

PNR 61 – Synthèse thématique 2
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

La gestion des ressources en eau face à la pression accrue de leur utilisation

Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm



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



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

PNR 61 – Synthèse thématique 2
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

La gestion des ressources en eau face à la pression accrue de leur utilisation

Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm

Mentions légales

Auteurs:

D^r Klaus Lanz, International Water Affairs, Evilard; Eawag, Dübendorf
Eric Rahn, Eawag, Dübendorf
Rosi Siber, Eawag, Dübendorf
D^r Christian Stamm, Eawag, Dübendorf

Equipe du projet (développement du concept et soutien scientifique du projet): P^r Jürg Fuhrer (Agroscope); P^r Adrienne Grêt-Regamey (EPF Zurich); P^r Wilfried Haeberli (Université de Zurich); D^r Christian Stamm (Eawag); P^r Rolf Weingartner (Université de Berne).

Recommandations relatives aux citations: Klaus Lanz, Eric Rahn, Rosi Siber, Christian Stamm (2014): La gestion des ressources en eau face à la pression accrue de leur exploitation. Synthèse thématique 2 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



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: Reportair (1-3), Max Maurer, Lisa Rigendinger, Jürg Fuhrer. Photos de fond: Beat Ernst, Bâle

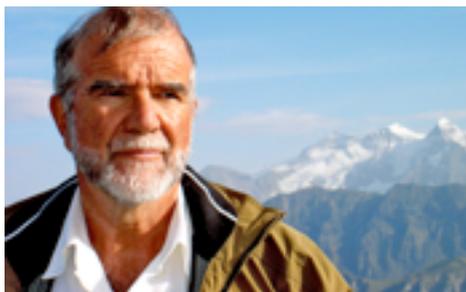
Illustrations et citations: sauf par indication contraire, les illustrations et citations utilisées proviennent des clips vidéo du PNR 61 «Aperçu» et «Perspectives», cf. www.pnr61.ch. L'abréviation du projet PNR 61 indiquent la source correspondante dans chaque cas. Les citations reflètent l'opinion 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
8	Summary
10	1 – Objectifs et démarche méthodique
10	Contexte
10	Méthodologie
13	2 – Utilisation de l'eau, conflits et synergies en Suisse
13	Partie A – Gestion des quantités d'eau
13	A1 Gestion des quantités par le biais de centrales électriques à accumulation
18	A2 Exigences relatives aux quantités dans le cadre de la protection des eaux
19	A3 Gestion des quantités par le biais de la protection contre les crues
21	A4 Gestion des quantités par le biais de l'irrigation agricole
26	A5 Eau potable: utilisation de l'eau souterraine et des lacs
28	A6 Exploitation de la chaleur des eaux souterraines
29	A7 Quantités d'eau: autres influences
31	A8 Durcissement des conflits durant les épisodes de sécheresse prolongée
32	Bilan Partie A – Gestion des quantités d'eau
35	Partie B – Qualité de l'eau
35	B1 Eaux de surface: apports de substances issus de zones urbaines
38	B2 Eaux de surface: apports de substances issus de l'industrie et de l'artisanat
39	B3 Apports de substances issus de l'agriculture
41	B4 Exigences relatives à la qualité chimique de l'eau et aux ressources en eau potable
42	B5 Exploitation thermique et apports de chaleur
43	B6 Autres utilisations ayant un impact sur la qualité de l'eau
45	Bilan Partie B – Qualité de l'eau
47	Partie C – Hydromorphologie et milieux naturels aquatiques
47	C1 Impacts hydromorphologiques des centrales au fil de l'eau sur le Plateau
48	C2 Impacts hydromorphologiques de la protection contre les crues
50	C3 Impacts hydromorphologiques de l'agriculture
51	C4 Exigences hydromorphologiques liées à la protection des eaux
52	C5 Impacts de l'urbanisation et des voies de circulation sur les berges
53	C6 Impact hydromorphologique des captages de sources pour l'eau potable
53	Bilan Partie C – Hydromorphologie et milieux naturels aquatiques
55	Partie D – Conflits liés à l'utilisation du territoire
55	D1 Besoins en surface pour l'approvisionnement en eau potable
56	D2 Besoins en surface pour l'urbanisation et la circulation
57	D3 Besoins en surface pour l'agriculture
58	D4 Besoins en surface pour la protection des eaux
58	Bilan Partie D – Conflits liés à l'utilisation du territoire
60	3 – Les différentes utilisations de l'eau: risques et enjeux pour l'avenir
60	Ressources en eaux alpines
61	Approvisionnement en eau potable
63	Agriculture
65	Ecologie des cours d'eau
67	Sécheresse
69	4 – Prévenir, éviter, négocier: des outils pour la gestion de conflits
69	Prévenir: une meilleure base de données pour agir à temps
70	Eviter et négocier: adopter une approche rationnelle et transparente
71	Désamorcer les conflits: des stratégies impartiales, robustes, souples, durables
72	Prévenir les conflits: intégrer le sujet de l'eau dans l'action politique
73	Index des illustrations
73	Index des tableaux
73	Index des matrices
73	Bibliographie
81	Remerciements
82	Annexe
82	Qu'est-ce que le PNR 61?
82	Les 16 projets de recherche du PNR 61
84	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





Résumé

A gauche: Le changement climatique exercera une influence notable sur les volumes de débit et la disponibilité saisonnière de l'eau. (DROUGHT-CH).

Au milieu: La croissance rapide des activités économiques et de la population ne remodèle pas seulement le paysage, elle renforce également les conflits relatifs aux surfaces dans le domaine de l'eau. (Photo: Reportair)

A droite: Le changement des conditions-cadres appelle des adaptations de l'utilisation des eaux: des chercheurs examinent les conditions d'approvisionnement en eau potable à la station de pompage d'eau souterraine «Oberes Linsental». (GW-TEMP)

Elaboré dans le cadre du PNR 61, le présent rapport décrit la gestion des ressources en eau en Suisse ainsi que les conflits d'utilisation et les potentiels de synergie qui en résultent, aujourd'hui et demain – pour autant que l'on puisse le prévoir. Il s'appuie autant que faire se peut sur les enseignements tirés des projets de recherche du PNR 61, tout en se référant également aux résultats d'autres projets de recherche, à des rapports techniques rédigés par l'administration ainsi qu'à d'autres publications. Le rapport entend ainsi faire un résumé de l'état actuel des connaissances sur le thème de la gestion de l'eau en Suisse.

L'ensemble des exigences pertinentes relatives à l'eau et aux cours d'eau ont été compilées afin d'identifier les synergies et les conflits fondamentaux. Les activités qui n'impliquent pas une utilisation directe de l'eau, mais influent néanmoins sur son état ou sur d'autres utilisations, ont également été intégrées à ce processus.

Les répercussions de ces diverses activités sur l'eau et les cours d'eau ont fait l'objet d'une analyse basée sur des ouvrages et des entretiens menés avec des spécialistes, en tenant systématiquement compte des quatre dimensions suivantes: quantité d'eau, qualité de l'eau, hydromorphologie et besoins en surface. Les résultats ont été reportés dans des matrices, lesquelles associent chaque utilisation à son effet sur les eaux et indiquent les éventuelles superpositions avec d'autres affectations. Ces quatre matrices illustrent la quintessence de quatre sous-chapitres exposant de manière détaillée les différentes exigences en matière d'utilisation et leurs conséquences.

Une situation modifiée et de nouveaux défis en perspective

La gestion des eaux en Suisse est caractérisée depuis plusieurs décennies par des utilisations et des accords équilibrés. Depuis les années 60 et 70, des efforts soutenus et des moyens financiers considérables ont été déployés afin d'améliorer la qualité de l'eau, dont la détérioration était préoccupante. Grâce à des normes législatives ambitieuses et à des administrations compétentes aux niveaux national et cantonal, l'amélioration des eaux est en bonne voie dans de nombreux domaines.

Cependant, le monde évolue constamment: les analyses réalisées dans le cadre de ce rapport indiquent que l'économie des eaux est confrontée à de nouveaux défis de taille du fait de l'évolution rapide de ses conditions-cadres. On pense tout d'abord au changement climatique, mais les recherches effectuées dans le cadre du PNR 61 ont démontré que l'impact des facteurs socio-économiques sera nettement supérieur dans de nombreux domaines. Les processus de modification principaux et les défis qui en découlent peuvent être résumés en sept points:

- ▶ Le changement climatique exercera une influence notable sur les volumes de débit et la disponibilité saisonnière de l'eau; les adaptations requises en matière d'utilisation des eaux pour faire face à la sécheresse et à l'augmentation des températures peuvent accentuer les conflits existants et en déclencher de nouveaux.
- ▶ Les lois sur la protection des eaux ont intégré de nouvelles valeurs sociales, appelant à revoir les utilisations établies, notamment pour la force hydraulique et l'agriculture.
- ▶ La croissance rapide des activités économiques et de la population renforce les conflits relatifs aux surfaces dans différents domaines. Ce constat s'applique, par exemple, à la protection extensive des eaux souterraines destinées à l'approvisionnement en eau potable face à la croissance urbaine, ou encore au conflit entre l'espace réservé aux eaux et l'agriculture.
- ▶ Commencer de nouvelles activités ou intensifier celles déjà en place peut nuire de manière accrue aux eaux et à leurs utilisations actuelles. Sont notamment concernés le domaine de l'exploitation thermique des eaux (chaleur, refroidissement) actuellement en pleine expansion et l'introduction potentielle du «fracking» (fracturation hydraulique) ou de la géothermie profonde.
- ▶ Les glaciers actuels laisseront en partie place à de nouveaux lacs. La question de savoir si ces futurs lacs de haute altitude devraient être utilisés et protégés, et le cas échéant comment, peut donner lieu à de nouveaux conflits. Dans tous les cas, il faudra résoudre les questions de sécurité et de propriété qui se poseront.



- ▶ De nouvelles connaissances sur les fonctions et l'état des eaux peuvent remettre en question certaines des utilisations établies et appeler à modifier la gestion des ressources en eau, par exemple en matière de micropolluants.
- ▶ Les conditions-cadres changent pour tous les bassins, dans l'ensemble du pays et au-delà. Il n'est possible d'adopter une réaction appropriée que si l'on se base sur des bassins versants entiers. Nombre de tâches à l'ordre du jour ne pourront pas être menées à bien par les communes ou les cantons seuls et devraient être coordonnées au niveau régional.

Malgré les grandes avancées de ces dernières décennies, la mise en œuvre effective d'une gestion durable de l'eau est encore «en chantier», et tel sera le cas à l'avenir, au regard du renouvellement permanent des conditions-cadres. Il importe de reconnaître suffisamment tôt les modifications subies par les conditions-cadres, d'adapter en conséquence les utilisations de manière équitable et efficace, tout en continuant à améliorer l'intégrité écologique des eaux. La richesse hydrique de la Suisse – aussi rassurante qu'elle puisse être – doit être gérée avec prévoyance et de manière avisée, afin de se rapprocher de l'objectif de durabilité. Ce faisant, il faut veiller à ce que l'utilisation de ces précieuses ressources en eau suscite le bien-être tout en garantissant la conservation du paysage aquatique unique de la Suisse pour les générations à venir.

A gauche: Les flux des cours d'eau et des eaux souterraines ne suivent pas les délimitations des communes et des cantons. Une coordination régionale est nécessaire pour une gestion durable des ressources en eau. (IWAGO)

Au milieu: La qualité de l'eau de nombreux fleuves influe étroitement sur celle des eaux souterraines: la qualité chimique est dès lors également déterminante pour la pureté de l'eau potable. (RIBACLIM)

A droite: La place unique qu'occupe l'eau dans les paysages de la Suisse doit être préservée pour les générations futures. (SEDRIVER)

«Le Conseil fédéral et le Parlement ont approuvé le postulat «Gérer les pénuries d'eau en Suisse». Nous avons désormais pour mission de mettre en œuvre les mesures correspondantes. C'est pourquoi nous suivons avec grand intérêt les conclusions du PNR 61.»

*Hugo Aschwanden
division Eaux de l'OFEV*



Pour plus d'informations  DROUGHT-CH sous www.pnr61.ch



Summary

A gauche: L'urbanisation et l'infrastructure de transport se développent également de plus en plus au niveau du sous-sol, ce qui peut porter atteinte aux flux d'eaux souterraines: nouveau lotissement «Im Lee», Egg (ZH). (SWIP)

Au milieu: Moins d'espace pour les cours d'eau: la gestion durable des ressources en eau s'avère particulièrement délicate en présence d'intérêts divergents. (Photo: Reportair)

A droite: La fonte des glaciers change également la donne en matière de production hydroélectrique: lac de barrage du glacier de Gries. (Photo: Lisa Rigendinger)

This report describes how water and aquatic ecosystems in Switzerland are presently being utilised. It also documents present and – as far as foreseeable – future conflicts and potential synergies resulting from the different uses. The analysis is based wherever possible on knowledge gained by NRP 61 research projects, yet also draws on insights of other research projects, official reports and publications. The report hence lays out the current state of knowledge on water utilisation in Switzerland. To identify the relevant synergies and conflicts, all important demands on water and aquatic ecosystems have been examined. This includes activities that do not originally intend to make use of water or water bodies, but do have an impact on their condition and hence on other water users.

The impact of the various activities on water and aquatic ecosystems was analysed on the basis of literature research and interviews with experts, and framed along the four dimensions water quantity, water quality, hydro-morphology and land use (chapters A to D). The results are summarised in four utilisation matrices showing how the various activities (potentially) impact other uses. These matrices epitomise the essence of chapters A to D, in which the impact of different user demands is explored in detail.

Changing conditions – new challenges

Water law and water management in Switzerland are the result of societal agreements that have continually been negotiated over decades. Since the 1960s and 1970s, when water quality had deteriorated to precarious levels, considerable efforts and substantial funds have been invested to improve the situation. Ambitious legislation and competent federal and cantonal authorities have since contributed to paving the way for the recovery of rivers and lakes in many areas.

But the world is not at a standstill: analyses conducted in the context of this report show that the water sector is faced with new challenges due to rapidly changing boundary conditions. This is partly due to climate change, but as NRP 61 research is showing, socio-economic factors often play a much more important role. The key developments and resulting challenges are summarised below:

- ▶ Climate change will affect river discharge and seasonal availability of water; societal responses to the respective conditions of drought and higher temperatures may exacerbate existing water conflicts and trigger new ones.
- ▶ Social values regarding water use have changed; this is reflected in water-related legislation and requires established users such as hydropower production and agriculture to adjust their practices.
- ▶ The rapid growth of economic activities and population intensifies land use conflicts in various sectors. This holds for example for maintaining groundwater protection zones vs. urban development or land needs for river restoration vs. agriculture.
- ▶ New or intensified activities can affect aquatic ecosystems and current water uses. Such activities include the rapidly expanding use of groundwater and lakes for the exploitation of thermal energy (heating, cooling) or the potential introduction of fracking and deep geothermal energy systems.
- ▶ Today's glaciers will melt and, in some areas, leave behind new lakes. The question if and how these new Alpine water bodies should be used and protected may give rise to new conflicts. In any case, questions relating to risks and ownership will have to be clarified.
- ▶ A new understanding of the functioning and state of aquatic ecosystems may question established uses and necessitate adaptation of management, e.g. with regard to micro-pollutants.
- ▶ Boundary conditions are changing across regional and national boundaries; adequate responses require action at the scale of catchments. Many of the upcoming challenges are difficult to deal with at local or cantonal scale alone; they call for regional coordination.

Despite great achievements in the past few decades, the implementation of sustainable water management remains “work in progress”. In view of the ongoing changes of boundary conditions this will be also the case in the future. The main tasks are to recognise changing conditions early, to adapt uses fairly and efficiently while continuing to improve



the ecological integrity of aquatic ecosystems. Water may seem plentiful in Switzerland, but it needs to be managed with foresight and astuteness if we want to continue working towards sustainability. The overall objective of the management of water and aquatic systems is to generate welfare while preserving the unique aquatic landscapes of Switzerland for future generations.

A gauche: Un nouveau lac s'est formé près du glacier de Stein suite à la fonte de la glace. L'exploitation éventuelle de cette nouvelle ressource est actuellement à l'étude. (NELAK)

Au milieu: Même à sa sortie des stations d'épuration des eaux usées, l'eau épurée contient encore des substances indésirables, par exemple des micropolluants. C'est pourquoi de nouvelles techniques d'épuration sont actuellement mises en place dans les principales stations d'épuration des eaux usées de Suisse. (Photo: Eawag)

A droite: L'exploitation de la force hydraulique et la qualité écologique des eaux sont difficilement conciliables. On peut préserver les paysages marécageux, comme ici au bord de la Singine, grâce à une répartition judicieuse entre zones utilisées et zones protégées. (Photo: Eawag)

1 – Objectifs et démarche méthodique

Contexte

L'économie des eaux en Suisse est un système organisationnel, technique et juridique hautement élaboré dont l'équilibre subtil a été acquis au fil des décennies. Ce système garantit la haute qualité des eaux, agit en faveur de la prévention des crues et régule la quantité d'utilisations des eaux. La qualité et la quantité des ressources en eau de même que l'état écologique des rivières, des lacs et des eaux souterraines sont contrôlés par le biais d'un dense réseau de monitoring. Le renforcement des lois relatives à la protection des eaux et le déploiement de moyens financiers considérables au cours des dernières décennies ont permis d'améliorer notablement la qualité et l'état écologique des eaux en Suisse. La gestion intégrée des eaux vise à harmoniser l'ensemble des activités sociales liées à l'utilisation de l'eau, à la protection des eaux et à la protection contre les dangers que l'eau représente. Elle préconise une gestion durable de l'eau à même de pérenniser les différentes utilisations de l'eau ainsi que ses fonctions écologiques et sociales.

Le régime des eaux et l'intensité avec laquelle il est utilisé seront sensiblement modifiés dans les décennies à venir en raison du changement climatique, de l'intensification des activités humaines et de l'évolution de la technique. La hausse des températures entraînera la fonte des glaciers et l'élévation de limite des neiges. De même, le changement climatique risque de modifier le régime des précipitations saisonnières. Dans ces processus de transformation entre également en jeu l'augmenta-

tion potentielle des demandes d'utilisation due à la croissance prévisible de la population, de l'économie et des zones urbaines. Du fait de l'exploitation plus intensive du paysage, certains impacts sur l'eau, jusqu'à présent isolés, risquent de s'accumuler et de s'amplifier mutuellement. De même, la modification des conditions-cadres politiques, telle qu'une exploitation accrue de la force hydraulique ou une production non polluante de denrées alimentaires, aura un impact direct ou indirect sur les eaux et leur utilisation.

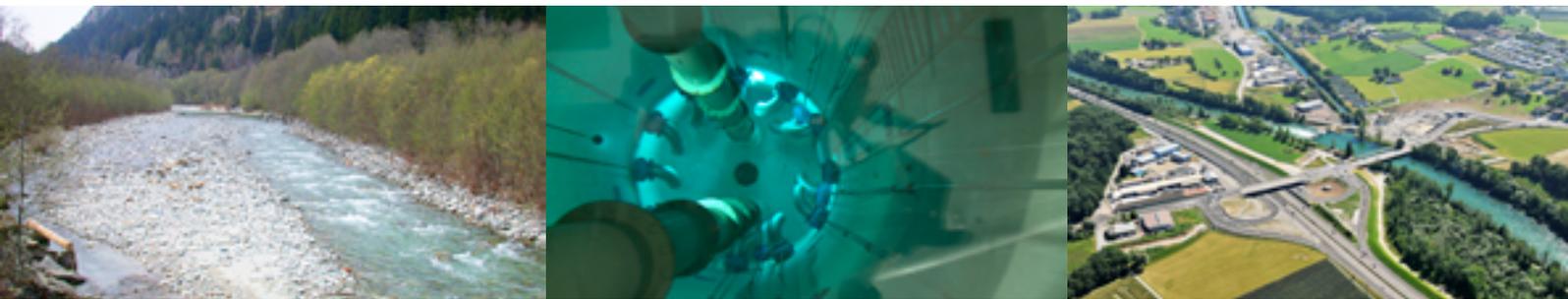
La gestion des ressources en eau doit être en mesure d'anticiper ces changements. En outre, le processus d'adaptation sera rendu plus difficile par le fait que plusieurs groupes d'utilisateurs modifieront simultanément leur mode de gestion des ressources en eau. Cette situation complexe peut engendrer de nouveaux conflits, mais aussi créer de nouvelles synergies. Le présent rapport entend soutenir les acteurs concernés – notamment les spécialistes engagés au sein des autorités ou des associations ainsi que les chercheurs – dans le cadre de la planification stratégique, en identifiant et en décrivant les utilisations fondamentales de l'eau et les conflits potentiels y afférents ainsi qu'en fournissant des exemples de solutions, ce sur la base du Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61).

Méthodologie

En Suisse, la gestion des ressources en eau a été examinée sous l'angle des superpositions

Tableau 1: apport des projets du PNR 61 à la synthèse thématique 2. Chaque domaine analysé est illustré de manière récapitulative sur une carte dans [1].

Projet	Question traitée dans la synthèse thématique 2	Page
FUGE	Modification du potentiel hydraulique dû au changement climatique et aux développements socio-économiques	13
NELAK	Formation de nouveaux lacs dans les bassins glaciaires et attentes de la société à leur égard	14
MONTANAQUA	Conflits dans le cadre de la gestion des ressources en eau alpines	17
HYDROSERV	Impact de l'exploitation du territoire sur la protection contre les crues	20
AGWAM	Réduction des potentiels de conflits dans le cadre de l'irrigation agricole	24
	Impact du changement climatique et de l'exploitation agricole sur les apports de substances en 2050	39
WATERCHANNELS	Gestion des bisses et comparaison des besoins en eau liés à différentes utilisations	25
GW-TREND	Changement climatique et disponibilité des eaux souterraines au regard des différentes exigences en matière d'utilisation	27
DROUGHT-CH	Prévision des épisodes de sécheresse comme condition préalable à la prévention de conflits	31
RIBACLIM	Diminution potentielle de la qualité des eaux souterraines due à la hausse des températures	37
IWAQA	Qualité des cours d'eau	40
	Impact de multiples facteurs de stress sur les cours d'eau	52
	Méthodes permettant d'optimiser la prise de décisions dans le cadre de la gestion de l'eau	70
SEDRIVER	Impact provoqué par le charriage dans les cours d'eau alpines sur les habitats aquatiques	48



géographiques – actuelles et susceptibles de survenir dans le futur – des affectations de l'eau ainsi que sous celui des conflits d'utilisation et des potentiels de synergie qui en découlent. Le présent rapport est basé sur le concept du PNR 61 et les enseignements tirés des projets de recherche du PNR 61 (cf. tableau 1). Les résultats d'autres projets de recherche, des rapports techniques officiels et d'autres publications ont également été mis à profit pour rendre compte de manière détaillée des superpositions entre les principales activités liées à l'eau. Le rapport entend ainsi synthétiser l'état actuel des connaissances relatives à l'influence réciproque des différentes utilisations de l'eau et des conflits et synergies qui en découlent en Suisse.

D'un point de vue chronologique, le PNR 61 et, partant, le présent rapport couvrent une période allant jusqu'à la moitié du XXI^e siècle. Cependant, de nombreux processus (changement climatique, horizons de planification pour les infrastructures, etc.) nécessitent des périodes d'observation encore plus longues. Par conséquent, lorsque le thème abordé s'y prête, le présent rapport étend l'horizon temporel jusqu'à la fin de ce siècle et se tourne également vers le passé afin de pouvoir évaluer au mieux la situation actuelle.

Les enseignements dégagés dans le cadre du PNR 61 et utiles à la gestion des conflits d'utilisation ont été évalués sur la base des publications et synthèses de projets ad hoc, puis approfondis dans le cadre d'entretiens menés avec des spécialistes. Les projets de recherche du PNR 61 sont intégrés à trois niveaux dans le présent rapport: premièrement, dans l'éla-

boration des questions pertinentes pour la vue d'ensemble; deuxièmement, en tant qu'études de cas explicatives et approfondies dans le chapitre 2; troisièmement, les enseignements des projets livrent des informations importantes, reprises dans la synthèse du chapitre 3. En outre, les travaux issus des trois autres synthèses thématiques ont également été pris en considération et comparés au présent rapport. Il est fait référence aux autres rapports de synthèse lorsque cela s'impose.

Utilisation de l'eau

Si l'on limite la définition du terme «utilisation de l'eau» seulement aux prélèvements dans un cours d'eau, il est impossible de rendre compte de manière réaliste des multiples interactions existant entre le régime des eaux et les activités humaines. C'est pourquoi le présent rapport inclut, dans la notion d'utilisation, l'apport de substances et de chaleur dans les eaux. Sont également considérées comme relevant de l'utilisation des eaux les interventions ayant une incidence sur la morphologie des eaux, c'est-à-dire les digues, les barrages, l'étanchement du fond et les gains de terres qui y sont associés, y compris les opérations de protection contre les crues. Par ailleurs, l'état des eaux est affecté par les activités réalisées dans le bassin versant qui ne représentent pas une utilisation de l'eau à proprement parler, mais qui ont un impact sur le stockage, le débit et la qualité de l'eau et peuvent compromettre d'autres utilisations. Afin de pouvoir rendre compte le plus exhaustivement possible de l'impact humain sur les eaux ainsi que des potentielles utilisations concurrentes, le

A gauche: La loi fédérale sur la protection des eaux vise une revitalisation optimale des cours d'eau, comme ici sur le Rhin antérieur. Cet objectif ne pourra pas être mis en œuvre partout sans restrictions d'utilisations. (Photo: ProNatura)

Au milieu: Un approvisionnement fiable en eau potable d'excellente qualité est l'un des principes fondamentaux de la politique de l'eau: puits d'eau souterraine. (GW-TEMP)

A droite: C'est surtout sur le Plateau et dans les grandes vallées alpines que l'on constate des interférences entre les activités les plus diverses. De plus, les cours d'eau et leurs utilisations subissent de plus en plus de restrictions. (Photo: Reportair)

Activités avec répercussions sur l'eau et les cours d'eau

Protection de l'état écologique proche de l'état naturel	Approvisionnement en eau potable, en eau d'usage et en eau d'extinction	Gestion des eaux usées et de l'eau de pluie	Besoins en surface pour l'urbanisation	Production d'énergie (courant, chauffage, gaz)	Production agricole	Industrie et artisanat, extraction de matières premières	Protection contre les crues	Détente, tourisme	Navigation	Pêche
--	---	---	--	--	---------------------	--	-----------------------------	-------------------	------------	-------

III. 1: diversité des exigences de la société vis-à-vis de l'eau: exigences de protection (état écologique proche de l'état naturel, protection contre les crues), exigences de protection et d'utilisation (qualité et quantité de l'eau potable) et exigences purement relatives à l'utilisation (production d'énergie, agriculture, industries, navigation, zones urbaines).



A gauche: L'espace supplémentaire concédé aux cours d'eau en vue de leur revitalisation se fait pratiquement toujours au détriment des autres utilisations: plaine de la Linth près de Schanis. (Photo: Reportair)

Au milieu: La hausse de la limite de la neige et le recul des glaciers modifient les quantités d'eau disponibles pour la production d'électricité. Le projet FUGE a analysé les potentiels de production des centrales hydroélectriques existantes. Glacier de Gries en hiver. (FUGE)

A droite: La formation de nouveaux lacs dans un paysage stable est un phénomène rare. La gestion de ces nouveaux éléments du paysage pose des défis de taille aux plans légal et administratif: nouveaux dangers naturels, droits de propriété à définir et conflits d'utilisation à régler. Glacier du Rhône avec nouveau lac glaciaire. (NELAK)

terme «utilisation des eaux» et l'horizon d'analyse engloberont également les activités exerçant une influence dans la zone concernée (cf. ill. 1).

Conflits, synergies et leur recensement

Les différentes exigences socialement légitimes relatives à l'eau peuvent générer de multiples interférences aux niveaux géographique et temporel. Lorsque qu'une utilisation ne peut être intensifiée qu'au détriment d'une autre, il en résulte des conflits. A l'inverse, des synergies se forment lorsque l'intensification d'une utilisation profite à une autre.

L'identification des conflits et des synergies les plus importants, avérés et potentiels, dans le secteur de l'eau suisse s'est déroulé en trois étapes:

- Recensement des exigences pertinentes relatives à l'eau et aux cours d'eau (cf. ill. 1): le maintien d'un bon état écologique est ici placé sur un pied d'égalité avec d'autres objectifs, tels que la production d'électricité ou l'approvisionnement en eau potable. Il existe cependant des différences qualitatives entre ces différents éléments: les eaux qui connaissent un bon état écologique constituent une ressource donnée, limitée et à conserver, tandis que les exigences de l'homme vis-à-vis de l'eau sont susceptibles de s'intensifier d'une manière ou d'une autre.
- Matrice d'utilisation indiquant les conflits et les synergies: les interactions des exigences relatives à l'eau (cf. ill. 1) ont fait l'objet d'une analyse systématique fondée sur des recherches documentaires et des entretiens menés avec des spécialistes. Les résultats sont présentés en détail au chapitre 2. Outre les impacts actuels, les répercussions d'activités plus anciennes ont également été prises en compte. Parmi elles figurent notamment les atteintes historiques à la morphologie des cours d'eau, telles que les corrections, les digues de protection contre les crues ou encore les consolidations du lit et les gains de terres associés, destinées à d'autres utilisations. Par ailleurs, les nappes d'eau souterraine, qui ne peuvent plus être

utilisées pour la production d'eau potable sans traitement en raison des apports de substances ou des modifications dans l'utilisation des sols survenus antérieurement, ont été classées comme surexploitées.

- Afin de faciliter l'exploitation de la matrice d'utilisation, l'analyse a été divisée en quatre dimensions: aspects liés à la quantité – impacts sur la qualité – impacts hydromorphologiques – rivalité territoriale. Une matrice d'utilisation individuelle a été élaborée pour chacune de ces quatre dimensions: gestion de la quantité matrice A, qualité de l'eau matrice B, interventions ayant une incidence sur l'hydromorphologie matrice C, utilisations du territoire liées à l'eau matrice D.

Le chapitre 2 présente les résultats de l'analyse de la matrice dans quatre sous-chapitres, lesquels correspondent à ces quatre dimensions. Le chapitre 3 résume les défis et les mesures potentielles découlant de l'analyse traitée au chapitre 2, et le chapitre 4 identifie les outils de prévention et de gestion des conflits.

Base de données

La recherche du PNR 61 portait sur l'intégrité du régime des eaux et de ses utilisations en Suisse. Les utilisations et les impacts du régime des eaux s'expriment en premier lieu au niveau des bassins versants, ces derniers constituent le principal point d'observation du PNR 61.

Les résultats des projets du PNR 61 et d'autres projets de recherche dans le secteur de l'eau se basent majoritairement sur des investigations régionales. Le présent rapport entend évaluer, sous l'angle national, la pertinence des résultats de ces projets pour la résolution de conflits et la création de synergies.

«Afin de garantir durablement l'approvisionnement en eau potable, nous devons à l'avenir conserver suffisamment de sites où la priorité sera donnée à l'exploitation de l'eau souterraine.»

Daniel Hunkeler
Université de Neuchâtel



Pour plus d'informations  GW-TREND sous www.pnr61.ch

2 – Utilisation de l'eau, conflits et synergies en Suisse

Partie A – Gestion des quantités d'eau

Sans l'intervention de l'homme, l'eau ne serait pas disponible partout, à tout moment et en quantité suffisante pour les différentes utilisations et les différentes sollicitations auxquelles elle est confrontée. Par conséquent, la gestion des quantités – régulation, approvisionnement, évacuation – représente l'un des domaines centraux des activités du secteur de l'eau au sens large. Les objectifs sont les suivants: protection contre un excédent d'eau à travers la protection contre les crues, drainage des sols agricoles ainsi que mise à disposition d'eau dans la qualité et la quantité voulues, au bon moment et au bon endroit.

A1 | Gestion des quantités par le biais de centrales électriques à accumulation

La force hydraulique, source d'électricité prédominante en Suisse

En Suisse, la force hydraulique joue un rôle majeur dans la garantie de l'approvisionnement en électricité. Pour une consommation annuelle actuelle (2012) d'environ 65 térawatts-heures par an (TWh/a), le turbinage des eaux fournit en moyenne environ 55,4% (soit 36 TWh/a) du courant produit [2]. La force hydraulique couvre environ 11% de la totalité des besoins énergétiques du pays (67% sont importés sous forme de gaz naturel et de pétrole). En conséquence, les cours d'eau de la Suisse sont exploités de manière particulièrement intensive. Le volume d'eau utilisé dans les turbines est d'environ 550 milliards de m³ par an, soit plusieurs fois la totalité du débit annuel [3]. D'un point de vue numérique, chaque mètre cube d'eau fluviale est utilisé environ 14 fois sous l'angle énergétique (cf. également la synthèse thématique 1 du PNR 61).

La décision arrêtée en 2011 par le Conseil fédéral et visant à limiter la durée d'exploitation des centrales nucléaires de même que l'interruption des activités de la centrale

nucléaire de Mühleberg prévue pour 2019 au plus tard signifient qu'il faudra à l'avenir économiser, importer ou mettre à disposition via d'autres sources nationales une quantité d'énergie considérable. Dans ce contexte, la force hydraulique, en sa qualité d'énergie renouvelable, occupe le centre de l'attention [4]. Les nouvelles infrastructures et les extensions actuellement mises en route augmenteront la production d'environ 1% (0,33 TWh/a). Des installations supplémentaires pourraient permettre de mettre à disposition, d'ici à 2050, de 1,4 à 3,0 TWh/a en plus, tandis que des mesures complémentaires pourraient augmenter l'efficacité des centrales de 0,9 à 1,5 TWh/a. Du fait des directives de la loi fédérale sur la protection des eaux, cette croissance est confrontée à une baisse de la production de 1,4 à 2,0 TWh/a destinée au maintien du volume de débits résiduels dans les rivières. En fonction des nouvelles infrastructures et rénovations qui seront réalisées et selon la méthode utilisée pour déterminer les débits résiduels, la production prévisionnelle annuelle augmentera au bout du compte de 0,6 à 3,4 TWh au maximum [5].

Néanmoins, il est nécessaire, pour toutes ces prévisions, de tenir compte des transformations considérables que pourrait engendrer le changement climatique sur la disponibilité de l'eau et le paysage en haute montagne. Aussi deux projets du PNR 61 (FUGE et NELAK) ont-ils examiné les aspects centraux de cette problématique. Le projet de recherche FUGE s'est ainsi penché sur la question suivante: comment les ressources en eau évolueront-elles dans l'absolu et au fil des saisons et quelles conséquences cette transformation pourrait-elle avoir sur les centrales d'énergie hydroélectrique (cf. encadré ci-dessous). Le projet NELAK a examiné en profondeur l'étendue de la formation de lacs glaciaires à l'avenir et leur potentiel d'exploitation (cf. encadré page 14). Malgré les modifications fondamentales pro-

Le présent chapitre met systématiquement en lumière les sollicitations importantes des eaux et des cours d'eau en Suisse et examine les superpositions potentielles – conflits et synergies – avec d'autres utilisations, aujourd'hui et à l'avenir. Cette démarche est fondée sur quatre dimensions, à savoir les quantités d'eau, la qualité de l'eau, les impacts hydromorphologiques et les rivalités territoriales (cf. chapitre 1). Chacun des parties se consacre à l'un de ces thèmes (parties A-D) et se termine par un résumé spécifique.

Comment le potentiel de force hydraulique évolue-t-il? Enseignements du projet FUGE du PNR 61

Après la fonte des glaciers dans les Alpes, les centrales hydroélectriques profiteront encore d'une légère hausse des débits jusque dans les années 2030, mais elles devront ensuite s'adapter à un régime d'écoulement des eaux fortement modifié tant au niveau du volume que des saisons. Le projet FUGE a procédé à une analyse globale de l'avenir de la force hydraulique dans des conditions climatiques et socio-économiques modifiées. Les baisses prévues des débits se multiplieront durant les périodes marquées par une forte demande en électricité et des prix élevés sur le marché de l'électricité [6]. D'un point de vue économique, ce décalage saisonnier pourrait permettre de compenser un recul de la production globale. Puisque la demande en électricité connaît également un décalage en raison du changement climatique (plus de climatisation en été, moins de chauffage en hiver), les centrales hydroélectriques pourraient devenir encore plus lucratives qu'à l'heure actuelle. D'après les chercheurs, les prévisions sur le rôle futur et la rentabilité de la force hydraulique sont caractérisées par de grandes incertitudes en raison de nombreux impondérables dans le développement du système énergétique [7].

De nouveaux lacs comme conséquence de la fonte des glaciers: enseignements du projet NELAK du PNR 61

Les zones aujourd'hui encore couvertes de glaciers se transformeront, au cours de ce siècle, en un nouveau paysage de roches, d'éboulis, de lacs et de végétation clairsemée. Dans le projet NELAK, les nouveaux lacs qui pourraient se former dans des creux de terrain ont été cartographiés de manière systématique pour la première fois. La recherche s'est également penchée sur leur exploitation potentielle dans le cadre de l'énergie hydroélectrique.

Le projet NELAK a évalué, de manière approfondie, le potentiel de nouveaux lacs glaciaires apparaissant sur le glacier de Corbassière en Valais et les glaciers du Gauli et de Trift dans l'Oberland bernois pour l'exploitation hydroélectrique. Leur situation en haute altitude permet d'obtenir de grands écarts entre les niveaux d'eau, engendrant ainsi une performance élevée. Les possibilités de jonction avec des réservoirs situés à plus basse altitude créent de nouvelles capacités d'accumulation par pompage. Des barrages relativement petits seraient suffisants pour le lac de Corbassière et les deux lacs prévus du Gauli. Quant au lac de Trift, il ne pourra être exploité de manière optimale qu'une fois construit un barrage de 100 mètres de hauteur. Le gain de performance assuré par ces projets est de l'ordre de quelques centaines de mégawatts (Corbassière: 500 MW, Gauli-Trift: 500 MW) [8].

D'un point de vue juridique, les lacs glaciaires doivent être traités comme des «terres non cultivables» et sont accessibles à tout un chacun, à des fins non commerciales. Ils relèvent de la souveraineté de leur canton respectif (sauf pour les cantons du Valais et des Grisons, qui ont délégué leurs droits aux communes). En règle générale, les nouveaux lacs glaciaires ont le statut d'eaux publiques. Un lac ne peut constituer une propriété privée que lorsque la propriété privée du glacier environnant peut être prouvée. En règle générale, ce sont les cantons ou les communes qui octroient les concessions de droits sur les eaux de ces lacs.

Du fait de la formation de nombreux nouveaux lacs dans des espaces protégés (p. ex. Aletsch-Jungfrau, patrimoine mondial de l'UNESCO), des aspects supplémentaires sont à prendre en considération dans le cadre des réflexions portant sur leur exploitation. Il convient ainsi de s'intéresser aux questions concernant les concessions hydrauliques (étendue, renouvellement, retour, etc.), la protection des eaux (volume de débits résiduels, éclusées, espace réservé aux cours d'eau, etc.) et la protection de la nature et du paysage [9]. Enfin, d'un point de vue actuel, il est impossible de prévoir dans quelle mesure les barrages alpins devront, dans 50 ans, également mettre à disposition de l'eau pour d'autres utilisations – irrigation agricole dans les vallées sèches intra-alpines, enneigement, débit minimal des cours d'eau nécessaire à l'écologie des eaux (débit de dilution suffisant pour les stations d'épuration des eaux usées) et même approvisionnement en eau potable [8].

Si la majorité des 500 à 600 lacs potentiels de la région glaciaire n'existent actuellement que sous forme de creux de terrain représentés sur des cartes de modélisation, leur exploitation et leur protection font déjà l'objet d'une réflexion active. Ainsi, la centrale d'Oberhasli a d'ores et déjà prévu de manière définitive de construire un barrage sur le lac de Trift [10]. Les dangers que présentent ces lacs ne doivent pas non plus être sous-estimés: les glissements de terrain au niveau des berges, dont la probabilité augmente avec le recul des glaciers et du permafrost, peuvent déclencher des inondations assorties d'un grand potentiel de risques pour les riverains en aval. Ce point en lui-même oblige déjà à se préoccuper de l'avenir de ces nouveaux lacs dans la région glaciaire et à anticiper leur consolidation.

voquées par le changement climatique dans l'espace alpin, les analyses issues du projet FUGE du PNR 61 montrent que les incertitudes concernant l'évolution future de l'énergie hydroélectrique seront plus fortement marquées par des contraintes sociales et économiques (au niveau international). Il en va de même pour le développement dans le secteur des centrales d'accumulation par pompage (aujourd'hui 4,4% de l'énergie hydroélectrique). L'accumulation par pompage est un élément important qui permet d'équilibrer les fluctuations de production d'autres sources d'énergie (solaire, éolienne). En 2012, onze centrales d'accumulation par pompage avec un rendement de pompage total de 1400 MW étaient exploitées en Suisse [11]. Avec trois nouvelles centrales actuellement en cours de construction (Nant de Drance, Linth-Limmern,

Hongrin-Léman), la capacité d'accumulation par pompage sera doublée d'ici à 2017 [11]. La rentabilité de la transformation d'autres centrales électriques à accumulation en centrales d'accumulation par pompage dépend des marchés internationaux de l'électricité et de l'évolution des prix de l'électricité. A l'heure actuelle, le secteur de l'électricité en Suisse considère qu'un tel aménagement n'est pas rentable en raison de la faiblesse des prix du marché, et de nombreux projets d'envergure ayant obtenu une autorisation sont momentanément suspendus [11]. Dans ce cadre, d'éventuels mécanismes incitatifs feront l'objet d'une évaluation [12].



Conflits et synergies potentiels

Conflit: force hydraulique/écologie des cours d'eau

Les répercussions de la production hydroélectrique sur les cours d'eau diffèrent grandement selon la technique d'exploitation employée (cf. page 47 sur les centrales au fil de l'eau). Les centrales à accumulation, qui produisent 48,3% de l'énergie hydroélectrique, restituent la quasi-totalité de l'eau puisée dans les cours d'eau. Le moment de la restitution est déterminé en premier lieu par la demande en énergie électrique. Les espaces accueillant les cours d'eau entre un barrage et un lieu de restitution ne sont dotés que d'une faible quantité d'eau, ce qui donne lieu à une modification fondamentale de leur caractère hydrologique et du régime de charriage, qui entraîne à son tour de graves répercussions sur les biocénoses aquatiques. Certains tronçons d'eau sont même continuellement coupés de leurs affluents, ce qui provoque un phénomène d'embroussaillage.

Débits résiduels

Les réglementations légales portant sur le maintien des débits résiduels sont synonymes de contraintes pour l'exploitation de la force hydraulique. D'après la LEaux, art. 80 al. 1, les tronçons de débits résiduels doivent être assainis dans les concessions actuelles sans qu'une baisse de la production d'électricité ne justifie un dédommagement. Si les autorités édictent des mesures supplémentaires, par exemple concernant les cours d'eau dans des zones particulièrement protégées, les usufructiers des forces hydrauliques seront indemnisés pour cette restriction (LEaux, art. 80 al. 2). A l'expiration des concessions, les débits résiduels peuvent être adaptés dans les nouvelles concessions et ne sont ainsi pas soumis à indemnisation.

L'équilibre à trouver entre exploitation de la force hydraulique et maintien des débits résiduels nécessaires est l'un des points de conflit centraux de la politique de l'eau en Suisse. Au total, il existe plus de 1300 tronçons de débits résiduels dans le pays, sur une distance d'env. 2700 km de cours d'eau [13]. Toutes les zones de débits résiduels dans les concessions existantes auraient dû être assainies avant la fin 2012. A l'expiration du délai de 20 ans, les cantons n'ont procédé qu'à la moitié à peine des

assainissements requis [14]. Lors de la détermination des quantités de débits résiduels dans le cadre des nouvelles concessions, les autorités cantonales ont rarement dépassé les valeurs légales minimales (LEaux, art. 31 al. 1). Elles ont fait usage de la possibilité d'augmenter le débit résiduel minimal visée à l'article 33 de la LEaux dans 30% des cas et ont ordonné un nombre moindre de variations des débits résiduels en fonction des saisons [13].

Eclusées

L'écologie des cours d'eau est également influencée par la restitution très irrégulière de l'eau dans les rivières (effet d'éclusées, cf. paire d'images ci-dessus). Lors de ce processus, le débit d'éclusée présente un rapport de fluctuation allant jusqu'à 30:1 [13]. Les animaux et les plantes sont emportés lors de l'augmentation soudaine du courant due à l'éclusée et séchouent lors de l'étiage suivant (débit plancher). Cela nuit plus particulièrement au frai et aux alevins, qui pâttissent du manque de substances nutritives et de lieux protégés. Les zones d'éclusées situées sur des berges plates, où seuls quelques organismes peuvent survivre à une exondation régulière, subissent notamment une forte dégradation sous l'angle écologique [15].

D'après une étude préliminaire réalisée par l'OFEV, près de 1000 km de cours d'eau sont potentiellement influencés par l'exploitation par éclusées de plus de 130 centrales hydroélectriques. Le Rhône jusqu'au lac Léman, le Rhin jusqu'au lac de Constance et le Tessin sont les plus touchés. Les abaissements de débit créés par les éclusées sont largement atténués par les lacs préalpins, c'est pourquoi les cours d'eau alpins sont particulièrement affectés [16].

La LEaux entrée en vigueur en 2011 après révision prescrit l'assainissement des effets d'éclusées d'ici à 2031. Dans un premier temps – d'ici à la fin 2014 – les cantons doivent identifier les tronçons d'eaux à fort potentiel écologique soumis à des atteintes graves par l'exploitation par éclusées et devant être assainis. Il est possible de réduire les effets d'éclusées en construisant un bassin de rétention pour l'eau turbinée. Cette mesure permet d'amortir le flot et de stabiliser l'écoulement de l'eau.

A gauche, au milieu: La production hydroélectrique, axée sur les besoins énergétiques actuels, peut entraîner de fortes fluctuations du niveau d'eau (marnage). Les deux photos montrent la Sarine dans un intervalle de 90 minutes. (Photos: Pro Natura)

A droite: Les petites centrales hydrauliques provoquent des pertes écologiques particulièrement élevées par rapport à leur rendement énergétique. Ici, la centrale hydraulique de Grob près de Buchs (SG). (Photo: TNC Consulting AG)

Controverse autour des petites centrales hydrauliques

La pesée des intérêts entre la production d'électricité et l'écologie des cours d'eau montre que les petites centrales hydrauliques provoquent des pertes écologiques particulièrement élevées par rapport à leur rendement énergétique. Un exemple: sur 620 petites centrales hydrauliques annoncées dans le cadre de la rétribution à prix coûtant (RPC) en avril 2009, les 202 plus petites centrales fournissent à peine 6% de l'électricité [23]. Puisqu'il faut en conclure que chacune de ces centrales altère un tronçon d'eau, le rapport coûts-avantages est particulièrement défavorable en raison du faible rendement des centrales les plus petites. Les cantons choisissent de façon individuelle la stratégie à adopter à l'égard des requêtes des petites centrales hydrauliques, comme le montre un aperçu des plans et stratégies des cantons pour la pesée des intérêts liés à la protection et à l'exploitation des eaux [24]. Les cantons du Valais et des Grisons font exception: ils ne définissent pas de critères d'exclusion pour la petite hydraulique, car ce sont les communes qui détiennent la souveraineté sur l'eau. Avec sa stratégie de gestion de l'eau édictée en 2010 et destinée à contrôler l'expansion et les répercussions de la force hydraulique sur les cours d'eau, le canton de Berne met en avant une solution alternative. Certaines rivières sont destinées à une exploitation intensive, d'autres ne sont aucunement touchées par les interventions liées à la force hydraulique (cf. à ce sujet la recommandation de la Confédération pour l'élaboration de stratégies cantonales de protection et d'explo-

tation dans le domaine des petites centrales hydrauliques) [25].

Autres conflits

Même si la force hydraulique n'est apparemment pas consommatrice d'eau, elle prive temporairement de nombreux tronçons de rivières de parties de leur débit naturel (cf. ill. 2). En conséquence, la production d'électricité par les centrales à accumulation exerce une influence primordiale sur d'autres formes d'utilisation des cours d'eau en aval. La modification de la vitesse d'écoulement, de la température et de la dynamique du débit peut entraver ou rendre impossible le déversement d'eaux épurées par les stations d'épuration, l'utilisation d'eau de refroidissement et l'utilisation de l'eau pour les loisirs (dangers sur les berges en cas d'exploitation par éclusées). La pêche est directement touchée par l'exploitation de la force hydraulique, qui nuit à la population de poissons à la fois en raison des situations d'éclusées et de la diminution de l'écoulement d'eau (débits résiduels).

Synergie: force hydraulique/protection contre les crues

Les bassins d'accumulation peuvent également contribuer à la protection contre les crues. En haute montagne notamment, les centrales hydroélectriques contrôlent une partie considérable du débit. Ainsi, lors de la crue de l'Aar en octobre 2011, près de 6 millions de m³ d'eau ont été retenus dans des barrages, ce qui a eu pour effet d'abaisser le niveau de crue du lac de Brienz d'environ 20 centimètres [26]. Les débits de pointe du

III. 2: répercussions de la force hydraulique sur les eaux: retenue par des centrales (situation des centrales d'accumulation et au fil de l'eau de plus de 300 kW) [17]– Effets d'éclusée [18] – Retenue de l'eau dans les barrages [19]– Infériorité des débits résiduels [20]. Données contextuelles: [21], [22], [19]; Analyse SIG [1].

Usines hydroélectriques au fil de l'eau

Performance (MW)

- ▲ <50
- ▲ 50-200

Centrales électriques à accumulation

Performance (MW)

- ▲ <50
- ▲ 50-200
- ▲ >200

Effets d'éclusées

-

Lacs de barrage

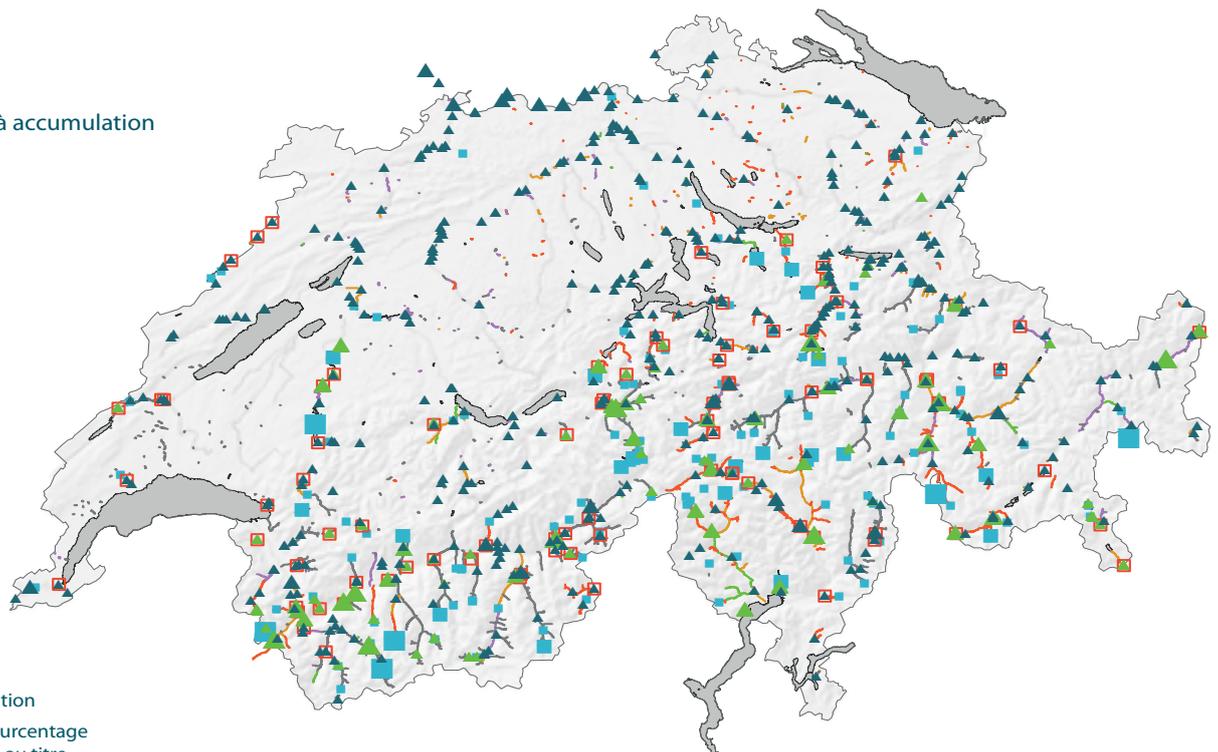
Volume (en mio m³)

- 0-50
- 50-150
- 150-401

Tronçons de débits résiduels *

- <10%
- 10-50%
- 50-90%
- >90%
- Pas d'information

* Débit de dotation en pourcentage du débit résiduel minimal au titre de l'art. 31 al. 1 LEaux



Rhône peuvent, dans le meilleur des cas, être réduits de 20 à 25% grâce à la retenue dans des bassins d'accumulation [27]. Pour que cela soit possible, le niveau d'eau dans les barrages doit être maintenu bas en prévision des crues (gestion «conservatrice» des lacs) et les situations de crues doivent être pronostiquées au plus tôt et de la manière la plus fiable possible. Il convient également de mettre en balance les intérêts liés à la force hydraulique et ceux liés à la protection contre les crues dans le cadre de la gestion du niveau d'eau des grands lacs régulés (tous, à l'exception des lacs de Constance et de Walenstadt). Tandis qu'il

existe, pour la plupart des lacs régulés, des règlements qui tiennent compte des intérêts de chacun, la situation s'avère plus complexe pour le lac Majeur, qui s'étend au-delà des frontières et dont le débit est contrôlé unilatéralement par l'Italie.

Autres synergies

En principe, un réservoir d'eau situé en montagne peut tout aussi bien être utilisé pour la production d'électricité que pour l'enneigement ou à d'autres fins. A Zermatt, la majeure partie de l'eau servant à l'enneigement provient des bassins d'accumulation et des cap-

La gestion de l'eau dans les Alpes en temps de pénurie et de changement global: enseignements du projet MONTANAQUA du PNR 61

Le projet de recherche MONTANAQUA du PNR 61 a entrepris de dresser un bilan de l'offre et de la demande en eau aujourd'hui et à l'avenir pour les communes touristiques alpines d'une vallée sèche intra-alpine du Valais caractérisée par une forte croissance démographique et touristique. Ce bilan montre de façon emblématique pourquoi l'utilisation multifonctionnelle des bassins d'accumulation peut représenter une option primordiale pour l'avenir de l'économie des eaux [29].

La zone d'investigation englobe six communes implantées dans des régions de montagne et cinq autres situées à plus basse altitude. Malgré l'abondance des ressources en eau pour toutes ces communes, la région endure les conséquences d'une mauvaise coordination de la gestion de l'eau. Celle-ci est organisée au niveau communal, où les ressources en eau étaient jusqu'à présent considérées comme plus ou moins constantes et suffisantes. L'eau provient de deux bassins versants, l'un d'eux étant utilisé pour un barrage servant à la production d'énergie hydroélectrique (barrage de Tseuzier). Durant plusieurs décennies, les infrastructures de gestion des eaux des communes ont été aménagées sans planification à long terme, entraînant une sollicitation toujours plus importante des ressources et de l'écologie des cours d'eau et engendrant également des frais d'infrastructure élevés. Les chercheurs en ont conclu qu'il était nécessaire d'apporter des modifications conséquentes à la planification régionale du développement. L'existence de divers intérêts a mis en lumière plusieurs droits sur l'eau, lesquels devraient être coordonnés dans le cadre d'une planification globale: l'irrigation par les bisses (prairies, vignes, terrains de golf) et avec l'eau du réseau (jardins, gazons), la force hydraulique, l'enneigement et l'approvisionnement en eau potable. En raison de la pénurie saisonnière, l'eau provenant du barrage de Tseuzier, à l'origine uniquement construit pour la production d'énergie hydroélectrique, est également utilisée à d'autres fins (eau potable, enneigement, terrains de golf). Enfin, il est indispensable de maintenir les débits résiduels nécessaires à l'écologie dans les cours d'eau.

Utilisations de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre:

- ▶ Environ 88% de la quantité totale d'eau utilisée servent à la production d'électricité (entre 60 et 80 millions de m³/a).
- ▶ L'irrigation, l'eau potable et l'enneigement constituent environ 12% de la quantité utilisée (entre 10,5 et 13,5 millions de m³/a).
- ▶ Dans ces 12%, la consommation la plus importante est enregistrée par l'approvisionnement en eau potable (4,65 millions de m³/a), dont une grande partie est également utilisée pour l'irrigation.
- ▶ La consommation d'eau maximale (majoritairement pour l'irrigation) augmente fortement durant les années sèches; en 2011, année de sécheresse, la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation a doublé par rapport à 2010. La pression exercée sur les ressources en eau devrait encore augmenter en hiver (saison touristique) et dans la seconde moitié de l'été (irrigation).

Les scénarios relatifs au bilan hydrique de la région pour 2050 montrent que l'absence d'adaptation des utilisations de l'eau entraînera des difficultés pour les régions durant les années dites normales. Ces difficultés s'aggraveront durant les années de sécheresse, lorsque la disponibilité de l'eau se trouve réduite et sa consommation fortement accrue. Afin de prévenir cette situation, il conviendrait de mettre en œuvre dès aujourd'hui une planification de la gestion de l'eau coordonnée entre les communes – une volonté qui n'a cependant pas remporté l'adhésion des communes, probablement aussi en raison de l'étendue de l'horizon temporel. En attendant, les communes espèrent une extension supplémentaire de l'approvisionnement en eau («supply management»), dans le cadre de laquelle le barrage de Tseuzier ou un autre réservoir devant encore être construit joueront un rôle décisif.



A gauche: Les crues pourraient devenir de plus en plus fréquentes à l'avenir; le montant des dommages augmente de pair avec la valeur des infrastructures et des bâtiments. (HYDROSERV)

Au milieu: La protection contre les crues passe par des aménagements de cours d'eau ... (HYDROSERV)

A droite: ... ou par une meilleure retenue de l'eau, obtenue à la faveur de l'élargissement des espaces réservés aux eaux ou du reboisement des bassins versants. Image de synthèse d'un paysage basée sur des modèles de calcul. (HYDROSERV)

tages d'eau des centrales électriques de Z'mutt et de la Grande-Dixence [28]. Le projet MONTANAQUA du PNR 61 (cf. encadré ci-dessous) a effectué une analyse très circonstanciée des différentes utilisations de l'eau et de la dépendance des réservoirs dans la région de Crans-Montana-Sierre. L'utilisation d'eau issue de bassins d'accumulation pour l'irrigation agricole en période de sécheresse est également sujette à discussion. Aujourd'hui déjà, les stations d'irrigation du Domleschg (canton des Grisons) paient pour que les centrales hydroélectriques de la ville de Zurich les approvisionnent en eau provenant de leurs galeries. Cela permet avant tout de préserver les débits résiduels dans les cours d'eau locaux. Dans la commune de Sent en Basse-Engadine, les agriculteurs peuvent aussi utiliser une certaine quantité d'eau en provenance de la centrale locale si nécessaire [30]. Et sur le flanc nord et sec de la vallée du Rhône, l'eau d'un bassin d'accumulation est utilisée non seulement pour la force hydraulique, mais également à d'autres fins (cf. l'exemple de MONTANAQUA). De telles utilisations multifonctionnelles des bassins d'accumulation devraient se faire plus fréquentes à l'avenir, au moment du renouvellement des concessions des centrales hydroélectriques – en particulier dans le contexte de la formation de nouveaux lacs dans la zone des glaciers.

A2 | Exigences relatives aux quantités dans le cadre de la protection des eaux

Les écosystèmes aquatiques sont adaptés aux conditions hydrologiques naturelles de leur milieu. Si la fixation de débits résiduels dans les cours d'eau est très importante d'un point de vue écologique, elle est également nécessaire à la dilution et à la décomposition de substances polluantes ainsi qu'à l'alimentation d'aquifères qui y sont associés. Il est donc nécessaire de contrôler les prélèvements effectués dans les cours d'eau. Depuis 1992, la loi fédérale sur la protection des eaux prescrit la fixation de débits résiduels pour chaque cours d'eau. L'apparition de crues périodiques revêt également une importance capitale pour les cours d'eau, car elle permet de conserver une dynamique plus naturelle et plus proche de l'état naturel des écosystèmes aquatiques. L'absence de ces débits de pointe entraîne la sédimentation de dépôts fins, ce qui par la suite peut détruire les frayères et les

zones d'alimentation des organismes vivant dans ces eaux. A l'inverse, lors de crues artificielles présentant de fortes fluctuations au cours de la journée (exploitation des centrales hydroélectriques par éclusées), les organismes vivants sont entraînés par la montée des eaux et peuvent sécher sur la rive lorsque le débit diminue à nouveau.

Il n'est pas non plus possible de disposer librement de l'eau des lacs, car un abaissement du niveau de l'eau de quelques centimètres suffit à endommager l'écologie de la végétation des berges ou à assécher les frayères dans l'eau peu profonde. Par exemple, la marge estivale est de 40 cm maximum pour le lac des Quatre-Cantons [31] et de 50 cm maximum pour le lac de Thoune [32].

Les petits plans d'eau, comme les mares, suivent leur propre rythme annuel, caractérisé par un assèchement estival. Cette variation naturelle du débit garantit la valeur écologique élevée de ces milieux naturels, qui se sont entretemps raréfiés. D'un point de vue écologique, la conservation de la dynamique hydrologique correspondante est très importante. La gestion des nappes souterraines doit garantir l'alimentation suffisante en eau des écosystèmes aquatiques qui y sont associés (zones humides, marais). Les connaissances acquises jusqu'à présent concernant la sensibilité des biocénoses dans l'eau souterraine lors d'un abaissement prolongé du niveau de l'eau sont limitées. Etant donné que le niveau de nombreux aquifères subit également une fluctuation naturelle en fonction des saisons, on suppose que les biocénoses dans le sous-sol s'adaptent partiellement à cette dynamique et peuvent se régénérer [33].

Conflits et synergies potentiels Conflits et synergies nés des exigences liées aux débits résiduels

L'obligation de maintenir des débits résiduels concerne non seulement l'énergie hydraulique (cf. page 13), mais également d'autres utilisations, notamment l'irrigation agricole (cf. page 21). Les prélèvements directs pour l'approvisionnement en eau potable s'effectuent uniquement dans les grands cours d'eau, là où ne se pose en principe aucun problème de débit résiduel. Dans certains cas particuliers, le captage d'eau potable dans les eaux souterraines peut également entraîner une baisse des débits résiduels au-dessous des quanti-



tés prescrites (cf. page 26). Les débits résiduels protègent les populations piscicoles et ont un impact positif sur la pêche.

Synergie et conflit: revitalisation/ protection contre les crues

La synergie la plus importante relève de la protection contre les crues, car, selon la législation sur l'aménagement des cours d'eau, la protection contre les crues doit être réalisée dans le plus grand respect de la nature et réserver suffisamment d'espace aux eaux. En cas de crue, les espaces élargis réservés aux eaux peuvent retenir une partie du débit pendant un certain temps et ainsi stabiliser le niveau de la rivière en aval. Dans le canton de Zurich, près de 400 km de cours d'eau sur les 800 km prévus pour une revitalisation d'ici à 2091 auront également un effet immédiat sur la protection contre les crues [34]. Ces mesures sont cependant susceptibles d'engendrer des conflits si la revitalisation provoque une hausse du niveau de l'eau souterraine. Le développement urbain ayant majoritairement eu lieu après les corrections de cours d'eau, il se base sur des niveaux d'eau artificiellement bas. La vallée de la Thur en Thurgovie en est un exemple: certains tronçons ne pourront pas être revitalisés en raison d'ouvrages construits trop profonds [35]. En outre, la revitalisation ne doit en aucun cas diminuer la garantie de la protection contre les crues.

A3 | Gestion des quantités par le biais de la protection contre les crues

Les modélisations des conditions d'écoulement de plus de 180 bassins versants de taille moyenne en Suisse, réalisées sur la base de modèles climatiques, indiquent que les pics de crues pourraient s'accroître à l'avenir. Ce phénomène s'explique avant tout par l'élévation de la limite des chutes de neige du fait de la hausse des températures: si, dans des régions à haute altitude, les précipitations sous forme de pluie augmentent, l'eau s'écoule plus rapidement à un niveau proche de la surface [36]. Dans de nombreux bassins versants situés à haute altitude et ne subissant pas l'influence de glaciers, le débit passe d'un régime nival à un régime pluvial, ce qui augmente sa variabilité et altère l'exactitude des prévisions. La saison des crues est prolongée et la fréquence des événements extrêmes pourrait augmenter [36].

En principe, il existe, dans le cadre de la protection contre les crues, diverses options permettant de réagir à l'éventualité d'un risque de crue amplifié. D'une part, il est possible de mettre en œuvre des mesures d'aménagement des cours d'eau; d'autre part, l'utilisation du sol dans le bassin versant peut être modifiée de sorte à diminuer le risque de crues grâce à une meilleure retenue de l'eau. Le projet HYDROSERV du PNR 61 a analysé les variantes envisageables et le degré d'acceptation de cette approche dans le bassin versant de la Petite Emme (cf. encadré page 20). Bien que les reboisements au profit de la protection contre les crues remportent l'adhésion de la population, les analyses ont montré que leurs effets sur la retenue de l'eau étaient relativement minimes. Il a été démontré que, de par son ampleur, le reboisement théoriquement nécessaire n'était pas réalisable dans les conditions (agronomiques) actuelles, car les mesures d'incitation pour le reboisement, même sur des surfaces de rendement marginales, n'auraient qu'un impact limité en comparaison avec les possibilités de rendement agricoles. Par conséquent, les mesures d'aménagement (y compris les surfaces de rétention des crues) feront également l'objet d'une attention particulière à l'avenir. Elles devront cependant être complétées par une gestion intersectorielle de l'utilisation des terres. Le présent chapitre est consacré à l'impact de telles mesures sur la quantité d'eau. Les répercussions hydromorphologiques de la protection contre les crues sont décrites en page 48.

Aménagement des cours d'eau

Les ouvrages et autres mesures de protection contre les crues exercent une influence non seulement en cas de crues, mais aussi lorsque le niveau de l'eau est normal. Leur agencement détermine l'influence positive ou négative qu'ils ont sur l'offre en eau. La création d'espaces de rétention à des fins de revitalisation et, de manière générale, l'élargissement des rivières ralentissent les débits et augmentent la rétention d'eau dans la surface. À l'inverse, les mesures techniques introduites pour accélérer le débit (rétrécissement, correction) ont tendance à entraîner un approfondissement du lit du cours d'eau et une baisse du niveau de l'eau souterraine, ce qui diminue la quantité d'eau stockée dans le paysage.

A gauche: Dans certaines régions de Suisse, les besoins en eau de l'agriculture dépassent, aujourd'hui déjà, les quantités d'eau disponibles dans les cours d'eau: exploitation agricole intensive dans la Broye. (Photo: Reportair)

Au milieu: Lors d'une irrigation par aspersion, une grande partie de l'eau s'évapore avant même de pouvoir alimenter les plantes. (AGWAM)

A droite: La quantité d'eau nécessaire à l'agriculture dépend des cultures sélectionnées, mais également de la méthode employée. (Photo: Jürg Fuhrer)

La protection contre les crues passe-t-elle par une adaptation de l'utilisation du sol?

Enseignements du projet HYDROSERV du PNR 61

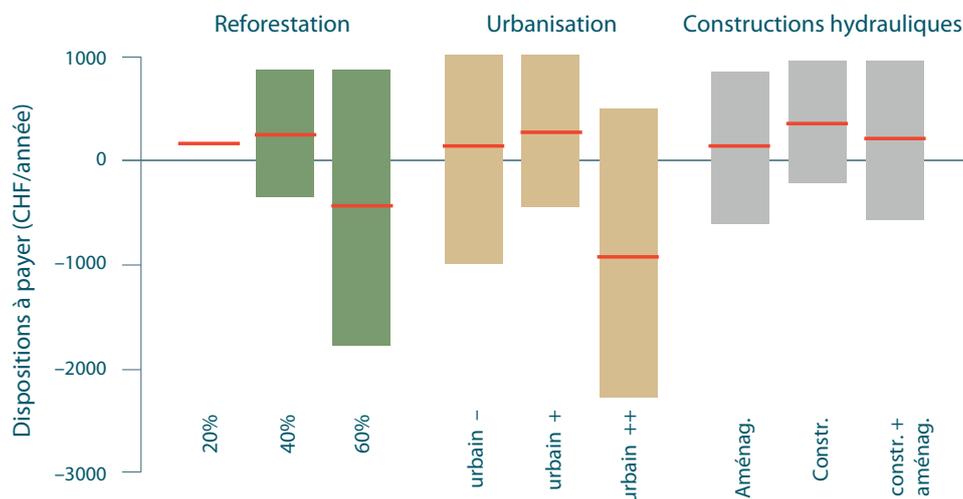
Le projet HYDROSERV qui vise à savoir si les conflits d'utilisation survenant dans le domaine de la protection contre les crues peuvent être atténués ou directement résolus au moyen de financements destinés aux prestations écosystémiques est très instructive. Ainsi, différentes options concernant la gestion des risques de crues dans le bassin versant de la Petite Emme (478 km²), dans le canton de Lucerne, ont été étudiées sous l'angle de leur acceptation par la population [37]. Le choix portait sur différents degrés de reboisement – susceptibles de réduire le risque de crues – dans le cours supérieur (statu quo: 35% de forêt, accroissement de la surface forestière de 20, de 40 et de 60%), de développement urbain (légère baisse, statu quo, légère et forte croissance) et d'expansion des espaces réservés aux eaux (statu quo, ouvrages de protection contre les crues, élargissement fluvial avec surfaces de rétention, ouvrages de protection plus élargissement fluvial). Étaient également mentionnées les cotisations individuelles annuelles (hausse ou baisse des impôts) que chaque mesure ferait peser sur la population concernée. Au total, 3200 citoyens ont reçu un questionnaire portant sur ces différentes options et 547 retours ont pu être exploités. Environ un sixième des répondants ont subi des dommages personnels lors de la dernière crue en 2005.

De toute évidence, la population appelle de ses vœux une amélioration de la protection contre les crues. Les mesures à prendre à cet effet font bien davantage débat. Selon les préférences personnelles, celles-ci vont des élargissements de surfaces intensifs, des surfaces de rétention et des reboisements aux ouvrages traditionnels en dur de protection contre les crues sans adaptation de la gestion dans le bassin versant. Cependant, la position adoptée vis-à-vis de la protection contre les crues s'éloigne manifestement des solutions purement techniques et tend à privilégier des variantes accordant davantage d'espace aux cours d'eau – même au détriment de surfaces exploitées de manière intensive.

Les divergences parfois extrêmes entre les préférences des personnes interrogées sont frappantes (cf. ill. 3). Selon les chercheurs, ce phénomène peut s'expliquer par l'étendue de l'horizon temporel, fixé à 2100. Pour la plupart, les personnes interrogées ne profiteront donc pas elles-mêmes de tous les avantages mis en avant. La tendance indique une préférence pour un reboisement de la forêt actuelle de 20 à 40% – sans aller jusqu'à 60% – dans les zones reculées du cours supérieur afin de réduire les risques de crues. En outre, les personnes interrogées étaient certes prêtes à prendre en charge les coûts supplémentaires des mesures de protection contre les crues provoqués par une légère croissance de la population et des zones urbaines, mais pas les surcoûts engendrés par une forte croissance de l'urbanisation. Par ailleurs, l'idée d'une réduction des zones d'urbanisation et d'une diminution de la croissance économique au profit de la protection contre les crues a reçu un écho positif auprès d'une bonne moitié des répondants (si l'on en croit le fait qu'ils seraient disposés à payer).

De plus, HYDROSERV a évalué l'efficacité des reboisements pour la rétention de l'eau en cas de crue ainsi que leur faisabilité dans l'agrosystème actuel. Les analyses réalisées à partir de modèles hydrologiques ont démontré la rétention d'eau supplémentaire découlant des reboisements étaient plutôt faible et très incertaine [38]. En outre, du fait de l'agrosystème actuel, il ne faut s'attendre qu'à un très faible reboisement naturel dans les prochaines années [39]. Des paiements en contrepartie de surfaces de reboisement pourraient également inciter au reboisement. Cependant, même le montant estimatif le plus élevé justifiable dans le cadre de ce projet (900 CHF/ha annuellement) ne pourrait pas compenser la perte de rendement agricole de ces surfaces. Ces paiements ne permettraient d'accroître la surface forestière que de 10% environ.

III. 3: disposition de la population à payer pour des mesures supplémentaires destinées à la protection contre les crues, par an et par personne en CHF, relevée dans le cadre du projet HYDROSERV [37]. L'enquête a examiné la disposition à payer pour 20, 40 et 60% de forêt de plus qu'aujourd'hui, pour différents scénarios de développement urbain dans les zones à risques (– d'urbanisation: retrait de l'urbanisation; + d'urbanisation: légère croissance urbaine; ++ d'urbanisation: forte croissance urbaine) ainsi que pour trois mesures de construction différentes en faveur de la protection contre les crues (aménag.: élargissements; constr.: mise en œuvre d'un projet de construction hydraulique planifié; constr. + aménag.: combinaison du projet de construction hydraulique planifié et d'élargissements). La situation actuelle constitue le point de référence, avec une disposition à payer de 0 CHF (source: HYDROSERV) [37].



Galeries d'évacuation

Afin de protéger les zones urbaines particulièrement menacées par les risques de crues, des galeries souterraines sont également construites pour rediriger l'eau en cas de crue loin de ces zones. C'est ainsi qu'un tunnel de 2,5 km de long a été construit dans le Seeland bernois après les fortes inondations à répétition du Lyssbach. La galerie peut conduire jusqu'à 65,8 m³ d'eau par seconde sous la ville de Lyss, soit une fois et demi le volume de la crue centennale de l'été 2007. L'un des effets inévitables d'une telle galerie est l'accélération sensible du débit et le déplacement des pics de crue en aval. Par conséquent, en cas de crue, la capacité de débit de l'ancienne Aar, où la galerie du Lyssbach est évacuée, ne suffit plus; d'autres mesures de protection contre les crues sont donc nécessaires. Dans le cadre du projet de protection de la nature et de protection contre les crues de l'ancienne Aar, il est ainsi prévu de mettre en œuvre d'importantes mesures supplémentaires [40].

Régulation des lacs

A l'exception des lacs de Constance et de Walenstadt, tous les grands lacs de Suisse sont soumis à une régulation artificielle. Ces régulations offrent, entre autres, la possibilité d'abaisser suffisamment tôt le niveau des eaux afin de créer un volume de stockage en prévision de crues. Toutefois, les marges de manœuvre relatives au niveau des lacs sont généralement très faibles, car il faut satisfaire à de nombreuses exigences en partie contradictoires (protection de la nature et du paysage, tourisme, pêche, eaux souterraines, production d'énergie). La régulation du niveau d'eau des grands lacs est donc soumise à de nombreux règlements normalisés, qui traitent également de la protection contre les crues dans les cours inférieurs.

Conflits et synergies potentiels

Conflit: protection contre les crues/ eau potable et eau d'usage

Le caractère hydrologique de la plupart des vallées fluviales du Plateau et des Alpes a subi de fortes modifications, notamment du fait des ouvrages de protection contre les crues. La construction de digues de protection contre les crues et les corrections fluviales ont entraîné un abaissement significatif des lits des cours d'eau et, partant, des niveaux des eaux souterraines. Ainsi, suite à la construction de digues dans le cadre de la première correction de la Thur en 1879, le fond de la rivière s'est abaissé de 4,8 mètres jusqu'en 1921. Les conséquences sur les eaux souterraines n'ont pas tardé à se manifester: en 1909, on a constaté un tarissement des résurgences d'eau souterraine et des puits dans une zone de forte érosion du lit [41].

A4 | Gestion des quantités par le biais de l'irrigation agricole

Aujourd'hui, la majeure partie de la production agricole en Suisse se passe d'irrigation artificielle (95% de la surface). Seules les vallées sèches intra-alpines connaissent une longue tradition d'irrigation des prés et des champs, qui représente la majeure partie de l'irrigation dans tout le pays [42, 43]. Sur le Plateau, le recours à l'irrigation intervient avant tout là où il existe un potentiel important pour l'agriculture et les cultures spéciales, comme les légumes de plein champ, et où les précipitations ne couvrent pas en continu les besoins des cultures (cf. ill. 4). Dans de nombreux cas cependant, la technique employée n'est pas la plus efficace, ce qui signifie que la consommation d'eau est supérieure aux besoins.

Hormis les prés de la région intra-alpine, on compte parmi les cultures qui sont régulièrement irriguées aujourd'hui les cultures maraîchères, les cultures de baies et d'arbres fruitiers, les pommes de terre, les vignes et les céréales, tandis que l'irrigation des betteraves sucrières n'est que rarement nécessaire ou économique. Selon l'enquête complémentaire réalisée dans le cadre du recensement des utilisations agricoles de l'Office fédéral de la statistique, 36 183 hectares de surfaces agricoles utiles ont été irrigués en 2010 [43]. Ce chiffre correspond à 59,3% de la surface qui pourrait potentiellement être irriguée avec les infrastructures existantes (61 022 ha) et à 3,4% de la surface agricole utile totale. La part de surfaces irriguées dans le domaine de l'arboriculture fruitière est particulièrement élevée: d'après les données d'Agroscope, 60% des cultures de pommes, qui représentent trois quarts de l'arboriculture fruitière, sont irriguées. On constate de grandes différences en fonction des régions: tandis que seulement 5 à 10% des cultures fruitières sont irriguées en Thurgovie, plus de 90% des cultures fruitières sont irriguées dans la région du lac Léman [44]. L'illustration 4 met en lumière les axes centraux de l'irrigation en Suisse: sur le Plateau, les cultures maraîchères et cultures des fraises prédominent; dans la région alpine, l'irrigation des prés est la plus importante, tandis que dans les cantons du Valais et de Vaud, il convient d'y ajouter les fruits et les vignes. L'irrigation est pratiquée soit pour augmenter le rendement (p. ex. prés dans des régions sèches), soit pour garantir le rendement (grandes cultures, légumes de plein champ), soit pour augmenter le rendement et la qualité (p. ex. viticulture, arboriculture fruitière). Même les cultures sous auvent sont irriguées (p. ex. les cerises de table). La quantité d'eau utilisée est souvent supérieure à celle nécessaire à la croissance des cultures. Avec des techniques efficaces, telles que le goutte-à-goutte ou la micro-irrigation, il est possible de réduire considérablement l'utilisation d'eau tout en obtenant le même rendement. Grâce à l'irrigation au goutte-à-goutte, les fruits à noyaux et à pépins sous auvent néces-

«La première solution à laquelle l'on pense est l'irrigation: lorsque les besoins en eau augmentent, l'on irrigue pour garantir les rendements. Cette solution n'est pas viable à long terme car les ressources en eau diminueront à l'avenir. Il s'agit en revanche de rendre l'agriculture moins gourmande en eau et d'optimiser l'utilisation de l'eau disponible.»

Jürg Fuhrer
Agroscope



Pour plus d'informations  AGWAM sous www.pnr61.ch

sitent seulement de 40 à 80 mm d'eau environ par saison [45].

Prélèvements d'eau pour l'irrigation

Parmi les exploitations qui irriguent leurs cultures, 37,1% utilisent l'eau des rivières, des fleuves et des lacs, 30,0% l'eau souterraine, 24,6% l'eau potable et 8,3% l'eau d'une autre provenance [43]. En ce qui concerne les nappes d'eau souterraine, les prélèvements ne doivent pas, à long terme, dépasser la quantité d'eau qui les alimente, conformément à l'art. 43 LEaux. Toutefois, cette réglementation ne peut être garantie que si les cantons contrôlent les prélèvements d'eau destinés à l'agriculture. Si, dans la plupart des cantons, les exploitations agricoles sont tenues de déclarer les quantités d'eau utilisées, les autorités cantonales n'exigent généralement pas cette déclaration. Récemment, le canton de Thurgovie a réalisé un relevé des prélèvements d'eau destinés à l'agriculture sur l'ensemble de son territoire [46]. Dans les cantons alpins des Grisons et du Valais, les communes sont chargées des autorisations et des contrôles. Certains cantons posent des conditions supplémentaires; le canton de Schaffhouse, par exemple, exige en général un système de goutte-à-goutte dans le cas de prélèvements d'eau souterraine [47].

Les débits résiduels doivent être garantis lors de prélèvements dans les cours d'eau. Toutefois, en vertu de l'article 32 let. d LEaux, «en cas de nécessité», c'est-à-dire en cas de sécheresse, les cantons peuvent autoriser des débits résiduels inférieurs en faveur de l'irrigation agricole. Afin d'éviter les répercussions négatives sur l'environnement dans ces situations, l'OFAG étudie notamment comment couvrir au mieux les situations agricoles critiques dues à la sécheresse par le biais d'assurances contre les pertes de rendement tout en protégeant les eaux contre des prélèvements excessifs [48].

Jusqu'à présent, les grands lacs (Léman, Neuchâtel, Constance) ont été considérés comme des ressources quasiment illimitées pour l'irrigation. Un projet d'irrigation par prélèvements dans le lac de Neuchâtel a ainsi été autorisé par le canton de Fribourg et subventionné par la Confédération, sans que les répercussions sur le lac en période de sécheresse prolongée soient connues [49]. Si les quantités de prélèvements de ce projet n'ont pas été précisées, ce dernier se traduit néanmoins par un accroissement notable de l'offre en eau, car la surface d'irrigation potentielle pourrait être triplée et passer de 260 à 792 hectares.

L'utilisation de l'eau pour l'agriculture, à l'avenir, sera déterminée par le climat, la politique agricole et les conditions du marché. D'une part, le besoin potentiel des cultures en eau s'accroît simultanément à la hausse des températures, en raison d'une évaporation plus rapide (cf. ill. 5). Des précipitations égales, voire plus faibles en été et en particulier pendant les sécheresses estivales engendrent des

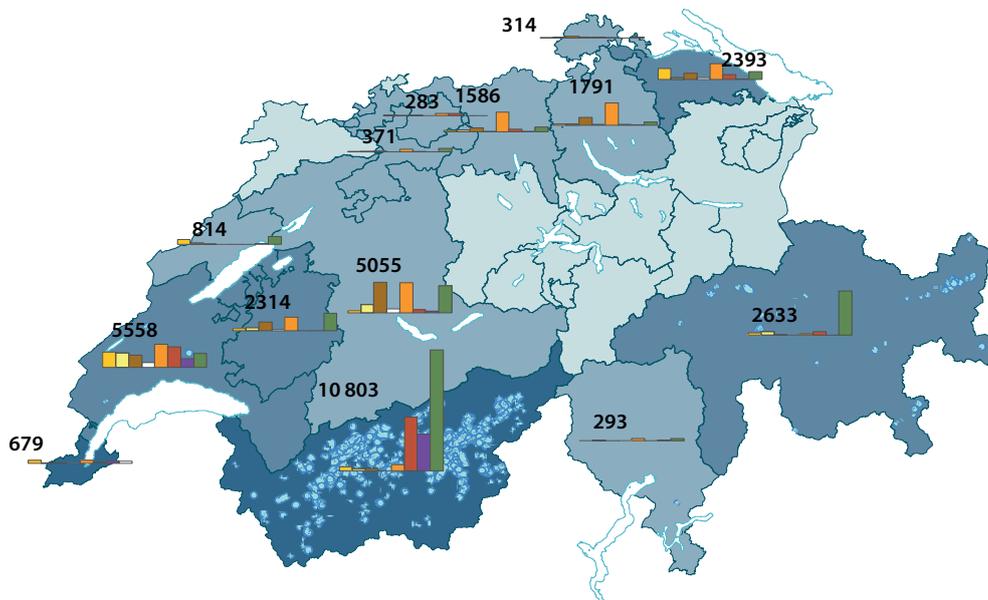
déficits d'eau dans les sols et, par conséquent, augmentent les besoins supplémentaires en eau. D'autre part, les exigences du marché en matière de qualité peuvent également entraîner un accroissement de l'irrigation (p. ex. les pommes de terre destinées à la production de chips, qui ont besoin de pousser dans un sol constamment humide).

Le développement de la surface irriguée à l'avenir dépend également de la demande en produits agricoles nécessitant une irrigation intensive. Si le degré actuel d'autoapprovisionnement en produits agricoles reste inchangé, le besoin en production et, selon le type de production, le besoin en eau devraient subir une forte augmentation, ne serait-ce qu'en raison de la croissance démographique prévue par l'Office fédéral de la statistique et selon laquelle la population suisse passerait de 8 millions actuellement à 11 millions de personnes en 2050.

À l'heure actuelle, il est difficile d'estimer le rôle joué par les serres dans la demande en eau d'irrigation. Celui-ci devrait cependant gagner en importance à l'avenir, car les cultures sous serre sont entièrement tributaires de l'apport artificiel en eau. La surface cultivée de légumes sous serre a connu une hausse constante durant ces dernières années (2011: 1043 ha) [50]. Selon le légume, la culture maraîchère nécessite entre 200 et 500 mm d'eau.

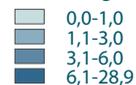
Les enseignements tirés de la sécheresse de l'année 2003 et du printemps sec de l'année 2011 ont amorcé différents développements, dont les répercussions sont encore difficiles à évaluer. En prévision de la hausse des températures et de la fréquence accrue des périodes de sécheresse, les conseillers en agriculture recommandent d'utiliser à l'avenir des cultures et des espèces adaptées. Il faudra en outre adopter des méthodes d'agriculture réduisant les pertes d'eau afin de conserver l'humidité du sol. A cela s'ajoute le fait que les exploitations agricoles misent de plus en plus sur des cultures rentables exigeant une irrigation constante. Ces cultures sont également en partie privilégiées, car elles bénéficient d'un soutien sous forme de contributions à la sécurité de l'approvisionnement et/ou de contributions pour cultures particulières [51].

Au niveau régional, différents grands systèmes d'approvisionnement en eau uniquement dédiés à l'agriculture sont en cours de planification ou de construction (Broye/lac de Neuchâtel, Syndicat d'Arrosage de Nyon et Environs/lac Léman, Furttal/Limmat, Seeland/Aar, Thurgovie/lac de Constance). Le canton de Vaud propose d'extraire à l'avenir l'eau d'irrigation du lac de Neuchâtel et du Léman [52]. Il convient d'exploiter le potentiel de réduction de la consommation d'eau par le biais de techniques efficaces à chaque investissement dans des infrastructures d'irrigation, mais également lors de l'attribution de concessions de prélèvements [47]. Conformément à l'ordonnance sur les améliorations structurelles dans l'agriculture (OAS), la Confédération octroie



III. 4: importance de l'irrigation au niveau régional et cultures les plus irriguées. La coloration des cantons correspond au pourcentage de surfaces agricoles utiles irriguées, les colonnes présentent l'estimation des surfaces irriguées dans les cantons selon le type de culture (OFS, 2012) [53]. La carte montre également la répartition géographique des bisses [54]. Données contextuelles: [55]; Analyse SIG Eawag [1].

Surfaces agricoles utiles (%)



Surfaces irriguées selon le type de culture

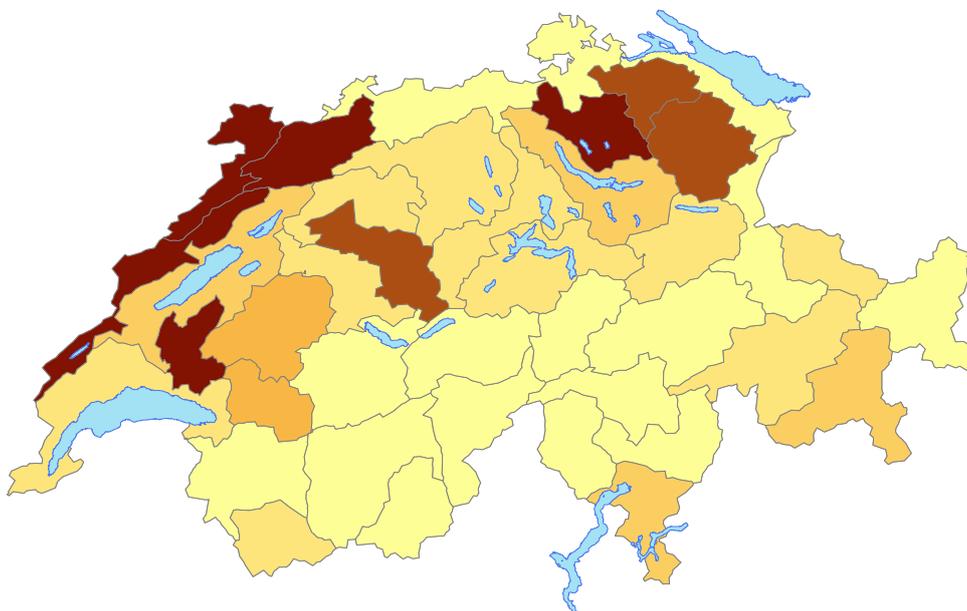
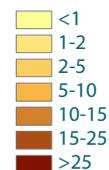


Bisses —



III. 5: impact des conditions météorologiques sur les besoins en irrigation agricole – répartition du rapport moyen entre les besoins en irrigation potentiels et les ressources (débit cumulé des cours d'eau) pour les mois d'été (juin-juillet-août) de la période 1981-2010 (1^{re} carte) et de l'année 2003 (2^e carte) en tenant compte des débits résiduels (Q347) et d'une efficacité de l'irrigation de 70% [56].

Besoins en irrigation vs. ressources disponibles (%)
1981-2010 (en haut)
et 2003 (en bas)



Changement climatique et besoins en eau dans l'agriculture suisse – variantes pour une gestion durable des terres et des eaux: enseignements du projet AGWAM du PNR 61

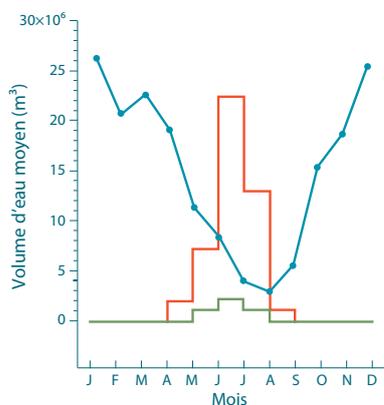
Le projet AGWAM visait, d'une part, à élaborer des recommandations pour la gestion de l'eau dans le domaine de l'agriculture à l'aide de différents scénarios concernant le climat, les prix du marché et la politique. D'autre part, il avait pour but de définir des variantes de régulation destinées à garantir la rentabilité et le respect des standards environnementaux (cf. encadré page 39). L'ensemble des évaluations ont été réalisées dans la région de la Broye et dans le bassin versant du lac de Greifensee, deux régions très différentes en matière de climat et d'utilisation du sol [57]. D'après les calculs du scénario basé sur l'hypothèse d'une agriculture visant unilatéralement une «productivité» maximale, les besoins en irrigation en 2050 excéderont la quantité d'eau de surface alors disponible dans le bassin versant de la Broye. Des solutions techniques permettent de remédier à cette pénurie, notamment la construction de bassins d'accumulation ou le transport d'eau issue de zones plus lointaines. Sont cités en exemple les prélèvements d'eau d'ores et déjà effectués dans le canal de la Broye pour l'irrigation des cultures maraîchères de la commune de Galmiz ou dans le lac de Neuchâtel pour l'irrigation de cultures de pommes de terre sur le Plateau, à Forel et à Rueyres-les-Prés. Cependant, de tels projets de construction génèrent des coûts élevés en termes d'investissement et d'entretien. En outre, une irrigation intensifiée a des répercussions négatives sur l'environnement: elle accroît l'érosion des sols et le potentiel de gaz à effet de serre. Une irrigation excessive favorise également le lessivage des nitrates, tandis qu'une irrigation optimale peut atténuer ce phénomène [58]. Par ailleurs, des prélèvements d'eau supplémentaires menacent l'écologie des cours d'eau, notamment des petits, car la diminution de leur volume accentue encore la hausse des températures [59]. Par conséquent, l'intensification de l'irrigation par le biais de systèmes additionnels d'approvisionnement en eau devrait rester cantonnée à des sites disposant de sols et de terrains propices, et les prélèvements d'eau à des cours d'eau de grande envergure. Dans la région de la Broye, il est recommandé de concentrer la production intensive et irriguée dans les lieux propices du bassin versant (autour de Payerne), la région vallonnée étant mieux adaptée au fourrage et, selon le type de sol, à des cultures arables individuelles ne nécessitant pas d'irrigation.

Le projet AGWAM présente des stratégies d'adaptation alternatives durables et solides en s'appuyant sur une optimisation – multicritères et basée sur des modèles – de l'utilisation agricole du territoire au niveau régional. Les priorités des différentes fonctions agricoles (production, objectifs environnementaux) ayant été modifiées, l'organisation de l'utilisation du territoire (type de cultures et lieux) et le type de gestion (assolement, labour, fertilisation, etc.) peuvent être adaptés en cas de disponibilité réduite de l'eau. A l'opposé d'une stratégie unidimensionnelle orientée vers la productivité, la mise en œuvre d'une stratégie de compromis qui, outre les intérêts de production, tient compte des objectifs environnementaux, évitera d'atteindre un débit trop bas dans le bassin de la région de la Broye (cf. ill. 6). Cela signifie qu'il est possible de réduire les risques de pénurie d'eau et de conflits avec d'autres utilisations de l'eau ou avec l'écologie des eaux en introduisant des mesures appropriées. Cette stratégie exige toutefois qu'une partie des terres cultivées soient transformées en prairie, où la production de biomasse restera certes élevée, mais où celle de denrées alimentaires – exprimée en unités d'énergie – diminuera.

Les résultats présentés sont typiques d'une région «sèche» du Plateau, mais ils ne peuvent être transposés à d'autres régions. Il convient de différencier les conditions initiales, les objectifs stratégiques et les éventuels conflits d'objectifs entre les différentes fonctions agricoles (également appelées «trade-offs») au niveau régional.

A l'heure actuelle, le prix peu élevé de l'eau et les conditions généreuses des concessions de prélèvement encouragent les exploitations à pratiquer une irrigation encore plus intensive. Une situation qui pourra se prolonger aussi longtemps que l'eau sera disponible. Sous la menace des interdictions de prélèvements dans les fleuves et les rivières en période de sécheresse, elle représente un risque élevé en matière de revenus (p. ex. pour la culture des pommes de terre). Les modélisations montrent que l'introduction de contingents d'eau liés à l'exploitation ou une hausse du prix de l'eau réduirait fortement l'utilisation d'eau pour l'irrigation. Les exploitations réagiraient alors en modifiant leur mélange de cultures et en adoptant une technique d'irrigation efficace et adaptée aux besoins (cf. ill. 7). Cette stratégie ne réduirait qu'à peine les revenus des exploitations agricoles tout en limitant les répercussions sur les eaux – une situation gagnant-gagnant.

Dans des conditions climatiques extrêmes, c'est-à-dire en cas de fortes sécheresses ou de canicules, l'amélioration de l'efficacité se révélera insuffisante, car il n'y aura plus assez d'eau disponible, même pour une irrigation réduite. La question des produits d'assurance destinés à couvrir ces événements extrêmes, p. ex. des assurances indexées pour les pertes de rendement liées à la sécheresse, font l'objet de discussions. En Suisse, il est possible de contracter une assurance de ce type depuis janvier 2014 [60]. Celle-ci assure les agriculteurs contre la perte de gain et préserve indirectement les eaux touchées par la sécheresse de prélèvements d'eau additionnels.

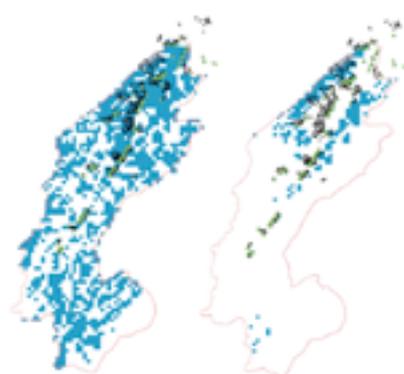


Besoin potentiel

— «Productivité»

— Débit

— «Compromis»



«Productivité»

«Compromis»

«Compromis»: irrigation en plaine sur les sols à gros grains uniquement

▲ Points de prélèvement

■ Surface irriguée aujourd'hui

□ Pas d'irrigation

■ Surfaces irriguées

III. 6: courbe annuelle des besoins en eau mensuels moyens pour l'irrigation dans la région de la Broye selon deux stratégies d'exploitation du territoire (partie supérieure) et carte de l'irrigation des surfaces concernées à l'horizon 2050 (partie inférieure) [57].



aux régions les plus fréquemment affectées par des sécheresses et des pertes de rendement importantes des aides financières destinées à des installations d'irrigation fixes visant à garantir le rendement et la qualité. Des subventions fédérales en faveur de l'irrigation peuvent également être versées en vue de réorienter l'offre nationale en fruits, légumes, pommes de terre et autres cultures spéciales en fonction de la demande actuelle, la condition étant ici aussi l'utilisation de techniques à faible consommation d'énergie ou d'eau.

Un cas particulier: l'irrigation des prés

Dans les vallées sèches intra-alpines des Grisons et du Valais, les conflits relatifs à l'eau entre l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable, l'énergie hydraulique et les débits

résiduels nécessaires au maintien de l'écologie existent depuis longtemps [61]. Dans de nombreuses zones des Grisons, les prés sont considérés comme zones nécessitant une irrigation. Cependant, l'on ne dispose d'aucune donnée indiquant dans quelle mesure l'eau nécessaire peut être durablement mise à disposition à partir des eaux locales [62]. Après la sécheresse de 2003, la commune de Sent en Basse-Engadine a décidé de mettre sur pied un nouveau système d'irrigation. La commune voisine de Ftan souhaite doubler le nombre de surfaces irriguées dans la mesure du possible [61]. L'un des aspects étudié dans le cadre des recherches du projet WATERCHANNELS du PNR 61 portait sur la manière de garantir la pérennité de la gestion de l'irrigation alpine. Afin d'assurer une base scientifique solide à la

A gauche: Le projet WATERCHANNELS a étudié comment optimiser l'irrigation traditionnelle par les bisses dans les Alpes pour répondre aux exigences futures.

Au milieu: Pour donner des tubercules réguliers, les pommes de terre destinées à la production de chips sont irriguées en priorité. (AGWAM)

A droite: L'introduction de contingents d'eau ou de prix de l'eau fixes pourrait réduire fortement l'utilisation d'eau pour l'irrigation. (AGWAM)

Les bisses – héritage culturel – et gestion de l'eau: enseignements du projet WATERCHANNELS du PNR 61

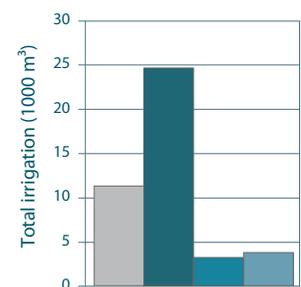
Etablie depuis des siècles, la gestion des bisses en Valais représente un cas particulier de l'approvisionnement en eau destinée à l'agriculture. Les cours d'eau de montagne situés à haute altitude, souvent alimentés par les glaciers, sont conduits à travers des canaux, des tunnels et des conduites (bisses) vers les versants secs de la vallée du Rhône, où leur eau est principalement utilisée pour l'irrigation des prés. Ces systèmes de canalisation très anciens étaient traditionnellement entretenus et gérés par des coopératives.

Le projet WATERCHANNELS a réalisé une enquête approfondie visant à déterminer comment la gestion des bisses pouvait réagir face aux exigences sociales actuelles. D'une part, l'irrigation traditionnelle des prés peut être considérée comme un gaspillage d'eau qui doit être remplacée par des systèmes d'arrosage plus économes. D'autre part, l'irrigation intensive des prés entre en contradiction avec le maintien des prairies sèches souhaité sous l'angle écologique. Enfin, les centrales hydroélectriques sont elles aussi intéressées par l'exploitation de l'eau des bisses.

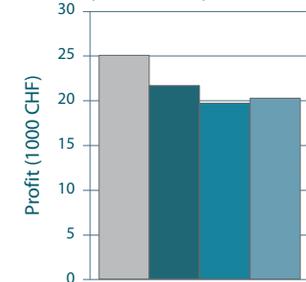
Il a été démontré que l'exploitation plus intensive du paysage avait exacerbé les conflits relatifs à l'utilisation des bisses, conflits que la gestion traditionnelle par coopérative n'est plus en mesure de résoudre seule. Afin de diminuer la concurrence entre les différentes utilisations, le projet de recherche propose aux responsables des bisses de renouveler leur structure organisationnelle et de coopérer avec les agriculteurs locaux, les associations de protection de la nature et du paysage, et les acteurs du tourisme. L'amélioration de l'irrigation des prés est indispensable à la préservation des canalisations ouvertes, lesquelles représentent un véritable héritage culturel. D'un point de vue écologique, il conviendrait que des prés irrigués de manière traditionnelle et intensive coexistent avec des prairies sèches non irriguées dans le paysage des prés [63].

A priori, l'eau disponible dans les bisses subira une forte baisse en raison du changement climatique, comme nous avons pu le constater lors de la canicule de 2003. Les droits sur les eaux dont bénéficient les utilisateurs des bisses reposent souvent sur des législations très anciennes et abrogées depuis longtemps, mais demeurent intacts au titre de droits «immémoriaux». Ces droits fixent souvent des volumes exploitables indépendamment du débit des bisses, ce qui entraîne une pénurie d'eau pour d'autres utilisations en cas de sécheresse – p. ex. pour la production hydroélectrique ou pour garantir un débit résiduel dans les ruisseaux. Dans ce contexte, des questions juridiques complexes doivent être réglées.

Consommation totale d'eau (1000 m³/an)



Résultat d'exploitation de l'entreprise (profit) (1000 CHF/an)



■ Référence ■ 2050 avec prix de l'eau
■ 2050 ■ 2050 avec contingent d'eau

III. 7: besoins en eau et bénéfices d'une exploitation agricole dans la région de la Broye dans le cadre du changement climatique (2050), avec ou sans contingent d'eau ou augmentation du prix de l'eau [57].



A gauche: Les nappes aquifères les plus importantes de Suisse se trouvent dans les grandes vallées fluviales. (Photo: Reportair)

Au milieu: Le projet GW-TREND a étudié les répercussions des épisodes de sécheresse sur les aquifères de la vallée de l'Emme et la quantité d'eau qui peut y être prélevée pour l'approvisionnement en eau potable.

A droite: Les lacs suisses jouent un rôle de plus en plus important dans l'approvisionnement en eau potable. L'usine de filtration de Moos (ZH). (Photo: Reto Oeschger)

discussion portant sur l'utilisation durable de l'eau dans l'agriculture en présence d'autres exigences relatives aux ressources en eau disponibles, le projet AGWAM du PNR 61 (cf. encadré page 24) a étudié comment l'utilisation et la gestion du sol pouvaient être adaptées de manière optimale à une pénurie d'eau croissante liée au changement climatique. Il en est ressorti que les conditions-cadres socio-économiques et la politique agricole joueront un rôle bien plus important que le changement climatique.

Conflits et synergies potentiels

Conflit: agriculture/eau potable et écologie des cours d'eau

Les conflits avec l'approvisionnement en eau potable et l'écologie des cours d'eau surviennent avant tout durant les longues périodes de sécheresse. D'un côté, les agriculteurs pompent l'eau souterraine des nappes, qui sont également utilisées pour l'approvisionnement public en eau. De l'autre, certains fournisseurs cèdent de l'eau potable directement aux agriculteurs. A l'heure actuelle, il est impossible d'estimer avec fiabilité l'intensité de ces concurrences, entre autres car, dans de nombreuses nappes d'eau souterraine, les débits pouvant être exploités durablement n'ont jamais été quantifiés jusqu'à présent (cf. également synthèses thématiques 1 et 3 du PNR 61). Comme, en parallèle, les quantités prélevées par l'agriculture ne sont pas connues, l'incertitude concernant leur éventuelle surexploitation pendant les sécheresses est considérable.

La canicule de 2003 a montré, dans le canton d'Argovie par exemple, que, malgré l'interdiction de prélèvement dans les eaux de surface, les nappes aquifères alimentées par l'infiltration d'eau fluviale ont mis deux ans pour se rétablir. Ainsi, ce n'est qu'au printemps 2006 que l'on a de nouveau enregistré un niveau normal pour la saison [64].

Les modélisations réalisées par le projet AGWAM pour le PNR 61 confirment que les cours d'eau sont fortement sollicités pendant les saisons sèches: l'illustration 5 montre que, par comparaison avec une année normale, les besoins en irrigation pendant une année sèche comme l'année 2003 sont considérablement plus élevés et accaparent une grande partie du débit dans de nombreux bassins versants [56].

Les récentes interdictions relatives aux prélèvements d'eau ne se cantonnent pas à l'année 2003. Le printemps et le début de l'été 2011 ayant été caractérisé par la sécheresse, les exploitations agricoles du Jura et situées le long de nombreux cours d'eau sur le Plateau (p. ex. dans le canton de Soleure) ont également été confrontées à des interdictions de prélèvements [65]. De même, en juillet 2006 et de juillet à décembre 2010, les cantons de Fribourg et de Vaud ont dû interdire les prélèvements d'eau.

Dans certains cantons, ce sont les communes qui accordent les autorisations pour les prélèvements effectués par les agriculteurs dans les cours d'eau. Cette situation accentue les risques de manque de coordination et de prélèvements abusifs, notamment si plusieurs communes octroient en même temps des autorisations de pompage pour les mêmes cours d'eau. Par exemple, selon la nouvelle version – en projet – de sa loi sur l'eau, le canton de Zurich peut habiliter les communes à autoriser des prélèvements temporaires dans des cours d'eau à des fins d'irrigation lors de graves pénuries d'eau [66].

A5 | Eau potable: utilisation de l'eau souterraine et des lacs

Malgré la croissance démographique toujours en hausse, on ne prévoit jusqu'à présent aucune forte augmentation de la consommation d'eau domestique dans les prochaines décennies. Cette estimation s'explique avant tout par l'effet d'économie généré par les appareils ménagers à faible consommation d'eau, qui compense le surcroît de consommation dû à la croissance démographique. La question suivante se pose toutefois: sera-t-il à l'avenir possible ou nécessaire d'utiliser le réseau d'eau potable pour d'autres utilisations? Il est courant que l'agriculture puise une partie de l'eau destinée à l'irrigation dans ce réseau (près d'un tiers de l'eau d'irrigation est approvisionnée par le réseau public, cf. à cet effet page 21). Une irrigation de grande ampleur nécessiterait toutefois une importante consolidation des capacités des réseaux, une évolution non souhaitable aux yeux des fournisseurs en eau, pour des raisons de coûts et d'exploitation (longues périodes de stagnation causant des problèmes d'hygiène en-dehors de la saison d'irrigation).

Au niveau régional, l'irrigation des terrains de golf et l'enneigement des montagnes au moyen de ressources tirées du réseau d'eau potable jouent également un rôle croissant. Il ne faut pas oublier que les fournisseurs en eau peuvent avoir tout intérêt à assurer des approvisionnements supplémentaires afin de mieux exploiter leurs stations et d'augmenter leurs revenus. Dans cette optique, il est tout à fait possible que les fournisseurs en eau potable renforcent leurs capacités pour de telles utilisations. Cependant, l'hypothèse selon laquelle la consommation d'eau restera constante ne se vérifiera pas nécessairement indéfiniment. Il conviendra d'observer attentivement la naissance de nouveaux modèles de consommation ou de besoins supplémentaires au moment de la planification des infrastructures destinées à l'eau potable (cf. également la synthèse thématique 3 du PNR 61). Le projet MONTANAQUA du PNR 61 (cf. encadré page 17) a ainsi démontré que l'arrosage de jardins et de gazons privés lors d'étés secs et par des températures élevées pouvait se traduire par un excès de consommation considérable. De nombreux cantons disposent toutefois d'instruments juridiques permettant d'empêcher des telles utilisations pendant les épisodes de sécheresse.

Au total, 80% de l'eau potable en Suisse provient des eaux souterraines (env. 39,2% de sources, 40,6% de stations de pompage) et 20% des lacs. [67]. Les nappes aquifères les plus importantes se trouvent dans les roches meubles des grandes vallées fluviales et sont reliées aux cours d'eau [68]. Le volume d'eau

fluviale présent dans les eaux souterraines prélevées n'est connu que dans quelques cas particuliers.

Utilisation de l'eau souterraine

Il est toujours aussi difficile d'estimer avec précision les quantités d'eau souterraine disponibles à long terme. Afin d'accorder des concessions appropriées pour les prélèvements d'eau et d'éviter une surexploitation au cours des sécheresses, il est essentiel de dresser un bilan détaillé de la situation. Ainsi, une étude commandée par l'Office de l'environnement du canton de Soleure a démontré que, par endroits, les concessions octroyées excédaient largement les ressources en eau souterraine disponibles pour une exploitation durable [69]. Les quantités d'eau durablement disponible aujourd'hui et à l'avenir dans les nappes souterraines alimentées par les cours d'eau dans le canton de Berne ont été analysées dans le cadre du projet GW-TREND du PNR 61 (cf. encadré ci-dessous).

Le recours fréquent à l'enrichissement artificiel des aquifères démontre également que l'eau souterraine n'est pas disponible partout dans la qualité et la quantité souhaitées. La ville de Bâle s'approvisionne exclusivement en eau souterraine alimentée par l'infiltration de l'eau du Rhin. Dans le cadre de sa planification stratégique d'approvisionnement en eau potable, le canton de Zurich mise également de plus en plus sur les installations d'alimentation artificielle aux abords du Rhin (Weiacher Hard, Rafzerfeld, Rheinau) [70]. D'après l'ébauche du plan directeur cantonal, celles-ci

Disponibilité de l'eau souterraine aujourd'hui et sous l'effet du changement climatique: enseignements du projet GW-TREND du PNR 61

Le projet GW-TREND a analysé l'impact du changement climatique sur le renouvellement et la disponibilité de l'eau souterraine. Sur le Plateau, la période estivale, pendant laquelle l'eau souterraine ne se renouvelle pas en raison de l'évaporation et de la consommation qui en est faite, devrait sensiblement se prolonger (de mai jusqu'à octobre au lieu de juin jusqu'à août) du fait de la hausse des températures. Tant que les précipitations des mois d'hiver augmentent, conformément aux prévisions actuelles, ce déficit en eau devrait, sur l'année, être comblé. Il faut cependant s'attendre à ce que les eaux souterraines affichent un niveau nettement inférieur à la fin de l'été et à l'automne, ce qui peut notamment réduire la possibilité d'utilisation des réservoirs à capacité de stockage limitée [71].

Pour les aquifères de vallée jouant un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau potable, l'alimentation en eau fluviale est plus importante que l'infiltration des précipitations. Si, comme prévu, le régime du débit fluvial sur le Plateau et dans les Préalpes donne lieu à un écoulement estival largement inférieur à celui d'aujourd'hui, le renouvellement de l'eau souterraine alimentée par l'infiltration des cours d'eau sera également diminué. Plus une nappe aquifère dépend de l'infiltration fluviale, plus elle sera sensible à une baisse de débit. Les répercussions concrètes sur la disponibilité de l'eau potable dépendent de nombreux facteurs et peuvent uniquement être déterminées au cas par cas [72].

A l'inverse, de nombreux cours d'eau sont tributaires des eaux souterraines exfiltrées. Aujourd'hui déjà, des tronçons fluviaux situés dans la vallée de la Töss, la vallée de Frick et le Haut-Emmental s'assèchent temporairement lorsque le niveau de l'eau souterraine est bas. Dans les lieux où l'eau fluviale peut s'infiltrer librement dans l'eau souterraine, les prélèvements d'eau souterraine en grande quantité pendant les périodes de sécheresse risquent de réduire encore le débit de base. Toutefois, l'infiltration est souvent limitée par le colmatage des fonds de rivières, lesquels conservent un certain volume d'eau. Une représentation détaillée de la situation des eaux souterraines en Suisse face à la progression du changement climatique figure dans la synthèse thématique 3 du PNR 61.

devraient permettre de capter plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par jour, une quantité qui permettrait même de pallier une éventuelle pollution du lac de Zurich, dont l'eau ne pourrait dès lors plus être prélevée. De nombreuses autres installations dans toute la Suisse sont déjà opérationnelles ou en cours de planification (p. ex. dans le canton d'Argovie) [74]. Cette évolution n'apparaît pas dans les statistiques concernant l'eau potable, car, jusqu'à présent, les eaux souterraines rechargées artificiellement avec de l'eau fluviale n'étaient pas distinguées des autres eaux souterraines.

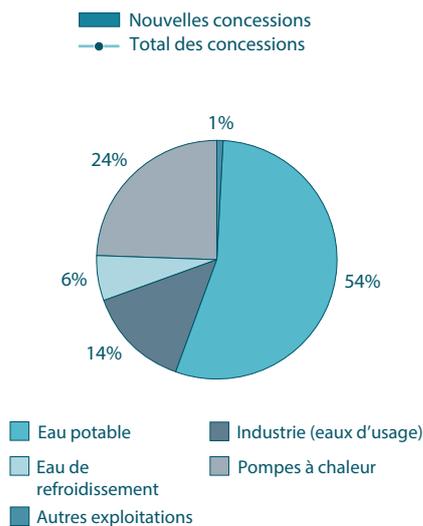
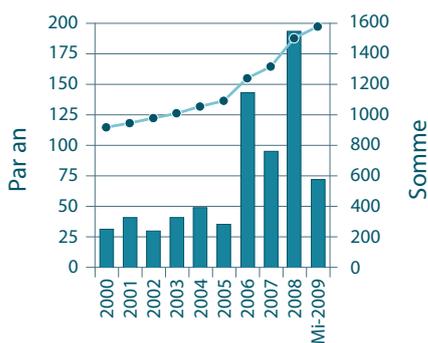
Eau potable issue des lacs

Les quantités d'eau potable prélevée dans les lacs sont, dans des conditions normales, négligeables eu égard au débit et au volume des lacs. Lors de longues périodes de sécheresse, la production d'eau potable peut néanmoins se répercuter sensiblement sur le niveau de l'eau. Le débit de lacs régulés ne peut pas être réduit à loisir, sans quoi les limites des débits résiduels du cours inférieur seront dépassées. De telles situations peuvent se traduire par une baisse du niveau du lac, qui n'est compatible que de manière très restreinte avec l'écologie des rives et d'autres utilisations (p. ex. la navigation). Ainsi, lors de la canicule de 2003, le niveau des lacs de Zurich et de Lugano n'a pas pu être maintenu. Cela prouve que les réserves des lacs ne sont pas illimitées, raison pour laquelle elles doivent être exploitées avec précaution.

Il existe toutefois une exception: les débits résiduels n'ont pas à être respectés pour les sources où les prélèvements d'eau potable ne dépassent pas 80 l/s (art. 30, let. c L'Eaux) et qui, par conséquent, sont en règle générale toujours entièrement captées. D'un point de vue historique, le captage de centaines de sources pour l'approvisionnement en eau potable a considérablement modifié le paysage hydrique. A l'origine, l'eau d'un grand nombre de ces sources alimentait des biotopes de sources et des petits ruisseaux, aujourd'hui disparus suite à son exploitation. Dans ce contexte, l'approvisionnement en eau potable se trouve également en concurrence avec les besoins en eau des écosystèmes aquatiques.

A6 | Exploitation de la chaleur des eaux souterraines

Avec leur température constante quasiment tout au long de l'année, les eaux souterraines peuvent également servir de source thermique pour le chauffage en hiver. A cet effet, l'eau est prélevée d'une nappe aquifère par forage; elle est ensuite refroidie avec des échangeurs thermiques avant d'être reconduite dans le même aquifère au moyen d'un deuxième forage ou par infiltration dans l'effluent. De nombreux cantons encouragent activement l'exploitation de la chaleur des eaux souterraines, une forme d'énergie renouvelable exempte de CO₂. Ce mode d'utilisation a ainsi connu une forte augmentation ces dernières années; il est dès lors possible qu'il représente une part considérable de l'extraction de l'eau souterraine (cf. ill. 8 et 9). Dans le canton de Saint-Gall, par exemple, l'exploitation thermique constituait environ 12% de la quantité totale des captages d'eaux souterraines en 2012 [76]. Dans le canton de Berne, ce taux était même doublé. Avec 1600 concessions destinées aux systèmes de pompe à chaleur pour le chauffage et la production d'eau chaude, la majorité des concessions d'eau d'usage du canton étaient utilisées pour l'exploitation thermique. Au total, 20 millions de m³ d'eau souterraine ont été concessionnés pour le chauffage (contre env. 100 millions de m³ pour l'eau potable) [77], produisant ainsi une puissance calorifique de 90 MW [78]. Plusieurs cantons considèrent qu'exploitation thermique des eaux souterraines et production d'eau potable sont incompatibles. Ils craignent en effet une éventuelle détérioration de la qualité des eaux souterraines. L'OFEV souligne également que «des polluants peuvent emprunter le dispositif de restitution pour atteindre les eaux souterraines sans qu'on le remarque, en cas de défaut dans le système ou d'accident concernant les liquides pouvant polluer les eaux» [79]. Dès lors, le canton de Zurich n'autorise pas l'exploitation thermique de l'eau souterraine dans les zones S1, S2 et S3 et les secteurs de protection des eaux [80]. Cette situation génère une rivalité directe entre la production d'eau potable et le prélè-



Conflits et synergies potentiels

Conflit: eau potable/agriculture

L'approvisionnement en eau potable occupe une place importante en comparaison d'autres utilisations, notamment l'irrigation agricole. C'est pourquoi l'irrigation à partir du réseau d'eau potable n'est possible que de manière limitée, la capacité des conduites de distribution se révélant insuffisantes en cas de pics de consommation élevés.

Conflit: eau potable/écologie des cours d'eau

Les quantités d'eau nécessaires à l'approvisionnement en eau potable sont prélevées très régulièrement et de façon décentralisée. En général, ces quantités ne sont pas suffisantes pour nuire sérieusement à d'autres utilisations ou à l'écologie. Les prélèvements d'eau potable dans l'eau souterraine sont organisés de manière à n'avoir aucune répercussion négative sur les écosystèmes alimentés par les réserves d'eau souterraine. L'on estime à 20% le renouvellement naturel pouvant être exploité de manière durable [68]. Sur le terrain, cette proportion doit être déterminée au cas par cas. En vertu de l'art. 29 L'Eaux, les prélèvements d'eau souterraine associés à des cours d'eau doivent respecter les débits résiduels [75].

III. 8 (partie supérieure): multiplication des pompes à chaleur dans le canton de Berne entre 2000 et 2009 [73].

III. 9 (partie inférieure): quantités d'eau souterraine affectées à l'exploitation thermique dans le canton de Berne. Cette quantité correspondait à 30% des concessions d'eau potable en 2008 [73].



vement de chaleur pour ce qui est des quantités utilisables. La plupart des cantons essaient de contourner ces conflits en élaborant une planification de l'exploitation thermique à long terme et en se concentrant uniquement sur quelques systèmes de grande envergure [80]. Le canton de Berne a l'intention de limiter l'augmentation de l'exploitation thermique des eaux souterraines. A l'avenir, l'eau souterraine ne devra être utilisée pour la production de chaleur que là où elle est abondante et où cela ne porte pas atteinte au captage d'eau potable [78]. Selon la vision énergétique du canton de Berne, cela signifie également que l'énergie renouvelable issue de l'énergie hydraulique et l'exploitation de la géothermie doivent permettre de renforcer la place économique et satisfaire à des objectifs environnementaux primordiaux [81]. La comparaison des objectifs politiques relatifs à l'économie énergétique et à l'économie hydraulique fera également partie du débat sur l'eau souterraine à l'avenir.

A7 | Quantités d'eau: autres influences

Gestion quantitative dans l'industrie et l'artisanat

L'industrie manufacturière et l'artisanat ont eux aussi besoin d'un approvisionnement en eau fiable, à un prix avantageux. Traditionnellement, ce sont les industries chimique,

métallurgique et du papier qui présentent les besoins les plus élevés; les usines d'incinération de déchets ménagers comptent également parmi les plus grands consommateurs d'eau (p. ex. pour le lavage des gaz de fumée et le refroidissement).

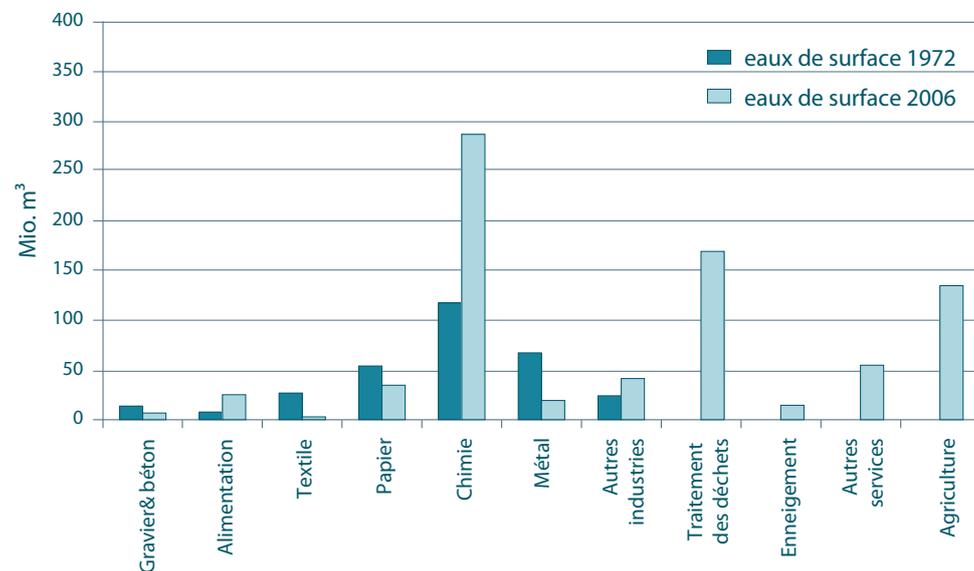
A l'heure actuelle, les autorités ne recensent pas systématiquement les utilisations de l'eau par l'industrie. D'après la SSIGE, les cantons ne disposent de données complètes sur les quantités prélevées que dans des cas exceptionnels [82].

Les chiffres publiés pour 2006 sont tirés d'un sondage effectués par la SSIGE et reposent sur la seule déclaration des industries. Aucun chiffre plus récent n'est disponible [83]. Le changement structurel de l'industrie et la disparition de secteurs faisant un usage intensif de l'eau sont mis en évidence par des modèles de consommation d'eau fortement modifiés. La consommation d'eau de la plupart des secteurs a nettement reculé depuis 1972. Seule l'industrie chimique utilise sensiblement plus d'eau aujourd'hui en raison de sa forte croissance (cf. ill. 10) [82]. Les entreprises industrielles n'achètent qu'une partie de l'eau dont elles ont besoin auprès des fournisseurs publics d'eau potable; elles prélèvent le reste dans leurs propres puits ou des cours d'eau («auto-alimentation»). Ces 30 dernières années, de nombreuses entre-

A gauche: Le barrage de Tseuzier à Crans-Montana, initialement construit pour assurer la production d'électricité, est désormais également utilisé pour l'approvisionnement en eau potable et l'enneigement des pistes. (MONTANAQUA)

Au milieu: L'enneigement a lieu d'octobre à décembre, soit longtemps avant le début de la saison de ski, lorsque le débit des cours d'eau est particulièrement bas. Des bassins de retenue sont construits, comme ici à Lenzerheide, pour assurer l'enneigement artificiel des domaines skiables. (Photo: Reportair)

A droite: Les modèles d'utilisation intensive tels qu'ils sont appliqués dans les bassins versants des Alpes sont-ils compatibles avec les ressources attendues à l'avenir? Le projet MONTANAQUA a étudié cette question à la lumière de l'exploitation de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre. (MONTANAQUA)



III. 10: auto-alimentation de l'industrie en eaux de surface entre 1972 et 2006 [82].



A gauche: L'absence de précipitations sur une longue période entraîne l'assèchement de certains cours d'eau en Suisse également. Il s'agit en particulier des cours d'eau dont le bassin versant n'a ni glacier ni lac, comme la Töss ou l'Emme supérieure. (DROUGHT-CH)

Au milieu: Afin d'assurer l'approvisionnement en eau pendant des épisodes de sécheresse prolongée, toutes les communes doivent à l'avenir pouvoir être approvisionnées par deux ressources indépendantes: petit réservoir d'eau. (DROUGHT-CH)

A droite: En 2013, la Suisse comptait une centaine de terrains de golf. La surface totale occupée par ces terrains a triplé, passant de 832 à 3141 hectares depuis la fin des années 1980. (MONTANAQUA)

prises sont passées du réseau public à l'auto-alimentation. Durant la période d'observation (de 1972 à 2006), l'approvisionnement en eau de l'industrie a connu un changement marqué, l'eau souterraine et de source (-29%) étant délaissée pour l'eau de surface (+34%); ainsi, en 2006, l'eau de surface était quasiment trois fois plus utilisée que l'eau souterraine [82]. Chose étonnante, la SSIGE indique qu'en 2006 en Suisse, les prélèvements privés ont été plus importants que l'approvisionnement public (environ 25% en plus) et ont été effectués en majorité (64%) à partir d'eaux de surface (à ce sujet, cf. la synthèse thématique 1 du PNR 61) [82].

Ces données ne tiennent pas compte des eaux de refroidissement des centrales nucléaires. Par conséquent, une grande partie des quantités d'eau prélevées par les industries n'est pas connue des autorités (uniquement les quantités maximales des concessions). Cette méconnaissance concerne également l'eau souterraine et les sources qui pourraient être utilisées comme eau potable, dont au moins un tiers est utilisé à d'autres fins que l'approvisionnement en eau public, et notamment – outre les utilisations industrielles – pour l'agriculture [82].

Seul le canton de Bâle-Campagne possède des données récentes sur la consommation d'eau dans le secteur de l'industrie. Celles-ci indiquent que les prélèvements de l'industrie et de l'artisanat dans le réseau d'eau potable entre 1995 et 2012 ont reculé d'environ un quart. Dans le même temps, l'auto-alimentation dans les eaux souterraines, opéré en majeure partie par l'industrie, a augmenté de 27%. Globalement, l'utilisation d'eau issue du réseau d'eau potable et de sources propres par l'industrie entre 1995 et 2012 a augmenté d'environ 20%. Dans le canton de Bâle-Campagne, l'eau souterraine est plus souvent prélevée à partir de sources privées qu'elle ne l'est pour la production d'eau publique [84].

Gestion quantitative pour l'enneigement

D'un point de vue quantitatif, l'enneigement occupe une place peu importante en Suisse. Les enneigements interviennent au niveau local et lorsque le débit des eaux est au plus bas dans les ruisseaux alpins. Toujours réalisé à titre préventif, donc indépendamment des chutes de neige naturelles, l'enneigement a généralement lieu à partir d'octobre et per-

met de garantir la praticabilité des pistes à Noël (ou, très souvent, début décembre déjà). A l'heure actuelle, environ 40% des pistes de Suisse sont enneigées artificiellement et d'autres aménagements de grande envergure sont en cours de planification. Saint-Moritz prévoit ainsi de construire un grand bassin d'accumulation et de procéder au captage des ruisseaux de montagne dans le domaine skiable de Corviglia [85].

S'il n'existe aucune vue d'ensemble des autres constructions prévues, il faut s'attendre à voir apparaître d'autres projets de ce genre, précisément dans les stations de ski à moyenne altitude (p. ex. Schwende, AI, 2012) [86]. A Zermatt, où 70% des pistes peuvent déjà être enneigées, le but est de parvenir à un enneigement intégral dans les années à venir.

Conflits et synergies potentiels

Conflits avec les débits résiduels

Il est extrêmement vraisemblable que des conflits relatifs à l'utilisation des ressources en eau apparaissent dans les vallées sèches intra-alpines du Valais et des Grisons, mais ces derniers sont difficiles à identifier en raison de l'absence de données ad hoc. Puisque l'enneigement dépend entièrement des ressources d'eau locales, il faut s'attendre à ce que les débits résiduels connaissent de graves problèmes [87]. Afin d'éviter un prélèvement d'eau excessif dans les sources et les ruisseaux alpins durant les mois secs, on mise en de nombreux lieux sur la construction de bassins d'accumulation dans les domaines skiables [85].

Conflits potentiels avec l'approvisionnement en eau potable

Comparées aux besoins locaux en eau potable, les quantités d'eau utilisées pour l'enneigement sont loin d'être négligeables. Le projet de recherche MONTANAQUA du PNR 61 a démontré que, en 2010, le domaine skiable de Crans-Montana avait utilisé une quantité d'eau correspondant à 5 à 10% du besoin en eau potable pour l'enneigement [88]. Dans d'autres domaines, les quantités utilisées sont bien plus conséquentes: à Davos, pendant la saison d'hiver 2006/2007, près de 600 000 m³ d'eau ont été utilisés pour l'enneigement artificiel, soit environ 21,5% de la consommation annuelle d'eau potable; à Scuol, la quantité a atteint 36,2% [89].

Gestion quantitative pour les terrains de golf

En 2013, la Suisse comptait une centaine de terrains de golf. La surface totale occupée par ces terrains a plus que triplé de 832 à 3141 hectares depuis la fin des années 80 [90]. Les besoins en arrosage peuvent fortement varier d'un terrain à l'autre. Là où l'eau est prélevée dans le réseau d'approvisionnement en eau potable, les quantités nécessaires sont susceptibles de représenter une part importante de la consommation. On estime qu'un terrain de golf typique situé sur le Plateau nécessite 35 000 m³/a d'eau, pour un prélèvement moyen de 500 m³/j pendant les mois d'été. Pendant la saison d'arrosage, ce volume correspond à la consommation domestique d'environ 2000 habitants [91]. Seuls de grands fournisseurs en eau ou des associations de grande taille qui disposent d'infrastructures suffisamment grandes et de ressources abondantes sont à même de fournir de telles quantités d'eau. Dans les régions sèches notamment, la disponibilité en eau locale peut atteindre ses limites du fait de l'arrosage des terrains de golf, ce qui risque d'engendrer, dans les années chaudes et sèches, des conflits avec l'approvisionnement en eau potable ou les débits résiduels. Pour prévenir ces conflits, il serait en principe envisageable d'utiliser des eaux usées épurées pour les terrains de golf.

Impact des travaux publics et de la construction de routes et de tunnels

En Suisse, l'augmentation de la densité urbaine se traduit par un développement de la construction de voies de communication et de bâtiments dans le sous-sol. Ces ouvrages (tunnels, parkings souterrains ou entrepôts) empiètent fréquemment sur les eaux souterraines, ce qui peut entraver leur courant et influe sur leur disponibilité en aval. La plupart du temps, l'épandage de gravier tout autour des bâtiments permet de garantir la perméabilité. Dans une majorité de cantons, ce type de mesures fait d'ores et déjà partie des réglementations relatives à la construction. Certains ouvrages déjà construits dans le sous-sol causent de gros problèmes: par exemple le tunnel de St Johann à Bâle, qui forme une barrière de plusieurs kilomètres dans les eaux souterraines et génère des effets de refoulement et de détournement considérables [92].

A8 | Durcissement des conflits durant les épisodes de sécheresse prolongée

Après la canicule de 2003 et le printemps anormalement sec de 2011, il est apparu que la sécheresse et les températures élevées pouvaient entraîner des conséquences désagréables en Suisse, malgré la richesse en eau du pays. Le changement climatique engendrera des can-

Comment la Suisse réagit-elle face aux périodes de sécheresse?

Enseignements du projet DROUGHT-CH du PNR 61

Pour être en mesure de réagir à temps face à un épisode de sécheresse, il est primordial de disposer de prévisions aussi étendues que possible sur l'ampleur et la durée de la disponibilité réduite de l'eau. Le projet DROUGHT-CH visait à jeter les bases d'un système de détection précoce des épisodes de sécheresse en collaboration avec des utilisateurs intéressés. Dans le cadre des prévisions de ces épisodes à moyen terme, l'état des réserves d'eau est plus important que les précipitations et les débits. En effet, la réaction lente des réserves permet par exemple de prévoir un étiage dans les cours d'eau sur une période nettement plus longue (>20 jours) que les prévisions relatives aux crues, celles-ci étant fortement influencées par les précipitations [93]. Les réserves les plus importantes sont les sols humides, les eaux souterraines, la neige et la glace, dont les relevés précis sont en cours de mise en œuvre sur le territoire suisse [94]. Le projet a pu démontrer qu'il est tout à fait possible de prévoir le degré d'humidité du sol deux semaines à l'avance. L'objectif est de rendre ces prévisions accessibles sur la plateforme d'information nationale relative aux épisodes de sécheresse www.drought.ch.

Les enquêtes et les ateliers réalisés dans le cadre du projet DROUGHT-CH ont mis en lumière le profond besoin du secteur de l'agriculture, mais aussi d'autres activités dépendant de l'eau telles que l'énergie hydraulique et la navigation, en matière de prévisions des épisodes de sécheresse [95]. D'après un sondage réalisé auprès d'arboriculteurs du Nord-Ouest et du Nord-Est de la Suisse, de meilleures prévisions en matière de sécheresse ainsi que des données sur l'évapotranspiration et l'humidité du sol actualisées au quotidien seraient utiles pour adapter suffisamment tôt la gestion des cultures. Afin que les utilisateurs puissent effectivement réagir face à la sécheresse, il est également nécessaire de mettre en place des systèmes leur permettant d'agir, par exemple des aménagements pour le stockage de l'eau.

Selon les chercheurs, la détection précoce d'épisodes de sécheresse reste très complexe. Le printemps 2011, précédé d'un hiver sec, a de nouveau démontré que le niveau de remplissage des réservoirs d'eau jouait un rôle crucial dans le développement d'épisodes de sécheresse. Si le printemps 2003 avait été aussi sec que celui de 2011, les répercussions de la canicule de l'été 2003 auraient été bien plus graves. Ainsi, les conditions de l'année 2003 en matière de sécheresse sont loin de représenter la pire situation que l'on pourrait imaginer, ce qui est également vrai pour les conditions climatiques actuelles et futures, et a été prouvé par des relevés historiques (cf. encadré page 32). Le projet DROUGHT-CH n'a pas seulement réalisé des avancées considérables dans la compréhension de la sécheresse en Suisse: il a également réussi à sensibiliser les cercles concernés à l'éventualité de l'apparition d'événements extrêmes.

«La plateforme d'information «Sécheresse» joue un rôle essentiel pour les projets de l'AGRIDEA visant à adapter l'agriculture au changement climatique. Elle pourrait également être utilisée dans les écoles d'agriculture.»

Bettina Marbot
AGRIDEA



Pour plus d'informations  [DROUGHT-CH sous www.pnr61.ch](http://www.pnr61.ch)

cules et une baisse des précipitations estivales en Suisse également. Fort de ce constat, le projet DROUGHT-CH du PNR 61 a cherché à mieux comprendre le phénomène des sécheresses et leurs répercussions. L'étiage – même s'il n'est que temporaire – mène inévitablement à l'intensification de la concurrence entre les différentes utilisations. Selon la quantité d'eau alors disponible, toutes les exigences ne pourront plus être satisfaites et, le cas échéant, il y aura lieu de définir des méca-

nismes de hiérarchisation des utilisations de l'eau en fonction de facteurs vitaux. Dans ce contexte, la fiabilité des prévisions des épisodes de sécheresse joue un rôle primordial.

Sécheresse: combien de temps la Suisse peut-elle fonctionner sans pluie?

Au cours des derniers siècles, la sécheresse a régulièrement provoqué d'importants dégâts en Suisse. On recense 24 sécheresses estivales entre 1500 et 1995. En 13 ans, la sécheresse s'est étendue sur une période de six mois. Les conditions étaient particulièrement difficiles au XVII^e et au XVIII^e siècle, lesquels ont connu à plusieurs reprises deux étés de sécheresse consécutifs; entre autres, les années 1660 à 1662 ont été caractérisées par trois années consécutives de sécheresse [96].

Les relevés historiques sont instructifs et permettent d'estimer l'ampleur des phases de sécheresse prononcées et persistantes. En 1540, le niveau de grands fleuves comme le Rhin avait également fortement baissé et les plus petits cours d'eau, comme la Wiese et la Suhre, étaient déjà complètement asséchés en juillet. La dernière source d'eau fiable restait les rivières bénéficiant de l'effet tampon des lacs ou alimentées par des glaciers [96].

Au printemps 2011, suite à un hiver doux et sec, la fonte des neiges n'a pas permis de faire monter les débits des cours d'eau, ce qui a donné lieu à des interdictions de prélèvement dans de nombreux ruisseaux et rivières. La situation s'est ensuite arrangée grâce aux précipitations tombées en mai et à un mois de juillet frais et pluvieux.

Mais qu'advierait-il si un hiver doux et sec comme celui de 2011 était suivi par un été chaud et sec comme celui de 2003? Les comptes rendus sur la sécheresse estivale que le Plateau a connue en 1947 nous donnent une idée de ce qui pourrait se passer. Après cette sécheresse, les agriculteurs se trouvèrent dans l'impossibilité de faucher leurs herbages une deuxième fois et le fourrage est venu à manquer. Les cultures de pommes de terre et de céréales fournirent un faible rendement. Les pertes de revenus agricoles en 1947 ont été estimées à environ 300 millions de francs (près d'un sixième du rendement total) [96].

L'Office fédéral de la protection de la population (OFPP) a esquissé les répercussions d'une sécheresse prolongée dans un scénario présentant des événements d'intensité «majeure» [97]. La situation de départ de ce scénario est similaire à celle de 2011. Dans ces conditions, il faut s'attendre à des situations critiques dès le mois de mai, le niveau des eaux souterraines les plus importantes ayant déjà subi une forte baisse à cette époque. Pour la suite du scénario, l'OFPP prévoit des vagues de chaleur de courte durée et cinq mois sans pluie. D'après l'OFPP, ce scénario aura les répercussions suivantes sur les eaux et leurs utilisations:

- ▶ forte baisse du niveau des cours d'eau et des lacs, entraînant la détérioration des écosystèmes aquatiques, et mortalité piscicole anormale dans de nombreux cours d'eau et lacs;
- ▶ irrigation insuffisante de certaines surfaces agricoles utiles, pertes de récolte à partir de septembre au plus tard; de nombreux agriculteurs voient leur existence menacée;
- ▶ production électrique des centrales hydrauliques au fil de l'eau limitée jusqu'à 25%, jusqu'à 10% de production électrique en moins pour les centrales à accumulation;
- ▶ interruption de la navigation sur le Rhin à partir de mi-août;
- ▶ baisse sensible des débits de source, situation difficile pour certains approvisionnements en eau potable à compter du mois d'août.

La conclusion selon laquelle la Suisse peut être touchée par une sécheresse lourde de conséquences après seulement quelques mois secs malgré ses quantités de pluie et de neige, tirée de ces événements historiques, a été confirmée par le projet DROUGHT-CH du PNR 61. Le scénario mentionné ci-dessus correspond à des événements d'une intensité «majeure», mais l'OFPP n'écarte pas l'éventualité d'événements d'une intensité «extrême», par exemple suite à des sécheresses généralisées sur deux années consécutives (comme en 1718/1719 et 1723/1724). Aucune expérience passée ne peut nous préparer à des situations exceptionnelles aussi extrêmes. Toutefois, la société, l'administration et l'économie de la Suisse doivent pouvoir réagir de manière adéquate face à de telles conditions.

Bilan Partie A

Gestion des quantités d'eau

En Suisse, l'eau fait l'objet d'une utilisation et d'une gestion intensives. La matrice A récapitule les résultats de la partie A en les accompagnant de brèves notes explicatives. Evoquons en premier lieu l'énergie hydraulique, qui capte de grandes quantités de ressources en eau aux fins de production d'électricité, les turbine et les reconduit, parfois très irrégulièrement, dans les cours d'eau. Ces processus entraînent la dégradation écologique des cours d'eau, notamment dans les régions montagneuses, en raison de l'insuffisance des débits résiduels et des effets d'écluse en aval. Ensuite, le secteur de l'agriculture utilise des quantités d'eau considérables pour l'irrigation dans certaines régions. Les prélèvements sont notamment considérables dans les cours d'eau de petite et moyenne taille des Préalpes et du Plateau et sont susceptibles de créer des conflits relatifs aux débits résiduels pendant les périodes de sécheresse. A ce jour, l'impact quantitatif de l'agriculture sur les eaux souterraines n'est que très peu connu.

Enfin, la forte densité d'urbanisation sur le Plateau s'avère être une importante cause de conflits, du fait des diverses exigences en

matière d'utilisation de l'eau et des impacts variés sur l'eau qui y sont associés. La production d'eau potable et la production de chaleur entrent de plus en plus fréquemment en concurrence. Souvent, dans les zones où une extension du prélèvement d'eau ou le remplacement de captages d'eau s'avère nécessaire, aucun autre réservoir exploitable ne se trouve à proximité. Par conséquent, en raison de la concurrence existant entre différentes utilisations du territoire, les eaux souterraines exploitables se raréfient (cf. partie D).

L'impact des activités humaines est largement plus important que celui du changement climatique, non seulement sur le Plateau – exploité de manière intensive –, mais aussi dans certaines zones de régions montagneuses. Le projet MONTANAQUA du PNR 61 (cf. encadré page 17) a étudié la disponibilité et l'utilisation des ressources en eau d'un bassin versant alpin du Valais. S'il est avéré que le changement climatique réduira sensiblement les ressources en eau pendant les années sèches, les processus socio-économiques n'en auront pas moins un impact bien plus important sur le bilan hydrique – voilà l'une des conclusions principales du PNR 61.

Matrice A – Conflits et synergies potentiels relatifs à la gestion des quantités d'eau

Partie	Se répercute sur...	Energie hydraulique	Protection des eaux	Protection contre les crues ^(a)	Agriculture	Approvisionnement en eau potable	Tourisme (enneigement)
	Exigence sociale						
A1	Energie hydraulique		1	2	3	neutre	4
A2	Protection des eaux	5/6		7	8	9	neutre
A3	Protection contre les crues	10	11		12	12	neutre
A4	Agriculture	neutre	13/14	15		13	13
A5	Approvisionnement en eau potable	neutre	14	neutre	13		13
A6	Tourisme (enneigement)	4	13	neutre	13	13	

■ synergie ■ conflit important ■ conflit ■ synergie et conflit

- Les situations considérées comme des conflits importants concernent de longs tronçons fluviaux ou de grandes quantités d'eau, ou entravent d'autres intérêts dans une très large mesure.
- En général, les conflits et/ou concurrences interviennent au niveau local ou régional, ou selon les saisons, et sont aggravés par la sécheresse et par des températures élevées.
- (a) Les activités de protection contre les crues ne sont pas consommatrices d'eau. Par conséquent, cette colonne indique l'impact sur l'efficacité de la protection contre les crues. A l'inverse, la protection contre les crues exerce une influence sur les quantités d'eau et peut indirectement restreindre la quantité d'eau disponible pour d'autres consommateurs (cf. ligne A3).

- (1) L'énergie hydraulique est la principale concurrente en ce qui concerne les débits résiduels des rivières et les effets d'écluse.
- (2) Débits de pointe diminués du fait des barrages; fortes pertes de production hydroélectrique potentielle du fait de la retenue d'eau dans les lacs lors de crues.
- (3) Pendant les périodes de sécheresse, l'agriculture pourrait éventuellement obtenir davantage d'eau en provenance des bassins d'accumulation. Stabilisation du débit → ressources plus régulières.
- (4) Energie hydraulique et enneigement artificiel: concurrence ou utilisation combinée (exemple d'utilisation combinée: Zermatt).
- (5) L'exploitation de l'énergie hydraulique est limitée dans les zones revitalisées.
- (6) Les exigences relatives au débit résiduel et l'assainissement des éclusées réduisent l'exploitation de l'énergie hydraulique.
- (7) Les impacts de la revitalisation et de la protection contre les crues vont dans le même sens.
- (8) Les exigences relatives au débit résiduel réduisent la quantité d'eau disponible pour l'irrigation.
- (9) Les revitalisations augmentent les volumes d'eau souterraine alimentés par des rivières et accroissent ainsi la disponibilité de l'eau potable. Toutefois, des problèmes de qualité de l'eau rendent parfois les revitalisations incompatibles avec les captages d'eau potable (cf. page 43).
- (10) La gestion «conservatrice» des lacs aux fins de protection contre les crues peut entraver la production hydroélectrique (p. ex. lac de Biene et centrales au fil de l'eau en aval).
- (11) Les ouvrages de protection des berges accélèrent le courant.
- (12) Les ouvrages de protection des berges accélèrent le courant, réduisant le renouvellement de l'eau souterraine et diminuant ainsi la disponibilité de l'eau pour la production d'eau potable et l'agriculture.
- (13) Concurrence directe concernant les quantités (cours d'eau, eau souterraine).
- (14) Les prélèvements agricoles peuvent entraîner une baisse du niveau des eaux souterraines et provoquer des dégâts écologiques sur les écosystèmes dépendant de ces eaux souterraines. Les captages d'eau de source entraînent la disparition de milieux humides naturels.
- (15) Les drainages peuvent éventuellement accélérer le débit et augmenter les débits de pointe.

Partie B – Qualité de l'eau

Les propriétés chimiques, physiques et biologiques de l'eau déterminent à quelles utilisations elle se prête et quelles sont ses répercussions sur les écosystèmes aquatiques. La détérioration chimique et biologique de la qualité de l'eau est un effet secondaire dû à d'autres utilisations. Les modifications de nature physique peuvent survenir directement lorsque la chaleur est soustraite à l'eau. Par ailleurs, des conflits portant sur la qualité de l'eau peuvent survenir entre deux utilisations, lorsque l'une est tributaire d'une qualité d'eau spécifique et que l'autre entraîne une diminution de cette qualité.

B1 | Eaux de surface: apports de substances issues des zones urbaines

Les zones urbaines exercent une influence considérable sur la qualité des eaux (consulter la synthèse thématique 3 «Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse – défis et mesures possibles» du PNR 61 pour plus de détails sur la gestion des eaux urbaines). Les apports de substances dans les eaux de surface sont dus en premier lieu aux stations d'épuration; seule une petite partie des apports issus de zones urbaines débouche dans les eaux par d'autres voies, parmi lesquelles trois jouent un certain rôle.

- ▶ Si, en cas de forte pluie dans les zones urbaines dont l'eau est évacuée via un réseau d'assainissement unitaire (70% de la surface urbaine en Suisse), le système de canalisations ne peut pas capter la totalité des précipitations, une partie des eaux usées est déversée dans les cours d'eau sans avoir été traitée. Les quantités qui s'écoulent par temps sec sont déterminantes pour l'apport de polluants: env. 3,5% du volume annuel des eaux usées domestiques sont ainsi directement déversés dans les cours d'eau via des déversoirs d'orage [98], [99].
- ▶ Dans les zones où l'eau de pluie est collectée par un réseau séparatif (30% de la surface urbanisée), des substances telles que les produits chimiques liés à la construction (p. ex. biocides ou métaux lourds pouvant être lessivés à partir des enveloppes de bâtiment) se retrouvent également dans les eaux de surface par le biais du déversement d'eau de pluie.
- ▶ D'après les estimations des cantons, environ 10% des produits chimiques introduits de manière diffuse dans les zones urbaines s'infiltrent également dans l'eau souterraine [100]. Une grande partie des micropolluants présents dans l'eau souterraine proviendrait des canalisations de biens-fonds non étanches: en Suisse, on estime que 50% des systèmes d'évacuation des eaux d'immeubles privés ne sont pas étanches [101], [102]. Cependant, les recherches sur

la proportion de ces apports dans l'eau souterraine sont rares.

Les canalisations et les stations d'épuration publiques sont les principales installations permettant de réduire la pollution des eaux urbaines. En 2000, les stations d'épuration, dont la construction a commencé à grands frais dans les années 60, couvraient pratiquement tous les ménages (97%) [103]. La valeur de remplacement des stations d'épuration s'élève aujourd'hui à 13,6 milliards de francs, auxquels s'ajoutent 66,4 milliards de francs pour les canalisations publiques (cf. également la synthèse thématique 3 du PNR 61) [104].

À l'origine, les stations d'épuration étaient prévues pour retenir les agents pathogènes et décomposer la matière organique. L'élimination de l'azote, du phosphore et des produits chimiques non polaires (sorption des boues d'épuration) est venue s'ajouter ensuite. Sans ces stations d'épuration, la production d'eau potable à partir d'eau souterraine alimentée par les eaux fluviales ne serait probablement plus possible en maints endroits. Les lacs bénéficient eux aussi largement de l'élimination des substances nutritives par les stations d'épuration.

Les eaux usées contiennent une multitude de substances, provenant des utilisations les plus variées. Selon les estimations, 30 000 substances sont utilisées au quotidien en Suisse [105]. Si la majorité de ces substances est complètement dégradée ou retenue par les stations actuelles, certaines sont persistantes et se retrouvent dans les eaux.

L'amélioration technique des équipements des stations d'épuration (ozonation, charbon actif), approuvée en 2014, permettra d'augmenter fortement leur capacité d'assainissement [106]. Les quelques 100 stations qui promettent la plus forte réduction de micropolluants seront ainsi réaménagées – les plus grandes dans un premier temps, puis celles qui se trouvent dans le bassin versant de lacs. Ensuite, il conviendra d'améliorer l'équipement des stations d'épuration dont les eaux usées (rejetées) contribuent à plus de 10% au débit total du cours d'eau récepteur.

L'amélioration de l'équipement des stations d'épuration ne permettra pas d'éliminer complètement les apports de micropolluants. Par temps de pluie, une partie de l'eau usée continue d'être déversée dans les rivières par l'intermédiaire des déversoirs d'orage. De plus, certains produits chimiques résistent à la nouvelle technologie d'assainissement [107]. Cette situation étant jugée insatisfaisante, l'OFEV réfléchit à des mesures étendues à appliquer à la source – à l'instar des mesures ayant fait leurs preuves dans le cadre de l'interdiction des phosphates dans les lessives. Il serait également utile d'établir, à l'intention des autorités, un répertoire des produits

La présente partie décrit, selon les différents types d'utilisations, les apports de substances importants dans les eaux de surface et les eaux souterraines ainsi que leur impact sur d'autres utilisations des eaux et sur les milieux naturels aquatiques. Il traite également de l'échange d'énergie thermique dû au chauffage ou au refroidissement.



A gauche: Le degré de pollution des eaux engendré par l'agriculture dépend fortement des méthodes de culture pratiquées: l'agriculture biologique renonce, par exemple, aux produits phytosanitaires synthétiques. (Photo: Felix Luder)

Au milieu: La construction de stations d'épuration des eaux usées depuis les années 1970 a considérablement amélioré la qualité de l'eau des cours d'eau et des lacs. Afin d'éliminer également les polluants persistants rejetés par les ménages et l'industrie, il faut cependant encore améliorer les techniques d'épuration. Chercheurs à la station d'épuration des eaux usées de Mönchaltorf (ZH). (SWIP)

A droite: Les jardins privés et ouvriers sont également considérés comme une source de pollution en produits phytosanitaires et en nitrates. (Photo: Reportair)

chimiques utilisés dans la production et les produits de consommation, qui permettrait de détecter plus rapidement les substances critiques et de les comparer avec les pollutions constatées dans l'environnement.

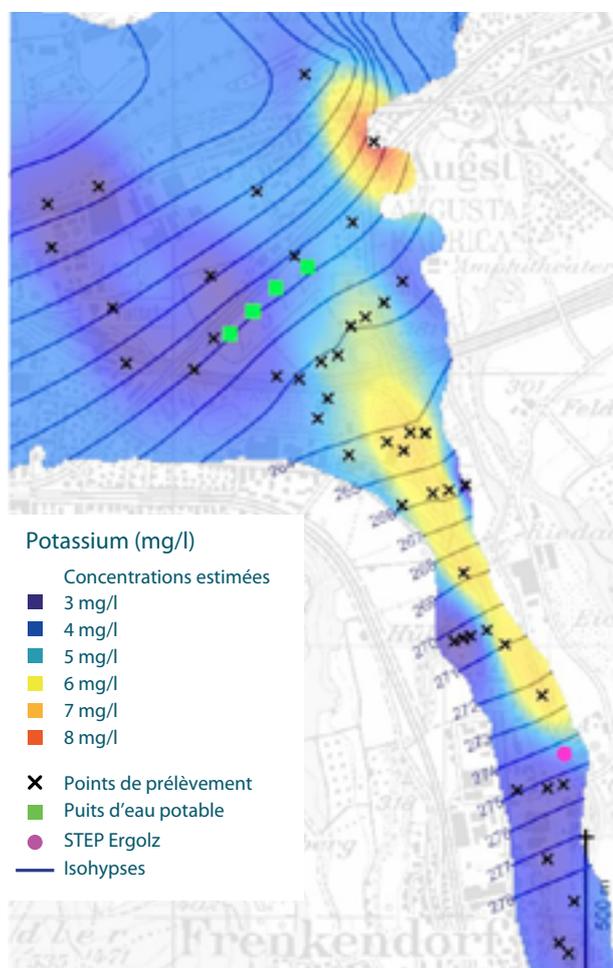
Conflits et synergies potentiels Conflits avec l'approvisionnement en eau potable

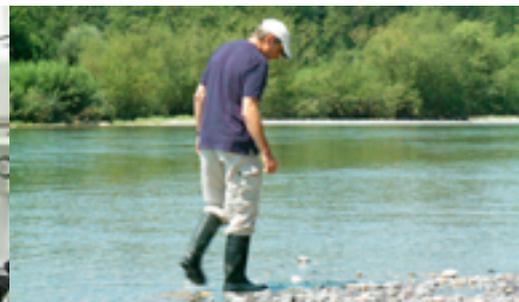
En Suisse, une partie considérable de l'eau potable provient de ressources en eau dont la qualité peut être influencée par les stations d'épuration. Ces ressources sont, en premier lieu, les aquifères situés dans des roches meubles et alimentés par des rivières, les lacs (20% de l'approvisionnement en eau potable) [108] et enfin les nappes d'eau souterraine rechargées artificiellement avec de l'eau fluviale (p. ex. Bâle, Genève, Zurich). Dans ces dernières, on porte une attention particulière aux

micropolluants et agents pathogènes provenant des rejets des stations d'épuration. D'après l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), la présence de micropolluants n'est de manière générale pas souhaitable dans les eaux naturelles et l'eau potable. Afin d'éviter les apports dans les eaux, l'origine et le lieu de dépôt des micropolluants sont passés au crible. Une étude réalisée par le canton de Berne a ainsi analysé l'eau de l'Aar et de ses affluents situés au-dessus de Berne, à partir desquels les réserves d'eau potable de la ville de Berne sont alimentées. En aval de certaines stations d'épuration, on a trouvé des produits pharmaceutiques et des produits destinés à leur dégradation, d'autant plus que, conformément aux prévisions, plus l'écoulement d'eau d'une rivière était faible, plus la part des eaux usées était élevée [109].

III. 11: écoulement des eaux usées dans les eaux souterraines via la partie basse de l'Ergolz (BL), illustré au moyen des concentrations de potassium [110].

(graphique: Dominik Bänninger, AUE BL)





Dans l'agglomération de Liestal, dans le canton de Bâle-Campagne, les eaux usées communales sont déversées par la station d'épuration dans l'Ergolz. Les quantités concernées sont considérables pour un petit cours d'eau. Par temps sec, les eaux usées peuvent constituer jusqu'à 40% de son débit. Sous la station d'épuration, l'eau de l'Ergolz s'infiltré dans les nappes aquifères situées dans les roches meubles. Quatre captages d'eau potable de grande importance se trouvent à moins de deux kilomètres en aval (cf. ill. 11).

Au total, 285 produits chimiques ont été trouvés dans les rejets de la station d'épuration et dans l'Ergolz [110]. Entre 20 et 25% des substances ont également été relevés dans l'eau souterraine. La plupart d'entre elles sont transportées sur de longs tronçons jusqu'à l'aquifère et se retrouvent jusque dans les captages d'eau potable. A titre de mesure d'urgence, le point de déversement des stations d'épuration a été temporairement déplacé en aval, là où l'Ergolz n'influence plus les ressources d'eau potable. A l'avenir, une quatrième étape d'assainissement sera ajoutée à la station d'épuration de Liestal [110].

Les résultats des recherches menées dans les cantons de Berne et de Bâle-Campagne sont caractéristiques des ressources en eau potable à forte teneur en eau fluviale. Les concentrations de micropolluants trouvées

dans l'eau brute sont comprises entre 0,01 et 0,1 µg/l, mais dépassent parfois la valeur préventive de 0,1 µg/l fixée par l'Office fédéral de la santé publique pour les substances génotoxiques [110].

Le projet RIBACLIM du PNR 61 a examiné les répercussions supplémentaires de la hausse des températures due au changement climatique sur la qualité de l'eau potable produite à partir d'eau souterraine alimentée par les rivières (cf. encadré ci-dessous). Environ un tiers de l'eau potable en Suisse provient de captages d'eaux souterraines situés à proximité de rivières et dont la qualité dépend fortement du taux d'infiltration d'eau fluviale.

Conflits avec l'écologie des eaux

Il existe environ 700 stations d'épuration communales et régionales en Suisse et leurs rejets affectent près de 4800 km de tronçons fluviaux [106]. Plus les cours d'eau touchés sont petits, plus la part des débits résiduels est grande et plus les concentrations mesurées en substances nutritives et polluants sont élevées. Dans les cours d'eau où la part des eaux usées dans l'écoulement d'étiage est supérieure à 10% (environ 1400 km), les quantités relevées représentent un facteur de stress considérable pour les organismes aquatiques [106]. Actuellement, il est difficile de savoir si les substances ayant une incidence sur l'écologie des cours

A gauche: L'exploitation des nappes d'eau souterraine pour l'eau potable nécessite, outre une compréhension technique, des réflexions stratégiques avec un horizon de planification sur plusieurs décennies. (GW-TEMP)

Au milieu: Des tests effectués en laboratoire montrent comment les micropolluants contenus dans les cours d'eau s'infiltrent dans les nappes d'eau souterraine. (RIBACLIM)

A droite: Un phénomène invisible aux yeux de l'homme: l'échange permanent entre l'eau des grands cours d'eau des vallées et les eaux souterraines. Les micropolluants pouvant ainsi s'infiltrer dans l'eau souterraine – la principale ressource en eau potable de la Suisse –, la qualité de l'eau des cours d'eau doit faire l'objet d'un contrôle constant. (RIBACLIM)

Le changement climatique peut-il avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines? Enseignements du projet RIBACLIM du PNR 61

Parmi les répercussions attendues du changement climatique, on prévoit une baisse des quantités d'eau et une hausse des températures de l'eau des rivières. Si le débit baisse, la part des rejets des stations d'épuration et la concentration de polluants dans les cours d'eau augmentent – cela se répercute indirectement sur l'eau souterraine infiltrée. La hausse des températures de l'eau affecte également la qualité des eaux souterraines, car, lors du passage de l'eau à travers le fond de la rivière, l'oxygène qu'elle contient s'épuise plus rapidement (par réaction avec la matière organique). En temps normal, l'eau fluviale contient suffisamment de nitrates – un oxydant – pour que la dégradation de la matière organique n'entraîne une réduction et une mobilisation du manganèse et du fer qu'en cas de températures demeurant longtemps élevées. Lorsqu'ils entrent en contact avec l'oxygène de l'air lors du captage de l'eau souterraine, les ions de manganèse(II) et de fer(II) dissous forment des flocons marron, qui peuvent obstruer les filtres de fontaine et obligent à traiter l'eau potable. Si cette situation ne se présente pas lors d'étés normaux en Suisse, certains puits ont été touchés par ce type de réaction lors de la canicule de 2003. Le projet de recherche RIBACLIM est parvenu à la conclusion qu'à l'avenir également, seuls les cas de canicule persistante entraîneraient une mobilisation du manganèse et du fer et, partant, des coûts de traitement supplémentaires pour les producteurs d'eau [111]. Pour l'heure, il n'est pas nécessaire – d'après les auteurs – de prévoir d'autres étapes de traitement [112].

d'eau proviennent des ménages ou des industries. De 1998 à 2013, le projet de recherche national «Fischnetz», qui a montré combien la compréhension des mécanismes de l'écologie des cours d'eau était délicate, s'est penché de manière approfondie sur différentes raisons pouvant expliquer la baisse de la population piscicole dans les cours d'eau. Entre autres hypothèses, il a suggéré que les conditions de vie des poissons pouvaient être altérées par des produits chimiques. Les chercheurs ont conclu que l'apport de polluants était déterminant pour les populations piscicoles, tout au moins en aval des stations d'épuration et des déversoirs d'orage. Des concentrations élevées en pesticides agricoles ont également été identifiées comme étant l'une des causes possibles de la baisse des populations piscicoles [113].

Aujourd'hui encore, les répercussions des micropolluants sur l'écologie des cours d'eau ne sont que partiellement connues, notamment en raison de la variété des substances mentionnées précédemment. En raison du nombre élevé de substances relevées, mais également d'autres facteurs pertinents (substances nutritives, température, morphologie), il est toujours aussi difficile d'établir une corrélation entre l'état écologique d'un cours d'eau et son taux de pollution.

B2 | Eaux de surface: apports de substances issus de l'industrie et de l'artisanat

Historiquement, les entreprises industrielles et artisanales se sont toujours établies le long des cours d'eau. Pour elles, l'eau présente plusieurs intérêts: d'une part, elle fournit de l'énergie hydraulique, d'autre part, elle est disponible à la fois pour la production et l'évacuation des déchets. Il existait peu de réglementations relatives à l'assainissement des eaux usées industrielles jusque dans les années 60. L'entrée en vigueur de législation sur la protection des eaux a permis de diminuer fortement les apports. Dans ce contexte, les utilisations industrielles et artisanales doivent entre autres veiller

- ▶ «à générer aussi peu d'eaux polluées et à évacuer aussi peu de substances pouvant polluer les eaux que cela est possible sur le plan de la technique et de l'exploitation tout en restant économiquement supportable;
- ▶ à ce que les eaux usées non polluées et les eaux de refroidissement soient séparées des eaux polluées;
- ▶ à ne pas diluer les eaux usées polluées ni les mélanger à d'autres eaux à évacuer en vue de satisfaire aux exigences [114].»

A l'exception de la grande industrie, les entreprises industrielles et artisanales déversent leurs eaux usées dans les stations d'épuration communales. La part des eaux usées provenant du secteur industriel et artisanal est en partie indiquée dans les rapports annuels des stations d'épuration, mais la plupart des can-

tons ne publient pas de synthèse à ce sujet. Il est avéré que la charge de polluants d'origine industrielle et artisanale dans les cantons de Berne et de Soleure correspondent (en DCO) à environ 340 000 équivalents-habitants [115]. A cela s'ajoutent les eaux usées traitées et déversées directement par quelques grandes entreprises disposant de leurs propres stations d'épuration. Pour l'heure, la vue d'ensemble relative à la pollution chimique des eaux en Suisse n'est pas bien définie. De nouvelles méthodes d'analyse, comme celles appliquées dans la station de surveillance du Rhin à Bâle, pourront à l'avenir fournir de précieuses données et permettre de concrétiser un éventuel besoin d'intervention dans le secteur industriel et artisanal [116].

Conflits et synergies potentiels

Conflit avec l'approvisionnement en eau potable et l'écologie des cours d'eau

Les connaissances sur les produits chimiques issus des entreprises industrielles et artisanales se trouvant dans les canalisations sont minimes en comparaison de la multitude de substances existantes. Souvent, l'analyse d'échantillons d'eaux usées ou de boues d'épuration est le seul moyen de remonter jusqu'aux responsables de déversements préjudiciables. Néanmoins, étant donné la quantité considérable de substances diverses dans les eaux usées, ces analyses ne sont possibles que pour des substances isolées.

L'approvisionnement en eau potable peut être affecté de deux manières par des déversements industriels: soit par l'infiltration d'eau fluviale contenant des quantités élevées d'eaux usées dans les eaux souterraines, soit lors du captage d'eau des lacs situés en aval des stations d'épuration industrielles ou communales. Le canton de Saint-Gall a ainsi constaté, à l'occasion d'une campagne de relevés réalisée en 2012 dans le lac de Zurich, des concentrations notables de micropolluants, lesquels proviennent vraisemblablement de l'industrie [117], [118].

Pour le Léman, d'où provient la quasi-totalité de l'eau potable de Genève, les industries du Valais jouent un rôle déterminant. Depuis 2004, on sait que des quantités considérables de produits chimiques, en partie inconnus, passent dans le Rhône avec les eaux usées de différentes industries pour s'écouler dans le lac. Le canton du Valais a adopté une ordonnance stipulant que la quantité maximale d'une substance libérée dans l'environnement ne devait désormais excéder 200 grammes par jour [119]. Dans le bassin versant, l'industrie chimique a réorganisé l'évacuation de ses eaux usées et incinère désormais une partie de ses déchets de production. Depuis l'entrée en vigueur de l'ordonnance en 2012, la charge annuelle de résidus de produits pharmaceutiques dans le Rhône en amont du lac Léman a diminué, passant de 2400 kg à 400 kg entre 2008 et 2012 [119].



III. 12: répercussions du changement climatique (scénarios ETHZ-CLM et SMHI) sur les fonctions agricoles «production», «érosion», «lessivage des nitrates» et «besoins en eau» sans mesures d'adaptation. Résultats regroupés pour la région de la Broye (partie supérieure) et la région du lac de Greifensee (partie inférieure) [120].

B3 | Apports de substances issus de l'agriculture

Les substances nutritives, produits phytosanitaires et produits pharmaceutiques (pour l'élevage) utilisés dans la production agricole peuvent polluer les eaux de différentes manières. Les apports de phosphate jouent un rôle particulièrement important pour les lacs, car ils contribuent à l'eutrophisation. Les cours d'eau sont tout autant affectés par les apports de substances nutritives (N, P) et de produits phytosanitaires. Même si seul 0,01 à 1% des produits phytosanitaires utilisés se retrouve dans les eaux de surface, les concentrations peuvent atteindre des valeurs significatives pour l'écotoxicologie. L'eau souterraine est avant tout affectée par des produits phytosanitaires persistants et isolés, par leurs produits de transformation et par le nitrate (cf. ci-dessous).

Influence du système de production

Chacune des activités agricoles a des répercussions spécifiques sur la qualité de l'eau. S'agissant des cultures arables, les apports de pesticides dans les eaux de surface et souterraines, le lessivage des nitrates et l'érosion occupent une place prédominante. La culture fruitière et la viticulture sont souvent liées à une pollution par les insecticides et les fongicides; et vers les pâturages, selon les bestiaux qui y paissent, on retrouve dans les eaux du phosphore, de l'azote, des métaux lourds tels que le cuivre et le zinc ainsi que des produits pharmaceutiques provenant du lisier. Les méthodes de culture et les techniques de labour constituent des facteurs déterminants: ainsi, les agricultures biologique, intégrée et conventionnelle se différencient par l'ampleur de la pollution qu'elles engendrent dans les eaux. En outre, des facteurs spécifiques à l'emplacement des cultures, tels que la déclivité, la

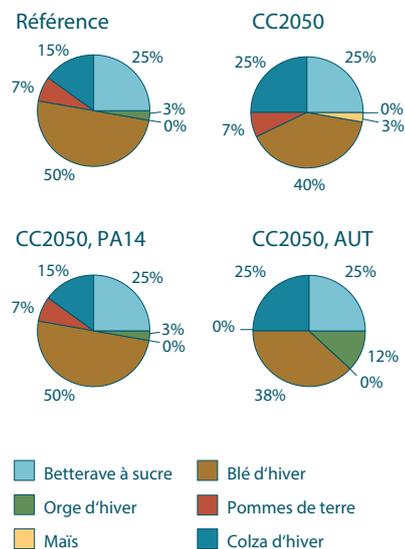
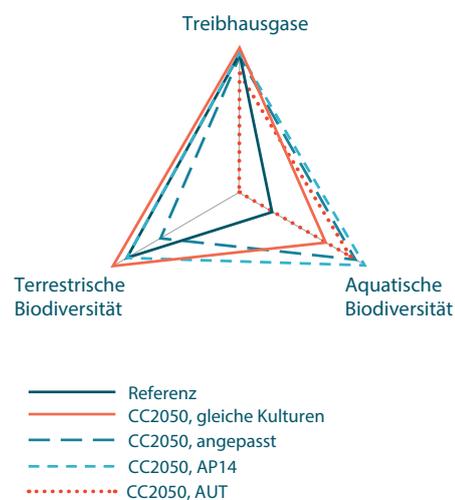
couverture des sols et le lien hydraulique avec les eaux situées à proximité, jouent un rôle important.

Le projet AGWAM du PNR 61 a montré que les conditions-cadres politiques et économiques exerceront une plus grande influence sur l'utilisation de l'eau par l'agriculture et, partant, sur les flux de substances que le changement climatique prévu d'ici à 2050 (cf. encadré ci-dessous). Les données d'IWAQA indiquent également que, en comparaison avec les impacts sociaux potentiels, liés par exemple au système de paiement direct pour les agriculteurs, le signal du changement climatique est relativement faible (cf. encadré page 40). Le rôle du climat n'est toutefois pas négligeable: d'une part, il apparaît que le danger découlant du lessivage des nitrates et de l'érosion continuera d'augmenter du fait de la hausse des précipitations en hiver; d'autre part, il n'est pas invraisemblable que de nouveaux organismes polluants apparaissent dans l'agriculture suisse suite au changement climatique, nécessitant l'élaboration de nouvelles stratégies pour la protection des végétaux [121]. En novembre 2013, plusieurs associations suisses pour l'environnement ont lancé une initiative en faveur d'une stratégie fédérale globale visant à diminuer l'utilisation des pesticides [122]. La Confédération réfléchit actuellement à la question de l'introduction d'un programme pour la réduction des pesticides, à l'exemple de nombreux états membres de l'UE [123].

Conflits et synergies potentiels

Conflit avec l'approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau potable peut être affecté par l'apparition de matières auxiliaires agricoles dans les ressources en eau.



Quel est le rôle joué par le changement climatique dans les répercussions de l'agriculture sur l'environnement? Enseignements du projet AGWAM du PNR 61

Les modélisations réalisées dans le cadre du projet montrent que, suite au changement climatique intervenant aux alentours de 2050, les répercussions environnementales et le besoin en eau dans la région de la Broye (VD/FR) connaîtront une nette hausse, tandis que la productivité agricole baissera. Dans la région plus humide du lac de Greifensee (ZH), le changement climatique amplifiera également les répercussions environnementales (érosion, lessivage des substances nutritives), sans toutefois entraîner d'augmentation en matière d'irrigation (cf. ill. 12). La baisse de la productivité à proximité du lac de Greifensee est encore plus marquée, cependant non pas en raison de la sécheresse, mais avant tout du fait de la hausse des températures.

A l'échelle des exploitations individuelles, il conviendrait d'adapter le mélange des cultures, les méthodes de fertilisation et l'intensité de l'irrigation afin de maximiser les profits sous l'influence du changement climatique. De telles adaptations se traduiraient par une intensification des répercussions environnementales (par rapport à la quantité de production), avec, entre autres, des conséquences négatives pour la biodiversité aquatique (cf. ill. 13, partie supérieure). Une exploitation de cultures arables typique de la plaine de la Broye produirait alors davantage de cultures d'hiver bénéficiant de paiements directs (p. ex. le colza d'hiver) et moins de maïs. En dépit de la pénurie d'eau, l'irrigation des cultures spéciales, comme les pommes de terre et les betteraves sucrières, demeurera rentable. Néanmoins, la rentabilité de la culture des pommes de terre diminuera si leurs prix de marché venaient à baisser (niveau UE), (cf. ill. 13, partie inférieure). Les résultats montrent clairement que le mélange des cultures est plus fortement influencé par le niveau des prix et les paiements directs (PA14) que par le changement climatique.

III. 13: culture arable dans la plaine de la Broye selon différents scénarios – climat, prix (niveau UE, AUT) et politique (paiements directs selon PA 2014–2017).

Partie supérieure: répercussions environnementales par MJ d'énergie produite (émissions de gaz à effets de serre, dégradation de la biodiversité aquatique et terrestre).

Partie inférieure: surfaces occupées par les cultures [120].

Les impacts de l'utilisation du territoire sur la qualité et l'utilité des cours d'eau: enseignements du projet IWAQA du PNR 61

L'apport de substances dans les eaux de surface est influencé d'une part par l'utilisation et la gestion du territoire, et d'autre part par les conditions climatiques (p. ex. les fortes précipitations). Mais quels sont les facteurs prépondérants? Afin d'estimer l'impact relatif du changement climatique et des développements socio-économiques sur la qualité future de l'eau et l'état écologique des cours d'eau, le projet IWAQA a développé une chaîne de modèles qui relie les processus du changement climatique aux répercussions sur l'écologie des cours d'eau.

Quatre scénarios socio-économiques (tableau 2) et huit variantes d'actions (ainsi que leur combinaison, cf. tableau 3) ont été testés dans un bassin versant typique du Plateau (Mönchaltorfer Aa, région du lac de Greifensee). La situation actuelle a été analysée à l'appui de données existantes, complétées par les résultats d'une étude de terrain.

Il s'avère que les incertitudes relatives aux prévisions sont d'ores et déjà importantes dans les conditions actuelles, plus particulièrement en ce qui concerne les précipitations et l'utilisation de produits chimiques (où, quand, combien). De plus, le manque de connaissances relatives à l'écologie de nombreuses espèces complique encore les prévisions.

Malgré ces contraintes, les résultats des modèles démontrent clairement que, à l'avenir, l'état des eaux sera principalement déterminé par les activités humaines dans les bassins versants. Le changement climatique n'aura qu'un impact limité, bien que les modifications prévues soient avant tout imputables à la hausse des températures (ill. 14).

Sous l'angle de la gestion, ces résultats signifient que les mesures qui contribuent aujourd'hui à l'amélioration de l'état écologique peuvent également atténuer la plupart des problèmes prévus à l'avenir. Mais les modèles montrent également que cela ne pourra pas être le cas pour tous les paramètres: il sera difficile d'éviter la hausse des températures moyennes dans les cours d'eau et les conséquences écologiques qui en résulteront. Un boisement des rives adapté aura certes un effet tampon sur les températures maximales, mais il ne sera guère possible d'influencer les valeurs moyennes.

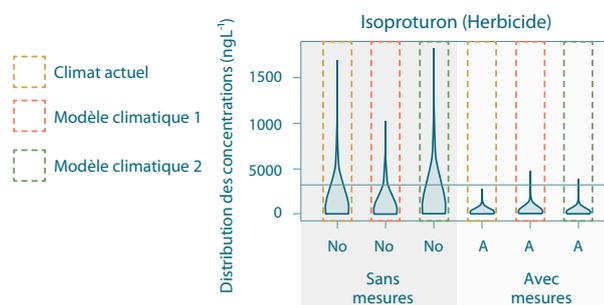
Tableau 2: description des scénarios socio-économiques utilisés dans le cadre du projet IWAQA [124].

	Revenu	Population	Urbanisation
Statu quo	+0,4% / an	Comme aujourd'hui	Comme aujourd'hui
Boom	+4%	+730%	+300%
Doom	-1,5%	-20%	-
2000 W	+2%	+20%	+5%

Tableau 3: aperçu des mesures étudiées dans le cadre du projet IWAQA.

Mesures	Domaine	Effet attendu
Interdiction de l'utilisation de biocides pour les façades	Urbanisation	Diminution de l'apport de biocides
Agrandissement des bassins de rétention des eaux de pluie	Urbanisation	Moins d'eaux usées déversées
Augmentation des revêtements permettant l'infiltration	Urbanisation	Ecoulement plus faible
Rétention des eaux de toiture	Urbanisation	Ecoulement plus faible
Equipped des stations d'épuration	Urbanisation	Apport de substances plus faible
Reconversion à l'agriculture biologique	Agriculture	Apport de substances plus faible
Boisement des rives	Agriculture	Apport de substances plus faible, ombragement
Passage aux prairies extensives	Agriculture	Apport de substances plus faible
Combinaison de toutes les mesures	Urbanisation et agriculture	Apport de substances plus faible, ombragement

Ill. 14: exemple de représentation de l'impact du climat et du recours à des mesures étendues de protection des eaux sur les concentrations en herbicides prévues en 2050. No = aucune mesure; A = toutes les mesures étudiées sont prises en compte.



Les propriétés des substances déterminent dans quelle mesure celles-ci pénétreront dans l'eau souterraine. On décèle souvent des substances suffisamment persistantes et peu absorbantes dans l'eau souterraine.

En 2011, le réseau de surveillance national des eaux souterraines (NAQUA) a trouvé des substances actives issues des produits phytosanitaires ou de leurs produits de dégradation (métabolites) dans 55% des sites analysés. Les plus visibles étaient les métabolites de certains herbicides, qui dépassaient la valeur de 0,1 µg/l fixée par l'OEaux dans 20% des sites. Depuis début 2014, la concentration de ces substances dans l'eau potable ne doit pas dépasser 10 µg/l selon l'Ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC). Parmi les substances actives des produits phytosanitaires, on décèle avant tout des herbicides qui dépassent la valeur limite de l'OSEC de 0,1 µg/l dans 2% des sites analysés dans le cadre du projet NAQUA [125].

Les concentrations élevées de nitrates dans l'eau souterraine sont également dues en majeure partie aux activités agricoles. Tandis qu'en 2011, 16% des sites analysés par NAQUA enregistraient une concentration de nitrates supérieure à la valeur maximale de 25 mg/l prescrite par l'OEaux, cette valeur était dépassée dans plus de 60% des sites agricoles. En outre, 16% d'entre eux dépassaient même la valeur tolérée pour l'eau potable de 40 mg/l; les ressources concernées ne pouvaient donc pas être utilisées pour l'approvisionnement en eau potable [126].

Conflit avec l'écologie des cours d'eau

Pour certains lacs du Plateau, les conséquences d'une utilisation excessive de substances nutritives dans l'agriculture sont déjà connues du public depuis les années 70 et 80. Outre la pollution par les eaux usées, une densité élevée des animaux de rente et l'épandage du lisier qui en résulte ont été à l'origine d'apports élevés de phosphore dans les lacs. Dans des lacs comme ceux de Baldegg et de Sempach, on a observé des proliférations d'algues absorbant l'oxygène dans les profondeurs et entraînant la mort des poissons. Depuis le milieu des années 80, la construction de stations d'épuration ainsi que des mesures spécifiques, comme l'aération des lacs, et des mesures externes dans le domaine de l'agriculture ont permis d'améliorer notablement l'état des lacs. La concentration de phosphore dans les lacs de Baldegg et de Sempach se maintient depuis plusieurs années sous la valeur cible de 30 mg/m³. Dans certains lacs cependant, les apports restent encore trop élevés; l'aération des lacs doit donc continuer [127].

Sont avant tout affectés par les apports de produits phytosanitaires les petits cours d'eau du Plateau, qui constituent la majeure partie du réseau hydrographique. En 2012, une étude approfondie de cinq cours d'eau de taille moyenne a démontré que les eaux étaient bien plus polluées que ce qui était supposé

[128]. Sur 288 substances actives mesurables, 104 ont été retrouvées dans les eaux. De nombreux herbicides ainsi que quelques fongicides et biocides présentaient une concentration supérieure à la valeur limite de 0,1 µg/l. Dans 78% des échantillons, la somme des concentrations de tous les pesticides était supérieure à 1 µg/l. Ces échantillons composés datant de deux semaines, ils présentaient des concentrations moyennes; les concentrations maximales dans les cours d'eau de taille moyenne devaient donc parfois être bien plus élevées. Ce phénomène est encore amplifié pour les cours d'eau de petite taille [128].

Les seuils d'effets écotoxicologiques sont déterminants pour l'écologie des cours d'eau. Dans 70% des échantillons, les critères de qualité chroniques (en anglais: environmental quality standards, EQS) ont été dépassés pour au moins une substance, et pour au moins deux substances actives dans quasiment la moitié des cas. Par ailleurs, en tenant à chaque fois uniquement compte de l'écotoxicité de la substance écologique la plus active, deux tiers des échantillons des eaux présentaient un potentiel écotoxique [129]. La situation est encore aggravée par l'érosion du sol, qui altère également les eaux de surface. Les sédiments fins qui en résultent dégradent sensiblement le milieu naturel des poissons et des invertébrés dans la zone sédimentaire.

B4 | Exigences relatives à la qualité chimique de l'eau et aux ressources en eau potable

La législation suisse protège les eaux, les milieux naturels qui en dépendent et, en particulier, les ressources en eau potable contre les apports de substances. Les objectifs écologiques sont définis à l'annexe 1 de l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) et les objectifs physico-chimiques relatifs à la qualité de l'eau à l'annexe 2. Le but est de parvenir à un état proche de la nature, sans aucune substance de synthèse persistante dans l'eau, dans les matières en suspension et dans les sédiments et, de manière générale, de prévenir la pollution des eaux résultant des activités humaines.

La protection des eaux a connu différentes phases historiques. Alors qu'il s'agissait au départ de protéger l'eau potable des polluants bactériens, l'attention s'est tournée, durant la seconde moitié du XX^e siècle, vers les apports de substances nutritives, qui posaient problème aussi bien au niveau de l'eau potable (teneur en nitrates) que de la qualité écologique des lacs (phosphate, eutrophisation). Ces apports ont été sensiblement réduits grâce au traitement des eaux usées, à l'interdiction de l'utilisation de phosphate dans les lessives et à la définition de conditions écologiques plus strictes dans le secteur de l'agriculture. Toutefois, ils restent problématiques pour certains lacs du Plateau suisse. Cela ne fait que quelques années que l'on connaît l'impact important de la pollution des res-

«Selon moi, le premier axe de travail en matière de gestion de l'eau est la réduction des micropolluants: il faut déterminer les produits chimiques qui peuvent être utilisés ou non. Le deuxième axe est la mise en place d'une organisation à grande échelle chargée de l'approvisionnement en eau, une vision globale des ressources et des besoins permettant de mieux régler les problèmes locaux. Le troisième axe de travail est de développer des systèmes décentralisés de transport des excréments humains n'utilisant pas d'eau.»

Urs von Gunten
Eawag



Pour plus d'informations  RIBACLIM sous www.pnr61.ch

sources en eau par les micropolluants sur les eaux et l'approvisionnement en eau potable. Ces substances (organiques synthétiques), qui proviennent des entreprises industrielles et artisanales, des ménages ou des pesticides utilisés dans l'agriculture, se retrouvent dans les eaux. La présence d'une multitude de ces substances dans l'environnement ne pourra être prouvée que lorsque les processus d'analyses chimiques auront été améliorés.

Un grand nombre d'apports de substances dans les eaux sont en cours d'observation et une grande partie d'entre eux sont déjà régulés par le biais de mesures techniques ou légales. La détection de microplastiques dans les eaux, et jusque dans les mers, révèle toutefois que la protection des eaux est encore et toujours confrontée à de nouveaux défis [130].

Haute protection pour l'eau potable

Qu'elles soient déjà utilisées ou qu'une utilisation soit prévue ultérieurement, les ressources en eau potable situées dans le sous-sol bénéficient d'une protection particulière, couplée aux exigences de qualité pour l'eau potable énumérées à l'annexe 2, ch. 22, OEaux. L'ordonnance définit les concentrations maximales à ne pas dépasser dans les eaux souterraines, notamment 25 mg/l de nitrates et 0,1 µg/l de substances actives de pesticides. En 2012, l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) a également fixé une valeur préventive de 0,1 µg/l pour les substances génotoxiques dans l'eau potable [131]. En 2014, l'OFSP a introduit, selon le concept des thresholds of toxicological concern (concept TTC), une nouvelle exception importante pour ce que l'on appelle les «métabolites non pertinents» de produits phytosanitaires [132]. Celle-ci stipule que, d'après l'Ordonnance sur les substances étrangères et les composants (OSEC), la nouvelle valeur maximale de 10 µg/l (au lieu de 0,1 µg/l) pour l'eau potable, établie sur la base de la toxicologie humaine, s'applique pour les micropolluants dont la toxicité n'a été répertoriée dans aucune base de données satisfaisante.

Protection des eaux souterraines au titre de milieu naturel

On sait depuis peu que les polluants affectent les organismes non seulement dans les cours d'eau, mais aussi dans les eaux souterraines. Entretemps, environ 2000 espèces de microorganismes – par exemple les turbellariés, les rotifères ou les hydracariens – vivant dans les nappes aquifères et contribuant à l'amélioration de la qualité de l'eau potable grâce à leurs processus métaboliques ont été recensées [133]. Ce milieu naturel souterrain est également explicitement couvert dans le cadre de l'Ordonnance sur la protection des eaux (objectif: biocénoses d'aspect naturel et adaptées au milieu). Il est toutefois encore difficile de savoir si d'autres mesures de protection sont nécessaires.

B5 | Exploitation thermique et apports de chaleur

Les eaux de surface et souterraines sont utilisées en grande quantité pour le refroidissement depuis longtemps. A l'heure actuelle, les centrales thermiques présentent de loin le plus grand besoin en refroidissement: à cet effet, les cinq centrales nucléaires locales prélèvent l'eau fluviale de l'Aar et du Rhin. En termes de quantités, cette utilisation d'eau correspond, avec l'énergie hydraulique, à la plus importante en Suisse. En 2006, les centrales prélevaient 1643 millions de m³, soit 42% des eaux utilisées au niveau national (hors énergie hydraulique) [82].

Le refroidissement par l'eau est également utilisé dans les installations et bâtiments industriels. Jusqu'à présent, la majeure partie de cette eau provenait des cours d'eau et rivières. La quantité d'eau fluviale prélevée par l'industrie chimique a été multipliée par 2,5 entre 1972 et 2006 [82]. Entretemps, l'augmentation constante des températures de l'eau fluviale a amené à privilégier l'eau souterraine pour le refroidissement des processus industriels et des bâtiments [82]. Du fait de la hausse des températures estivales due au changement climatique, l'augmentation des besoins en eau souterraine pour le refroidissement des bâtiments devrait continuer à croître. L'eau fraîche des lacs, si elle est prélevée sous le métalimnion, entre également en ligne de compte. La ville de Zurich, par exemple, étudie les capacités de refroidissement de l'eau des lacs s'écoulant à environ 800 GWh/a dans le cadre de sa stratégie de la «société à 2000 watts» [134].

Conflits et synergies potentiels

Réchauffement des eaux souterraines

Plusieurs cantons rapportent à la fois un besoin croissant en eau de refroidissement (p. ex. BE, SG, ZH) et des impacts visibles sur les eaux souterraines. En 2010, dans le canton de Berne, il existait 210 concessions d'eau de refroidissement [81]. Dans la stratégie d'utilisation de l'eau du canton, il est dit que «le découpage des zones industrielles et artisanales effectué dans le cadre de l'aménagement du territoire a pour conséquence une concentration géographique des installations utilisant de l'eau de refroidissement. Il faudra donc s'attendre à une augmentation des conséquences négatives sur les eaux souterraines (réchauffement). Ce sont surtout des grandes entreprises du secteur de l'industrie et des services qui utilisent des eaux superficielles et des eaux souterraines pour le refroidissement d'installations.» [135]

Conflit avec l'écologie des cours d'eau

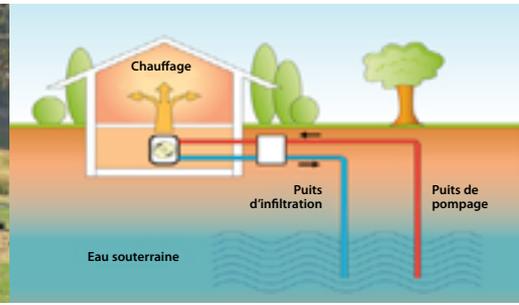
Lorsque la température des cours d'eau est élevée, le refroidissement des centrales nucléaires peut mettre en danger les écosystèmes aquatiques, car il entraîne un réchauffement supplémentaire des cours d'eau. Ainsi, pendant la canicule de 2003, la centrale

«Nous avons utilisé des modèles et des formules mathématiques pour prévoir l'évolution des eaux dans les années et décennies à venir. Nous cherchons à définir des mesures qui permettront de conserver, voire d'améliorer encore le bon état des eaux à l'avenir.»

Christian Stamm
Eawag



Pour plus d'informations  IWAQA
sous www.pnr61.ch



nucléaire de Beznau a dû ralentir sa production électrique afin de maintenir le réchauffement de l'Aar dans les limites autorisées [136]. A moyen terme, cette perturbation sera résolue par la sortie du nucléaire.

Conflits entre les riverains en aval et en amont

Il existe également des conflits entre les riverains situés en aval et en amont des cours d'eau: en raison des limites maximales absolues fixées par l'OEaux s'agissant des températures de l'eau, le potentiel des eaux est restreint par les utilisateurs en amont. Aucune coordination supracantonale n'existe à l'heure actuelle. Ces conflits d'utilisation devraient s'exacerber suite au réchauffement climatique.

Exploitation de la chaleur des lacs

La quantité de chaleur contenue dans les grands lacs est considérable. L'utilisation de la chaleur de l'eau des lacs permet notamment de chauffer les bâtiments résidentiels et commerciaux via les réseaux de chauffage urbain. Des systèmes plus modestes sont déjà opérationnels pour certains lacs. Compte tenu du potentiel de chauffage exploitable des lacs suisses et des décisions favorisant les sources renouvelables dans le domaine de la politique énergétique, il faut s'attendre à ce que, pour plusieurs lacs, ce type de projets fasse l'objet d'une attention particulière. Ainsi, la ville de Zurich examine actuellement la faisabilité d'une mesure visant à extraire la chaleur du lac à hauteur d'un quart du rendement d'une centrale nucléaire (300 GWh/a) [137]. A cet effet, il faudrait prélever 5 m³/s d'eau dans le lac, soit quasiment quatre fois les quantités pompées pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Zurich (1,3 m³/s). S'il s'avère possible d'extraire la chaleur contenue dans l'eau des lacs sans conséquences écologiques ou hydrologiques, une autre utilisation des eaux socialement importante se profile à moyen terme. Les lacs font aujourd'hui déjà l'objet d'utilisations et d'exigences variées, de sorte qu'il existe un fort besoin de coordination. La régulation des lacs, les déversements et prélèvements d'eau, l'utilisation d'eau de refroidissement et l'extraction de chaleur ne devraient pas altérer ni les températures naturelles, ni la distribution des substances nutritives, ni les conditions de vie et de reproduction des

organismes dans l'eau, notamment près des berges et dans les zones peu profondes.

B6 | Autres utilisations ayant un impact sur la qualité de l'eau

Conflits et synergies: revitalisation/eau potable

Les fournisseurs d'eau émettent certaines réserves vis-à-vis des revitalisations dans les zones fluviales où ont lieu des captages d'eau souterraine. Des problèmes de qualité peuvent apparaître lorsque l'eau fluviale est captée sans avoir effectué une traversée du sol suffisamment longue. L'approvisionnement en eau de Winterthur (rivière Töss, services industriels de Winterthur) a permis de démontrer que le conflit entre la revitalisation et l'extraction d'eau potable pouvait être résolu en procédant avec diligence. Une fois certains tronçons individuels situés directement en amont des captages retirés de manière ciblée du processus de revitalisation et d'élargissement, il a été possible de garantir une traversée du sol suffisamment longue pour les captages proches de la Töss et d'assurer ce faisant la qualité élevée de l'eau potable [138].

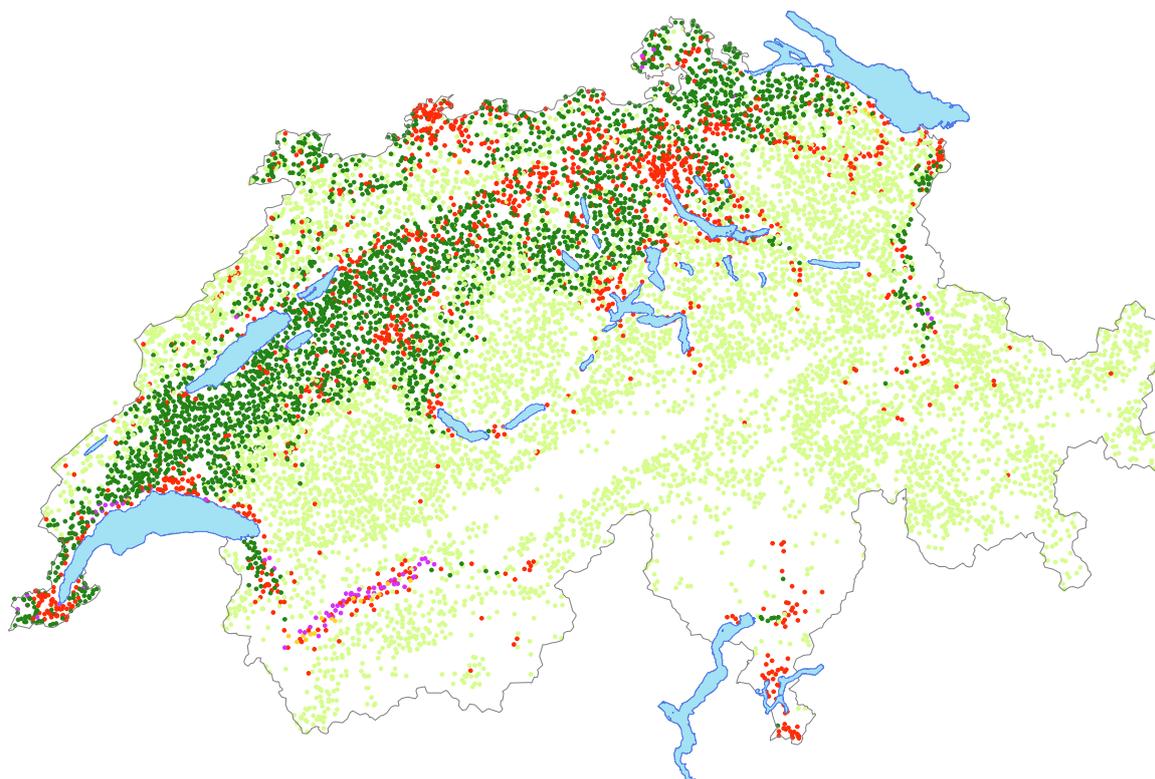
Les travaux de recherche effectués pendant plusieurs années par les services industriels de Winterthur sur la Töss, ont démontré que «les eaux naturelles affichent généralement un rendement d'infiltration dans les aquifères plus élevé que les eaux canalisées. Les projets de revitalisation menés à bien ont une influence positive sur le rendement de zones de captage d'eau souterraine – un point très positif pour l'avenir de l'approvisionnement en eau, alors que le changement climatique est imminent.» [138]

Dans d'autres cas, il est difficile d'écarter totalement les craintes des fournisseurs en eau. Dans le cadre d'une enquête de la SSIIGE relative aux mesures de revitalisation, sur dix-huit fournisseurs en eau concernés par des projets de revitalisation, six ont fait état de modifications en matière de quantité et de qualité de l'eau, sept n'ont constaté aucune conséquence sur l'approvisionnement, tandis que les cinq autres n'ont pu fournir aucune indication sur les conséquences éventuelles [139].

A gauche: Lorsque les canalisations connaissent des débordements en raison de fortes pluies, les eaux usées doivent être en partie déversées dans les cours d'eau sans avoir été préalablement traitées. (IWAQA)

Au milieu: A proximité des captages d'eau souterraine, certaines activités potentiellement polluantes, comme l'épandage de purin, sont interdites. (GW-TREND)

A droite: L'exploitation thermique des eaux souterraines nécessite de percer les couches superficielles, ce qui augmente le risque de pollution. En général, les autorités autorisent de tels systèmes uniquement là où l'eau souterraine n'est pas utilisée pour l'approvisionnement en eau potable. (Graphisme: arahan – Fotolia.com)



III. 15: intensité de l'exploitation du territoire par l'agriculture et l'urbanisation en Suisse: superficie des utilisations du sol par bassin versant en km² [140], [90], [141]. Analyse SIG [1].

Un point correspond à 1 km²

- Terres ouvertes
- Prairie
- Fruits
- Vigne
- Zone urbanisée

Apports de substances par les trafics routier et ferroviaire

Si les routes nationales, cantonales et communales ainsi que les tracés, les gares et les sites exploités par les chemins de fer occupent peu d'espace en comparaison avec la surface totale de la Suisse, ils accaparent une grande partie de la surface disponible dans les agglomérations et les vallées étroites. Tant les véhicules routiers que le trafic ferroviaire polluent les eaux.

Les substances provenant des routes sont des métaux lourds, tels que le cadmium, le plomb, le cuivre, le zinc, le platine, le palladium et le rhodium, des hydrocarbures aromatiques polycycliques et du méthyl tert-butyl éther (MTBE). Ces substances proviennent de l'abrasion des freins, de l'embrayage et des pneus ainsi que des lubrifiants, des catalyseurs et des carburants [142]. S'agissant des transports publics, c'est l'utilisation d'herbicides pour l'entretien des voies ferrées qui pose problème – les CFF utilisent environ deux tonnes de glyphosate par an –, ainsi que l'abrasion du cuivre contenu dans les lignes de contact des trams, trolleybus et locomotives [143].

Ces apports de substances sont particulièrement critiques lorsque les voies de circulation se trouvent à proximité d'un cours d'eau ou d'un lac, car l'eau de pluie charrie les polluants directement dans les eaux. Comme le montre une étude réalisée sur le lac de Zurich, le déversement d'eaux usées en provenance des routes a surtout un impact sur l'écologie des rives. L'optimisation de l'évacuation des eaux de chaussée et du nettoyage des routes permettrait de réduire ces apports [144].

Apports de substances par la voie aérienne

On retrouve dans l'atmosphère de légères substances volatiles résultant d'utilisations très variées. Elles sont charriées par les précipitations dans les sols ainsi que dans les eaux souterraines et superficielles. La contribution relative de cette voie d'apport n'est pas manifeste: elle devrait faire l'objet de clarifications en ce qui concerne les substances volatiles à forte rémanence (p. ex. les substances fluorées), en particulier celles utilisées en grandes quantités dans les produits ménagers.

Gaz naturel non conventionnel (fracturation hydraulique)

A l'heure actuelle, aucun pronostic ne peut être établi quant à l'utilisation future des gisements de gaz naturel non conventionnel en Suisse. Les recherches concernant les gisements potentiels sont insuffisantes. On estime cependant, sur la base de la géologie régionale et par comparaison avec d'autres pays européens ou avec les Etats-Unis, qu'ils sont limités. Dans tous les cas, on suppose qu'ils se trouvent sous les régions densément peuplées du Plateau, entre le lac Léman et le lac de Constance [145]. L'expérience des Etats-Unis révèle la possible apparition de divers problèmes liés à l'eau: besoins en eau considérables pour l'extraction de gaz, contamination des eaux souterraines et de l'eau potable, problèmes lors du traitement des eaux usées à forte salinité et polluées par des métaux lourds toxiques et en partie radioactifs, ainsi qu'accumulation de radium dans les sédiments des cours d'eau récepteurs [146].

Bilan Partie B Qualité de l'eau

La qualité chimique de l'eau est affectée par de nombreuses utilisations (cf. matrice B). Les efforts fournis par le passé pour améliorer la qualité de l'eau ont eu un impact extrêmement positif à de nombreux égards. Toutefois, les eaux présentent des concentrations parfois trop élevées de substances nutritives et de polluants. A l'heure actuelle, l'objectif ancré dans l'OEaux et selon lequel les eaux ne doivent présenter aucune substance de synthèse persistante n'est pas totalement atteint. A titre de contre-mesure ciblée, 100 stations d'épuration seront réaménagées dans un avenir proche afin d'éliminer les micropolluants organiques des eaux usées. Des efforts sont également déployés pour revenir sur la question de la protection de la qualité. En 2013, l'OFSP a ainsi introduit, en se basant sur la toxicologie humaine, une valeur limite cent fois plus élevée pour les produits de dégradation des pesticides dans l'eau potable que pour les pesticides eux-mêmes. Dans ce contexte, il est important de souligner que les exigences en matière de qualité de l'eau sont en partie basées sur différents fondements juridiques, lesquels poursuivent des objectifs différents (écosystèmes intacts ou santé humaine). Il peut en résulter des exigences contradictoires en matière de qualité de l'eau, comme c'est actuellement le cas dans le domaine des produits phytosanitaires et de leurs métabolites [147]. Dans l'ensemble, il s'avère que les mesures élémentaires de protection des eaux, telles que le réaménagement planifié des stations d'épura-

tion, sont effectivement appliquées, car elles sont faciles à mettre en œuvre d'un point de vue technique et n'entraînent pas de coûts supplémentaires pour les différents acteurs. Cependant, ces mesures ne couvrent pas toutes les problématiques. En effet, une intervention s'impose dans le domaine des apports de substances diffus provenant non seulement de l'agriculture et des zones urbaines, mais également des industries, relativement difficiles à recenser jusqu'à présent.

Plus les activités humaines se concentrent sur une surface réduite, plus les conflits en lien avec les besoins en eau de la société s'exacerbent. L'illustration 16 met en lumière la forte pression d'utilisation exercée sur les eaux et leur qualité par l'agriculture et l'urbanisation sur le Plateau densément peuplé et dans les principales vallées alpines.

La matrice B récapitule les résultats de la partie B en les accompagnant de brèves notes explicatives.

Matrice B – Conflits potentiels concernant la qualité de l'eau

Partie	Se répercute sur...	Ecologie des cours d'eau	Ecologie des lacs	Eaux souterraines	Eau potable
	Exigence sociale				
B1	Urbanisation	1	1	2	3
B2	Industrie / artisanat	4	4	4	4
B3	Agriculture	5	5	5	5
B4	Refroidissement / apport de chaleur	6	7	8	8

■ conflit important ■ conflit

- Les situations considérées comme des conflits importants concernent de longs tronçons fluviaux ou de grandes quantités d'eau, ou entravent d'autres intérêts dans une très large mesure.
- En général, les conflits et/ou concurrences interviennent au niveau local ou régional, ou selon les saisons, et sont aggravés par la sécheresse et par des températures élevées.

- (1) Nette amélioration par rapport aux années 70, notamment en ce qui concerne les substances nutritives, mais l'apport de micropolluants indésirables continue.
- (2) Détection de micropolluants dans les eaux souterraines également, du fait de l'infiltration des eaux fluviales.
- (3) Nette amélioration de la qualité des eaux fluviales grâce aux stations d'épuration; l'eau potable est influencée soit directement par les stations d'épuration (lors des prélèvements d'eau de lac), soit indirectement via l'infiltration dans les eaux souterraines.
- (4) Amélioration générale de la qualité des eaux usées rejetées dans les cours d'eau et les canalisations, mais présence persistante de micropolluants indésirables issus de la production dans les rivières, les eaux souterraines, l'eau potable et les lacs.
- (5) Apports de pesticides et substances nutritives dans les cours d'eau, les lacs et les eaux souterraines.
- (6) Apport élevé de chaleur par le biais du refroidissement des centrales nucléaires, entraînant des restrictions saisonnières pour l'écologie des cours d'eau et la production d'électricité.
- (7) L'exploitation de l'eau des lacs pour le refroidissement peut entraîner un réchauffement indésirable de l'eau.
- (8) L'exploitation des eaux souterraines pour le refroidissement peut entraîner un réchauffement indésirable de l'eau.

Partie C – Hydromorphologie et milieux naturels aquatiques

C1 | Impacts hydromorphologiques des centrales au fil de l'eau sur le Plateau

L'énergie hydraulique, conjointement avec la protection contre les crues, est à l'origine des interventions hydromorphologiques les plus importantes en Suisse. La majeure partie des cours d'eau sont exploités pour la production d'électricité, que ce soit par des retenues et/ou des prélèvements d'eau (cf. ill. 2).

Interventions dans la morphologie naturelle des cours d'eau

La modification de l'hydromorphologie naturelle des cours d'eau exploités pour l'énergie hydraulique est un épiphénomène inévitable des barrages. Les berges et les lits situés à proximité des barrages doivent souvent accueillir des aménagements annexes [148]. Les répercussions les plus marquées sur l'hydromorphologie des cours d'eau sont généralement enregistrées en aval des barrages: le fort courant de l'eau sortant des turbines après le retrait des matériaux charriés du bassin d'accumulation entraîne des érosions prononcées au niveau des berges et du lit des cours d'eau situés en aval. Afin de parer à ces effets, des constructions en dur sont souvent élevées sur de larges tronçons de rives en aval des barrages. Or, les obstacles artificiels ou les constructions en dur empêchent le charriage dans le lit du cours d'eau.

Les barrages peuvent ainsi modifier les milieux naturels aquatiques sur plusieurs kilomètres en amont et en aval. Lors de la construction de la nouvelle centrale hydroélectrique de Rheinfelden le long du Rhin, un canal de 100 mètres de large sur une distance de 1,8 km a été creusé dans le but d'approfondir le cours inférieur du fleuve d'environ 12 mètres. Ces travaux de construction ont pour but d'améliorer le débit de l'eau tout en renforçant la déclivité et en augmentant le rendement [149].

Conflits et synergies potentiels Barrages et migration des poissons

Sur le Plateau, les discontinuités introduites dans les cours d'eau par les barrages hydroélectriques sont, d'un point de vue écologique, particulièrement lourdes de conséquences. Dans ces cours d'eau, l'accès des poissons aux zones d'alimentation, de protection et de frai est également coupé. Des espèces comme le saumon, le hotu et l'anguille, qui parcourent de longues distances toute leur vie durant, ne peuvent donc plus se reproduire de manière naturelle. Ainsi, un barrage de 6 mètres de haut en aval de la Töss dans le canton de Zurich représente un obstacle insurmontable lors de la montaison de 11 espèces de poissons sur 23 [150].

Plus récemment, de gros efforts ont été déployés afin de permettre la remontée piscicole au moyen de rampes, de rivières artificielles et d'échelles à poissons, par exemple le

long de la nouvelle centrale hydroélectrique de Rheinfelden.

L'enjeu de la migration des poissons vers l'aval est négligé depuis longtemps, en particulier dans le cadre des grandes centrales hydroélectriques. Or, la dévalaison est tout aussi importante pour l'existence de nombreuses espèces. Puisque les poissons suivent toujours le courant le plus fort, ils se retrouvent souvent dans les turbines, où ils périssent. Si l'installation de grilles au niveau des turbines permet de les maintenir éloignés, elle entraîne une baisse de rendement pour les centrales. C'est pourquoi le laboratoire pour l'aménagement des eaux de l'EPF de Zurich (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, VAW) collabore avec les spécialistes en ichtyologie de l'Eawag pour améliorer la position et la forme de ces grilles, afin de repousser les poissons migrateurs dans les rivières artificielles tout en réduisant au maximum les entraves à la production d'électricité [151]. L'article 9 de la loi fédérale sur la pêche (LFSP) stipule que la libre migration des poissons doit être assurée lors de la construction de nouvelles installations hydroélectriques [152].

Régime de charriage

Tout ouvrage transversal situé sur un cours d'eau entrave la dynamique naturelle de l'érosion, du charriage et de la sédimentation. Ces ouvrages, d'une grande variété, ont fortement modifié le régime de charriage de la plupart des cours d'eau dans les régions alpines et sur le Plateau. Outre la protection contre les crues (cf. page 48) et les prélèvements de matière (p. ex. gravières), la production d'électricité au moyen de barrages et d'écluses est la principale cause des perturbations subies par le processus de charriage. En plus de ces interventions humaines, le régime de charriage sera certainement également modifié du fait du changement climatique à venir (cf. encadré page 48).

En quelques années seulement, les barrages peuvent engendrer un creusement conséquent du lit des cours d'eau. Le gravier, le sable et les sédiments fins se déposent dans la zone du barrage et le lit du cours d'eau est colmaté par de grandes quantités de matières fines. En revanche, aucun charriage n'a lieu en aval du barrage, ce qui se traduit par une absence de frayères pour les espèces de poissons frayant sur gravier (lithophiles) et, plus généralement, de milieux naturels pour les espèces de poissons et d'insectes appréciant le courant (rhéophiles) [150].

Modifications des températures

Dans les retenues des centrales au fil de l'eau, le courant est fortement réduit et la température de l'eau, en été, peut largement dépasser les 15°C. Les conditions de vie des poissons et d'autres organismes vivants sont fondamenta-

La présente partie étudie les répercussions des utilisations entraînant une modification des eaux par le biais d'interventions et d'ouvrages hydromorphologiques.



A gauche: La Suisse prévoit de revitaliser 4000 km de tronçons fluviaux dans les 80 prochaines années. Le réaménagement de la Thur près de Neunforn (TG) constitue un projet pilote important qui fournit à la recherche et aux autorités des connaissances essentielles sur les conséquences de la revitalisation. (Photo: Patricia Fry)

Au milieu: Les cours d'eau transportent, selon leur déclivité et leur débit, des galets, du gravier, du sable et des sédiments fins. Le charriage est également essentiel pour les organismes vivant dans les cours d'eau. (SEDRIVER)

A droite: Si une grande quantité d'eau est prélevée pour l'irrigation, la température d'un ruisseau ou d'un fleuve peut augmenter considérablement. La dégradation consécutive des conditions de vie dans les cours d'eau doit être prise en compte lors de l'octroi des autorisations de prélèvements. (AGWAM)

lement modifiées par comparaison avec celles dont ils bénéficieraient dans les cours d'eau originellement frais et riches en oxygène (zones à ombres). De grands tronçons fluviaux voient leur nature écologique se modifier, ce qui se reflète dans la composition des espèces.

Evolutions futures

En vertu de l'art. 83a LEaux, les exploitants de centrales hydroélectriques existantes sont tenus de prendre les mesures d'assainissement requises pour favoriser la migration des poissons et le charriage d'ici à 2031. A cet effet, les cantons doivent proposer un plan d'assainissement d'ici à 2014. Conformément à l'art. 15a^{bis} LÉne, les coûts de ces mesures seront remboursés aux centrales hydroélectriques par le biais d'une redevance sur la consommation d'énergie, perçue depuis 2012 à hauteur de 0,1 centime/kWh. Un milliard de francs est mis à disposition pour ces assainissements, à réaliser dans les 20 prochaines années.

Dans le cadre de la stratégie énergétique 2050, le Conseil fédéral escompte, entre autres, une augmentation du rendement des centrales au fil de l'eau [153]. Celle-ci résultera en partie des travaux d'agrandissement et de transformation réalisés dans les centrales existantes, soit le rehaussement des barrages et l'approfondissement des cours d'eau en aval, et en partie de la construction de nouvelles centrales au fil de l'eau sur des tronçons fluviaux non encore exploités. Dans une étude sur l'impact des installations de grande hydraulique prévues en 2013, réalisée pour l'Office fédéral de l'énergie, 16 projets sur les 25 analysés concernaient des centrales au fil de l'eau [154]. La plupart de ces projets (19 sur 25) visent une hausse de la pro-

duction. Si chacun des 25 projets venait à être réalisé, il en résulterait une production supplémentaire de 2617 GWh par an, dont 82% issus des nouvelles installations [154]. Huit projets sont déjà en phase de conception, les autres n'étant pas aussi avancés.

Ces différents aspects montrent clairement l'ampleur que pourraient prendre les interventions dans la morphologie des cours d'eau. Les entreprises d'énergie hydraulique se focalisent sur la hausse et l'assouplissement de la production énergétique. Cependant, il est également fait mention de projets présentant des avantages supplémentaires pour d'autres domaines. Ainsi, huit projets devraient réduire les effets d'écluse, et deux devraient améliorer la protection contre les crues.

C2 | Impacts hydromorphologiques de la protection contre les crues

Depuis la nuit des temps, les crues en Suisse sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dévastatrices. Depuis toujours et surtout dans les régions montagneuses, on craint plus les inondations que la sécheresse. Le récit historique de Jeremias Gotthelf, «Die Wassernoth im Emmenthal am 13. August 1837» (Le déluge en Emmenthal du 13 août 1837), constitue un témoignage saisissant des ravages et de la souffrance humaine causés par les crues.

Lutte contre l'eau

C'est pour cette raison que les hommes luttent depuis des siècles contre la puissance de l'eau. En 1714 déjà, la Kander, qui descendait dans le lac de Thoune, avait été déviée, et durant les trois siècles qui ont suivi, d'innombrables

Le régime de charriage sous les effets du changement climatique: enseignements du projet SEDRIVER du PNR 61

Le projet SEDRIVER s'est penché sur la modification du régime de charriage dans les cours d'eau alpins sous différentes conditions. A cet effet, il a développé le programme de simulation sedFlow dans les cours d'eau [155]. Celui-ci tient compte de nouvelles approches pour calculer le décalage du charriage dans des canaux à forte déclivité de bassins versants alpins. Ce programme a permis de simuler les répercussions de différents scénarios climatiques sur la Petite Emme dans le canton de Lucerne et d'établir ainsi des pronostics s'agissant des conséquences éventuelles sur les organismes vivants dans la rivière. En hiver, l'érosion et le charriage devraient s'intensifier du fait de l'augmentation des débits, tandis que l'été, en raison de sécheresses plus longues et d'un débit réduit, sera vraisemblablement marqué par une plus grande diversité des habitats et des conditions de vie plus favorables, notamment pour les jeunes truites de rivière [156].



aménagements fluviaux (corrections) ont également vu le jour [157]. Au moyen d'ouvrages divers, l'homme essaie de contrôler l'eau et le charriage; avec des barrages et en utilisant les lacs comme bassins de rétention, il s'efforce de prévenir les inondations. Si l'ensemble des ouvrages de protection contre les crues en Suisse est impressionnant et important, il ne faut pas pour autant oublier combien les répercussions des interventions sur le régime des eaux et les écosystèmes des cours d'eau sont lourdes.

En vue de réduire ces répercussions, il est nécessaire de garantir une protection contre les crues aussi respectueuse des eaux que possible (art. 4 al. 2, loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau, LACE). D'après la LACE, la protection contre les crues doit respecter la nature et accorder suffisamment d'espace aux eaux.

Ces principes se conforment à la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) révisée, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2011, qui poursuit les objectifs suivants: «encourager les revitalisations (rétablissement, par des travaux de construction, des fonctions naturelles d'eaux superficielles endiguées, corrigées, couvertes ou mises sous terre), et garantir un espace réservé aux eaux avec exploitation extensive de cet espace». [158] Les revitalisations ne doivent pas pour autant être réalisées à l'échelle nationale, mais plutôt sur les tronçons de cours d'eau présentant un bon rapport utilité-coût. Les mesures favorisant à la fois l'écologie des cours d'eau et la protection contre les crues sont prioritaires (art. 41d al. 1 let. c OEaux).

Conflits et synergies potentiels

En raison des aménagements réalisés par le passé, de nombreux cours d'eau ont aujourd'hui perdu leur cours naturel; leurs milieux naturels aquatiques ont été dégradés, de même que la végétation propre à leurs rives [159]. De nombreux tronçons de cours d'eau ne peuvent plus remplir les fonctions naturelles exigées par la LACE, car la construction de barrages et l'érosion des sols qui en résulte ont entraîné la disparition des forêts alluviales avoisinantes et, avec elles, la continuité transversale avec les milieux naturels de leur environnement. Ce phénomène se traduit par une forte réduction de la biodiversité; de nombreux organismes manquent de sites pour la reproduction et la nidification, ainsi que de sources d'alimentation.

Obstacles artificiels et migration des poissons

La plupart des ouvrages transversaux bâtis sur les cours d'eau ne servent pas à la protection contre les crues en soi, mais à la lutte contre ses conséquences indésirables. Le courant étant fortement accéléré par les sections plus étroites et les tronçons plus abrupts et corrigés, particulièrement en cas de débits élevés, les cours d'eau s'enfouissent toujours plus profondément dans le terrain. Afin de limiter cet approfondissement et, partant, la baisse du niveau de l'eau dans les environs, plusieurs dizaines de milliers d'obstacles artificiels (seuils) ont été érigés dans les fleuves. L'OFEV a comptabilisé 101 000 seuils et barrages de plus de 50 cm de haut lors d'un état des lieux réalisé à l'échelle nationale en 2010 [160]. Il suffit de petits obstacles (> 25 cm) pour faire barrage à la remontée des cyprinidés; à compter de 70 cm de hauteur, les salmonidés sont également bloqués. D'un point de vue écologique, les seuils relèvent des interventions les plus lourdes de conséquences pour les cours d'eau, car elles empêchent la montaison des poissons migrateurs dans leurs zones de frai et entravent ainsi l'existence de ces espèces. Les petits cours d'eau des Préalpes, situés entre 600 et 1200 m d'altitude, sont particulièrement concernés [160]. Ainsi, à l'heure actuelle, 50% des cours d'eau du canton de Zurich sont soit fortement altérés, soit artificiels, soit mis sous terre et comptent 27 000 seuils et obstacles artificiels. Le canton y voit un grand besoin de revitalisation, car seuls 31% des cours d'eau actuels sont naturels ou proches de l'état naturel [161].

Un deuxième effet indésirable de l'approfondissement du lit des cours d'eau dû aux travaux d'aménagement sont les seuils de parfois plusieurs mètres de haut à l'embouchure des affluents. Ces ouvrages de chute entravent la migration des poissons et leur retraite dans les affluents et sont considérés comme un autre facteur important de la baisse des populations piscicoles.

De nombreux projets pilotes s'attachent à rétablir la libre circulation des poissons dans les cours d'eau. La construction d'échelles à poissons (p. ex. à la centrale de Reichenau sur le Rhin alpin) ou la liaison entre l'estuaire du Binnenkanal du Liechtenstein et le Rhin constituent des développements innovants (autres exemples: Reppisch, Ron [LU], Önz

A gauche: Plus la végétation est dense sur les rives des cours d'eau, mieux elle protège l'eau contre un réchauffement excessif pendant les périodes de canicule. La Broye dans le canton de Vaud. (AGWAM)

Au milieu: D'un point de vue écologique, les digues sont les interventions les plus lourdes de conséquences pour les cours d'eau, par exemple sur la Töss (ZH). (Photo: Andri Bryner, Eawag)

A droite: Les revitalisations, comme ici sur la Thur près de Neunforn, revalorisent l'écologie des cours d'eau, mais contribuent également à la protection contre les crues en créant de nouvelles zones de rétention. (Photo: Patricia Fry)



A gauche: La géologie de son bassin versant détermine le type et la quantité de charriage sur l'ensemble du parcours d'un cours d'eau. Les ouvrages de protection contre les crues, les barrages et les gravières ont modifié la dynamique de charriage de nombreux cours d'eau. (SEDRIVER)

Au milieu: Depuis les années 1930, d'importantes zones marécageuses et humides ont été asséchées par drainage et cultivées. La faune et la flore de ces écosystèmes humides ont elles aussi disparu. (IWAGO)

A droite: Les cours d'eau perturbent l'utilisation des sols: à l'exemple de l'Arbogne (FR), l'agriculture exploite les terres cultivables jusque sur les rives de nombreux cours d'eau. (Photo: Reportair)

[BE], Kander). De nombreux seuils peuvent être démantelés: ils ont souvent été remplacés par des rampes en enrochements visant à stabiliser le fond des cours d'eau, mais dont l'utilité écologique n'est pas toujours prouvée, notamment en présence d'un niveau d'eau élevé (et d'une grande vitesse d'écoulement) [162].

Régime de charriage

Le régime de charriage est fortement perturbé dans de nombreux cours d'eau, notamment du fait des mesures de protection contre les crues. Les ouvrages de protection des berges en dur réduisent l'apport de charriage dans les eaux; les dépotoirs en diminuent encore la quantité; les seuils et autres ouvrages transversaux retiennent également la matière. Les sédiments fins et la matière organique peuvent se déposer dans le fond des cours d'eau et le colmater en cas de bas débit. Ces processus nuisent au milieu naturel des poissons et d'autres espèces aquatiques, et peuvent empêcher l'infiltration dans les eaux souterraines [163].

L'exemple de la Thur illustre bien l'impact de la protection contre les crues sur le régime de charriage. Le cours supérieur de cette rivière naturelle, marquée par des crues rapides, a été aménagé depuis bien longtemps, tout comme ses affluents, la Sitter, l'Urnäsch, la Glatt et le Necker. Etant donné que les travaux d'aménagement réalisés sur le cours supérieur affectent le régime de charriage de tout le cours inférieur, les cinq cantons concernés par cette situation (AI, AR, SG, TG, ZH) ont élaboré une stratégie commune afin de stabiliser le régime de charriage de la Thur et ont convenu d'apporter davantage de charriage issu de la Sitter dans la Thur [164]. L'objectif visé consiste à équilibrer le régime de la Thur en interdépendance avec l'élargissement prévu du tronçon traversant la Thurgovie, tout en revalorisant les milieux naturels aquatiques.

Synergie: protection contre les crues/ revitalisation

Le canton de Zurich dispose de chiffres mettant en lumière l'importance potentielle de synergies entre la revitalisation et la protection contre les crues. Le canton a défini 800 km de cours d'eau à revitaliser en priorité sur les 3620 km que compte le canton. Sur un total de 400 km, la revitalisation peut être combi-

née à la protection contre les crues; les 400 km restants accueilleront des projets de revitalisation sans utilité spécifique pour la protection contre les crues [34]. Plus les espaces de rétention mis à disposition grâce aux revitalisations seront grands, plus le besoin en ouvrages diminuera.

C3 | Impacts hydromorphologiques de l'agriculture

Drainage des terres agricoles

Dans de nombreuses régions de Suisse, les sols agricoles seraient trop humides sans intervention humaine pour permettre une exploitation agricole intensive, au moins saisonnière. Depuis les années 1930, des systèmes de drainage étendus ont été installés pour veiller à ce que les sols aient un régime des eaux saisonnier aussi régulier que possible. En conséquence, la morphologie des cours d'eau a considérablement changé, en particulier au niveau des sources des petits cours d'eau et le long des rivières, du fait des mesures d'amélioration du sol, des mises sous terre et de la construction de drainages [165].

Selon une enquête réalisée en 2008 auprès des cantons par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), environ 192 000 hectares de terres agricoles bénéficient d'un drainage. Cela représente environ 4,7% de la surface du pays, près d'un cinquième (18,1%) de la surface agricole utile et environ 7% des terres ouvertes [166]. La majeure partie (80%) des terres drainées se situent dans des zones de plaine, 12% dans des zones de collines et de montagne I, et 8% dans des zones de montagne II à IV et dans les alpages. Par ailleurs, la pente naturelle n'est pas toujours suffisante pour l'écoulement des eaux de drainage; sur 11% des surfaces (21 000 ha), ces eaux sont évacuées par pompage ou par relevage. La valeur de remplacement des installations de drainage atteint 4 à 5 milliards de francs [167]. Selon l'enquête de l'OFAG réalisée en 2008, 35,5% des drainages (68 400 ha) sont en mauvais état [166].

Exploitation intensive des berges

Dans les régions agricoles, 48% des 7000 km de ruisseaux et de rivières sont en mauvais état écomorphologique. Dans près de la moitié des cours d'eau, les berges sont exploitées de manière trop intensive ou possèdent une végétation qui n'est pas typique du milieu. Au total, 75% des ruisseaux souffrent d'un



manque d'espace sur une ou sur les deux rives, ou bien ont été enterrés [168].

Conflits et synergies potentiels Conflits avec l'écologie des cours d'eau

Les drainages sont à l'origine de modifications profondes du paysage et comptent parmi les interventions les plus lourdes de conséquences et les plus importantes concernant le régime des eaux. Bien que l'évacuation des eaux du sol par drainage entraîne, comme prévu, des changements dans les milieux naturels aquatiques – voire leur complète disparition –, elle n'est quasiment plus perçue comme une atteinte à l'écologie. Durant les deux derniers siècles, la Suisse a perdu plus de 90% de sa surface marécageuse d'origine (plus de 250 000 ha) à la suite de drainages, mais aussi à cause de l'exploitation de la tourbe et des cultures [169].

Les conséquences du drainage réalisé à grande échelle dans tout le pays se constatent en particulier dans la mise en danger ou la disparition d'espèces animales et végétales dépendantes de la présence d'humidité temporaire ou durable. En Suisse, les espèces animales ou végétales tributaires de l'eau sont représentées de manière disproportionnée sur la liste des espèces en danger [170]. Du point de vue de la biodiversité, il pourrait donc être intéressant de revitaliser, à l'instar des zones de cours d'eau, des prairies humides ou des sources. Ce type de mesure est en particulier envisagé pour des sites agricoles abandonnés ou de faible valeur. Pour la remise en eau, il suffirait de renoncer à entretenir les systèmes de drainage sur les sites sélectionnés.

L'utilisation intensive des berges des ruisseaux, des rivières et des lacs, souvent jusqu'à proximité immédiate des eaux, augmente les apports potentiels de substances polluantes et nutritives des surfaces agricoles (cf. page 38) et empêche la croissance, sur les berges, d'une végétation naturelle suffisante pour les cours d'eau. Outre l'ombrage insuffisant de la surface de l'eau et le réchauffement accru des eaux, la réticulation avec l'environnement est bien souvent compromise, de sorte que les eaux perdent leur fonction de corridor écologique. L'influence de ces modifications hydromorphologiques sur les milieux naturels aquatiques n'est pas isolée: celles-ci s'accompagnent souvent d'une détérioration de la qualité de l'eau et d'une altération du régime

de sédimentation. La façon dont ces interférences entre les facteurs d'influence ont pu se répercuter sur les milieux naturels a fait l'objet de recherches dans le cadre du projet IWAQA du PNR 61 (cf. encadré page 52).

C4 | Exigences hydromorphologiques liées à la protection des eaux

La présente partie traite des aspects hydromorphologiques dans et à proximité des eaux. Les aspects de la revitalisation liés à la surface seront abordés à la partie D.

Les exigences relatives à l'hydromorphologie des eaux de surface sont définies à l'annexe 1 de l'OEaux. Selon l'art. 1, al. 2, la morphologie doit présenter des caractéristiques proches de l'état naturel et garantir sans restriction «l'autoépuration par des processus naturels, les échanges naturels entre l'eau et le lit ainsi que les interactions avec l'environnement». L'objectif est d'améliorer l'état écologique des cours d'eau afin que les communautés animales et végétales qu'ils accueillent présentent «une composition et une diversité d'espèces spécifiques à chaque type d'eau peu ou non polluée».

L'adoption de la LEaux devrait contribuer à l'amélioration significative de la morphologie des cours d'eau dans les prochaines décennies. D'ici à 2031, le régime de charriage et la migration des poissons dans les cours d'eau seront rétablis grâce à l'assainissement de l'énergie hydraulique. Il est prévu de revitaliser quelques 4000 km de cours d'eau d'ici à 2091 (l'ensemble du réseau hydrographique mesurant 65 000 km). En outre, la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau stipule que la protection contre les crues doit respecter la nature et réserver suffisamment d'espace aux eaux. Conjuguées à une augmentation de la qualité de l'eau, ces mesures permettront d'améliorer considérablement l'écologie aquatique et de revaloriser les eaux en tant que zone de loisirs.

Les conditions de vie des poissons devraient être améliorées en vertu des dispositions de la loi fédérale sur la pêche (LFSP). Les objectifs principaux sont la libre migration des poissons vers l'amont et l'aval, ainsi qu'une reproduction naturelle. Les cantons devront par conséquent délivrer des autorisations relevant du droit de la pêche pour les nouveaux barrages, systèmes de régulation ou constructions, tandis que les mesures relatives aux installations

A gauche: Il est possible d'améliorer l'écologie des cours d'eau, y compris artificiels – comme le canal de Hagneck, qui détourne l'Aar jusqu'au lac de Bienne – par le biais d'élargissements, de baines lacustres et de zones humides. (Photo: Reportair)

Au milieu: Le Rhin alpin est fortement marqué par la protection contre les crues et l'exploitation humaine. En raison des divers intérêts en présence, sa revitalisation est un projet fort controversé. (Photo: Reportair)

A droite: Les rives des lacs, comme ici le lac de Walenstadt, sont des emplacements très prisés pour l'immobilier résidentiel et de loisir. Une autre partie des rives accueille les infrastructures de transport. (Photo: Reportair)

existantes ne pourront être ordonnées que si elles sont économiquement supportables (art. 10 LFSP).

Conflits et synergies potentiels

Conflit avec l'énergie hydraulique

Du point de vue juridique, les rapports entre revitalisations et énergie hydraulique ne sont pas explicitement réglementés et les conflits doivent donc être résolus au cas par cas. En principe, une expansion de l'énergie hydraulique sur les tronçons fluviaux en cours de revitalisation n'est pas possible. Mais certains cas peuvent être envisagés, par exemple les seuils artificiels utilisant un obstacle existant pour la production d'électricité tout en permettant la revitalisation du tronçon de la rivière et le rétablissement de sa connectivité. En général, la revitalisation n'entrave que marginalement l'extension de l'exploitation hydraulique. En effet, le potentiel écologique de la revitalisation est plus grand dans les tronçons fluviaux à faible pente, tandis que celui de la force hydraulique est plus important dans les pentes les plus fortes. Dès lors, les cantons éviteront de planifier des revitalisations sur les tronçons à forte déclivité.

Synergie avec la protection contre les crues

Dans de nombreux cas, la protection contre les crues sera améliorée grâce aux projets de revitalisation (cf. page 48), lesquels sont priori-

taires selon l'art. 41 let. d OEAux. Par ailleurs, les revitalisations ne pourront être réalisées que là où elles ne portent pas atteinte à la sécurité contre les crues.

C5 | Impacts de l'urbanisation et des voies de circulation sur les berges

Urbanisation

Historiquement, la plupart des villes et villages ont été construits aux abords des rivières, qui présentaient un intérêt à la fois pour les moulins, comme voies fluviales et comme cours d'eau récepteur. La proximité de l'eau impliquant toujours un risque d'inondation, des mesures structurelles ad hoc ont été mises en œuvre pour y faire face, donnant aux berges des rivières dans la plupart des villes une image de rampes bétonnées. Dans les zones urbaines, les petits plans d'eau existants (étangs, mares, ruisseaux) ont le plus souvent été drainés, canalisés ou mis sous terre.

Au cours des 30 dernières années, la tendance s'est quelque peu inversée et un nombre considérable de ruisseaux enterrés ont été remis à ciel ouvert [171]. Dans les zones urbaines, la revitalisation des rivières est limitée en raison des infrastructures; les cours d'eau ont cependant pu être sensiblement valorisés grâce à l'amélioration de l'accessibilité et de l'intégration dans le cadre urbain, à l'élimination des fonds bétonnés et des ouvrages de protection des berges ainsi qu'à l'élimination d'obstacles artificiels.

Facteurs influençant l'état écologique des cours d'eau: enseignements du projet IWAQA du PNR 61

De nombreux facteurs influencent l'état écologique des cours d'eau. Le projet IWAQA a examiné leur impact commun sur le terrain et au moyen de modélisations.

Sur le terrain, IWAQA a analysé le degré de similitude de la composition des espèces à divers points du réseau hydrographique, dans des conditions environnementales similaires [172]. Dans les deux zones étudiées – Gürbe et Mönchaltorfer Aa –, des contextes très différents ont été observés. La corrélation de divers facteurs d'influence sur la Gürbe a donné lieu à une répartition claire de la composition des espèces. A l'inverse du Mönchaltorfer Aa, où les facteurs d'influence se présentaient dans des combinaisons très différentes. Les données de terrain n'ont pas permis à elles seules de déterminer leur interaction.

Pour mieux comprendre la façon dont les divers facteurs influent conjointement sur les biocénoses des cours d'eau, un modèle écologique a été élaboré dans le cadre d'IWAQA [173]. Il tient compte des principaux facteurs environnementaux influant sur les différentes espèces et permet dorénavant d'étudier l'influence de différents facteurs sur la composition des espèces. Après application du modèle sans recalibrage dans le bassin versant de la Glatt, une concordance de 74% entre les compositions taxonomiques de la biocénose observée et simulée [174] a pu être constatée. Les prévisions de la modélisation indiquent que, dans les eaux étudiées, la vitesse du cours d'eau et les concentrations en insecticides, par exemple, constituent des facteurs importants. En outre, les résultats de la modélisation soulignent l'importance de l'interaction entre les organismes aquatiques à travers la concurrence pour la nourriture et la relation prédateur-proie. Dans l'ensemble, les calculs de la modélisation montrent très clairement que différents facteurs sont à prendre en compte. Un résultat qui correspond aux recherches effectuées sur le terrain en Hesse, en Allemagne, où il a été récemment démontré que la composition des espèces était fortement influencée par les eaux usées et que cette influence était amplifiée par la piètre morphologie des cours d'eau [175]. Le projet IWAQA a développé des outils permettant une compréhension approfondie de ces phénomènes, à confirmer d'un point de vue pratique suite à l'agrandissement des stations d'épuration et à la revitalisation des cours d'eau.

Voies de circulation

Bien souvent, les voies de circulation longent les cours d'eau et les plaines alluviales. Elles contribuent à modifier l'écologie des cours d'eau, lors du lessivage de sédiments fins par temps de pluie. Par ailleurs – et il s'agit a priori de l'aspect le plus important – les routes et les voies ferrées sont l'une des causes majeures de la consolidation et de l'aménagement des berges de rivières et de lacs. Par le passé, de nombreuses voies ferrées ont été construites directement sur les berges des lacs, sur un terrain spécialement remblayé, sans égard pour les milieux naturels aquatiques concernés.

Modification marquée des berges de lacs

Dans de vastes zones des lacs suisses, il est à peine possible de reconnaître le caractère d'origine de la berge. Certaines zones peu profondes ont été remblayées afin de gagner du terrain pour les voies de circulation ou les agglomérations. Autour du lac de Zurich aujourd'hui, plus de la moitié des berges sont construites ou ont subi de lourdes atteintes, et 90% ont été remblayés artificiellement. Toutefois, de larges portions présentent un remarquable potentiel de valorisation écologique [176]. Au vu de la diversité des besoins et des utilisations, la planification d'un aménagement durable des berges constitue un véritable défi. Le canton de Zurich a travaillé plusieurs années durant à l'élaboration de la charte «Lac de Zurich 2050», qui propose des solutions aussi consensuelles que possible.

C6 | Impact hydromorphologique des captages de sources pour l'eau potable

Les captages de sources destinés à l'approvisionnement en eau potable existent depuis de nombreuses décennies, voire des siècles. Et cela fait longtemps que l'on a oublié qu'il y avait autrefois des biotopes ou des zones humides dans les zones où se situent ces captages de sources. Pourtant, le captage de sources destiné à l'approvisionnement en eau potable est également synonyme de dégradation hydromorphologique et de perte écologique. Compte tenu de la disparition dramatique des animaux et des plantes tributaires de l'eau en Suisse, il semble que la question de la remise à ciel ouvert et de la revitalisation actives des sources captées qui ne sont plus utilisées pour l'approvisionnement en eau potable et ou en eau d'usage mérite réflexion. Ainsi, d'anciennes zones humides pourraient être réhumidifiées et régénérées sans effort particulier.

Bilan Partie C Hydromorphologie et milieux naturels aquatiques

Du fait des ouvrages de protection contre les crues, des centrales hydroélectriques au fil de l'eau, des amendements de terres agricoles, des voies de circulation et des nombreuses constructions, l'écomorphologie des cours d'eau suisses est souvent fortement modifiée et leur écologie est largement dégradée (cf. matrice C). Une grande partie de ces affections sont quasiment irréversibles, notamment en ce qui concerne les bâtiments résidentiels et commerciaux ainsi que les centrales hydroélectriques. D'autres interventions, principalement les corrections des cours d'eau et les aménagements liés aux crues réalisés par le passé, pourraient être en partie remédiées lors de la revitalisation ou ramenées à un état plus proche du naturel à l'occasion de travaux d'entretien.

Les objectifs définis dans le cadre de la révision de la loi sur la protection des eaux, lesquels visent la revitalisation et l'élargissement des espaces réservés aux eaux ainsi que l'assainissement du régime de charriage, ont permis de poser les jalons d'une amélioration substantielle de l'état hydromorphologique des cours d'eau. Les exigences liées à la protection contre les crues, qui, en vertu de la loi sur l'aménagement des cours d'eau, doit respecter la nature et être étroitement associée à la revitalisation des cours d'eau, vont dans le même sens.

Une question en suspens concerne l'avenir de l'énergie hydraulique. De nouvelles centrales de grande taille, comme celles qui sont prévues actuellement, entraîneraient d'autres interventions importantes dans la morphologie des cours d'eau. La petite hydraulique, qui devrait également contribuer à la transition énergétique selon les projets du Conseil fédéral, pourrait s'avérer encore plus lourde de conséquences. La densité d'énergie des petits cours d'eau est faible: un très grand nombre de centrales hydroélectriques serait nécessaire pour remplacer une infime partie seulement de l'électricité produite aujourd'hui par le nucléaire. Chaque installation interrompt le continuum des milieux naturels aquatiques et détériore l'état des eaux.

La matrice C récapitule les résultats de la partie C en les accompagnant de brèves notes explicatives.

Matrice C – Conflits relatif à l'hydromorphologie et les milieux aquatiques

Partie	Se répercute sur ...	Morphologie	Migration des poissons	Charriage / sédimentation	Températures
	Exigence sociale				
C1	Energie hydraulique	1	2	3	4
C2	Protection contre les crues ^(a)	5	6	7	neutre
C3	Agriculture	8	neutre	9	10
C4	Zones urbaines	11	neutre	neutre	12
C5	Voies de circulation	13	neutre	14	15

■ conflit important ■ conflit

- Les situations considérées comme des conflits importants concernent de longs tronçons fluviaux ou de grandes quantités d'eau, ou entravent d'autres intérêts dans une très large mesure.
- En général, les conflits et/ou concurrences interviennent au niveau local ou régional, ou selon les saisons, et sont aggravés par la sécheresse et par des températures élevées.

(a) Sont ici prises en considération les ouvrages de protection des rives et longitudinaux en dur. Les revitalisations au bénéfice de la protection contre les crues agissent, elles, en synergie et permettent d'améliorer les milieux naturels aquatiques.

- (1) Ouvrages de protection des rives et aménagement du lit en aval des barrages.
- (2) Perturbation de la migration piscicole vers l'amont et surtout vers l'aval à cause d'écluses et de barrages.
- (3) Régime de charriage perturbé par les barrages: rétention en amont, érosion en aval.
- (4) Réchauffement dans la retenue.
- (5) Corrections, constructions au fil de l'eau, aménagement des fonds, etc.
- (6) Interruption de la migration des poissons du fait des obstacles artificiels (p. ex. seuils de stabilisation).
- (7) Rétention au niveau des obstacles artificiels et des dépotoirs de charriage, érosion en aval.
- (8) Zones humides asséchées par les améliorations et corrections des cours d'eau.
- (9) Erosion liée aux activités agricoles, lessivage des sédiments fins par les eaux.
- (10) Hausse de la température des rivières en été due aux aménagements jusqu'au bout des berges et au faible ombrage lié au manque de boisement des rives.
- (11) Constructions sur les berges dans les zones urbanisées, ruisseaux enterrés.
- (12) Hausse importante de la température des eaux de pluie en été.
- (13) Rétrécissement des rivières pour les voies de circulation, rétrécissement important sur les berges des lacs également, passage réduit sous les ponts.
- (14) Lessivage des sédiments fins depuis les routes jusqu'aux cours d'eau.
- (15) En été, hausse importante de la température de l'eau de ruissellement urbaine.

Partie D – Conflits liés à l'utilisation du territoire

Jusqu'à présent, la question des conflits liés à l'utilisation du territoire a été quelque peu négligée dans la problématique de l'eau. Un grand nombre des utilisations et exigences relatives aux eaux abordées dans les chapitres précédents (gestion des quantités, apports de substances et interventions dans l'hydromorphologie) sont liées à des besoins en surface. En Suisse, le sol est une ressource très limitée; par conséquent, une partie de la problématique n'est perceptible que lorsque la question des surfaces est expressément prise en compte.

D1 | Besoins en surface pour l'approvisionnement en eau potable

En Suisse, l'approvisionnement en eau potable est à la charge des villes et des communes et, de ce fait, son organisation est décentralisée. La protection de la qualité excellente des eaux souterraines nécessite de grandes surfaces, qui soient le moins possible touchées par des activités entraînant une pollution de l'eau – de préférence donc, des zones situées dans les forêts ou en aval de celles-ci. En Suisse, 50% de toutes les zones de protection des eaux souterraines se trouvent dans des forêts, dont les sols et la répartition spatiale doivent être préservés en vertu de la législation forestière [90]. De nombreuses autres zones de protection subissent la pression de l'agriculture, de l'urbanisation et des routes, et ne pourront être préservées qu'à condition que ces activités soient limitées.

Des restrictions sur l'utilisation du territoire ont également été imposées aux alentours des lacs, notamment pour l'agriculture (p. ex. lacs de Baldegg ou de Sempach); elles visent principalement à réduire les apports de substances afin d'améliorer l'écologie des lacs [177]. Dans les endroits où les lacs sont utilisés comme réservoirs d'eau potable, ces mesures profitent également à l'approvisionnement en eau public (cf. page 38).

Conflits et synergies potentiels

Conflit: eau potable/agriculture

Un tiers des zones de protection des eaux souterraines se trouvent sur des espaces voués à l'agriculture, ce qui représente environ 6% de la surface exploitée par l'agriculture [90]. Les règles de gestion visant à limiter les apports de microorganismes, de substances nutritives et de pesticides dans les captages s'appliquent dans ces zones. Au niveau de l'étendue géographique, l'agriculture est le facteur d'influence le plus important s'agissant de la qualité des eaux souterraines (cf. ill. 16).

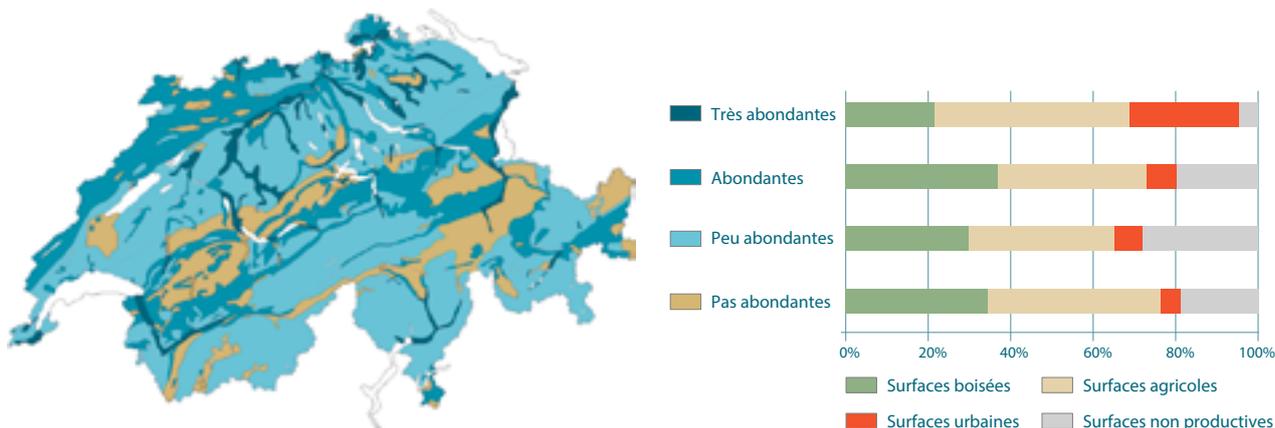
Conflit: eau potable/urbanisation

L'illustration 16 montre que les aquifères de fond de vallée productifs qui jouent un rôle important pour la production d'eau potable sont fortement affectés par l'urbanisation. Presque 10% des zones de protection des eaux souterraines sont situées dans des zones urbaines; en outre, le captage des eaux souterraines est abandonné aux endroits où des zones de protection sont aménagées. La création de nouvelles zones de protection paraît difficile, car le terrain situé au-dessus de ces nappes phréatiques est déjà utilisé à d'autres fins, ou son utilisation est déjà planifiée, et il est difficile de les protéger de manière conforme à la loi.

Il n'existe aucune vue d'ensemble, nationale ou cantonale, des captages d'eau souterraine abandonnés dans les dernières décennies en raison de la croissance urbaine. Pour disposer d'indices plus concrets, la SSIGE a réalisé en janvier 2014, en collaboration avec l'équipe d'auteurs de la présente synthèse thématique, une enquête auprès des producteurs d'eau au sujet des répercussions des conflits d'intérêts sur la production de l'eau. Sur les 201 participant à l'enquête, 76 rapportent avoir abandonné des captages d'eaux souterraines ou de sources ces 20 dernières années, tandis que 41 prévoient fermer un puits de captage dans les années à venir.

En tout, 14 entreprises de distribution ont indiqué que des captages d'eau potable avaient été abandonnés en raison de la croissance

III. 16: utilisation du territoire [90] au-dessus des nappes d'eau souterraine de différentes catégories: la carte montre la répartition des ressources en fonction de leur abondance en 2012, d'après l'OFEV [178], et le diagramme indique l'utilisation du territoire selon chaque type de catégorie.





A gauche: Dans les zones situées à proximité des agglomérations et bien desservies, l'urbanisation croissante restreint même les zones de protection destinées à l'approvisionnement en eau potable. (Photo: Reportair)

Au milieu: Les terrains plats situés dans les grandes vallées alpines sont particulièrement prisés. Bien que leur sous-sol recèle d'importantes ressources en eau potable, il est de plus en plus difficile de les préserver compte tenu de autres intérêts en présence (Urner Reusstal). (Photo: Reportair)

A droite: Le développement de l'infrastructure de transport est prioritaire en Suisse. Bien souvent, il faut prendre de la hauteur pour constater les conséquences sur le paysage et les eaux. (Photo: Reportair)

urbaine, tandis que 12 évoquent cette raison pour la fermeture prochaine de captages. Dans 18 de ces 26 cas, il s'agit de villes ou de communes de plus de 10 000 habitants, situées dans des régions à croissance rapide du Plateau et de grandes vallées alpines. Selon l'enquête, l'effet quantitatif des entraves à la production d'eau due à la croissance urbaine est extrêmement variable: de 1% à 60% de l'approvisionnement en eau potable par le passé et de moins de 1% à 95% pour les cas à venir [179]. Les valeurs moyennes (médianes) s'élèvent à 15% (7%) par le passé et à 26% (10%) pour les abandons prévus à l'avenir. Chaque situation est tributaire des conditions locales.

D'autres captages ont été abandonnés car la production d'eau potable n'était plus conforme à la loi du fait de conflits entre les zones de protection et des projets de construction de routes (6 cas), l'agriculture (8 cas) et, pour un cas, la viabilisation récente d'une zone industrielle. Pour certains captages, l'abandon était dû à des stratégies cantonales visant la constitution de réseaux (5 cas), à des projets de revitalisation (4 cas), à des exigences relatives aux débits résiduels dans les zones de protection de la nature, à des terres contaminées ou à la construction de téléphériques (1 cas chacun) ainsi qu'à d'autres problèmes non spécifiés liés à la zone de protection (9 cas). Dans plusieurs cas, les (petites) installations de production d'eau ont été abandonnées en raison de leur mauvaise qualité, de leur faible productivité ou de la dureté élevée de l'eau (19 cas).

Il n'est pas toujours possible d'exploiter d'autres nappes d'eau souterraine situées à proximité, soit parce qu'une zone de protection ne peut pas être mise en place si la zone concernée est utilisée à d'autres fins, soit parce que les flux d'eau souterraine en question sont déjà largement utilisés. Les mesures les plus fréquemment mentionnées en vue de remplacer les captages abandonnés sont l'interconnexion avec des zones de production voisines ou un regroupement à grande échelle. Les résultats démontrent l'existence d'une concurrence locale entre l'eau potable et la croissance urbaine, au moins dans les régions densément peuplées. Dans le cadre de l'enquête, plus de la moitié des entreprises (53%) estiment approprié que la position juridique des zones de protection de l'eau potable soit plus forte que celle des autres intérêts en jeu;

60% encouragent une plus grande sensibilisation du public à la question de la protection de l'eau potable.

D2 | Besoins en surface pour l'urbanisation et la circulation

Là où les villes et les communes souhaitent agrandir ou rénover des zones industrielles ou résidentielles, des intérêts économiques vitaux entrent en jeu et remettent en question l'affectation du territoire en cours dans la zone de planification. Dans ce contexte, la pression exercée sur l'agriculture est davantage perçue par le public. Comme expliqué sur la page 55, les sols agricoles ne sont pas les seuls à être construits: les surfaces nécessaires à la protection de l'eau potable le sont aussi. La statistique de la superficie révèle en outre dans quelle mesure l'utilisation du territoire, dans les zones de protection d'eaux souterraines, s'est transformée au détriment de la production d'eau potable durant les dernières décennies. Entre 1979/1985 et la dernière enquête de 2004/2009, les zones urbaines ont progressé de 16% dans les zones de protection [90].

L'incompatibilité entre urbanisation et utilisation des eaux souterraines est également due à la pollution existante ou potentielle. Les origines de la pollution des sous-sols urbains par des substances chimiques ne font l'objet que de peu d'études. D'une part, des substances variées sont produites dans les zones résidentielles, les sites industriels et les zones de circulation et, d'autre part, les canalisations d'égouts non étanches sont susceptibles de polluer les eaux souterraines. Dans les zones urbaines, les eaux souterraines ne sont donc généralement utilisées comme eau potable que si elles sont traitées ou complétées avec de l'eau de rivière épurée. Ainsi, dans l'usine de production d'eau potable de Zurich Hard, l'eau de la Limmat est infiltrée artificiellement afin de stopper l'afflux des eaux souterraines potentiellement polluées par la ville vers les puits de pompage. L'approvisionnement en eau potable provient ainsi principalement de l'eau de la rivière.

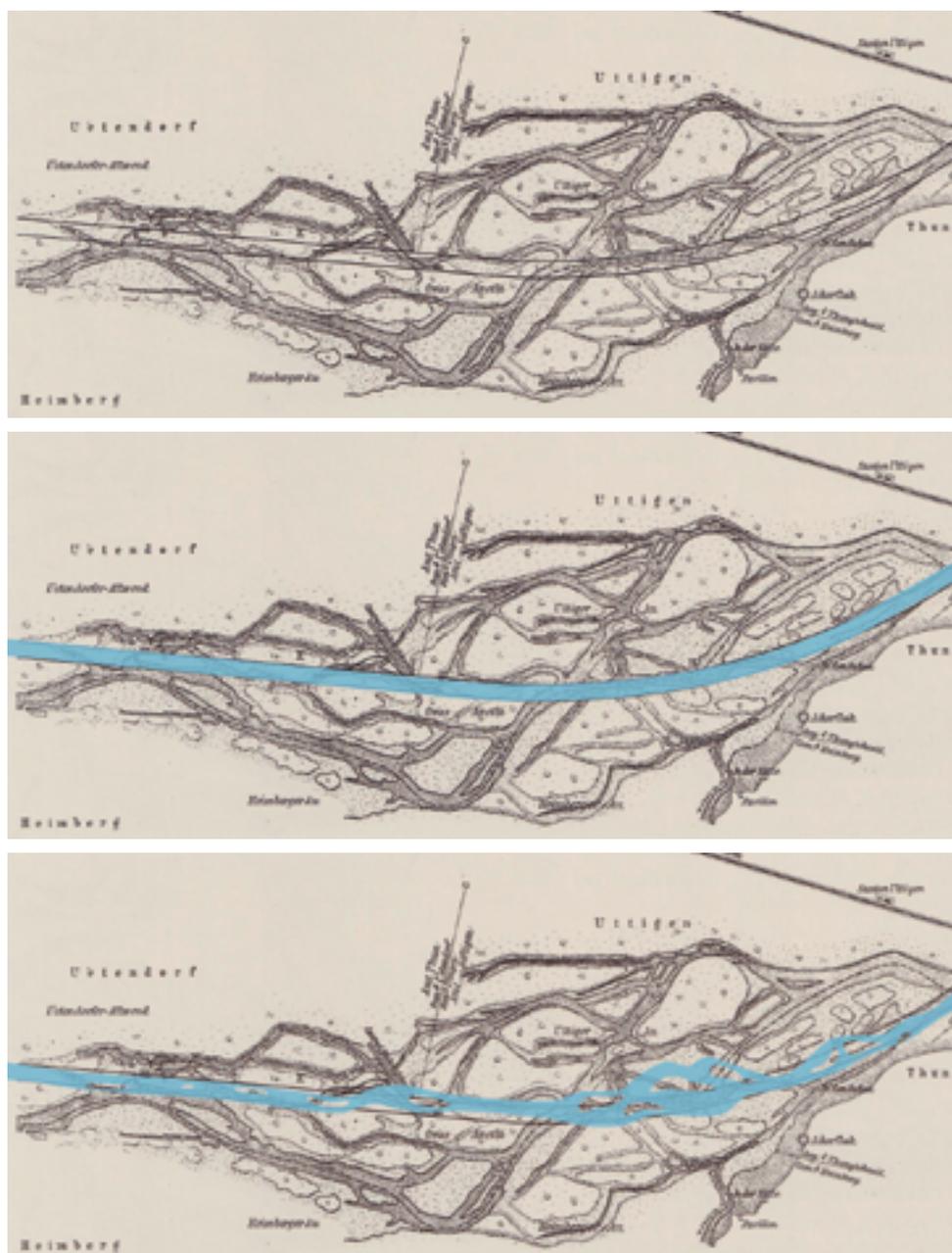
Conflit: protection contre les crues/urbanisation

L'ampleur des dégâts causés par une crue dépend principalement de la valeur des infrastructures et constructions se trouvant dans

la zone inondable. L'objectif de la protection contre les crues est de prévenir autant que possible les dommages, soit par des mesures de défense et de protection, soit en laissant libre des zones contiguës sur une surface aussi grande que possible, qui serviront de zones de rétention lors de crues extrêmes. Si ces zones sont revendiquées dans le cadre de la croissance urbaine, il en résulterait des conséquences doublement indésirables: d'une part, des zones de rétention seront perdues et, d'autre part, la protection des nouveaux bâtiments nécessitera la construction d'ouvrages de protection contre les crues supplémentaires et coûteux. Par conséquent, l'aménagement du territoire devra à l'avenir se baser sur les cartes des dangers afin d'éviter les constructions critiques et de préserver des zones de rétention suffisantes, à l'exemple de l'Autriche, qui a opté pour des protections non-architecturales contre les crues [180].

D3 | Besoins en surface pour l'agriculture

Aux XIX^e et XX^e siècles, le besoin croissant de terres pour l'agriculture intensive a été couvert par des mesures d'amendement, au détriment des rivières et des zones humides. L'ampleur des modifications est impressionnante: ainsi, entre Brigue et le lac Léman, plus de 100 km de méandres actifs ont été supprimés en deux corrections entre 1850 et 1900 afin de mettre à disposition des terres pour l'agriculture [181]. Un grand nombre de mares, d'étangs et de petits plans d'eau importants pour la survie des amphibiens ont également été drainés par le passé. Dans les Préalpes et les zones de montagne de plus haute altitude, de nombreux sites marécageux ou humides ont été drainés et mis à disposition pour l'agriculture ou le pâturage au XIX^e siècle. Les zones de vallée coupées de leur rivière ou asséchées sont beaucoup plus grandes que les zones dédiées à l'avenir à la revitalisation des cours d'eau, comme le demande la loi sur la protection des eaux (cf. ill. 17). Aujourd'hui, il est



III. 17: comparaison historique de l'espace fluvial à la lumière de l'exemple de l'Aar entre Thoune et Berne (projet Aarewasser) [182]. L'Aar au XIX^e siècle (partie supérieure), l'Aar aujourd'hui (au milieu), l'Aar et le projet Aarewasser (partie inférieure).

primordial de préserver des sols à haut rendement, en particulier les surfaces d'assolement. Cet objectif se trouve en conflit avec d'autres exigences relatives au territoire, telles que l'urbanisation et, dans une moindre mesure, la revitalisation des eaux (cf. ci-dessous).

Les répercussions de l'utilisation agricole du territoire, essentiellement qualitatives et écomorphologiques, sont abordées plus spécifiquement sur les pages 38 et 50.

D4 | Besoins en surface pour la protection des eaux

Les mesures décrites sur la page 51 et visant à améliorer la morphologie des cours d'eau (régime de charriage, migration des poissons, espace réservé aux eaux) sont complétées par des plans de revitalisation des zones fluviales. Ces derniers recensent – comme c'est actuellement le cas pour le Rhin alpin, le Rhône ou la troisième correction de la Thur en Thurgovie – les exigences en matière d'espace supplémentaire destiné aux cours d'eau. Il est ici question de surfaces qui ont été coupées de la rivière du fait d'ouvrages longitudinaux ou asséchées par drainage et qui sont aujourd'hui principalement vouées à l'agriculture. C'est pourquoi les revitalisations s'accompagnent souvent de restrictions liées aux utilisations agricoles. Certaines zones de revitalisation empiètent également sur des zones industrielles ou urbaines planifiées. Par comparaison à d'autres exigences, les besoins en espace supplémentaires pour les eaux sont modérés. Au cours des 25 dernières années, 2300 hectares en moyenne ont été urbanisés chaque année au détriment des terres agricoles [90]. C'est plus, en une année, que la totalité des surfaces agricoles prévues pour toutes les revitalisations des cours d'eau des prochaines décennies (cf. ill. 18). Les 20 000 hectares de terres agricoles prévus pour l'extensification imposée par la LEaux ne correspondent qu'à un tiers des sols obtenus entre 1941 et 1944 par des amendements de sols dans des zones humides [165].

Bilan Partie D

Conflits liés à l'utilisation du territoire

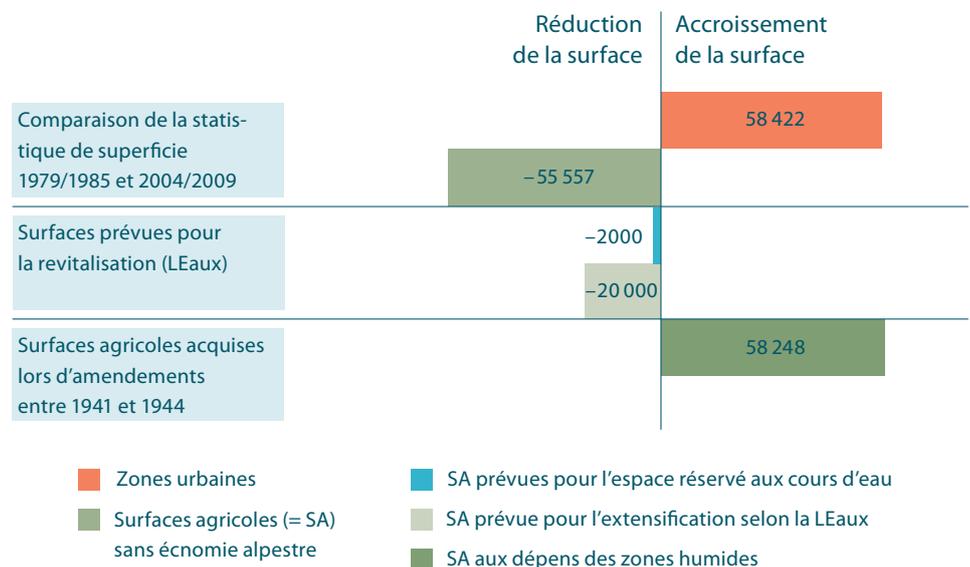
Deux conflits liés aux surfaces jouent un rôle particulièrement important dans le cadre de l'économie des eaux en Suisse. En premier lieu, le développement urbain peut entrer en conflit avec l'utilisation des nappes d'eau souterraines comme eau potable. A cela s'ajoute la concurrence existant autour des eaux souterraines en tant que ressource pour l'exploitation thermique. Souvent, les décisions prises dans le cadre des conflits avec ces exigences urbaines le sont au détriment de l'approvisionnement en eau et des zones de protection des eaux souterraines, la production d'eau potable locale devant alors être abandonnée.

Les producteurs d'eau potable communiquent peu au sujet des pénuries d'approvisionnement en eau potable susceptibles de survenir à cause de ces conflits. Même les cantons ne disposent d'aucune vue d'ensemble sur l'abandon de captages d'eau souterraine en raison de conflits d'utilisation, ni des utilisations qui les ont causés. Pourtant, cette vue d'ensemble serait déterminante pour la planification systématique de l'approvisionnement en eau, car le nombre de nappes d'eau souterraine abondantes et non polluées non encore exploitées est très limité et en déclin.

Par ailleurs, en vertu de la LEaux, l'extension des espaces réservés aux eaux empiètera sur l'utilisation actuelle du paysage fluvial. L'agriculture est largement concernée, car elle doit céder des terres pour la revitalisation et laisser place aux berges des rivières et ruisseaux. Si cela peut conduire à des pertes de surfaces importantes pour certains agriculteurs, la surface totale des terres agricoles n'en sera toutefois que peu réduite.

La matrice D récapitule les résultats de la partie D en les accompagnant de brèves notes explicatives.

ill. 18: sélection de modifications de l'exploitation du territoire passées et à venir: la superficie moyenne annuelle de terres agraires nouvellement aménagées ces 25 dernières années (environ 2300 ha) [90] est plus importante que la surface totale nécessaire à la revitalisation dans les prochaines décennies (2000 ha) [183]. Au total, 20 000 hectares de terres proches des rivières [183], soit environ un tiers des terres agraires nouvellement acquises entre 1941 et 1944, sont prévus pour l'extensification [165].



Matrice D – Conflits liés à l'utilisation du territoire

Partie	Se répercute sur ...	Approvisionnement en eau potable	Zones d'urbanisation et de circulation	Agriculture	Protection des eaux
	Exigence sociale				
D1	Approvisionnement en eau potable		1/2	3	4
D2	Zones d'urbanisation et de circulation	5			6
D3	Agriculture	7			8
D4	Protection des eaux	9	10	11	

■ conflit important
 ■ conflit
 ■ synergie et conflit
■ rivalités territoriales ne concernant pas l'eau

- Les situations considérées comme des conflits importants concernent de longs tronçons fluviaux ou de grandes quantités d'eau, ou entravent d'autres intérêts dans une très large mesure.
- En général, les conflits et/ou concurrences interviennent au niveau local ou régional, ou selon les saisons, et sont aggravés par la sécheresse et par des températures élevées.

- (1) Réglementation plus stricte sur la construction dans les zones et périmètres de protection des eaux souterraines et les zones riveraines.
- (2) Restriction de la construction de routes dans les zones et périmètres de protection des eaux souterraines et les zones riveraines.
- (3) Les zones de protection des eaux potables et l'espace réservé aux eaux sur les berges des lacs et des rivières entraînent des restrictions d'exploitation pour l'agriculture.
- (4) Les captages d'eau souterraine dans les plaines alluviales peuvent entrer en conflit avec la revitalisation du tronçon fluvial correspondant.
- (5) Juridiquement, l'urbanisation exclut l'exploitation des eaux souterraines comme eau potable. L'extension urbaine se traduit par la suppression de zones de protection et la fermeture de captages, qui doivent être remplacés par d'autres ressources en eau.
- (6) Dans les zones bâties, les revitalisations sont très limitées, voire impossibles.
- (7) L'agriculture intensive et la protection de l'eau potable s'excluent mutuellement sur une même surface.
- (8) L'exploitation agricole empêche les revitalisations.
- (9) En règle générale, les mesures de protection de l'eau ont un effet positif sur les ressources en eau potable. Il y a parfois des conflits entre les captages d'eau potable situés près des rivières et la revitalisation/protection des zones alluviales.
- (10) La revitalisation et les exigences liées à l'espace réservé aux eaux sont en conflit avec l'accroissement des zones urbaines, commerciales et de circulation. En revanche, l'expansion de l'espace réservé aux eaux et les remises à ciel ouvert en milieu urbain améliorent le climat urbain et la qualité de vie.
- (11) Les revitalisations occupent souvent des terres agricoles utiles.

3 – Les différentes utilisations de l'eau: risques et enjeux pour l'avenir

Le PNR 61 s'est fixé comme objectif de développer des bases, des méthodes, des stratégies et des solutions scientifiquement étayées pour les défis à venir dans le domaine de l'utilisation des ressources en eau et d'étudier la gestion des conflits d'utilisation dans une perspective globale. En outre, il vise à proposer des systèmes de management efficaces pour une utilisation prévoyante et durable des ressources en eau.

Le but de la présente synthèse était d'étudier de manière approfondie les nombreuses superpositions d'affectations ainsi que les conflits et synergies qui en résultent, de déterminer les mesures permettant d'y remédier et de proposer des stratégies de solution. Au chapitre 2, les conflits et synergies ont été systématiquement présentés à l'aune des quatre dimensions quantités d'eau, qualité de l'eau, impacts hydromorphologiques et rivalités territoriales.

Les résultats liés aux différentes dimensions et les défis globaux qui en découlent sont récapitulés dans le présent chapitre. Ces défis peuvent être résumés selon cinq grands axes thématiques qui reprennent une grande partie des conflits et synergies présentés dans les matrices du chapitre précédent.

Les défis peuvent être d'une part localisés géographiquement («Ressources en eaux alpines», page 60), car, dans les Alpes, les changements liés au climat et aux développements socio-économiques présenteront a priori des configurations très spécifiques. D'autre part, les défis concernent les utilisations ou les exigences sociales relatives aux eaux et aux cours d'eau («Approvisionnement en eau potable» page 61, «Agriculture» page 63, «Ecologie des cours d'eau» page 65), qui constituent des zones de conflit selon la vue d'ensemble des matrices du chapitre 2. Enfin, la partie «Sécheresse» (page 67) aborde les défis relevant du changement climatique, qui touchent quasiment l'ensemble des exigences d'utilisation relatives aux eaux.

Ressources en eaux alpines

L'eau est un élément caractéristique des régions alpines de Suisse, et l'homme est confronté depuis des siècles à l'alternance entre surabondance et pénurie. Depuis 700 ans au moins, les efforts déployés par les populations alpines pour gérer des eaux irrégulièrement disponibles sont visibles: les bisses, en Valais, en constituent un exemple marquant, de même que les cultures en terrasses dans l'Engadine. Le projet WATERCHANNELS du PNR 61 a montré qu'au XXI^e siècle, les stratégies d'utilisation traditionnelles ne suffisaient plus pour garantir une gestion ciblée de ces systèmes d'irrigation.

La question de la répartition et de l'utilisation des ressources en eau dans les régions alpines concerne principalement l'énergie hydraulique, qui produit aujourd'hui plus de la moitié de la consommation d'électricité en Suisse et couvre 11% des besoins en énergie. Par conséquent, la quasi-totalité des grands cours d'eau de Suisse sont influencés par les centrales hydroélectriques, du fait soit de prélèvements, soit d'effets d'exclusee, soit d'une rétention artificielle. La législation sur la protection des eaux de 1992, révisée et complétée en 2011, devrait permettre de réduire progressivement les conséquences de ces interventions. Dans le même temps, les changements climatiques et les processus politiques et économiques modifieront considérablement les conditions-cadres de l'énergie hydraulique.

Fort impact du changement climatique

Dans les barrages alimentés par les glaciers, on prévoit que la quantité d'eau produite augmentera légèrement jusque dans les années 2030 en raison de la fonte des glaciers. A compter des années 2040 au plus tard, les volumes provenant de la fonte estivale des glaciers seront

fortement réduits. Ainsi, pour les affluents du lac de Mauvoisin dans le canton du Valais, on escompte une diminution progressive d'environ 25% d'ici à 2100 [184]. Le projet FUGE du PNR 61 s'est intéressé aux conséquences du changement climatique sur la production et le rendement économique de l'hydroélectricité. D'un point de vue actuel, aucune perte fondamentale de production d'électricité n'est à craindre dans la seconde moitié du siècle, malgré la baisse des débits alpins (cf. page 13). L'apparition de nouveaux lacs dans les environs de certains glaciers actuels donnera lieu à une situation particulière. Les modélisations réalisées dans le cadre du projet NELAK du PNR 61 ont révélé que le volume total des lacs glaciaires formés à la place des glaciers pourrait correspondre à environ 3% du volume des glaciers en 2011. Il n'est pas certain que des lacs se forment effectivement dans tous les cas, car il est difficile de prévoir avec fiabilité où les chenaux d'écoulement se formeraient le cas échéant. Le volume de ces lacs pourrait être augmenté grâce à la construction de barrages et utilisé pour l'accumulation et la production d'électricité (cf. page 13).

Forte influence des conditions-cadres politiques et socio-économiques

En marge du changement climatique, les décisions politiques et sociales déterminent également le développement futur du secteur de l'énergie. Ainsi, l'utilisation de barrages situés à haute altitude pour le stockage de l'électricité nationale et internationale produites à partir de sources irrégulières (énergie éolienne ou solaire) pourrait même améliorer la rentabilité des centrales hydroélectriques. Cependant, les incertitudes politiques et économiques sont encore trop importantes pour pouvoir réaliser des prévisions à long terme [185], [186].

Exigences supplémentaires concernant les ressources en eau dans les Alpes

Les entreprises hydroélectriques sont de moins en moins les seules à manifester un intérêt pour l'utilisation des eaux alpines. Une situation qui s'avère notamment dans les vallées sèches intra-alpines et dans les régions densément peuplées ou connaissant un tourisme fortement développé. Le projet MONTANAQUA du PNR 61, qui a étudié en détail la gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre dans le canton du Valais, a conclu que les bassins d'accumulation à l'origine construits pour la production d'énergie hydroélectrique devraient à l'avenir fournir davantage d'eau pour d'autres utilisations également. Alors que les centrales hydroélectriques disposant aujourd'hui de concessions existantes seront indemnisées à cet effet, les



nouvelles concessions ou les nouvelles centrales pourront faire l'objet de conventions sur la répartition différente des affectations (cf. page 13). Il semble évident que les ressources en eaux alpines seront redistribuées, notamment dans les zones touchées par la fonte des glaciers, qui ne bénéficieront plus du débit des eaux de fonte en été. Des utilisateurs situés en aval pourraient être tributaires, en été et en automne, des volumes d'eau provenant de barrages. Cette mesure affecterait potentiellement l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture et la dilution, au moyen d'un débit adéquat, des eaux usées provenant de stations d'épuration. Les bassins d'accumulation pourraient également être davantage utilisés au titre de bassins de rétention pour la protection contre les crues. Ces exigences supplémentaires devront être adaptées en temps utile à l'exploitation énergétique des ressources alpines et être juridiquement garanties.

L'approvisionnement en électricité revêt une importance capitale pour la population, l'industrie et la politique. Il n'est pas certain que la société soit prête, dans le cadre de son optimisation, à faire des concessions dans le domaine de la protection des eaux et du régime des eaux. Ainsi, si la demande en électricité continue à augmenter – ce qui est à prévoir du fait du nombre croissant de sources de consommation, notamment voitures électriques et pompes à chaleur – la pression sur les eaux pourrait également s'accroître. Une bonne communication avec le public est donc déterminante afin que chacune des différentes exigences sociales puisse être évaluée à sa juste valeur.

Mesures possibles

En raison du changement climatique, le secteur de l'eau en Suisse sera confronté à des défis inédits dans les régions alpines. Par conséquent, de nouvelles tâches devront également être accomplies:

- ▶ clarification de la situation juridique des lacs émergents et discussions bien étayées autour des utilisations possibles de l'eau et des paysages qui en résultent à l'avenir (hydroélectricité, tourisme, etc.);
- ▶ à moyen terme, la répartition de l'eau devra être rediscutée, car les droits existants (concessions d'eau) parviennent à expiration et seront donc disponibles;

- ▶ de nouvelles combinaisons d'utilisation (souples) devraient être envisagées, en particulier s'agissant de la gestion et de la création de nouveaux réservoirs d'eau. A cet effet, le thème de la sécheresse (cf. page 67) devrait être expressément pris en compte.

Approvisionnement en eau potable

L'objectif de l'approvisionnement en eau potable en Suisse est de pouvoir mettre de l'eau à la disposition de la population «après un procédé de traitement simple». La ressource devant servir en premier lieu à cet effet est l'eau souterraine, préservée par le biais de mesures d'aménagement du territoire adéquates. Ces mesures sont fondées sur l'idée que, en temps normal, l'eau souterraine est protégée de la pollution par les couches de terre qui la recouvrent et qu'elle est dès lors disponible quasiment partout et de bonne qualité. Dans les zones particulièrement menacées, par exemple les aires d'alimentation des aquifères exploitables, les activités susceptibles de polluer les eaux doivent impérativement obtenir une autorisation. Ces dispositions se basent sur le principe de précaution, selon lequel l'apport de substances indésirables dans les réserves d'eau potable doit être évité d'emblée. Les zones où il apparaît impossible de restreindre les activités représentant un danger potentiel pour l'eau ne peuvent pas obtenir le statut de zone protégée ni être utilisées pour la production d'eau potable.

La Suisse a récemment connu une forte croissance en matière de revenus, de consommation, de surface habitable et de population, qui perdure avec la même intensité. A l'inverse, le territoire et le paysage restent constants malgré leur continuelle réaffectation. Les conséquences de cette nouvelle affectation du territoire jouent un rôle important pour la production d'eau potable. La tendance des zones urbaines à s'étendre dans les vallées, là où se trouvent les nappes d'eau souterraine les plus abondantes, donne lieu à une concurrence directe entre la production d'eau potable et l'urbanisation (cf. page 55).

Eaux souterraines sous pression

Pendant longtemps, les villes et les communes ont pu recourir à d'abondantes réserves d'eau souterraine propre dans des zones peu exploi-

Evolution de l'exploitation des eaux

dans les Alpes. Il faut négocier de nouveaux concepts d'utilisation pour les lacs situés en altitude.

A gauche: Le nouveau lac qui s'est formé sous le glacier de Stein offre un charme pittoresque. (Photo: Patricia Fry)

Au milieu: En revanche, des projets de barrage visent à tirer profit de la situation du nouveau lac de Trift. (NELAK)

A droite: Le barrage de Tseuzier près de Crans-Montana démontre qu'il est possible de combiner harmonieusement différentes utilisations. (MONTANAQUA)



L'approvisionnement en eau potable face à des défis de taille

A gauche: Les volumes d'eau souterraine et d'eau de source exploitables pourraient diminuer sous l'effet du changement climatique. Captage d'eau dans la vallée d'Urseren. (Photo: Daniel Küry)

Au milieu: Grâce à un réseau adapté, tous les services d'approvisionnement en eau devraient disposer d'au moins deux sources de captage indépendantes. (GW-TREND)

A droite: La qualité des ressources en eau potable tributaires des cours d'eau va bénéficier de l'amélioration technique des équipements des stations d'épuration des eaux usées (intérieur d'un réservoir d'eau). (GW-TREND)

tées de leurs environs. Toutefois, la pression d'utilisation croissante sur le paysage limite cette pratique, notamment dans la région densément peuplée du Plateau.

Ce phénomène entraîne l'abandon des captages d'eaux souterraines au niveau local, sur lesquels il est désormais prévu de construire. Dans la présente synthèse, de nouvelles informations probantes compilées en collaboration avec la SSIGÉ démontrent la pression structurelle exercée par l'expansion des surfaces construites sur l'approvisionnement en eau potable. Une enquête menée par la SSIGÉ auprès des fournisseurs en eau a montré que les captages d'eau potable devaient reculer face à la croissance urbaine dans les villes de taille moyenne du Plateau et dans les grandes vallées alpines notamment. D'autres fermetures de captages sont prévues dans les prochaines années. Les producteurs d'eau rapportent les difficultés qu'ils ont rencontrées pour établir des captages de remplacement, en raison d'autres utilisations qui empêchent la création de zones protégées. Ce processus et ses conséquences importantes pour la production d'eau potable ne font actuellement l'objet d'aucun relevé systématique, ni par les cantons ni par l'administration fédérale, ni par les communes, qui sont pourtant chargées de l'approvisionnement en eau.

Les eaux souterraines, jusqu'à présent principalement utilisées par les producteurs d'eau potable, sont de plus en plus exploitées pour le chauffage des bâtiments – un phénomène qui croît rapidement. L'exploitation de la chaleur des eaux souterraines, considérée comme énergie renouvelable, est encouragée par les cantons. On craint cependant que le grand nombre de nouveaux forages affaiblisse la fonction de protection des couches de terre et accroisse le risque de pollution. Afin de contrer ce risque, certains cantons n'autorisent pas l'exploitation thermique dans les zones et les périmètres de protection des eaux souterraines ou restreignent l'exploitation à quelques grandes installations. Toutefois, les prélèvements d'eau souterraine destinés à l'exploitation thermique sont synonymes de concurrence supplémentaire pour la production de l'eau potable.

Le facteur du changement climatique

Le changement climatique est susceptible d'engendrer d'autres complications pour les

approvisionnements en eau potable. Le projet GW-TREND du PNR 61 a constaté que les petits aquifères dépendant fortement de l'eau fluviale, notamment, seront à l'avenir moins abondants pendant les mois d'été (cf. page 27). On craint également qu'un réchauffement prononcé des eaux ait des répercussions sur la qualité de la production d'eau potable dans les vallées fluviales. Dans des conditions estivales normales, les quantités d'oxygène et de nitrates seront, à l'avenir également, suffisantes pour empêcher la libération du fer et du manganèse du sous-sol. Toutefois, en période de longue canicule, comme en 2003, on ne peut exclure la redissolution et la précipitation de ces métaux dans les captages de puits. Les résultats du projet RIBACLIM du PNR 61 indiquent cependant que de telles situations devraient être plutôt rares à l'avenir (cf. page 37).

Le changement climatique se perçoit également de manière indirecte par le biais de nouveaux modèles de consommation appliqués par des utilisateurs concurrents. Le projet AGWAM du PNR 61 (cf. page 24) a ainsi pu démontrer que l'agriculture (selon la politique agricole adoptée) pourrait solliciter de l'eau en quantité accrue, même dans les réserves utilisées jusqu'à présent par les fournisseurs en eau potable. Les entreprises industrielles et artisanales ont elles aussi sensiblement augmenté leur extraction d'eau souterraine ces dernières années, principalement pour le refroidissement des bâtiments et des processus (cf. pages 29, 42).

Risques de pollution

Une partie considérable de l'approvisionnement en eau dépend de nappes d'eau souterraine alimentées par les eaux fluviales, et donc, de la qualité de l'eau des cours d'eau. Outre les apports de substances diffus, cette qualité est largement déterminée par les stations d'épuration. Grâce au traitement quasiment généralisé des eaux usées domestiques et industrielles, la qualité de l'eau des cours d'eau s'est fortement améliorée durant les dernières décennies.

Grâce à l'ajout d'étapes d'assainissement supplémentaires dans 100 stations d'épuration importantes, l'apport de substances dans les cours d'eau devrait à nouveau se réduire dans les années à venir, et la qualité des eaux souterraine et potable alimentées par les eaux

fluviales continuer à s'améliorer. De par l'amélioration technique des équipements des stations d'épuration, la Suisse joue un rôle précurseur dans le domaine de la gestion des eaux, et les résultats de ces interventions sont suivis avec intérêt à l'étranger.

Il est plus difficile de limiter les apports de substances diffus dans les eaux provenant de l'agriculture, des voies de circulation, des égouts non étanches et des canalisations surchargées par temps de pluie. Dans ce type de cas, il est plus efficace de prendre des mesures à la source de la pollution.

Mesures possibles

L'approvisionnement en eau potable doit réagir en même temps aux conflits d'exploitation liés aux activités de la société et au changement climatique. Plusieurs stratégies potentielles sont envisageables. Parmi elles, certaines sont déjà appliquées aujourd'hui et se complètent mutuellement:

- ▶ Amélioration de la protection régionale des nappes d'eau souterraine importantes par des mesures d'aménagement du territoire afin de conférer à l'approvisionnement en eau local l'importance qu'il mérite aux côtés d'autres intérêts sociaux, notamment le recensement systématique des captages d'eau souterraine ayant dû laisser la place à d'autres utilisations, comme l'urbanisation.
- ▶ Distribution suprarégionale de l'eau issue de nappes d'eau souterraine abondantes. Bien souvent, les nappes situées sur le Plateau ne sont pas suffisantes. Comme alternative, il serait envisageable d'amener de l'eau des lacs ou des nouvelles installations d'alimentation artificielle des eaux souterraines de grande envergure. Inconvénient de cette option: les coûts élevés engendrés pour l'entretien des infrastructures.
- ▶ Maintien des structures existantes et traitement plus poussé des ressources en eau brute polluées. Si le traitement de routine implique de renoncer à l'objectif d'eau potable naturelle, les ressources considérées jusqu'à présent comme de qualité secondaire entrent désormais en ligne de compte pour l'eau potable (eaux karstiques, lacs, eaux fluviales via l'enrichissement artificiel des eaux souterraines). En outre, le conflit entre les captages d'eau souterraine et l'urbanisation pourrait être réduit si les nappes d'eau souterraine situées dans des zones urbanisées continuaient à être exploitées grâce à un traitement plus poussé.
- ▶ Prévention d'apports de substances au moyen de restrictions d'utilisation strictes et de mesures de politique chimique concernant les substances qui apparaissent fréquemment (p. ex. les produits chimiques persistants). D'une part, cette option se heurte à l'opposition d'autres intérêts et exige un renforcement de la protection des eaux souterraine et potable vis-à-vis d'autres activités; d'autre part, étant donné

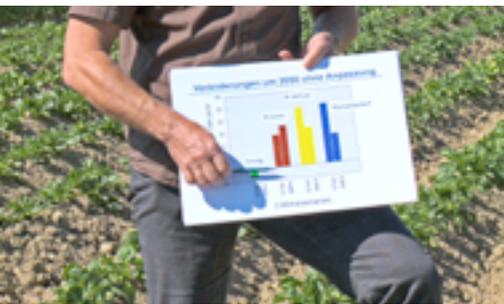
la multitude de substances existantes, cette approche s'accompagne de difficultés pratiques considérables.

- ▶ Hausse des valeurs limites pour l'eau potable, désormais alignées sur des valeurs limites basées sur la toxicologie humaine. Jusqu'à présent, des valeurs limites strictes étaient appliquées pour les substances retrouvées dans l'eau potable; leur objectif était d'exclure la présence de produits chimiques indésirables dans l'eau potable à titre préventif (principe de précaution). En combinaison avec des mesures d'aménagement du territoire destinées à la protection des eaux souterraines, cette mesure pourrait permettre d'utiliser, à long terme, l'eau souterraine comme eau potable sans traitement poussé. Toutefois, la hausse des valeurs limites jusqu'à des valeurs basées sur la toxicologie humaine équivaldrait à abandonner le principe de précaution.
- ▶ Meilleures connaissances relatives à l'utilisation de produits chimiques nuisibles à l'environnement grâce à un répertoire des produits chimiques.

La pose de jalons fondamentaux, tels que l'application du principe de précaution et des mesures d'aménagement du territoire destinées à la protection des eaux souterraines, est déterminante pour l'avenir de l'approvisionnement en eau potable en Suisse. Comment gérer ces principes alors qu'une pression accrue pèse sur l'utilisation des ressources en eau potable? Cette question fondamentale pour la société devra être résolue par le biais d'un processus politique.

Agriculture

En Suisse, l'agriculture reste encore le secteur le plus gourmand en surface. Ses activités, largement dirigées par les subventions de l'Etat et les paiements directs, marquent les paysages et, partant, le régime hydrologique. La Constitution tient explicitement compte de l'interdépendance étroite entre la production agricole et l'écologie en consignant les multiples fonctions de l'agriculture suisse (Constitution fédérale, art. 104). La production de denrées alimentaires ainsi que la contribution à la conservation durable des ressources naturelles sont deux objectifs sociaux que l'agriculture doit poursuivre dans une même mesure. La canicule de 2003 a fait prendre conscience du fait qu'en Suisse, l'eau pouvait également représenter un facteur limitatif pour la production agricole – qui plus est dans les conditions futures découlant du changement climatique. Le projet AGWAM du PNR 61 a pu démontrer qu'en l'absence de contre-mesures, le besoin potentiel en eau dépasserait à l'avenir, dans certaines régions, la totalité des débits. Le projet AGWAM a documenté la manière dont les besoins en eau pouvaient être nettement réduits par le choix des cultures et des méthodes d'exploitation, mais également par



Agriculture et eau

A gauche: Dans de nombreuses régions, il n'est plus possible d'augmenter les prélèvements d'eau destinés à l'agriculture, sous peine d'engendrer de trop lourdes conséquences pour l'environnement. (AGWAM)

Au milieu: L'irrigation au goutte-à-goutte constitue une alternative, la quantité d'eau utilisée étant nettement inférieure. (Photo: Jan Béguin)

A droite: Pour les agriculteurs, la question est surtout de garantir les revenus en utilisant moins d'eau. (AGWAM)

le biais de la répartition régionale de la production.

Il serait utile, pour l'agriculture, d'établir une différence entre les années «normales» du changement climatique et les périodes de sécheresse extrême. Les conditions des années «normales» peuvent être atténuées grâce à l'adaptation des méthodes d'exploitation et restent acceptables du point de vue de l'agriculture. A l'inverse, il ne sera pas possible de maintenir pleinement et partout la production agricole durant les périodes de sécheresse extrême, même avec une irrigation accrue. Les ressources en eau de certaines régions suisses ne sont pas suffisantes pour cela. Afin de protéger les agriculteurs contre des pertes de revenus en cas de sécheresse extrême, et de préserver les eaux face à des prélèvements excessifs, il est nécessaire de mettre au point des stratégies et des concepts sortant du cadre de la pratique actuelle (cf. ci-dessous). Ainsi, l'irrigation pourrait être réduite en période de sécheresse exceptionnelle et les pertes de rendement compensées par une assurance sécheresse. A cet effet, il est donc crucial de reconnaître assez tôt le passage d'une sécheresse «normale» à une sécheresse «extrême». Le projet DROUGHT-CH du PNR 61 fournit des bases essentielles permettant d'améliorer les prévisions en matière de sécheresse (cf. page 31).

Outre la quantité, la production agricole altère également la qualité de l'eau: cette problématique restera d'actualité à l'avenir. Les résultats d'AGWAM laissent prévoir que le risque de lessivage des nitrates augmentera avec le changement climatique. De plus, l'agriculture suisse est en constante transformation. Grâce à des lois plus strictes et à l'amélioration de la production, l'emploi de fertilisants a diminué depuis les années 70 et s'est stabilisé depuis la moitié des années 90. Par ailleurs, les exigences croissantes des grands distributeurs et des consommateurs concernant l'apparence et la qualité des produits se traduisent par une intensification et une spécialisation de la production. Cette évolution va généralement de pair avec l'emploi de fertilisants et de pesticides (avant tout pour les cultures spéciales), de sorte que, sans une amélioration concluante de l'efficacité des ressources, il faut s'attendre à une recrudescence des apports de substances dans l'eau.

Mesures possibles

La stratégie d'adaptation aux changements climatiques de la Confédération spécifie que les pratiques de l'agriculture doivent être adaptées à un climat modifié, par exemple en conformant la production au site, en améliorant la rétention de l'eau dans les sols, en réduisant le taux d'évapotranspiration, en produisant des cultures et des variétés résistantes à la sécheresse et, surtout, en modifiant le système d'irrigation («L'irrigation tient compte de la disponibilité en eau et elle est réalisée de manière économique et efficace»). Si l'on intègre également la problématique de la qualité de l'eau, il est possible d'identifier différentes mesures visant à garantir une production agricole respectueuse des ressources en eau.

- ▶ Evaluation des systèmes d'incitation et des régulations agricoles au moyen d'une observation générale et systématique des objectifs de l'agriculture polyvalente. Le PNR 61 (SWIP, IWAQA, AGWAM) a élaboré une palette d'outils méthodologiques directement applicables.
- ▶ Renoncement aux contraintes légales et économiques qui entraînent automatiquement une intensification accrue de la production agricole.
- ▶ Renforcement de la résilience contre la sécheresse, p. ex. par le biais
 - i. de l'adaptation des techniques de labour, de l'assolement et des variétés à des conditions de culture plus sèches;
 - ii. d'une gestion de l'irrigation plus efficace et orientée sur les ressources (garantie de la combinaison avec des quantités d'eau durablement disponibles, relevés des quantités consommées, directives relatives à des systèmes d'irrigation efficaces, capacités de stockage d'eau propres à l'exploitation, amélioration des prévisions de sécheresse, etc.).
- ▶ Programme global de mesures visant à réduire les apports de produits phytosanitaires, de substances nutritives et de sédiments fins dans les eaux (culture et utilisation de variétés résistantes, interdiction d'utiliser des substances critiques, rétention des substances dans les bassins versants en coupant leur connectivité, etc.).

Cette vue d'ensemble soulève la question suivante: quels efforts l'agriculture suisse peut-



elle et devrait-elle fournir aujourd'hui et à l'avenir? Les exigences de la protection des eaux envers la production agricole sont multiples. Elles sont nées de l'examen approfondi des objectifs sociaux liés à la production agricole et à la protection des eaux. Du fait de la modification des conditions-cadres climatiques et socio-économiques, cet examen restera à l'avenir un processus dynamique. A cet effet, le PNR 61 a élaboré d'importantes bases de diagnostic et de planification.

Écologie des cours d'eau

Les cours d'eau et les lacs sont à la fois l'objet et subissent les conséquences d'activités sociales variées restreignant leur espace et modifiant leur quantité, qualité et intégrité hydromorphologique. Si ces différentes sollicitations et répercussions ont chacune un impact individuel, elles peuvent également se renforcer mutuellement. Les dégradations observées aujourd'hui sont appelées à être atténuées par l'application de la nouvelle législation sur la protection des eaux (revitalisation, éclusées, régime de charriage, migration des poissons, espaces réservés aux eaux, agrandissement des stations d'épuration).

Aspect quantitatif

L'impact le plus notable sur la quantité des eaux est provoqué par l'énergie hydraulique. Celle-ci détourne l'eau des cours d'eau alpins, crée des retenues, modifie le régime après turbinage et restitue l'eau parfois dans un autre bassin versant. Les problèmes de débits résiduels et d'éclusées qui en découlent devraient être atténués par la loi fédérale sur la protection des eaux de 2011. Au vu des expériences réalisées lors de la mise en œuvre des subventions pour l'assainissement relevant de la loi fédérale sur la protection des eaux de 1991, il est important de commencer rapidement à éliminer les déficits causés par l'exploitation hydroélectrique si l'on veut respecter le délai imparti (d'ici à 2031). Près de 1 milliard de francs issus des taxes sur l'électricité payées par les consommateurs sont prévus pour financer les mesures nécessaires.

D'autres problèmes de quantité touchent les eaux suisses lors de longues périodes de sécheresse, d'une part en raison du temps de séjour réduit de l'eau dans les aquifères alimentés par les cours d'eau, et d'autre part en

raison des prélèvements parfois plus conséquents. Les cours d'eau de petite et moyenne taille n'ayant pas de grands lacs ni de glaciers dans leur bassin versant sont les plus touchés par ces problèmes. Si de l'eau leur est prélevée, directement ou indirectement (par des prélèvements dans l'aquifère qui leur est associée), les débits résiduels nécessaires aux organismes aquatiques risquent d'être insuffisants. Les bénéficiaires des prélèvements sont en premier lieu l'agriculture et, dans une moindre mesure, l'approvisionnement en eau potable public et l'extraction d'eau industrielle.

Mesures possibles dans le domaine quantitatif

- ▶ Cadastres des utilisateurs ayant une influence sur les débits (y c. prélèvements d'eau souterraine) et octroi coordonné de concessions pour les prélèvements au niveau de bassins versants dans le respect des quantités de débits résiduels.
- ▶ Signalement des données importantes pour l'écologie et issues de la surveillance de routine auprès des autorités responsables des autorisations relatives aux prélèvements d'eau.
- ▶ Relevé des quantités effectivement prélevées par les utilisateurs concernés, comparaison continue avec le débit disponible.
- ▶ Limitation précoce des prélèvements en cas de sécheresse prolongée, sur la base des systèmes de détection précoce développés dans le cadre du projet DROUGHT-CH du PNR 61.

Aspect qualitatif

Nombre d'activités sociales engendrent des émissions de substances variées. Plus le territoire fait l'objet d'une utilisation intensive, plus les apports de substances sont importants. En conséquence, les objectifs en matière de qualité de l'eau ne sont pas atteints partout, et en particulier dans les cours d'eau de petite taille ou fortement pollués par des eaux usées, où l'on retrouve des concentrations élevées de substances indésirables. Si certains apports de substances semblent à l'heure actuelle inévitables, il apparaît essentiel de mettre en œuvre d'autres remèdes et alternatives.

L'un des axes centraux de la politique de protection des eaux en Suisse est l'optimisation de la technique d'épuration des 100 stations d'épuration les plus importantes du pays. Le

L'écologie des cours d'eau sous la pression du changement climatique et des activités humaines

A gauche: Sous l'effet de la hausse de la limite de gel, le régime de charriage des cours d'eau alpins est modifié, ce qui n'est pas sans conséquence sur les frayères de poissons, notamment les truites de rivière. (SEDRIVER)

Au milieu: L'eau des petites rivières comme la Broye peut subir un réchauffement excessif en raison de prélèvements d'eau intensifs. (Photo: Broye source de vie)

A droite: Les larves de caloptéryx vierge se développant dans la végétation des cours d'eau pendant près de dix mois, l'espèce a besoin d'un débit constant. (Photo: Daniel Küry)

traitement poussé des eaux usées rejetées par les stations d'épuration dans les rivières est non seulement profitable à la qualité de l'eau potable (cf. page 61), mais également aux organismes vivant dans l'eau et à la biodiversité aquatique. Un autre axe de travail porte sur la manière d'éviter les apports de substances à la source. Les projets AGWAM et IWAQA du PNR 61 démontrent combien l'adaptation de l'exploitation du territoire peut affecter positivement la qualité de l'eau de bassins versants entiers.

Les nouvelles activités telles que le prélèvement de très grandes quantités d'eau des lacs pour l'exploitation thermique ne peuvent pas encore être jugées de manière concluante, mais doivent être soigneusement surveillées compte tenu, notamment, de l'écologie sensible des lacs. La même difficulté s'applique à l'augmentation, pendant les étés plus chauds, de l'exploitation de l'eau souterraine et des lacs pour le refroidissement des bâtiments et des processus (cf. page 41). Le réchauffement des eaux qui en résulte est accompagné et renforcé par l'augmentation des températures de l'eau due au changement climatique. Celles-ci pourraient, même sans l'impact humain, augmenter de plusieurs degrés Celsius et entraîner des modifications visibles de l'écologie des cours d'eau (projet IWAQA). Par exemple, la population de truites de rivière en Suisse pourrait ainsi s'amenuiser [187].

Mesures possibles dans le domaine de la qualité de l'eau

- ▶ Programme d'action visant à réduire les apports de substances diffus (pesticides, substances nutritives, érosion des sols, etc.). Dans cette optique, la prévention doit être conséquente, car une solution «end-of-pipe», à l'image de la stratégie MicroPoll mise en place avec succès dans le domaine des stations d'épuration, n'est pas envisageable.
- ▶ Renoncement, autant que possible, aux produits chimiques particulièrement problématiques à la source (substances persistantes, grandes quantités).
- ▶ Documentation et surveillance approfondies de l'usage des produits chimiques (p. ex. élaboration d'un répertoire des produits chimiques utilisés pour la production et contenus dans les produits, un «répertoire des produits chimiques» sur le modèle suédois).
- ▶ Mise en œuvre de davantage de stratégies de prévention et de rétention dans la production industrielle (recyclage, évaporation, production ne générant pas d'eaux usées).
- ▶ Renforcement de l'ombrage des berges le long des petits cours d'eau afin de réduire les pics de température.
- ▶ Estimation détaillée des conséquences de l'échange de grandes quantités de chaleur dans les lacs.

Aspect liés à l'hydromorphologie

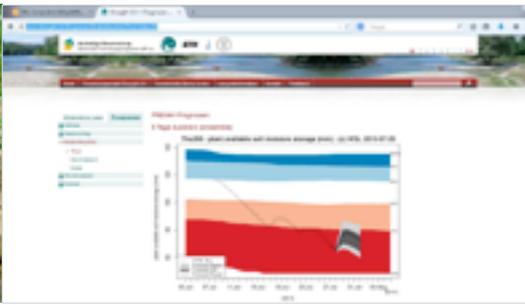
Par le passé, les cours d'eau suisses ont été dégradés, corsetés et aménagés au profit des gains de terres, de la protection contre les crues et de l'énergie hydraulique. Plus de 100 000 seuils de plus de 50 cm de haut entravent la migration des organismes aquatiques et modifient le régime de charriage, avec de lourdes conséquences, entre autres pour la reproduction des poissons. La nouvelle législation sur la protection des eaux entend redresser la barre: le régime de charriage et la migration des poissons devront faire l'objet d'assainissements d'ici à 2031. Il est vrai que, en conséquence de la stratégie énergétique du Conseil fédéral, l'exploitation accrue de la force hydraulique pourrait, dans un futur proche, altérer l'intégrité morphologique d'autres cours d'eau (cf. page 47 pour les plans d'aménagement). Il faudra donc coordonner les stratégies énergétiques et de gestion des eaux au niveau global plutôt que d'agir sectoriellement.

En ce qui concerne la protection contre les crues, la société devra s'adapter à la hausse des transports solides et des laves torrentielles causée par le recul du permafrost en altitude. Globalement, la fréquence et l'intensité des crues en Suisse pourraient augmenter. Sur le Plateau et dans les grandes vallées fluviales alpines – densément peuplées et exploitées –, les inondations peuvent avoir des répercussions sur des valeurs matérielles très importantes. Aussi, aucune nouvelle construction ne devrait être autorisée dans les zones inondables, afin de limiter au maximum le potentiel de dégâts et d'offrir des surfaces de rétention suffisantes autour des cours d'eau.

La loi fédérale sur la protection des eaux de 2011 prévoit de revitaliser 4000 km de tronçons fluviaux dans les 80 prochaines années. Une partie de ces aménagements respectueux de la nature amélioreront également la sécurité en cas de crue. Une vue d'ensemble par bassins versants permettra de faciliter la mise au point de solutions globales et d'empêcher que des mesures de protection contre les crues ne créent d'autres problèmes de crues en aval.

Mesures possibles dans le domaine de l'hydromorphologie

- ▶ Démanteler les obstacles artificiels à la migration devenus obsolètes, dans le cadre des travaux de construction et d'entretien réalisés régulièrement.
- ▶ Eviter toute construction de bâtiment dans les zones inondables afin de réduire la nécessité de mesures supplémentaires de protection contre les crues et, le cas échéant, évacuation ponctuelle de zones difficiles à protéger
- ▶ Adopter des méthodes d'aménagement fluvial respectueuses de la nature
- ▶ Planifier et financer des projets de protection contre les crues qui engendrent une forte accélération des débits (p. ex.



ouvrages en dur, galeries d'évacuation en cas de crue) uniquement à l'échelle de bassins versants entiers afin de minimiser le déplacement des dégâts potentiels vers l'aval.

- ▶ Éviter autant que possible de construire de petites centrales hydrauliques en raison de leur rapport coût-utilité défavorable en matière de protection des eaux.

Aspects liés au territoire

La protection des espaces réservés aux eaux le long des rivières est redéfinie et garantie par la loi fédérale sur la protection des eaux de 2011. Dans ce domaine, l'aménagement du territoire revêt une importance cruciale: protéger les sols agricoles contre les constructions pourrait sensiblement contribuer à la protection des milieux naturels aquatiques, car cela se traduirait par une baisse générale de la pression exercée sur les surfaces libres. Historiquement, les marais de source, prairies humides, prairies marécageuses et mares étaient exclusivement considérées comme des obstacles à éliminer. On sait aujourd'hui que ces éléments du paysage jouent un rôle fondamental pour la biodiversité. Ceux qui subsistent sont peu nombreux. Leur revitalisation, par exemple en supprimant les captages d'eau de source ou les drainages non utilisés, est à peine entamée. Des surfaces sont requises pour la remise en eau de ces zones humides.

Mesures possibles concernant l'utilisation du territoire

- ▶ Renforcer la position des espaces réservés aux eaux dans l'aménagement du territoire.
- ▶ Diminuer la pression urbaine sur les surfaces libres (agriculture et milieux proches de l'état naturel tels que les eaux).
- ▶ Établir un programme d'action pour la remise en eau des sites de captages d'eau de source et de drainages désormais abandonnés.

Sécheresse

La canicule de 2003 et le printemps sec de 2011, tous deux accompagnés de problèmes de pénurie d'eau notables, ont montré que quelques mois quasiment sans pluie suffisaient à entraver fortement la disponibilité de l'eau en Suisse. En 2003, les difficultés ont

surtout concerné le secteur de l'agriculture; le grand public, lui, se souvient de la canicule plutôt que de la sécheresse.

Et pourtant, la pénurie d'eau était considérable: les petites rivières et les ruisseaux avaient atteint des niveaux très bas ou étaient complètement asséchés; la Limmat, pourtant un grand cours d'eau, ne disposait de suffisamment d'eau que lorsque son débit était alimenté par les réserves du lac de Zurich. Par conséquent, le niveau du lac n'a pas pu être maintenu et a baissé de plusieurs centimètres. Le niveau de nombreuses nappes d'eau souterraine a également fortement baissé.

Toutefois, l'été 2003 n'est de loin pas la pire sécheresse que la Suisse ait connue. Les archives font état de périodes de sécheresse longues de plusieurs années (cf. page 31) et dont l'ampleur est peu comparable avec les épisodes survenus au XX^e siècle [96]. D'après certains rapports, les conditions météorologiques de l'époque étaient bien plus préoccupantes que celles des années de sécheresse de 1947 et 2003. Rien n'empêche que la Suisse subisse à nouveau de semblables périodes de sécheresse extrême à l'avenir.

Le changement climatique, du fait de la hausse des températures et de la baisse potentielle des précipitations estivales (les prévisions ne sont pas définitives sur ce dernier point), devrait augmenter la probabilité de la survenue de périodes de sécheresse extrême. Le PNR 61 avait donc pour tâche d'étudier les possibilités de détection précoce des conditions donnant lieu à une sécheresse. Le projet DROUGHT-CH du PNR 61 était avant tout axé sur l'évolution des réserves d'eau superficielles déterminantes pour la sécheresse. Il a en outre élaboré une plateforme d'information concernant les périodes de sécheresse (www.drought.ch) permettant aux producteurs d'eau, à l'agriculture et aux autres secteurs concernés de s'informer et de se préparer en conséquence. Le projet GW-TREND a analysé la vulnérabilité des nappes d'eau souterraine face à l'augmentation des températures et aux sécheresses.

Les études montrent également que la Suisse n'est pas outillée, aujourd'hui, de façon optimale pour affronter une sécheresse prolongée. La technologie moderne et les réseaux internationaux permettent cependant de mieux en supporter les conséquences qu'au XVIII^e siècle. La situation pourrait toutefois

Les défis de la sécheresse

A gauche: La canicule de 2003 a démontré que la Suisse aussi doit se préparer encore mieux aux périodes de sécheresse. Par exemple, les pertes de rendement des agriculteurs en cas de sécheresse prolongée pourraient être compensées par une assurance sécheresse. (DROUGHT-CH)

Au milieu: La détection précoce des périodes de sécheresse à venir et la communication d'informations y afférentes pourraient permettre de limiter les prélèvements d'eau dans les cours d'eau. (DROUGHT-CH)

A droite: Une planification prévisionnelle permet d'éviter que les cours d'eau n'atteignent un niveau d'eau critique comme en 2003. (DROUGHT-CH)

devenir critique en cas de sécheresse prolongée, par exemple pour l'agriculture: en règle générale, les agriculteurs partent du principe que les ressources en eau seront toujours suffisantes pour l'irrigation de leurs cultures. Les années 2003 et 2011, et en partie l'année 2006, ont pourtant démontré que lors d'une sécheresse prolongée, les besoins en eau de l'agriculture dépassaient rapidement les quantités disponibles au niveau régional [188].

Mesures possibles

Il ressort de ces différents aspects que des dispositifs politiques et administratifs doivent être créés en vue de gérer les conflits d'utilisation d'eau liés aux sécheresses (cf. également la synthèse thématique 4 du PNR 61 concernant les aspects de la gouvernance). Des mesures comme celles mentionnées ci-après peuvent contribuer à prévenir les conflits liés à l'eau, à préserver les fonctions de l'eau et à protéger les utilisations vitales de l'eau, en premier lieu l'approvisionnement en eau potable, même lors de longues sécheresses.

- ▶ Création d'un réseau stratégique dans le secteur de l'approvisionnement en eau potable. Ce processus est d'ores et déjà en œuvre suite aux événements de 2003.
- ▶ Prévision fiable des conditions de sécheresse devant permettre de réduire l'irrigation agricole à titre préventif.
- ▶ Compensation, par le biais d'une assurance, des pertes de revenus subies par l'agriculture en cas de sécheresse persistante.
- ▶ Négociation précoce des priorités assignées aux différentes utilisations des eaux en cas de sécheresse prononcée, en particulier dans les régions fragilisées. Le projet MONTANAQUA du PNR 61 en a clairement démontré la nécessité.
- ▶ Détermination de la mesure dans laquelle l'eau des réservoirs artificiels peut être mise à disposition pour d'autres utilisations au titre de réserve de secours.

4 – Prévenir, éviter, négocier: des outils pour la gestion de conflits

Dans de nombreuses situations, la gestion en place est d'ores et déjà efficace et porte ses fruits. Différents projets du PNR 61, tels que MONTANAQUA, AGWAM, WATERCHANNELS, NELAK, IWAQA ou SWIP, montrent cependant que le secteur de l'eau en Suisse sera confronté à de nouveaux défis à l'avenir. Ceux-ci nécessiteront d'adopter de nouvelles approches méthodologiques. Les décisions requises à cet effet devront être rationnelles, transparentes et compréhensibles pour la société. Dans la pratique, on a déjà réagi à cette situation, par exemple en encourageant la mise en œuvre du concept, largement étayé, de gestion intégrée des eaux par bassins versants (GIE). Les résultats des différents projets du PNR 61 fournissent notamment des outils méthodologiques permettant de rendre la GIE plus maniable.

Prévenir: une meilleure base de données pour agir à temps

Pour décider de manière rationnelle et prévoyante, il faut des connaissances. Les recherches effectuées pour le présent rapport ont montré que la Suisse dispose certes d'un grand nombre d'informations, mais qu'il lui manque encore d'importantes données dans des domaines précis. Tandis que les connaissances relatives à l'état hydrologique des eaux sont bonnes, on ne fait qu'estimer grossièrement les impacts de certaines utilisations, telles que les prélèvements du secteur agricole dans les cours d'eau et les eaux souterraines. Nous en savons également encore peu à propos de l'état chimique et biologique de nombreux cours d'eau – et souvent trop peu pour prendre certaines décisions. Il n'existe pratiquement aucune donnée permettant d'analyser le lien entre la pollution chimique et l'état écologique des cours d'eau sur des périodes prolongées [189]. Il est donc plus difficile de prendre des décisions fondées et rationnelles.

Il faudra par conséquent améliorer les données disponibles à l'avenir, en particulier parce que l'exploitation des ressources en eau augmente justement là où l'utilisation du territoire est de plus en plus intense. Alors que la planification pouvait autrefois être réalisée individuellement pour chaque affectation, on observe désormais d'importantes influences réciproques. Ces superpositions peuvent engendrer des situations de concurrence et de conflit entre exploitations, qui ne pourront être détectées suffisamment tôt que grâce à un contrôle accru des utilisations et de l'état des eaux. Le besoin de données plus détaillées est un corollaire de l'augmentation des

conflits potentiels. Ces efforts additionnels (qui seront minimisés grâce à des stratégies de monitoring intelligentes) sont à considérer comme un facteur de coût externalisé lié à l'intensité croissante de l'exploitation du paysage et des eaux.

Dans le cadre du PNR 61, plusieurs projets de recherche ont contribué dans une large mesure à améliorer les bases de données et à mieux comprendre les superpositions d'affectations dans le domaine de l'eau (NELAK, SWISSKARST, AGWAM, MONTANAQUA, GW-TREND). Il s'avère néanmoins que d'autres données relatives aux eaux doivent être collectées dans le cadre du recensement des utilisations et de leurs répercussions.

Il serait utile de recenser des données sur les aspects suivants:

- ▶ quantités d'eau réellement utilisées pour l'irrigation;
- ▶ exploitation des eaux par les entreprises industrielles et artisanales;
- ▶ identité et quantités des produits chimiques employés (produits industriels et ménagers);
- ▶ concurrence entre la production d'eau potable issue des eaux souterraines et les besoins en surface de l'urbanisation, de l'industrie et des voies de circulation;
- ▶ concurrence entre la production d'eau potable issue des eaux souterraines et l'exploitation de la chaleur et/ou du refroidissement par l'eau;
- ▶ développement durable de l'état écologique des eaux au moyen d'indicateurs biologiques probants.

Prévision d'événements extrêmes

La prévision des risques naturels tels que les crues est pratiquée depuis longtemps et continue à s'améliorer. Le projet DROUGHT-CH du PNR 61 recommande de mieux tenir compte des épisodes de sécheresse prolongée également en Suisse. Les archives témoignent d'événements extrêmes survenus au cours des 500 dernières années, sensiblement plus intenses que ceux du XX^e siècle. Même si la probabilité de tels événements est faible, la gestion des eaux en Suisse doit être capable de surmonter de telles situations avec la fiabilité nécessaire (cf. pages 31, 67).

Afin de réduire la vulnérabilité du pays en cas de sécheresse, il faut pouvoir détecter au plus tôt les épisodes de sécheresse. Le projet DROUGHT-CH du PNR 61 s'est concentré sur la mise en place d'un système de contrôle et de détection précoce ainsi que d'une plateforme d'information publique sur Internet (www.drought.ch). La définition du moment où l'on passe des conditions de sécheresse habituelles à un régime d'état d'urgence est

Le chapitre 2 a traité des exigences d'utilisations liées aux eaux et aux ressources en eau de Suisse, tandis que le chapitre 3 a présenté les interventions nécessaires qui en résultent et les mesures pouvant être prises. La forte croissance démographique et économique laisse prévoir une intensification encore accrue des utilisations à l'avenir.

Le présent chapitre expose les adaptations possibles des procédures relevant de la gestion de l'eau en Suisse, afin d'éviter et/ou de régler les conflits.

Les conséquences qui en découlent pour la politique globale de l'eau font l'objet de la synthèse thématique 4 du PNR 61.

«Il est primordial de disposer d'un système efficace de protection des eaux. A mon sens, cela passe principalement par une bonne coordination entre les communes des bassins versants.»

Eric Mennel
Service de l'environnement,
Canton de Fribourg,
conseiller communal de Givisiez



Pour plus d'informations  IWAQO
sous www.pnr61.ch

essentielle. Elle est tout aussi importante pour les eaux que pour les utilisateurs. Il pourrait par exemple s'agir du moment à partir duquel une assurance sécheresse compenserait les pertes de récolte des agriculteurs, afin d'éviter que l'irrigation s'intensifie en dépit des faibles niveaux des cours d'eau et des eaux souterraines. En cas de sécheresse extrême, la gestion des bassins d'accumulation en montagne devrait également limiter l'exploitation de la force hydraulique au bénéfice d'autres utilisations.

Eviter et négocier: adopter une approche rationnelle et transparente

Si la comparaison entre les utilisations et la viabilité de l'eau (en termes de quantité et de qualité) révèle un dépassement des limites, ou si un utilisateur restreint les possibilités d'un autre, il convient d'introduire des mesures en vue de corriger la situation. Pour trouver des solutions, il est recommandé de procéder en trois étapes: (a) augmenter l'efficacité de l'utilisation, (b) coordonner les utilisations, (c) définir la priorité des utilisations.

[a] Efficacité de l'utilisation: l'exploitation de l'eau met souvent en lumière d'importants potentiels d'efficacité inexploités. Le projet AGWAM du PNR 61 a identifié par exemple des grandes marges de manœuvre pour le secteur de l'agriculture. Il est tout à fait possible d'apporter aussi des améliorations dans le secteur de l'industrie et de l'artisanat, par exemple par le biais de processus et de machines à faible consommation d'eau ou de systèmes de circuit fermé.

[b] Coordination: si les mesures d'efficacité sont insuffisantes, la coordination tempo-

relle ou géographique peut permettre de désamorcer des conflits. Au niveau temporel, il est par exemple possible de réduire les prélèvements dans les cours d'eau en été grâce à l'eau accumulée en hiver. Au niveau géographique, les activités caractérisées par une utilisation particulièrement intensive ou polluante de l'eau peuvent être délocalisées là où cela n'affecte pas d'autres utilisations des eaux. On peut ainsi citer comme exemple l'adaptation des structures agricoles aux quantités d'eau disponibles, comme dans les modèles du projet AGWAM pour la région de la Broye ou la stratégie d'utilisation des eaux du canton de Berne, dans le cadre de laquelle certaines rivières sont mises à la disposition d'activités hydroélectriques, tandis que d'autres doivent rester libres de toute atteinte.

[c] Définition des priorités avec la participation des acteurs concernés: si les mesures d'efficacité et de coordination ne permettent pas de désamorcer complètement les conflits, il faudra définir les priorités d'utilisation. Etant donné qu'il faut souvent, dans ce cas, interférer avec des droits et habitudes existants, il est nécessaire de garantir la transparence des objectifs sociaux sous-jacents aux différentes utilisations et de les comparer. Diverses méthodes visant à soutenir de manière ciblée ces processus de négociation ont été élaborées dans le cadre de différents projets du PNR 61 (SWIP, IWAQA, HYDROSERV). Des approches, telles que l'analyse décisionnelle multicritère, mettent en lumière les raisons pour lesquelles les acteurs privilégient chacun des mesures différentes. Comme les expériences d'IWAQA ou de SWIP l'ont montré,

Examen d'objectifs contradictoires liés à la gestion de l'eau: enseignements du projet IWAQA du PNR 61

L'apport de substances dans les eaux de surface dépend fortement des différentes utilisations du territoire. Fort de cette constatation, le projet IWAQA a affiné une méthode spécifique qui tient compte de manière cohérente, lors de la prise de décision, des différents objectifs de la gestion de l'eau en matière de qualité de l'eau et d'état écologique. Cette méthode (l'analyse décisionnelle multicritère, en anglais «multi-criteria decision analysis, MCDA», cf. ill. 19) peut généralement être appliquée aux questions de gestion du secteur de l'eau et peut intégrer dans la prise de décision les incertitudes relatives aux prévisions des évolutions futures.

Les éléments-clés de la méthode sont, d'une part, la formulation explicite des objectifs de gestion visés et, d'autre part, la distinction entre le recensement objectif de l'état (et/ou les prévisions relatives à l'état futur) et l'évaluation de cet état. La procédure d'évaluation sous-jacente à cette méthode permet de regrouper de manière intelligible différents objectifs de gestion souvent contradictoires et de les comparer.

Dans le cadre du projet IWAQA, le système modulaire gradué établi par la Confédération et les cantons pour évaluer la qualité de l'eau (http://www.modul-stufen-konzept.ch/index_FR) a été intégré à l'analyse décisionnelle multicritère. Cette méthode peut être appliquée sous cette forme – et accompagnée du logiciel correspondant – à d'autres cours d'eau de Suisse. Il s'agit d'une procédure générale qui permet d'évaluer les mesures relatives à la gestion de l'eau (cf. également le projet SWIP et la synthèse thématique 3 du PNR 61).

En principe, cette méthode permet de traiter les objectifs contradictoires dans tout type de processus de décision. Elle peut également être employée dans les cas où les répercussions mutuelles de différents domaines politiques (p. ex. eau, énergie et agriculture) doivent être analysées et discutées (cf. page 72).

l'aide multicritère facilite considérablement le dialogue concret entre les acteurs (cf. encadré page 70).

Pour conclure un processus de décision de façon valable et consensuelle, il est nécessaire de disposer d'une bonne base de données et de pouvoir s'appuyer sur une gestion professionnelle des processus. Les spécialistes qualifiés à même d'appliquer dans la pratique les procédures développées et améliorées dans le cadre du PNR 61 sont encore rares. Etant donné la pluralité des conflits relatifs à l'eau, il serait particulièrement souhaitable de proposer des formations idoines. En effet, certaines configurations de conflits ne peuvent être résolues sans un recours professionnel à des méthodes et des procédures transparentes et compréhensibles.

Désamorcer les conflits: des stratégies impartiales, robustes, souples, durables

Le secteur de l'eau est plus fortement axé sur la durabilité que de nombreux autres domaines sociaux (p. ex. durée de vie des infrastructures destinées à l'eau potable et aux eaux usées = de 50 à 100 ans, concessions d'utilisation de la force hydraulique = 80 ans). De nombreuses décisions prises aujourd'hui devront faire leurs preuves sur plusieurs décennies, même face à l'évolution des conditions-cadres. Par conséquent, les approches légales, techniques et organisationnelles doivent être modulables et souples, tout en étant applicables avec succès («robustes») dans différentes conditions-cadres.

A cet effet, il convient de tenir compte des critères suivants:

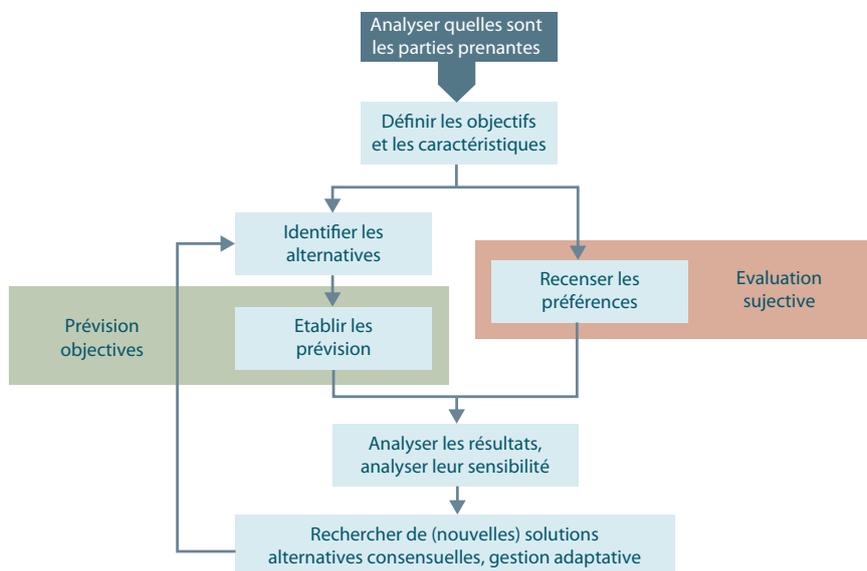
[a] Intégration très large de conditions potentiellement variables, entre autres: modifications durables (changement climatique, démographie, développements géopolitiques), événements extrêmes passagers

(p. ex. crue, sécheresse), déplacement éventuel des priorités sociales à l'avenir. Pour des projets déployés à long terme et portant sur des scénarios formulés de manière très large, la planification ne doit pas uniquement tenir compte des souhaits exprimés, mais également intégrer les évolutions non souhaitées et défavorables (cf. p. ex. les projets SWIP et IWAQA, ou les scénarios de sécheresse de l'Office fédéral de la protection de la population, cf. page 31). Dans cette perspective, les planifications doivent s'étendre au-delà des expériences de la génération actuelle et élargir le cadre de référence temporel (événements historiques).

[b] Eviter autant que possible les contraintes, conserver des marges de manœuvre aussi larges que possible: au vu de l'utilisation intensive des eaux en Suisse, il est essentiel de ne pas créer de conditions-cadres supplémentaires qui compliquent encore la situation. Les contraintes peuvent résulter de décisions de principe à caractère politiques (objectifs sectoriels), de nouveaux produits (p. ex. nanoparticules) ou d'utilisations supplémentaires (p. ex. besoin en refroidissement du secteur de l'informatique).

[c] Equité intergénérationnelle: cet objectif vise à la fois à préserver durablement les cours d'eau écologiquement intacts et à laisser aux générations futures une marge de manœuvre afin qu'elles puissent prendre leurs propres décisions. Il concerne tant les décisions techniques de principe (p. ex. réseaux unitaires ou séparatifs) que des ouvrages concrets: lors de la construction d'un barrage ou d'une zone urbaine, il convient de tenir compte des modifications du régime des eaux que cela engendre à long terme.

[d] Principe de précaution et systèmes de détection précoce: les décisions portant sur un horizon temporel long sont toujours



III. 19: déroulement schématisé de l'analyse décisionnelle multicritère [190]. La procédure a pour principale caractéristique d'établir une nette distinction entre les prévisions objectives et les évaluations subjectives.



Communiquer, négocier et s'entendre

A gauche: Il est plus facile d'aboutir à un consensus si tous les acteurs font preuve d'une compréhension mutuelle de leurs intérêts respectifs (atelier DROUGHT-CH).

Au milieu: Malgré les divergences d'opinions, il est souvent possible d'élaborer des solutions consensuelles répondant à plusieurs objectifs (atelier AGWAM).

A droite: Afin d'assurer une protection des eaux adaptée, la problématique de l'eau doit être abordée à temps dans tous les domaines politiques concernés (atelier SWIP).

liées à des incertitudes, mais elles doivent néanmoins être prises. Dans cette optique, les domaines dans lesquels les connaissances sont encore insuffisantes doivent bénéficier d'une attention toute particulière. Plus l'incertitude est grande, plus il faut faire preuve de prudence. On peut citer à titre d'exemple les produits chimiques dont nous ne connaissons pas encore l'impact sur l'environnement: si l'on tolère leur utilisation, mais qu'ils s'avèrent par la suite être nocifs, il sera encore plus difficile de les éliminer des eaux et cela demandera énormément de temps.

[e] Analyse des répercussions de décisions de principe antérieures en vue d'optimiser les décisions actuelles, par exemple en ce qui concerne les infrastructures («path dependence»). Cela est d'autant plus important du fait que plus l'existence d'une décision est longue, plus la portée de ses répercussions est large.

Prévenir les conflits: intégrer le sujet de l'eau dans l'action politique

La présente analyse des conflits et synergies potentiels liés à l'utilisation des eaux en Suisse montre que les objectifs sociaux relatifs à la qualité des eaux et à l'écologie des cours d'eau sont ceux qui sont le plus souvent remis en question, tandis que d'autres utilisations des eaux n'ont jusqu'à présent pas fait l'objet d'autant de contraintes. Cette tendance est notamment perceptible dans le cadre de la coordination entre l'aménagement du territoire destiné à la protection de l'eau potable et le développement de l'urbanisation ou dans le cadre d'activités agricoles et industrielles. Les objectifs en matière de politique énergétique occupent également une place importante dans la société – pas uniquement par rapport à l'énergie hydraulique, mais aussi par rapport à l'exploitation thermique des eaux – et relèguent les aspects de la protection des eaux au second plan.

Ce chapitre décrit les bases permettant de tenir compte de manière équilibrée de tous les aspects relatifs à l'économie des eaux et

à l'écologie des cours d'eau dans le cadre des procédures mises en œuvre. Ces méthodes de pesée rationnelle des intérêts se heurtent toutefois à des limites, lorsque la pondération est imposée de manière unilatérale, par le biais de politiques spécifiques (p. ex. les politiques agricoles et énergétiques), au profit d'une exigence sociale. Il est donc impératif de soutenir les procédures en intégrant le thème de l'eau dans sa globalité suffisamment tôt dans les divers domaines d'action politiques concernés. Par le passé, par exemple, l'orientation unilatérale de certains cantons sur la production d'énergies renouvelables s'est traduite par l'octroi à grande échelle de subventions pour des sondes thermiques, sans que d'autres exigences, telle que la production d'eau potable, soient suffisamment prises en compte. De tels problèmes devraient être évités à l'avenir, notamment en tenant compte des différentes exigences relatives aux eaux et aux cours d'eau dans l'aménagement du territoire (zones de protection des eaux souterraines, etc.).

L'eau est une caractéristique typique de la Suisse, une valeur propre, un atout national. Le présent rapport met en lumière les différents intérêts en jeu dans le cadre de l'exploitation des ressources en eau ainsi que la pression exercée sur l'eau, qui continuera probablement d'augmenter. Les jalons permettant de gérer cette situation ont, pour certains domaines, déjà été posés. Cependant, d'autres étapes sont nécessaires pour garantir durablement le succès de ces aboutissements. La Suisse, souvent qualifiée de château d'eau, renvoie une image de réserves d'eau inépuisables et d'exploitation illimitée. La présente synthèse, établie à partir des projets du PNR 61 et de nombreux autres documents relatifs à la gestion des eaux en Suisse, démontre que les différentes parties du château d'eau sont approvisionnées de manière très inégale. Ces déséquilibres pourraient s'accroître encore à l'avenir en raison de la modification des conditions-cadres. Il est primordial de prendre encore davantage soin des eaux en Suisse et de donner une nouvelle dynamique à leur gestion afin qu'elles puissent continuer d'offrir à l'avenir nourriture, détente et utilité économique aux humains.

Index des illustrations

- Ill. 1: diversité des exigences de la société vis-à-vis de l'eau.
- Ill. 2: répercussions de la force hydraulique sur les eaux.
- Ill. 3: disposition de la population à payer pour des mesures supplémentaires destinées à la protection contre les crues, relevée dans le cadre du projet HYDROSERV.
- Ill. 4: importance de l'irrigation au niveau régional et cultures les plus irriguées.
- Ill. 5: impact des conditions météorologiques sur les besoins en irrigation agricole.
- Ill. 6: courbe annuelle des besoins en eau mensuels moyens pour l'irrigation dans la région de la Broye selon deux stratégies d'exploitation du territoire et carte de l'irrigation des surfaces concernés à l'horizon 2050.
- Ill. 7: besoins en eau et bénéfices d'une exploitation agricole dans la région de la Broye dans le cadre du changement climatique (2050).
- Ill. 8: multiplication des pompes à chaleur dans le canton de Berne entre 2000 et 2009.
- Ill. 9: quantités d'eau souterraine affectées à l'exploitation thermique dans le canton de Berne.
- Ill. 10: auto-alimentation de l'industrie en eaux de surface entre 1972 et 2006.
- Ill. 11: écoulement des eaux usées dans les eaux souterraines via la partie basse de l'Ergolz (BL), illustré au moyen des concentrations de potassium.
- Ill. 12: répercussions du changement climatique sur diverses fonctions agricoles sans mesures d'adaptation pour la région de la Broye et la région du lac de Greifensee.
- Ill. 13: culture arable dans la plaine de la Broye selon différents scénarios – climat, prix et politique.
- Ill. 14: exemple de représentation de l'impact du climat et du recours à des mesures étendues de protection des eaux sur les concentrations en herbicides prévues en 2050.
- Ill. 15: intensité de l'exploitation du territoire par l'agriculture et l'urbanisation en Suisse.
- Ill. 16: utilisation du territoire au-dessus des nappes d'eau souterraine de différentes catégories.
- Ill. 17: comparaison historique de l'espace fluvial à la lumière de l'exemple de l'Aar entre Thoun et Berne.
- Ill. 18: sélection de modifications de l'exploitation du territoire passées et à venir.
- Ill. 19: déroulement schématique de l'analyse décisionnelle multicritère.

Index des tableaux

- Tableau 1: apport des projets du PNR 61 à la synthèse thématique 2.
- Tableau 2: description des scénarios socio-économiques utilisés dans le cadre du projet IWAQA.
- Tableau 3: aperçu des mesures étudiées dans le cadre du projet IWAQA.

Index des matrices

- Matrice A – Conflits et synergies potentiels relatifs à la gestion des quantités d'eau.
- Matrice B – Conflits potentiels concernant la qualité de l'eau.
- Matrice C – Conflits relatif à l'hydromorphologie et les milieux aquatiques.
- Matrice D – Conflits liés à l'utilisation du territoire.

Bibliographie

- [1] Rahn, E. et al. (2014): Analyse géographique des superpositions d'affectations dans le secteur de l'eau en Suisse – évaluations SIG dans le cadre de la synthèse thématique 2 «La gestion des ressources en eau face à la pression accrue de son utilisation» du Programme national de recherche 61. Eawag-Report, Dübendorf. (http://library.eawag.ch/eawag-publications/openaccess/Eawag_08139.pdf)
- [2] OFEN (2012) Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Office fédéral de l'énergie, janvier 2012 (uniquement en allemand)
- [3] Blanc, P. et al. (2013): Factsheet L'eau en Suisse. Académie des Sciences, Berne (http://www.scnat.ch/downloads/Factsheet_Wasser_f_web.pdf, consulté le 14.03.2014)
- [4] Walter, F. et al. (2013): Développement durable de la force hydraulique. Rapport à l'intention de l'Office fédéral de l'énergie. Berne (<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/27058.pdf>, consulté le 25.03.2014)
- [5] OFEN (2012): Le potentiel hydroélectrique de la Suisse (en 2050). Office fédéral de l'énergie, juin 2012
- [6] Gaudard L. et al. (2013) Climate change impacts on hydropower management. *Water Resource Management* 27, 5143–5156 (uniquement en anglais)
- [7] Gaudard L. et al. (2013) The future of hydropower in Europe: Interconnecting climate, markets and policies. *Environmental Science & Policy* 37, March 2014, 172–181 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.09.008>, uniquement en anglais)
- [8] NELAK (2013): Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques. Rapport de recherche du PNR 61. Haeberli W., Bütler M., Huggel C., Müller H. et Schleiss A. (éd.). Zurich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 p.
- [9] Bütler, M. (2013): Aspects juridiques. Dans: Rapport final du projet NELAK (PNR 61), 53–116
- [10] Biasiutti, G. (2013): Discours sur la stratégie énergétique du canton de Berne, janvier 2013, TTE (<http://www.bve.be.ch/bve/fr/index/direktion/organisation/ae/aktuell.assetref/content/dam/documents/portal/Medienmitteilungen/fr/2013/01/2013-01-25-referat-biasiutti-fr.pdf>, consulté le 31.01.2014)
- [11] ASAE (2012): Pompage-turbinage assure stabilité du réseau. Fiche d'information sur le pompage-turbinage. www.swv.ch/?uuiid=4e726b09-5214-43e7-94af-ecebdfba270&mode=live&open=true
- [12] Frontier Economics et SwissQuant (2013): Evaluation des centrales d'accumulation par pompage en Suisse dans le cadre de la stratégie énergétique 2050. Etude commissionnée par l'Office fédéral de l'énergie, décembre

- 2013 (<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33124.pdf>, consulté le 21.02.2014, uniquement en allemand, résumé en français)
- [13] Uhlmann, V. et al. (2007): Die Sicherung angemessener Restwassermengen – wie wird das Gesetz vollzogen? *Wasser Energie Luft*, 99, 4, 307-310 (uniquement en allemand)
- [14] OFEV (2013): Assainissement des débits résiduels selon les art. 80 ss, LEaux: état à fin 2012 et évolution depuis le second semestre 2011. Berne (http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/01284/01290/12509/index.html?lang=fr&download=NHZlpZeg7t,Inp6I0NTU042l2Z6ln1ae2lZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJ-CHdIN5g2ym162epYbg2c_JkKbNoKSn6A--, consulté le 14.03.2014)
- [15] Meile, T. et al. (2005): Synthesebericht Schwall-Sunk. Erkenntnisse aus dem Rhone-Thur-Projekt. Eawag, WSL, LCH-EPFL, VAW-ETHZ. 48 pages (<http://www.rivermanagement.ch/schwall-sunk/docs/synthese.pdf>, consulté le 14.03.2014, uniquement en allemand)
- [16] Bruder, A. (2013): Bewertung von Massnahmen zur Beseitigung wesentlicher Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk. Eawag, étude commissionnée par l'OFEV. (<http://www.bafu.admin.ch/gewaesserschutz/04851/index.html?lang=de>, consulté le 14.03.2014, uniquement en allemand)
- [17] OFEN (2013): Statistique des aménagements hydroélectriques (SAHE) 2013, Office fédéral de l'énergie
- [18] OFEV (2001): Kraftwerkszentralen mit Schwall-Sunk-Betrieb, étude des données disponibles commissionnée par l'OFEV, LimnEX AG, juillet 2001 (uniquement en allemand)
- [19] Swisstopo (2011): swisstopo (art. 30 OGéo): 5704 000 000 / Vector200©2011 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [20] Eawag (2011): Tronçons de débits résiduels: exploitation de la force hydraulique et débits résiduels – tronçons de débits résiduels et besoins d'assainissement, Eawag 2011/ (<http://www.eawag.ch/repository/surf/restwasser/index.html>, consulté le 13.05.2014)
- [21] Swisstopo (2003): swisstopo (art. 30 OGéo): 5704 000 000 / DHM25©2003 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [22] Swisstopo (2008): swisstopo (Art. 3 GeolV): 5704 000 000 / Vector25©2008 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [23] OFEV (2009): monitoring OFEV des petites centrales subventionnées par la LEnE; analyse des inscriptions à la rétribution à prix coûtant (RDC, état au 22.4.2009)
- [24] AE 21, OFEV, OFEN (2012): Übersicht über kantonale Strategien und Werkzeuge zur Nutzung der Wasserkraft (<http://wa21.ch/images/content/c%20wk/WA21%20WerkzeugeStrategien%200712.pdf>, consulté le 14.03.2014, uniquement en allemand)
- [25] OFEV, OFEN, ARE (2011): Recommandation relative à l'élaboration de stratégies cantonales de protection et d'utilisation dans le domaine des petites centrales hydroélectriques. Berne
- [26] Walther, H.-J. (2012): Abflussregulierung und Entscheidungsfindung im Betrieb – Sicht Wasserkraftbetreiber. Présentation lors du congrès KOHS (ASAE) 2012, Olten (<http://www.swv.ch/?uuid=08223a11-0efd-4c8f-be0a-aad9e433481c&mode=live&open=true>, consulté le 14.03.2014, uniquement en allemand)
- [27] Biedermann, R. et al. (1996): Speicherkraftwerke und Hochwasserschutz. *Wasser Energie Luft*, 10, 1996. Baden (uniquement en allemand)
- [28] Zermatt Inside (2012): Beschneien auf Knopfdruck? 6/12.pdf, consulté le 15.05.2014, uniquement en allemand (<http://inside.zermatt.ch/2012/>)
- [29] Reynard, E. et al. (2014): Interdisciplinary assessment of complex regional water systems and their future evolution: how socio-economic drivers can matter more than climate. *Wires Water* (en cours d'impression, uniquement en anglais)
- [30] Marbot B. et al. (2013): Wiesenbewässerung im Berggebiet. *Agroscope*, Zurich. (uniquement en allemand)
- [31] Commission intercantonale de surveillance du lac des Quatre-Cantons (sans date): Die Seeregulierung (http://www.4-waldstaettersee.ch/04.5_seeregulierung.html, consulté le 14.03.2014, uniquement en allemand)
- [32] Wehren. B. (sans date): Seekoten und ihre Bedeutung – Oberlandseen. AWA Berne. (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserregulierung/oberlandseen.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/GWR_Reg/GWR_Seepegel_und_ihre_Bedeutung_BeO.pdf, consulté le 24.02.2014, uniquement en allemand)
- [33] Hunkeler, D. et al. (2006): Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften. *Umwelt-Wissen 0603*, Office fédéral de l'environnement, Berne, 113 pages (uniquement en allemand, résumé en français)
- [34] Canton de Zurich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, page 64 ([https://www.ewp.zh.ch/vd/appl/awa/vnl/databases/vnl.nsf/vw-alldocuments/FD1EC1526C63F59AC1257B0B002FDD07/\\$File/121218_Vernehmlassungsbericht_WsG.pdf](https://www.ewp.zh.ch/vd/appl/awa/vnl/databases/vnl.nsf/vw-alldocuments/FD1EC1526C63F59AC1257B0B002FDD07/$File/121218_Vernehmlassungsbericht_WsG.pdf), consulté le 13.05.2014, uniquement en allemand)
- [35] Baumann, M. et al. (2009): Einsatz des neuen Grundwassermodells im Rahmen der 2. Thurgauer Thurkorrektur. Dans: *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft*, 63, 189-200 (uniquement en allemand)
- [36] Köplin, N. et al. (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes*, 28, 2567-2578 (uniquement en anglais) (<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9757>)

- [37] Ryffel, A. et al. (en cours de révision): Land use trade-offs for flood protection: A choice experiment with visualizations. *Ecosystem Services* (déposé, uniquement en anglais)
- [38] Pappas, C. et al. (2013): Sensitivity analysis of a process-based ecosystem model: Pinpointing parameterization and structural issues, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 118, 505-528 (<http://dx.doi.org/10.1002/jgrg.20035>, uniquement en anglais)
- [39] Celio, E. et al. (2014): Modeling land use decisions with Bayesian networks: Spatially explicit analysis of driving forces on land use change. *Environmental Modelling & Software* 52: 222-233 (uniquement en anglais)
- [40] Conseil-exécutif du canton de Berne (2013); rapport présenté lors de la séance du Conseil-exécutif du 23.10.2013 (<http://www.gr.be.ch/etc/designs/gr/media.cdwsbinary.DOKUMENTE.acq/e607ea2695274f06a35d8344e7853e90-332/4/PDF/2013.1374-Vortrag-F-71601.pdf>, consulté le 02.05.2014)
- [41] Baumann, M. (2009): Die Thur und das Thurtal. Dans: *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft*, 63, 17–27 (uniquement en allemand)
- [42] Weber, M. et al. (2007): Stand der Bewässerung in der Schweiz. Office fédéral de l'agriculture, Berne (uniquement en allemand)
- [43] Office fédéral de la statistique (2012): Recensement des exploitations agricoles, complément d'enquête 2010. Neuchâtel
- [44] Monney, P. (s.d.): Irrigation des arbres fruitiers. Site Internet d'Agroscope. (<http://www.agroscope.admin.ch/extension-obst/05946/06112/index.html?lang=fr>)
- [45] Kantonale Fach- und Zentralstellen für Obstbau et al. (2012): Anbauempfehlung für die Region Nordwestschweiz. (http://www.liebegg.ch/pdf/1330616097-anbau_empf_nwch2012.pdf, p. 46, uniquement en allemand)
- [46] Office de l'environnement du canton de Thurgovie (2013): Développement d'instruments pour la détection précoce et de solutions pour l'économie agro-alimentaire en Thurgovie visant une meilleure gestion en cas de pénurie d'eau. Projet s'inscrivant dans le cadre du programme pilote de l'OFEV pour l'adaptation au changement climatique
- [47] Canton de Schaffhouse (2009): Plan de gestion de l'eau, art. 2.3.4 (Conservation et utilisation des gisements d'eau souterraine). Schaffhouse
- [48] Kapphan I. et al. (2012): Climate change, weather insurance design, and hedging effectiveness. *Geneva Papers of Risk and Insurance Issues and Practice*, Special Issue: Climate Change and Insurance 37, 286–317 (uniquement en anglais)
- [49] Beguin, J. (2007): Irrigation dans la Broye fribourgeoise: trois exploitants agricoles se jettent à l'eau. *Geomatik Schweiz* 7, 346–349 (<http://www.gemueseschweiz.ch/grossesmoos.html> (consulté le 31.3.2014, en allemand))
- [50] OFAG (2014): Ordonnance sur les contribu-
- tions à des cultures particulières dans la production végétale (OCCP) du 23 octobre 2013 (état au 1er janvier 2014)
- [52] Canton de Vaud (2012): Rapport «circonstancié» en complément à la réponse du Conseil d'Etat aux trois objets parlementaires (Postulat Olivier Epars et consorts contre l'assèchement estival des cours d'eau; Postulat Marc-André Bory et consorts pour un plan pour la gestion de l'eau durant les périodes de sécheresse; Interpellation Epars sur la sauvegarde de nos rivières) (http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/environnement/eau/fichiers_pdf/Rapport_Epars-Bory_long_comp.pdf, consulté le 31.03.2014)
- [53] OFS (2012): Recensement des exploitations agricoles, complément d'enquête 2010. Neuchâtel
- [54] Swisstopo (2011): swisstopo (art. 30 OGéo): 5704 000 000 / swissTLM3D©2011 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [55] Swisstopo (2011c): swisstopo (art. 30 OGéo): 5704 000 000 / DHM25©2003 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [56] Fuhrer, J. et al. (2014): Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. *AgrarForschung*, en cours d'impression (uniquement en allemand)
- [57] Fuhrer, J. et al. (2013): Water Demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. *ART Schriftenreihe* 19, 2013, 56 pages (uniquement en anglais)
- [58] Prasuhn, V., et C. Vögeli Albisser (2014): Grundwasserqualität und Bewässerung. *Aqua & Gas* 4, 54–58 (uniquement en allemand)
- [59] Tendall, D.M. et al. (2014): Impacts of River Water Consumption on Aquatic Biodiversity in Life Cycle Assessment – a proposed method, and a case study for Europe. *Environ Sci Technol* 48(6), 3236-3244 (Köplin, N. et al. (2014): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change. *Hydrological Processes*, 28, 2567–2578 (<http://dx.doi.org/10.1021/es4048686>, uniquement en anglais))
- [60] Schweizer Hagel (2014): APV+ (http://hagel.ch/fileadmin/customer/Schweizer_Hagel/Produkte/APV%2B/APVplus.pdf, consulté le 12.05.2014, uniquement en allemand)
- [61] Marbot, B. et al. (2013): AgriMontana: Wiesenbewässerung im Berggebiet. *Agroscope* (<http://www.suissemelio.ch/files/aktuell/2013/Wiesenbewaesserung2013.pdf>, consulté le 30.03.2014, uniquement en allemand)
- [62] Göpfert, R. (2007): Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen im Kanton Graubünden (https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/dvs/alg/dokumentation/meliorationen/Dokumentliste%20Meliorationen/Bericht_Bewaesserung.pdf, consulté le 30.03.2014,

- uniquement en allemand)
- [63] Rodewald, R. (2013): Thesen für ein nachhaltiges Steuerungsmodell für Suonen. Dans: Schweizer, R. (2013): Des systèmes d'irrigation alpins entre gouvernance communautaire et étatique. Rüegger Verlag Zürich, 387–409 (uniquement en allemand)
- [64] Canton d'Argovie, Département des travaux publics, des transports et de l'environnement (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf die Aufgabenbereiche des Departements Bau, Verkehr und Umwelt. Rapport d'état (https://www.ag.ch/media/kanton_aargau/bvu/dokumente_2/umwelt__natur___landschaft/naturschutz_1/nachhaltigkeit_1/statusbericht_klimawandel_bvu_maerz_2010_normale_aufloesung.pdf, consulté le 19.12.2013, uniquement en allemand)
- [65] Office pour l'environnement du canton de Soleure (2012): Bericht zum Trockenjahr 2011 (<http://www.so.ch/fileadmin/internet/bjd/bumaa/pdf/wasser/fb-12-05.pdf>, consulté le 29.04.2014, uniquement en allemand)
- [66] Loi sur l'eau du canton de Zurich, projet du 18.12.2012, art. 65 al. 1
- [67] SSI GE (2011): Factsheet Trinkwasserstatistik Schweiz 2010 (uniquement en allemand)
- [68] Sinreich et al. (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz: Abschätzung von Kennwerten. Aqua & Gas. 9, 16–28 (uniquement en allemand)
- [69] Office pour l'environnement du canton de Soleure (2010): Hydrogeologie Wasseramt – Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung des Grundwasser (uniquement en allemand)
- [70] Canton de Zurich (2014): Kantonaler Richtplan Kapitel 5 Versorgung/Entsorgung, Zurich (état le 18.03.2014) (http://www.are.zh.ch/internet/baudirektion/are/de/raumplanung/kantonaler_richtplan/richtplan/_jcr_content/contentPar/download-list_5/downloaditems/43_1397641412817.spooler.download.1397640129849.pdf/KRP_Kap5.pdf, consulté le 02.05.2014, uniquement en allemand), et la carte connexe sur http://www.are.zh.ch/internet/baudirektion/are/de/raumplanung/kantonaler_richtplan/richtplan.html, consultée le 02.05.2014
- [71] Möck, C. et al. (2014): Hydrogeological modeling of climate change impacts on a small-scale aquifer (en préparation, uniquement en anglais)
- [72] Käser, D. et al. (2014): Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments. 2014 (en préparation, uniquement en anglais)
- [73] Canton de Berne (2010): Stratégie d'utilisation de l'eau, page 17 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/fr/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_f_0611.pdf, consulté le 02.05.2014).
- [74] BVU (2007): Leitbild Wasserversorgungen Aargau. Bericht des Departements Bau Verkehr Umwelt des Kantons Aargau (https://www.ag.ch/media/kanton_aargau/bvu/dokumente_2/umwelt__natur___landschaft/ressourcennutzung_1/trinkwasser_1/afu_leitbild_wasserversorgungen_ag.pdf, consulté le 17.02.2014, uniquement en allemand)
- [75] Schürch, M. et al. (2008): Schadenspotential und Verletzlichkeit von Grundwasser – Fallbeispiele bei Hochwasser und Starkniederschlägen. gwa 6, 459–469 (uniquement en allemand)
- [76] Canton de Saint-Gall (2012): Grundwasserstrategie Kap. 2.3.1.b (uniquement en allemand)
- [77] Canton de Berne (2010): Stratégie d'alimentation en eau 2010, page 9 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/direktion/ueber-die-direktion/dossiers/wasserstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/fr/Wasserstrategie/Wasserversorgungsstrategie_f.pdf, consulté le 10.05.2014)
- [78] Canton de Berne (2010): Stratégie d'utilisation de l'eau, page 16 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/fr/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_f_0611.pdf, consulté le 02.05.2014)
- [79] OFEV (2009): Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie. Berne (www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01042/index.html?lang=fr&download=NHZlpZig7t,Inp6l0NTU042l2Z6ln1ae2lZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGdoF,fmym162dpYbUzd,Gpd6emK2Oz9aGodetmqaN19Xl2ldvoaCVZ,s-.pdf, consulté le 15.05.2014)
- [80] Canton de Zurich (2010): Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser. Planungshilfe der Baudirektion des Kantons Zürich (uniquement en allemand)
- [81] Canton de Berne (2010): Stratégie d'utilisation de l'eau, page 11 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/fr/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_f_0611.pdf, consulté le 02.05.2014)
- [82] Freiburghaus, M. (2009): Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. gwa 12, 1001-1009 (uniquement en allemand)
- [83] Gander-Kunz, Y. (2013): Regionalisierung Kennzahlen Wassernutzung, Beilage 6. Bericht im Auftrag des BAFU (uniquement en allemand)
- [84] Statistisches Amt des Kantons Basel-Landschaft (2013): Wassergewinnung im Kanton Basel-Landschaft 1995–2012 (http://www.statistik.bl.ch/stabl_data/stabl_generator/titel.php?thema_id=3&unterthema_id=7&titel_id=52&modular=0) sowie Wasserverbrauch nach Verbraucher-kategorie im Kanton Basel-Landschaft 1995–2012 (http://www.statistik.bl.ch/stabl_data/stabl_generator/titel.php?thema_id=3&unterthema_id=7&titel_id=53&modular=0, consultés le 12.05.2014, uniquement en allemand)

- [85] Mountains.ch: Naturspeichersee Corviglia, Projektbeschreibung. (<http://www.mountains.ch/projekte/speichersee-corviglia/>, consulté le 31.03.2014, uniquement en allemand)
- [86] Genossenschaft Schnee-Horn, Schwende Al (<http://www.schnee-horn.ch/index.php/de/>, consulté le 31.03.2014, uniquement en allemand)
- [87] Hahn F. (2004): L'enneigement artificiel dans l'arc alpin: Rapport de synthèse. alpMedia / Décembre 2004. Schaan, Liechtenstein: CIPRA International (International Commission for the Protection of the Alps). (http://www.cipra.org/fr/publications/2709?set_language=fr, consulté le 31.03.2014)
- [88] Reynard, E. et al. (2010): Water Use in Dry Mountains in Switzerland. The Case of Crans-Montana-Sierre Area. Dans: Neményi, M. und Heil, B.: The Impact of Urbanization, Industrial, Agricultural and Forest Technologies on the Natural Environment. Budapest, 2012 (uniquement en anglais)
- [89] Rixen, C. et al. (2011), Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. Mountain Research and Development, 31(3), 229–236 (uniquement en anglais)
- [90] OFS (2004): Statistique de la superficie NOAS04.
- [91] Gemeinde Hausen am Albis, ZH (2011): Teiländerung Zonenplan Golfpark Zugersee. Planungsbericht nach Art. 47 RPV (http://cms3-hausen.backslash.ch/documents/Be110816_Planungsbericht_BZO_nach_RPV_47Hausen_Version11.pdf, consulté le 18.03.2014, uniquement en allemand)
- [92] Epting, J., et al. (2012): Thermal management of an urban GWB. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1851–1869, 2013 (uniquement en anglais)
- [93] Fundel, F. et al. (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 395–407 (<http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-395-2013>, uniquement en anglais)
- [94] Zappa, M. (2012): Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. Forum für Wissen, 19–27 (uniquement en allemand) ISSN 1021-2256
- [95] Kruse, S. et al. (2010): Informationsbedarf zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz – Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen. Wasser Energie Luft 102, 4, 305-308 (uniquement en allemand)
- [96] Pfister, C. et al. (2000): Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. Dans: Schorer, M. (2000): Trockenheit in der Schweiz, Workshopbericht, OcCC, Bern (uniquement en allemand)
- [97] Office fédéral de la protection de la population (2013): Dossier des mises en danger. Sécheresse. Berne.
- [98] Stauer, P. et al. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen. Dans: Aqua & Gas 11, 42-50 (uniquement en allemand)
- [99] Stauer, P. et al. (2012): Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen: Faktenblatt «Diffuse Mikroverunreinigungs-Emissionen aus Siedlungen (DIMES)», étude commissionnée par l'Office fédéral de l'environnement. Eawag, Dübendorf (http://www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/urbane_einzugsgebiete/dimes/DIMES_Faktenblatt.pdf, consulté le 15.05.2014, uniquement en allemand)
- [100] SSI GE (2012): Annuaire 2012 – Gaz et Eaux. Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux, Zurich
- [101] OFEV (2013): Abwasserentsorgung 2025. Rapport de l'Office fédéral de l'environnement, Berne (http://www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/infrastrukturen/uebersichtsstudie_2025/schriftenreihe_21.pdf, consulté le 02.05.2014, uniquement en allemand)
- [102] Stauer, P. et al. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen. Aqua & Gas 11, 2-10 (uniquement en allemand)
- [103] Gugerli, D. (2000): Wir wollen nicht im Trüben fischen. Gewässerschutz als Konvergenz von Bundespolitik, Expertenwissen und Sportfischerei (1950–1972). Schweizer Ingenieur und Architekt, 118, 13, 9–15 (http://www.tg.ethz.ch/dokumente/pdf_files/Klaeranlagen_SIA.pdf, consulté le 31.03.2014, uniquement en allemand)
- [104] Maurer, M. et al. (2006): Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Schlussbericht. Dübendorf (uniquement en allemand)
- [105] Beer, M. (2011): «...Nichts ist ohne Gift.» Aqua & Gas 3, 11 (uniquement en allemand)
- [106] Strahm, I. (2012): Organische Spurenstoffe in ARA. Eliminierungsmassnahmen in Kläranlagen – Abschätzung von Nutzen und Kosten. Aqua & Gas 11, 80–86 (uniquement en allemand)
- [107] Götz, C.W. et al. (2010): Mikroverunreinigungen. Beurteilung weitergehender Abwasserreinigungsverfahren anhand Indikatorsubstanzen. gwa 90, 4, 325–333 (uniquement en allemand)
- [108] Freiburghaus, M. (2012) Statistische Übersicht über die Wasserversorgung in der Schweiz 2010. Aqua & Gas 3, 54–59 (uniquement en allemand)
- [109] Ochsenbein, U. et al. (2012): Mikroverunreinigungen in Aarealgewässern – ein Risiko? Aqua & Gas 11, 68–79 (uniquement en allemand)
- [110] Auckenthaler, A. et al. (2012): Spurenstoffe in Fliessgewässern. Auswirkungen aufs Grundwasser – Fallbeispiele aus dem Kanton Basel-Landschaft. Aqua & Gas 11, 60–66 (uniquement en allemand)
- [111] Diem, S. et al. (2013): NOM degradation during river infiltration: effects of the climate variables temperature and discharge. Water Res. Nov 1, 47(17), 6585-6595 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.028>, uniquement en anglais)
- [112] Diem, S et al. (2013): Qualität des Uferfiltrats.

- Einfluss der klimabestimmten variablen Temperatur und Abfluss. *Aqua & Gas*, 11, 14–21 (uniquement en allemand)
- [113] Projet Fischnetz (2004): Dem Fischrückgang auf der Spur. Schlussbericht. Eawag, Dübendorf (http://www.fischnetz.ch/content_d/publ/Publications/Kurz_Schlussbericht/schlussbericht_deutsch.pdf, consulté le 13.05.2014, uniquement en allemand)
- [114] Annexe 3.2, chiffre 1, al. 2 OEaux
- [115] VOKOS (2010): Sachplan Siedlungsentwässerung 2010 der Kantone Bern und Solothurn (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/direktion/ueber-die-direktion/dossiers/wasserstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/de/Wasserstrategie/Sachplan%20Siedlungsentwässerung%20VOKOS_d.pdf, uniquement en allemand, consulté le 13.5.2014)
- [116] Ruff, M. (2013): 20 Jahre Rheinüberwachung. *Aqua & Gas* 5, 16–25 (uniquement en allemand)
- [117] Office pour l'environnement du canton de Saint-Gall, 2013: Spurenstoffe im Abwasser – Suche nach relevanten Emissionsquellen, Ergebnisse der Messkampagne 2012 (http://www.umwelt.sg.ch/home/Themen/wasser/Mikroverunreinigungen/_jcr_content/Par/downloadlist/DownloadListPar/download_6.ocFile/AFU%20St.Gallen%20-%20Spurenstoffe%20im%20Abwasser%20-%2020130704.pdf) (consulté le 09.08.2013, uniquement en allemand)
- [118] Götz, C. W. (2014): Suche nach gewerblichen und industriellen Emissionsquellen im Kanton St. Gallen. *Aqua & Gas* 3, 44–51 (uniquement en allemand)
- [119] Chèvre, N. et al. (2013): Suivi de la pollution du Léman. *Aqua & Gas* N° 5, 26–34
- [120] Fuhrer, J. et al. (2013): Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. *ART Schriftenreihe* 19, 2013, 56 pages (uniquement en anglais)
- [121] OFEV (2014): Propagation d'organismes nuisibles, de maladies et d'espèces exotiques (<http://www.bafu.admin.ch/klimaangepassung/11529/11550/11619/index.html?lang=fr>, consulté le 16.05.2014)
- [122] WWF et al. (2014): Plan d'action pesticides: il est temps de passer à l'acte. (<http://www.wwf.ch/fr/actualites/medias/communiques/?1825/Plan-daction-pesticides-il-est-temps-de-passer-a-lacte>, consulté le 13.7.1014)
- [123] Parlement suisse (2012): Postulat Moser 12.3299 – Plan d'action pour réduire les risques et favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires (http://www.parl-a--ment.ch/f/suche/Pages/geschaefte.aspx?gesch_id=20123299, consulté le 31.03.2014)
- [124] Scholten, L. et al. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Res.*, 2014, 49, 1, 124–143
- [125] Site Internet de l'OFEV: produits phyto-sanitaires dans les eaux souterraines (<http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07500/07563/07579/index.html?lang=fr>, consulté le 05.05.2014)
- [126] Site Internet de l'OFEV: nitrates dans les eaux souterraines (<http://www.bafu.admin.ch/grundwasser/07500/07563/07577/index.html?lang=fr>, consulté le 05.05.2014)
- [127] Lovas, R. (2012): Zustand des Sempachersees 2011. Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern (<http://www.sempachersee.ch/pdf/Seezustand%202011.pdf>, consulté le 13.05.2014, uniquement en allemand)
- [128] Moschet, C. et al. (2014): How A Complete Pesticide Screening Changes the Assessment of Surface Water Quality. *Environmental Science & Technology* 48, 10, 5423–5432 (<http://dx.doi.org/10.1021/es500371t>, uniquement en anglais)
- [129] Wittmer, I. et al. (2014): Schweizer Fließgewässer mit vielen Pestiziden belastet. *Aqua & Gas* 3, 32–43 (uniquement en allemand)
- [130] Dubaish, F. et al. (2013): Suspended Microplastics and Black Carbon Particles in the Jade System, Southern North Sea. *Water Air and Soil Pollution* 8, 224(2) (<http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1352-9>, uniquement en anglais)
- [131] Office fédéral de la santé publique OFSP (2012): Gestion des substances étrangères non réglementées présentes dans l'eau potable. Berne
- [132] Brüscheiler, B. (2010): Das TTC-Konzept. Beurteilungsmethode von Kontaminanten unbekannter Toxizität im Trinkwasser, *gwa* 4, 295-303 (http://www.eawag.ch/forschung/cc/ccdw/kompendium/health/TTC_Konzept.pdf, consulté le 13.07.2014, uniquement en allemand, résumé en français)
- [133] Stein, H. et al. (2012): Stygoregions – a promising approach to a bioregional classification of groundwater systems. *Nature Scientific Reports* (<http://dx.doi.org/10.1038/srep00673>, uniquement en anglais)
- [134] Wüest, A. (2012): Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee. Machbarkeit. Wärmeentzug (Heizen) und Einleitung von Kühlwasser. Studie im Auftrag des AWEL Kanton Zürich (uniquement en allemand)
- [135] Canton de Berne (2010): Stratégie d'utilisation de l'eau, page 10 (http://www.bve.be.ch/bve/de/index/wasser/wasser/wasserkraft/Wassernutzungsstrategie.assetref/content/dam/documents/BVE/AWA/fr/Wasserstrategie/Wassernutzungsstrategie_f_0611.pdf, consulté le 02.05.2014)
- [136] BUWAL, BWG et Meteo Suisse (2004): Canicule de 2003: conséquences pour les eaux. *Schriftenreihe Umwelt* 369 (<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/554.pdf>, consulté le 16.05.2014, en allemand et résumé en français)
- [137] Schmid, F. (2013): Konzept Energieversorgung der Stadt Zürich mit Fokus auf die Energienutzung aus Gewässern und aus

- dem Erdreich. Vortrag Cercleau Tagung 2013 in La Neuveville (http://www.cercleau.ch/files/9113/7276/5734/Vortrag_Felix_Schmid_Cercle_deau_2013_06_13_2.pdf, consulté le 25.03.2014, uniquement en allemand)
- [138] Buchs, U.: Revitalisierung von Fließgewässern – eine Chance für Wasserversorgungen. *Aqua & Gas* 3, 30–34 (uniquement en allemand)
- [139] Communications SSIGE (2013): Umfrage zu Revitalisierungsmassnahmen ([http://www.svgw.ch/index.php?id=267&tx_ttnews\[tt_news\]=380&cHash=01ac32233a26a74bfa7355c6369931bf](http://www.svgw.ch/index.php?id=267&tx_ttnews[tt_news]=380&cHash=01ac32233a26a74bfa7355c6369931bf), consulté le 11.05.2014, uniquement en allemand)
- [140] OFEV (2012): Subdivision de la Suisse en bassins versants EZGG-CH©2012, Berne
- [141] Swisstopo (2008): swisstopo (Art. 30 GeolV): 5704 000 000 / Vector25©2008 (reproduit avec l'autorisation de swisstopo / JA100119)
- [142] AquaPlus (2011): Strassenabwasser in der Schweiz. Literaturstudie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (www.aquaplus.ch/download/aquaplus_strassenabwasser.pdf, consulté le 28.02.2014, uniquement en allemand)
- [143] Staufer, P. et al. (2012): Mikroverunreinigungen aus diffusen Quellen: Faktenblatt «Diffuse Mikroverunreinigungs-Emissionen aus Siedlungen (DIMES)», étude commissionnée par OFEV, Eawag, Dübendorf (http://www.eawag.ch/forschung/sww/schwerpunkte/urbane_einzugsgebiete/dimes/DIMES_Faktenblatt.pdf, consulté le 28.02.2014, uniquement en allemand)
- [144] AWEL (2009): Belastung der Zürichsees durch die Strassenentwässerung. Zurich (http://www.awel.zh.ch/dam/baudirektion/awel/wasserwirtschaft/abwasserentsorgung/saba/Zsee_Bericht_Strassenabwasser.pdf, spooler.download.1306131725955.pdf/Zsee_Bericht_Strassenabwasser.pdf, consulté le 16.05.2014, uniquement en allemand)
- [145] Eawag (2013): Fiche d'information Eawag – Gaz de schiste – ce qu'il faut savoir sur la fracturation hydraulique. Dübendorf (http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fb_fracking_f.pdf, consulté le 10.6.2014)
- [146] Vengosh, A. et al. (2013): Impacts of Shale Gas Wastewater Disposal on Water Quality in Western Pennsylvania. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47 (20), 11849–11857 (<http://dx.doi.org/10.1021/es402165b>, uniquement en anglais)
- [147] Junghans, M. (2012): Qualitätskriterien für Pflanzenschutzmittel. *Aqua & Gas* 11, 2012, 16–22 (uniquement en allemand)
- [148] Fust, A. et al (2013): Neubau Kraftwerk Rheinfelden. *Wasser Energie Luft* 1, page 1 (uniquement en allemand)
- [149] Fust, A. et al (2013): Neubau Kraftwerk Rheinfelden. *Wasser Energie Luft* 1, page 2 (uniquement en allemand)
- [150] Eawag (2011): Fiche d'information Eawag – Hydroélectricité et écologie (http://www.eawag.ch/medien/publ/fb/doc/fs_hydro-electricite_ecologie_fr.pdf, consulté le 16.05.2014)
- [151] Bös, T. et al. (2012): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Eawag, Kastanienbaum. 177 pages (uniquement en allemand)
- [152] Loi fédérale sur la pêche (LFSP) (<http://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19910137/201310010000/923.0.pdf>)
- [153] OFEN (2013): Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Berne, le 4 septembre 2013
- [154] OFEN (2013): Perspektiven für die Grosswasserkraft in der Schweiz. Berne, le 12 décembre 2013 (<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33285.pdf>, consulté le 16.05.2014, en allemand, résumé en français)
- [155] Heimann, F. et al. (2014): Recalculation of bedload transport observations in Swiss mountain rivers using the model sedFlow. *Earth Surface Dynamics* (en préparation, uniquement en anglais)
- [156] Junker J. et al. (2014): Assessing the impact of climate change on brown trout (*Salmo trutta fario*) recruitment, (déposé, uniquement en anglais)
- [157] Vischer, D. L. (2003): Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz – von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert. *Berichte des BWG*, 5, Berne (uniquement en allemand)
- [158] OFEV (2012): Revitalisation des cours d'eau – planification stratégique, Berne, page 9
- [159] OFEV (2009): Ecomorphologie des cours d'eau suisses (<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01075/index.html?lang=fr>, consulté le 16.05.2014)
- [160] OFEV (2010): Indicateur central: structure des cours d'eau. Office fédéral de l'environnement, Berne (<http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/08605/12323/index.html?lang=fr>, consulté le 16.05.2014)
- [161] Canton de Zurich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, page 28 (uniquement en allemand)
- [162] Weibel, D. et al. (2012): Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement, *Aquatic Sciences* (http://www.fishecology.ch/publikationen/pub_12/Weibel_et_Peter_AquaticSci_2012.pdf, consulté le 16.05.2014, uniquement en anglais)
- [163] Canton de Zurich (2013): Vernehmlassungsbericht WsG, page 30 (uniquement en allemand)
- [164] Cantons d'Appenzell Rhodes-Intérieures, Appenzell Rhodes-Extérieures, St-Gall, Thurgovie et Zurich, Office fédéral de l'environnement (2007): Die Thur: Geschiebehaushalt Thur und Einzugsgebiet – Bericht zu Zielen und Massnahmen (uniquement en allemand)
- [165] Ewald, K.C. (2010): Die ausgewechselte Landschaft. ISBN: 978-3-258-07622-5, Haupt-Verlag Bern (uniquement en allemand)

- [166] OFAG (2008): Etat des drainages en Suisse – Bilan de l'enquête 2008, Berne
- [167] Beguin, J. (2010): Drainages agricoles en Suisse: quo vadis? Présentation Suissemelio, conférence à Olten
- [168] Zeh W. et al. (2009): Ecomorphologie des cours d'eau suisses. Etat du lit, des berges et des rives. Résultats des relevés écomorphologiques. Version: avril 2009. Umwelt-Zustand 0926. Office fédéral de l'environnement, Berne. 100 pages
- [169] Grünig A. (2007): Moore und Sümpfe im Wandel der Zeit. Forum Biodiversität Schweiz Hotspot 15, 4-5 (http://www.biodiversity.ch/downloads/HOTSPOT_15_2007dtWEB.pdf, consulté le 31.03.2014, uniquement en allemand)
- [170] Cordillot F. et al. (2011): Espèces menacées en Suisse. Synthèse des listes rouges, état 2010. Office fédéral de l'environnement, Berne. Umwelt-Zustand 1120, 111 pages
- [171] Mühlethaler, B. (2011): Remises à ciel ouvert. Une renaissance qui réjouit tout le monde. Dans: Environnement 3, 32–35, éd. OFEV, Berne
- [172] Robinson, C.T. et al. (2014): Spatial relationships between land-use, habitat, water quality and lotic macroinvertebrates in two Swiss catchments. *Aquatic Sciences* 76: (<http://dx.doi.org/10.1007/s00027-014-0341-z>, uniquement en anglais)
- [173] Schuwirth, N. et al. (2013): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems: modeling invertebrate community composition in streams. *Ecology*, 94, 368-379 (uniquement en anglais)
- [174] Schuwirth, N. et al. (en préparation): How to predict macroinvertebrate communities in streams: Application of the model Streambugs to the Glatt catchment on the Swiss Plateau. (uniquement en anglais)
- [175] Bunzel, K. et al. (2013): Effects of organic pollutants from wastewater treatment plants on aquatic invertebrate communities. *Water Research* 47, 597–606 (uniquement en anglais)
- [176] Denzler, L. et al. (2012): Die Interessen kumulieren am Seeufer. Dans: TEC 138, 37, 20–26 (uniquement en allemand)
- [177] Gemeindeverband Sempachersee (s.d.): Phosphorprojekt am Sempachersee (<http://www.sempachersee.ch/phosphorprojekt.html>, consulté le 16.5.2014, uniquement en allemand)
- [178] OFEV (2012): Ergiebigkeit der Schweizer Grundwasservorkommen. Données SIG obtenues de M. Sinreich, OFEV, cf. Sinreich, M. et al. (2012): Grundwasserressourcen in der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. *Aqua & Gas* 9, 16–28 (uniquement en allemand)
- [179] Lanz, K. et al. (2014): Flächenkonkurrenz zwischen Siedlungswachstum und Trinkwassergewinnung. Eawag-Auswertung einer Umfrage des SVGW bei den Wasserversorgern (uniquement en allemand, http://library.eawag.ch/eawag-publications/open-access/Eawag_08122.pdf)
- [180] Flood-plain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement. Dans: *Österreichische Abfall- und Wasserwirtschaft*, 62, 15–21 (<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00506-009-0153-x.pdf>, consulté le 04.05.2014, uniquement en allemand)
- [181] Peter, A. et al. (2004): Die Rhone als Lebensraum für Fische. *Wasser Energie Luft* 11/12, 326-330 (uniquement en allemand)
- [182] <http://www.aarewasser.ch/31223/Gesamtkonzept/Vision/content.asp> (uniquement en allemand)
- [183] OFEV (2012): Revitalisation des cours d'eau. Planification stratégique. (www.bafu.admin.ch%2Fpublikationen%2Fpublikation%2F01642%2Findex.html%3Fflang%3Dfr%26download%3DnHzLpZig7t%2CInp6l0NTU042l2Z6ln1ae2lZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGfHt4gmym162dpYbUzd%2CGpd6emK2Oz9aGodetmqaN19Xl2ldvoaCVZ%2Cs-.pdf&ei=X0fIU66xJeJl8wGOsoDYAw&usg=AFQjCNEsaQ3woNn5fBpal_xGMDaragS1qQ&bvm=bv.71198958,d.b2U&cad=rja, consulté le 16.05.2014)
- [184] Terrier, S. et al. (2011): Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. *Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges – 79th Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams, Lucerne, Switzerland* (Schleiss, A. & Boes, R.M., Eds), Taylor & Francis Group, London, 497–508 (uniquement en anglais)
- [185] Gaudard, L. et al. (2013): Climate change impacts on hydropower management. *Water Resources Management* 27: 5143-5156 (uniquement en anglais)
- [186] OFEN (2013): Evaluation des centrales d'accumulation par pompage en Suisse dans le cadre de la stratégie énergétique 2050. Berne, le 12 décembre 2013. (<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33124.pdf>, consulté le 13.12.2013, en allemand, résumé en français)
- [187] Uhlmann, V. et al. (2009): Lebensraum der Bachforellen um 2050. *gwa*, 39–44 (uniquement en allemand)
- [188] Fuhrer, J. et al. (2014): Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. *AgrarForschung*, en cours d'impression (uniquement en allemand)
- [189] Zobrist, J. et al. (2011): 77 Jahre Untersuchungen an der Glatt. *gwa* 9, 315-327 (uniquement en allemand)
- [190] Schuwirth, N. et al. (2012): Methodological aspects of multi-criteria decision analysis for policy support: A case study on pharmaceutical removal from hospital wastewater. *European Journal of Operational Research* 220, 472-483 (uniquement en anglais)

Remerciements

La rédaction du présent rapport a bénéficié du soutien actif d'un grand nombre de personnes. Son concept est marqué de l'empreinte du reste de l'équipe de projet, à savoir Jürg Fuhrer, Adrienne Grêt-Régamey, Wilfried Haerberli et Rolf Weingartner. Ils ont contribué à la rédaction du texte par leurs lectures critiques et leurs propres écrits. Les échanges avec les autres synthèses thématiques (Astrid Björnsen-Gurung [WSL], Sabine Hofmann [Eawag] et Franziska Schmid [Université de Berne]) furent en tous points fructueux. S'agissant du contenu, nous avons également pu profiter de discussions enrichissantes avec Hugo Aschwanden (OFEV), Marco Baumann (Canton de Thurgovie), Christian Leu (OFEV), Benjamin Meylan (OFEV) et Bruno Schädler (Université de Berne). Nous sommes reconnaissants à la SSIGE (Markus Biner, Urs Kamm, Anton Kilchmann) d'avoir permis la réalisation de l'enquête auprès des entreprises d'approvisionnement en eau au sujet des conflits de surface.

D'autres personnes ont révisé et commenté ce rapport détaillé. Nous souhaitons ainsi remercier en particulier Martin Bieri (Pöyry Switzerland), Andri Bryner (Eawag), Karin Ingold (Université de Berne, Eawag), Roger Pfammatter (ASAE), Luca Vetterli (Pro Natura), Olivier Chaix pour la lecture attentive du texte français, Christine Weber (Eawag), Bernhard Wehrli (Eawag) et Martin Würsten (VSA, Canton de Soleure). Janet Hering (Eawag) a fait bien plus que lire et commenter le présent rapport avec minutie: elle a également contribué au succès de son élaboration. Dietrich Borchardt, Bernd Hansjürgens, Christian Leibundgut et Bruno Merz, en tant que membres du comité de direction du PNR 61, nous ont accompagnés tout au long de ce projet et nous ont fait part de précieux commentaires. Barbara Flückiger (FNS) nous a également offert soutien et conseils pendant toute la durée du projet. De nombreux autres collègues au sein et à l'extérieur d'Eawag ont apporté leur contribution à l'élaboration du présent rapport grâce à leurs impulsions et aux discussions échangées.

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, 39

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. 31

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. 13

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.

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. 27

HYDROSERV: Ressources hydrologiques durablement garanties

Pr 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.

► p. 20

IWAGO: Vers une politique intégrative de l'eau

Pr 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.

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. 40, 52, 70

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. 17

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

P^r D^r Wilfried Haerberli

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. 14

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. 37

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.

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. 48

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.

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. 25

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 gestion des eaux en Suisse est caractérisée par des siècles d'utilisations et d'accords normalisés. Depuis les années 1960 et 1970, des efforts et des moyens financiers considérables ont été déployés dans le but de rétablir la qualité de l'eau qui se dégradait alors de manière préoccupante. Des normes légales rigoureuses et les mesures mises en œuvre par les administrations aux niveaux national et cantonal ont contribué à rehausser la qualité de l'eau dans de nombreux domaines. Le monde étant en perpétuel changement, la gestion des eaux est sans cesse remise en question. Les analyses réalisées dans le cadre du présent rapport révèlent en effet que l'évolution rapide des conditions-cadres pose toujours de nouveaux défis à l'économie des eaux. Les travaux de recherche menés dans le cadre du PNR 61 ont démontré que le changement climatique, que l'on dénonce volontiers en premier lieu, a cependant un impact moins important que les facteurs socio-économiques sur la gestion des eaux. Compte tenu de l'évolution permanente des facteurs d'influence, la mise en œuvre d'une gestion durable de l'eau appelle des efforts constants et ce, malgré les avancées déterminantes des dernières décennies. La gestion durable de l'eau nécessite d'identifier de manière précoce les changements, d'adapter efficacement les utilisations tout en continuant à améliorer l'intégrité écologique des eaux.



Publié avec le soutien du Fonds national suisse dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau». ISBN 978-3-9524412-4-4

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



9 783952 441244 >