Felix Naef

A l'avenir, du fait de l'augmentation des précipitations, les crues devraient être plus fréquentes et intenses. Afin de pouvoir mieux évaluer les risques d'inondation et d'adopter des mesures ciblées, le projet s'est penché sur les rapports entre précipitations, capacité de stockage du sol et conditions d'écoulement. ► p. 14

SEDRIVER: Augmentation des crues, augmentation des transports de sédiments: moins de poissons?

D^r Dieter Rickenmann

Le changement climatique modifie le transport de sédiments dans les torrents. Les chercheurs ont développé un modèle qui simule le transport des sédiments par charriage dans les cours d'eau de montagne. Le projet a aussi examiné les effets des sédiments transportés par les cours d'eau sur le développement des populations de truites de rivière. ► p. 42

SWIP: Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau

D^r Judit Lienert et P^r D^r Max Maurer

La planification de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux fait intervenir des aspects économiques, écologiques et sociaux. SWIP a élaboré, conjointement avec les parties prenantes concernées, des aides à la décision en vue de planifier à long terme des infrastructures selon différents scénarios d'avenir.

SWISSKARST: Les eaux karstiques, une ressource hydrique pour le futur?

D^r Pierre-Yves Jeannin

En Suisse, 18% de l'eau potable provient des aquifères karstiques. Ceux-ci ont été caractérisés sur un tiers du territoire à l'aide de la méthode «KARSYS», développée dans le cadre du projet. Les autorités et les utilisateurs d'eau utilisent cette méthode lorsqu'il s'agit de l'utilisation et de la gestion des eaux karstiques. ► p. 14

WATERCHANNELS: Canaux d'irrigation pour la biodiversité et le tourisme

D^r Raimund Rodewald

Les canaux irriguent les prés dans les vallées arides des Alpes depuis déjà de nombreux siècles. Le projet a examiné les avantages des canaux d'irrigation pour la biodiversité et le système d'utilisation. Il faudra compter à l'avenir avec des périodes de sécheresse plus nombreuses et une concurrence accrue dans le secteur de l'eau. Le projet aide à mieux comprendre les questions de distribution d'eau en relation avec l'utilisation des canaux d'irrigation. ► p. 24

Produits du PNR 61

Cinq synthèses ont été élaborées: quatre synthèses thématiques et une synthèse globale. Les premières s'adressent aux experts de la Confédération, des cantons, des communes, des associations, des ONG et des bureaux d'études privés. Elles rassemblent les enseignements scientifiques découlant des différents projets du PNR 61 et d'autres études sur des problématiques centrales du PNR 61, établissent des liens entre les résultats pratiques des différents projets et tirent des conclusions concrètes en vue de mettre en place une gestion durable des ressources en eau.

Synthèse thématique 1

Ressources en eau de la Suisse: ressources disponibles et utilisation – aujourd'hui et demain
Astrid Björnsen Gurung, Manfred Stähli

Synthèse thématique 2

La gestion des ressources en eau face à la pression accrue de leur utilisation
Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Synthèse thématique 3

Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse: défis et mesures possibles
Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Synthèse thématique 4

Gouvernance durable de l'eau: enjeux et voies pour l'avenir
Franziska Schmid, Felix Walter, Flurina Schneider, Stephan Rist



Dans le cadre d'une synthèse globale, le comité de direction s'adresse aux experts susmentionnés, aux médias, aux acteurs de la politique ainsi qu'à toutes les personnes intéressées. La synthèse globale se base aussi bien sur les 16 projets du PNR 61 que sur les quatre synthèses thématiques. Elle résume les principaux résultats du PNR 61 de manière accessible à tous.

Synthèse globale

Gestion durable de l'eau en Suisse: le PNR 61 montre les voies à suivre pour l'avenir
Comité de direction du PNR 61



Projets de publications

D'ici à l'été 2014 sont parues au moins 160 publications scientifiques, des thèses, une série d'entretiens et d'articles dans la revue «Aqua & Gas», des rapports spécialisés dans la revue «Eau, énergie, air», de nombreux rapports et d'autres publications en relation avec les 16 projets (<http://p3.snf.ch/>).

Vidéos

Les vidéos permettent d'établir des liens entre les disciplines et entre la science et la société (cf. www.pnr61.ch, DVD dans la synthèse globale).

Au début du programme, 16 clips vidéo ont été produits afin de donner un «aperçu» de chacun des projets de recherche. Les chercheurs expliquent ce qu'ils étudient et comment, mais aussi en quoi cette recherche est importante pour notre société.

10 clips vidéo «perspectives» ont ensuite été tournés à l'issue du programme afin de récapituler les thèmes tels que la fonte des glaciers, les ressources en eau de l'avenir, l'augmentation de la sécheresse, l'urbanisation croissante et la gestion de l'eau. Les chercheurs rapportent les connaissances surprenantes qu'ils ont acquises, la manière dont ils ont travaillé avec des acteurs de terrain et les outils de mise en œuvre qui existent à présent. Les acteurs de terrain expliquent comment ils évaluent les résultats de la recherche et ce qu'ils souhaitent désormais mettre en œuvre dans leur secteur.

Module d'exposition

Des clips vidéo de courte durée montrent les principaux enseignements tirés du PNR 61. Un module exposé dans les salons, les musées et les bâtiments officiels transmet les principaux messages de manière interactive (annonce auprès du FNS: nfp@snf.ch).



Recherche d'accompagnement

Les projets du PNR 61 ont été menés selon une approche interdisciplinaire et au moyen de méthodes transdisciplinaires. De nombreuses activités de mise en œuvre ont été engagées dans le cadre du programme et du projet. Le processus de synthèse a commencé dès les travaux de recherche. Deux projets de recherche d'accompagnement ont étudié les méthodes à utiliser et les chances de succès liées à chacune d'entre elles.

Potentiels et limites de la production de savoir transdisciplinaire au sein des projets de recherche du PNR 61

Tobias Buser, Flurina Schneider, Stephan Rist
La recherche d'accompagnement de l'Université de Berne a examiné les aspects transdisciplinaires des 16 projets.

Méthodes d'intégration interdisciplinaires et transdisciplinaires du savoir dans le processus de synthèse du PNR 61

Sabine Hoffmann, Christian Pohl, Janet Hering
La recherche d'accompagnement d'Eawag/td-net a examiné les méthodes de l'intégration des savoirs au sein des quatre synthèses thématiques.

Informations complémentaires: www.pnr61.ch



La Suisse, château d'eau de l'Europe, ressent déjà sensiblement les effets du changement climatique et les évolutions démographiques, économiques et politiques. Afin de disposer, à l'avenir également, de ressources en qualité et en quantité suffisantes, il convient dès aujourd'hui de poser les bons jalons.

Cette synthèse thématique décrit les ressources en eau actuelles ainsi que leur utilisation en Suisse et esquisse les futures conditions générales climatiques et sociales. Elle montre clairement que les ressources en eau sont limitées et que des ajustements s'imposent dans de nombreux secteurs. Dans les régions alpines, les ressources disponibles, de même que les situations de dangers y associées, évolueront sensiblement dans le temps et dans l'espace sous l'effet du changement climatique. Sur le Plateau, l'on s'attend à une diminution du débit des cours d'eau en fin d'été, une évolution qui affectera également de nombreuses nappes souterraines. L'augmentation de la demande et les nouveaux apports en polluants influenceront aussi la quantité et la qualité de l'eau.

Compte tenu de la diversité des usages ayant une incidence sur les cours d'eau de la Suisse, qui plus est sur un territoire restreint, la gestion durable de l'eau doit prendre en considération l'ensemble de l'espace réservé aux eaux. Cette synthèse thématique, fondée sur les connaissances acquises dans le cadre du PNR 61, offre à cet égard une vision exhaustive de la situation actuelle.



Publié avec le soutien du Fonds national suisse dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau».

Cette publication est disponible en français et en allemand.
Diese Publikation ist auf Französisch und Deutsch erhältlich.

ISBN 978-3-9524412-2-0



9 783952 441220 >