

PNR 61 – Synthèse thématique 3
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse

Défis et mesures possibles

Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer



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



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

PNR 61 – Synthèse thématique 3
dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61
«Gestion durable de l'eau»

Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse

Défis et mesures possibles

Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer

Mentions légales

Auteurs:

D^r Sabine Hoffmann, Eawag, Dübendorf
P^r D^r Daniel Hunkeler, CHYN, Université de Neuchâtel
P^r D^r Max Maurer, Eawag, Dübendorf

Recommandations relatives aux citations: Sabine Hoffmann, Daniel Hunkeler, Max Maurer (2014): Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse: défis et mesures possibles. Synthèse thématique 3 dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau», Berne.

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



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



FONDS NATIONAL SUISSE
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Impression: PrintMediaWorks, Schopfheim im Wiesental

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

Traduction(s): Trad8, Delémont

Photos de couverture: Daniel Hunkeler, Max Maurer (3X). Arrêts sur image tirés des projets: SWIP, GW-TREND. Photos de fond: Beat Ernst, Bâle

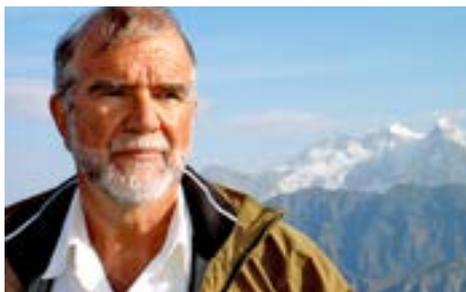
Illustrations et citations: sauf par indication contraire, les illustrations et citations utilisées proviennent des clips vidéo du PNR 61 «Aperçu» et «Perspectives», cf. www.pnr61.ch. L'abréviation du projet PNR 61 indiquent la source correspondante dans chaque cas. Les citations reflètent l'opinion 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 limites
10	Objectifs
10	Limites
10	Approche et structure
12	2 Le système de gestion des eaux urbaines
12	Système de gestion des eaux urbaines
12	Approvisionnement en eau de la Suisse
14	Evacuation des eaux usées en Suisse
15	Ressources en eau
20	3 Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines
21	Equité intergénérationnelle élevée
21	Bonne protection des eaux
22	Bon approvisionnement en eau
22	Evacuation sûre des eaux usées
23	Acceptabilité sociale élevée
23	Faibles coûts
23	Exploitation efficace des ressources
24	4 Défis liés à une gestion durable des eaux urbaines
24	Changement climatique
39	Vieillesse des infrastructures
41	Croissance démographique, économique et urbaine
43	Conditions-cadres institutionnelles
43	Autres défis
44	5 Mesures possibles pour garantir une gestion durable des eaux urbaines
45	Mesures possibles dans le domaine des infrastructures
49	Mesures possibles dans le domaine des ressources en eau
51	Mesures possibles dans le domaine des connaissances
54	6 Evaluation de l'impact des mesures
58	Notes
59	Index des illustrations
59	Index des tableaux
59	Bibliographie
66	Equipes
66	Remerciements
68	Annexe I
68	Démarche
69	Estimation des conséquences (évaluation)
82	Annexe II
82	Qu'est-ce que le PNR 61?
82	Les 16 projets de recherche du PNR 61
84	Produits du PNR 61

Avant-propos



Prém. 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 évaluables, 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

Objectifs et limites La synthèse thématique 3 (ST 3) fait partie du Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61) du Fonds national suisse. Elle étudie les défis actuels et futurs à relever pour garantir une gestion durable des eaux urbaines en Suisse, en analysant les liens de causalité (approche DPSIR), formulant des objectifs de développement durable, élaborant des mesures et en évaluant les répercussions. La gestion des eaux urbaines est considérée comme système global et analysé en tenant compte des ressources en eaux souterraines et en eaux de surface. Les eaux souterraines sont utilisées comme sources d'eau potable et les eaux de surface comme récepteur pour les eaux usées. La synthèse thématique 1 (ST 1) fournit une vue d'ensemble de la quantité des ressources en eau de Suisse. La synthèse thématique 2 (ST 2) analyse les conflits d'utilisation, et la synthèse thématique 4 (ST 4) examine les questions de gouvernance de l'eau.

La gestion des eaux urbaines: un système à part entière

Les installations techniques d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées représentent l'une des principales infrastructures du pays: leur valeur de remplacement est estimée à environ 230 mia CHF et les frais de fonctionnement à 5 mia CHF par an. Dans ce contexte, le coût moyen d'utilisation de CHF 3.70 pour 1000 litres d'eau semble dérisoire.

Outre les installations techniques, les ressources en eau constituent un élément central de la gestion des eaux urbaines en Suisse. L'eau potable provient à environ 36% des aquifères de roches meubles, souvent en lien avec des cours d'eau et équipés de puits de pompage, à 48% des aquifères fissurés et karstiques et à 16% des lacs.

Objectifs de développement durable

La notion de «développement durable» comporte sept objectifs fondamentaux et 44 sous-objectifs. Nombre d'entre eux ont été développés dans le cadre du projet SWIP du PNR 61 «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» et sont également mentionnés dans la législation suisse. Outre les objectifs de coûts, de qualité et de protection, des objectifs de développement durable, comme l'équité intergénérationnelle, l'acceptabilité sociale et l'exploitation efficace des ressources sont aussi explicitement pris en compte. Ces objectifs permettent d'évaluer les mesures possibles en fonction de leur impact sur le développement durable.

Défis

L'impact du changement climatique sur les eaux, en particulier souterraines, ainsi que sur

l'approvisionnement en eau et sur l'évacuation des eaux usées, est au cœur de nombreux projets de recherche du PNR 61. Les résultats montrent clairement que les évolutions économiques et sociales, la croissance urbaine ou démographique ou le vieillissement des infrastructures ont un impact sur la gestion des eaux urbaines bien plus important que le changement climatique. Il n'y a donc pas lieu de mettre en œuvre des mesures immédiates liées au changement climatique.

Sous l'effet du changement climatique, les **périodes de sécheresse** seront plus fréquentes. Si elles n'ont qu'un impact modéré sur le taux de renouvellement moyen des eaux souterraines, l'augmentation de leur fréquence risque de modifier la reconstitution saisonnière des aquifères (cf. projet GW-TREND du PNR 61). Le comportement des aquifères et sources face à l'augmentation des périodes de sécheresse diffère fortement d'un site à l'autre et doit être analysé en tenant compte des conditions locales dans le cadre d'une planification de la gestion des ressources en eau (cf. Mesures possibles infrastructures-1 et ressources en eau-2).

L'augmentation des périodes de sécheresse influe aussi sur le débit des cours d'eau. Il faut s'attendre à ce que les objectifs fixés en matière de quantité et de qualité de l'eau ne puissent plus être atteints, en particulier dans les régions densément peuplées, ce qui nécessitera des mesures dans le domaine de l'évacuation des eaux usées (cf. Mesures possibles infrastructures-6).

Le changement climatique entraînera une **hausse de la température de l'eau**. Selon les scénarios d'émission, la température des eaux souterraines dans les aquifères alimentés par des cours d'eau devraient augmenter de 1,0° C à 2,5° C d'ici à 2099 (GW-TEMP, PNR 61). La hausse conjuguée de la température des eaux souterraines et de la concentration en matière organique particulière entraîne une diminution de la concentration en oxygène dans les zones de filtration des berges (RIBACLIM, PNR 61). La concentration en oxygène des eaux souterraines dépend également de facteurs locaux comme les crues ou les quantités d'eau prélevées (GW-TEMP, PNR 61).

La hausse des températures des eaux de surface se répercute principalement sur les valeurs extrêmes. S'agissant du Rhin, on prévoit ainsi une hausse des valeurs moyennes d'env. 1,9° C par an pour la période 2070-2100, hausse pouvant atteindre 2,8° C par an pour le 95^{ème} percentile des températures les plus élevées. Les prévisions correspondantes concernant la Broye s'élèvent respectivement à 1,9° C et 2,7° C (AGWAM, IWAQA, PNR 61).

Au niveau des lacs, la hausse des températures de l'eau entraîne l'intensification de la stratification et donc une diminution du



brassage et de la concentration en oxygène, autant de facteurs qui favorisent la prolifération des algues bleues (cyanobactéries).

Le changement climatique entraînera une **hausse des fortes précipitations**. Celles-ci ont un impact direct sur le nombre de systèmes d'assainissement unitaires et donc sur l'apport de polluants dans les eaux (IWAQA, PNR 61). En revanche, la capacité hydraulique des systèmes d'évacuation des eaux dépend plus de la variabilité que du changement climatique (SWIP, PNR 61). Dans les régions karstiques, les fortes précipitations peuvent entraîner des changements de débit abrupts des sources liés à l'interaction entre des bassins d'alimentation avec un risque d'inondation (SWISSKARST, PNR 61).

Le **vieillessement des installations** augmente la probabilité de défaillance et le risque de pollution. Des modèles permettant de représenter l'état des réseaux en fonction des conditions spécifiques à la Suisse ont été développés afin de pouvoir planifier sur le long terme l'assainissement des infrastructures vieillissantes (SWIP, PNR 61).

Les projets de recherche du PNR 61 démontrent dans leur grande majorité que la **croissance démographique et le développement urbain** ont une influence déterminante sur le système de gestion des eaux urbaines. Dans ce contexte, (a) la pollution des eaux de surface due au déversement d'eaux usées, épurées ou non, et (b) la pression accrue de l'urbanisation dans les zones de protection des eaux souterraines jouent un rôle plus important que l'imperméabilisation, qui n'a qu'un faible impact sur le régime des eaux souterraines (voir aussi la synthèse thématique 2 du PNR 61).

Les mesures possibles et leurs répercussions

Pour relever ces différents défis, un catalogue de mesures a été élaboré. Présentées au tab. 4 page 44, ces mesures peuvent être classées en trois domaines: «Infrastructures», «Ressources en eau» et «Connaissances». Plus que des recommandations, les mesures doivent être considérées comme un éventail d'axes stratégiques à mettre en œuvre pour relever les défis en matière d'approvisionnement durable en eau et de gestion des eaux usées. De nombreuses mesures, par exemple l'amélioration de la redondance pour l'appro-

visionnement en eau («deuxième pilier»), se fondent sur des exigences actuelles. Elles ont été analysées avec l'aide des spécialistes du PNR 61 lors d'un atelier et complétées sur la base des résultats de leurs recherches et de leur expertise. Lors de la viabilisation de nouveaux points de captage, il faudra dès lors tenir compte non seulement de la vulnérabilité des ressources en eau face aux risques de pollution, mais aussi de leur résilience en vue des futures périodes de sécheresse. A cet égard, les concepts élaborés par les projets SWISSKARST et GW-TREND du PNR 61 constituent une base précieuse.

Les spécialistes du PNR 61 ont ensuite évalué l'impact des mesures possibles sur la réalisation des objectifs en matière de gestion durable des eaux urbaines. Les résultats des évaluations, synthétisés au tab. 5 page 54, montrent que de nombreuses mesures permettent d'atteindre cinq des sept objectifs fondamentaux, soit «Équité intergénérationnelle élevée», «Bonne protection des eaux», «Bon approvisionnement en eau», «Évacuation sûre des eaux usées» et «Exploitation efficace des ressources», ce qui n'est pas toujours le cas pour les deux derniers «Acceptabilité sociale élevée» et «Faibles coûts». Le domaine «Connaissances» constitue une exception dans la mesure où il s'articule autour d'une série de mesures «no regrets».

Les objectifs fondamentaux reflètent des exigences différentes, parfois contradictoires, pour parvenir à une gestion durable des eaux urbaines. Ces exigences peuvent entraîner des conflits d'intérêts, par exemple entre protection et exploitation ou entre approvisionnement fiable en eau et évacuation sûre des eaux usées. S'il n'existe aucune solution simple pour résoudre ces conflits, il existe des manières de les minimiser. Les résultats montrent que la concertation entre secteurs et acteurs concernés (aux niveaux local, cantonal et national) pour définir les objectifs prioritaires constitue une première étape importante vers une gestion durable des eaux urbaines. Dans cette optique, la synthèse thématique 3 offre un cadre précieux pour bien structurer le processus de concertation participative.

► Les infrastructures vieillissantes et les changements socio-économiques tels que la croissance urbaine ou démographique exercent une influence beaucoup plus décisive sur le système de gestion des eaux urbaines que le changement climatique.

A gauche et au milieu: SWIP; à droite: photo Max Maurer

Summary

Aims and delimitation

The thematic synthesis 3 is part of the National Research Programme “Sustainable Water Management” (NRP 61) of the Swiss National Science Foundation. It analyses the current and future challenges to sustainable urban water management in Switzerland. In so doing, it focuses on causal links (DPSIR framework), the definition of sustainability targets, potential courses of action as well as the evaluation of their effectiveness.

Urban water management is seen as a system and analysed in the context of groundwater and surface water resources. The former function as drinking water sources, the latter as sinks for wastewater. A quantitative overview of water resources is presented in thematic synthesis 1, user conflicts are discussed in thematic synthesis 2 and questions of governance are dealt with in thematic synthesis 4.

Urban water management as a system

With a replacement value of around CHF 230 billion and annual costs of around CHF 5 billion, the technical installations of water supply and wastewater disposal represent one of the most significant infrastructures in Switzerland. Compared to these figures, the average price of 1,000 litres of water at CHF 3.70 is cheap.

Alongside the technical installations, natural water bodies are also a key element of Swiss urban water management. About 36% of drinking water is drawn via pumping wells from unconsolidated aquifers which often interact with rivers, 48% is drawn from karstified and fissured aquifers and 16% from lakes.

Sustainability targets

Seven key targets and 44 subordinate targets characterise “sustainability”. Many of the subordinate targets are reflected in Swiss laws and were defined in the context of the NRP 61 project SWIP, with a view to the long-term planning of water infrastructures. Alongside the cost, quality and protection targets, there are also explicit targets to do with sustainable development, such as justice between various generations, social acceptance and resource efficiency. The purpose of these targets is to assess possible courses of action in terms of their sustainability.

Challenges

The impact of climate change on water bodies, in particular groundwater, water supply and wastewater disposal was an important question in many projects of NRP 61. The results are quite revealing. In brief, they show that socio-economic changes such as settlement and population development as well as aging infrastructures have a greater impact on the urban water economy than climate change. No immediate need for action related to climate change was identified.

Water scarcity during dry summers is likely to occur more frequently as a result of climate change but this will have limited influence on the annual average replenishment of groundwater. The more frequent drought periods imply, however, that the seasonal distribution of groundwater replenishment is changing (NRP 61 GW-TREND). Local conditions influence how aquifers and springs react to droughts; as a basis for local water resource planning, the effects should be analysed case by case (see courses of action “Promotion of water management planning” and “Promotion of second foothold”).

The increased frequency of **droughts** will also affect the discharge levels of rivers. Particularly in densely populated areas, water quality targets will probably not be met; this could trigger measures in the wastewater sector (see courses of action “Promotion of modernised or consolidated wastewater treatment plants”).

Water temperatures will rise due to climate change. Aquifers that are fed by rivers will see water temperatures rising between 1.0 °C and 2.5 °C until 2099 (NRP 61 GW-TEMP). Higher groundwater temperatures in combination with greater concentration of organic particles are likely to lead to lower oxygen concentration in riverside infiltration zones. This can slow down the depletion of pollutants and favour the dissolution of iron and manganese (NRP 61 RIBACLIM). The oxygen concentration in groundwater is also dependent on local factors such as floods and pumping activities (NRP 61 GW-TEMP).

In surface water, the **rising temperatures** are particularly pronounced in the extreme values. While the average annual temperatures of the Rhine are predicted to rise by 1.9 °C between 2070–2100, the rise on the 95th percentile reaches 2.8 °C. The corresponding predictions for the Broye, a tributary of the Rhine with a seasonal discharge regime, are 1.9 °C and 2.7 °C (NRP 61 AGWAM, IWAQA).

In lakes, the higher temperatures will lead to greater stratification, i.e. water levels will mix less and oxygen concentration will drop. The latter will favour invasive growth of blue-green algae (cyanobacteria).

Heavy precipitation events are likely to occur more frequently due to climate change. This will directly impact the number of combined wastewater overflows and the introduction of pollutants into water bodies (NRP 61 IWAQA). However, the hydraulic performance of drainage systems will not be primarily affected by climate change but by climate variability (NRP 61 SWIP). In karst areas, heavy precipitation can cause the catchment area to expand or shrink suddenly, which, in turn, can lead to rapid changes in spring discharge (NRP 61 SWISSKARST).



Aging infrastructures have a higher default probability which leads to greater environmental risk. To plan the long-term replacement of aging infrastructures, researchers have developed decay models which allow them to assess the state of infrastructures in specific Swiss conditions (NRP 61 SWIP). Most research projects of NRP 61 identify the **population and settlement development** as the key factor influencing the urban water economy. Urbanisation leads to the pollution of surface water due to the introduction of purified and non-purified wastewater and pressure on groundwater protection zones; this is more significant than the effect of urbanisation on groundwater balances (see also thematic synthesis 2 of NRP 61).

Courses of action and their impact

To meet these challenges, various courses of action were identified. These are summarised in table 4 on page 44 and can be divided into three areas: infrastructures, water resources, knowledge. The courses of action are not recommendations, instead they illustrate the wide range of approaches developed to meet the challenges of sustainable water supply and wastewater treatment.

Some courses of action such as the improved and more robust water supply (alternative water source) are linked to existing concepts. They were discussed in the context of a workshop with experts of NRP 61 and complemented with research results and expert knowledge. For example, when developing new water sources, both the risk of pollution and the resilience to droughts need to be considered. Concepts elaborated within the scope of the NRP 61 project SWISSKARST are an invaluable basis for making such decisions. In conclusion, the courses of action were rated by experts of NRP 61 with regard to their qualitative contribution to the target of sustainable water management. The results are summarised in table 5 on page 54. They show that many of the options contribute significantly to the key targets “intergenerational equity”, “good water supply”, “good water protection”, “safe wastewater disposal” and “efficient resource use”. But not all options contribute to the remaining key targets “high social acceptance” and “low costs”. An exception is the area “knowledge” in which there are a number of robust “no-regret” courses of action.

The seven key targets reflect different and, in parts, contradictory demands on sustainable water management. The demands can lead to conflicts of interests, e.g. protection vs. use or safe wastewater treatment vs. other uses. These conflicts cannot be avoided but it is possible to diminish them with suitable processes. The results suggest that all sectors and actors involved (local, cantonal and federal) have to agree on overarching targets in the first place if we are to make a first and decisive step towards sustainable water supply and wastewater treatment in Switzerland. The thematic synthesis 3 provides an important basis for structuring this participatory communication process transparently.

► En cas de diminution du débit d'eau provoquée par l'augmentation des périodes de sécheresse, il faut s'attendre à ce que, notamment dans les petits cours d'eau, les valeurs limites définies par l'OEaux soient dépassées plus fréquemment en aval des points de déversement des eaux usées.

A gauche et au milieu: DROUGHT-CH; à droite: photo Adriano Joss

1 Objectifs et limites

Objectifs

La synthèse thématique 3 «Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse: Défis et mesures possibles» (ST 3) fait partie intégrante du Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61) du Fond national suisse. La ST 3 analyse les défis actuels et futurs d'une gestion durable des eaux urbaines (GEU) en Suisse. Celle-ci est axée sur:

- ▶ l'analyse des rapports de causalité entre ces défis;
- ▶ la formulation d'objectifs pour garantir une gestion durable des eaux urbaines;
- ▶ l'élaboration de mesures possibles;
- ▶ l'évaluation des répercussions de ces mesures.

La gestion des eaux urbaines est considérée comme un système global qui sera analysé en tenant compte des ressources en eaux souterraines et en eaux de surface qui jouent le rôle de source d'eau et/ou de récepteur pour les eaux usées. La ST 3 génère ainsi trois types de connaissances interdépendants: connaissances systémiques, connaissances relatives aux objectifs et connaissances relatives aux mesures possibles (cf. ill. 1) [1].

Pour répondre à ces questions, la synthèse thématique intègre les résultats scientifiques d'au moins sept projets du PNR 61 (cf. ill. 2 et annexe I) en se focalisant sur les contenus suivants: eaux souterraines (projets GW-TREND, GW-TEMP, SWISSKARST, RIBACLIM), infrastructures d'hydraulique urbaine (projet SWIP), eaux de surface (IWAQA) et irrigation (AGWAM). Les connaissances provenant d'autres projets que ceux du PNR 61 sont intégrées le cas échéant pour fournir une vue d'ensemble.

Limites

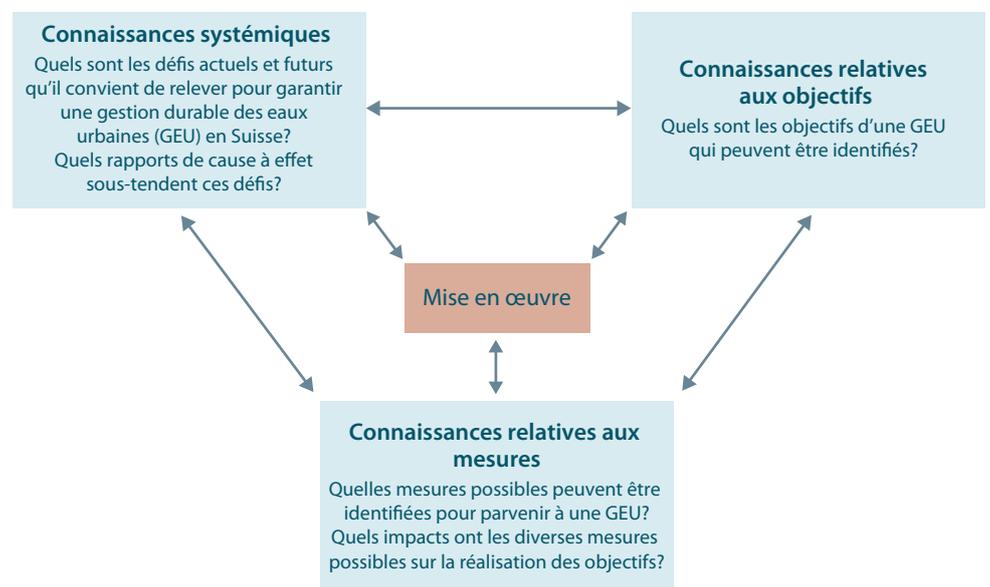
La ST 3 ne vise pas tant à évaluer explicitement les mesures possibles, mais davantage à apprécier leur impact sur la réalisation des objectifs en matière de gestion durable des eaux urbaines. L'importance qu'il convient d'accorder à chacun des objectifs est laissée à la libre appréciation du lecteur. Si la ST 3 n'a pas vocation à formuler des recommandations concrètes, elle entend fournir des éléments de décision pour garantir un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables en Suisse.

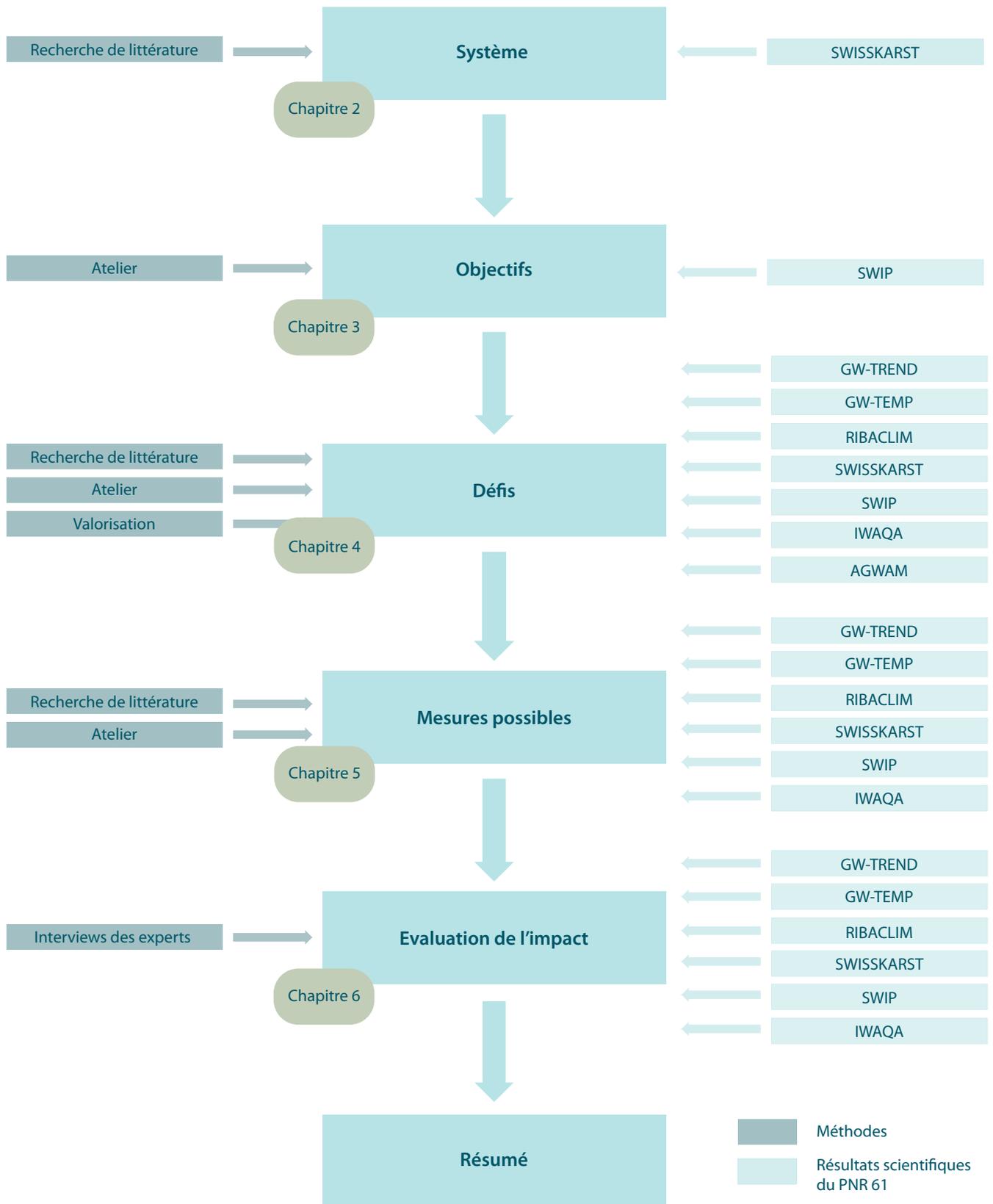
Approche et structure

L'illustration 2 ci-contre représente schématiquement l'approche et la structure de la synthèse thématique 3. L'annexe I fournit une représentation détaillée de l'approche employée.

Le rapport de synthèse s'articule comme suit: le chapitre 2 présente le système de gestion des eaux urbaines et ses limites et décrit l'état actuel des ressources en eau et des infrastructures hydrauliques en Suisse. Le chapitre 3 définit les objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines. Le chapitre 4 identifie les défis actuels et futurs d'une gestion durable des eaux urbaines et analyse leurs rapports de causalité à l'aide du modèle DPSIR (Drivers/forces, Pressures/pression, State/état, Impact/impacts, Responses/réponses). Le chapitre 5 identifie les mesures possibles et le chapitre 6 évalue l'impact de ces différentes mesures sur la réalisation des objectifs en matière de gestion durable des eaux urbaines.

Ill. 1: connaissances systémiques, connaissances relatives aux objectifs et connaissances relatives aux mesures possibles dans le cadre de la ST 3.





III. 2: représentation schématique de l'approche et de la structure de la synthèse thématique 3 «Approvisionnement en eau et assainissement des eaux usées durables en Suisse: Défis et mesures possibles» (voir également l'annexe I).

2 Le système de gestion des eaux urbaines

Ce chapitre présente le système de gestion des eaux urbaines et ses limites en tenant compte des eaux de surface et des eaux souterraines et décrit l'état actuel des ressources en eau et des infrastructures hydrauliques en Suisse.

Système de gestion des eaux urbaines

Dans la ST 3, la gestion des eaux urbaines est considérée comme un système global qui sera analysé en tenant compte des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines, qui jouent le rôle de source d'eau et/ou de récepteur pour les eaux usées. Dès lors, les défis et les mesures possibles ne portent pas seulement sur les infrastructures d'hydraulique urbaine, mais aussi sur les ressources en eau. A cet égard, les éventuelles répercussions – directes ou indirectes – du changement climatique sont au centre de l'analyse. Ces répercussions ont été examinées dans le cadre de plusieurs projets de recherche du PNR 61. Les autres facteurs ayant une influence sur les ressources en eaux de surface et en eaux souterraines, notamment l'agriculture ou la protection contre les crues, sont étudiés dans la synthèse thématique 2 du PNR 61.

Approvisionnement en eau de la Suisse

Chiffres clés

En Suisse, environ 3000 services publics de distribution d'eau mettent à disposition 954 millions de m³ d'eau potable chaque année [2].¹ Ce chiffre correspond à peine à 2% du volume des précipitations annuelles [3] (cf. encadré 1). Environ 84% de cette eau potable provient des ressources en eau souterraines et le reste des lacs. Afin de satisfaire aux exigences relatives à la qualité de l'eau potable prescrites par la loi fédérale sur les denrées alimentaires, l'eau des lacs subit toujours plusieurs étapes de traitement [4]. A l'inverse, 41% de l'eau souterraine alimente directement, c'est à dire sans traitement, le réseau public – qui s'étend sur environ 59000 kilomètres – 32% après une seule étape de traitement et 27% après deux étapes de traitement ou plus [4]. Selon la Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux (SSIGE), 7,92 millions d'habitants étaient raccordés à ce réseau en 2011 [2], soit un taux de raccordement de 99,3% [2].

De nombreuses exploitations artisanales et industrielles possèdent leurs propres installations de captage des eaux souterraines et de surface. La Synthèse thématique 1 du PNR 61 fournit une représentation exhaustive de la consommation globale d'eau en Suisse.

Coûts annuels et valeur de remplacement

Les coûts d'exploitation et de capital de l'approvisionnement en eau s'élevaient à environ CHF 1.5 milliard par an [2] (cf. tab. 1), ce qui correspond à des coûts moyens d'exploitation et de capital de CHF 1.59/m³ d'eau potable produite. La valeur de remplacement des infrastructures publiques assurant l'approvisionnement en eau en Suisse s'élève de CHF 50 à CHF 55 milliards (cf. tab. 1). Si l'on considère également la valeur de remplacement des infrastructures privées (installations sanitaires, canalisations des bâtiments, raccordements des maisons) de l'ordre de CHF 60,6 milliards [5], la valeur de l'ensemble des infrastructures suisses d'approvisionnement en eau se monte alors à CHF 115 milliards, soit environ CHF 15 300 par habitant.

Selon la SSIGE, [2] les investissements dans les infrastructures publiques d'approvisionnement en eau s'élevaient à près de CHF 800 millions par an, soit 1,5% à 1,6% de la valeur totale de remplacement. Ils se répartissent à hauteur de CHF 609 millions dans les canalisations et de 188 millions dans les installations. Le montant total des investissements est estimé à CHF 99 par an et par habitant.

Consommation d'eau et prix de l'eau

La consommation d'eau en Suisse recule depuis environ 30 ans. En 1981, la consommation d'eau moyenne dépassait encore 500 litres par jour et par habitant, alors qu'en 2011, elle se chiffrait à environ 325 litres par jour et par habitant [2]. La consommation se répartit entre les ménages (58%) et l'industrie (21%), les 21% restants englobant les «pertes d'eau» (14%), l'utilisation à des fins publiques et pour les fontaines (5%) et la consommation propre des services de distribution d'eau (2%) [2]. Ce sont les ménages qui consomment le plus d'eau [2], leur consommation d'eau moyenne représentant 189 litres par jour et par habitant. Le prix moyen de l'eau (comprenant la taxe de base et le rapport prix/quantité) pour 1000 litres d'eau s'élève à CHF 1.90 pour une maison individuelle et à CHF 1.60 pour une maison locative [3].

Age, état et besoin d'assainissement

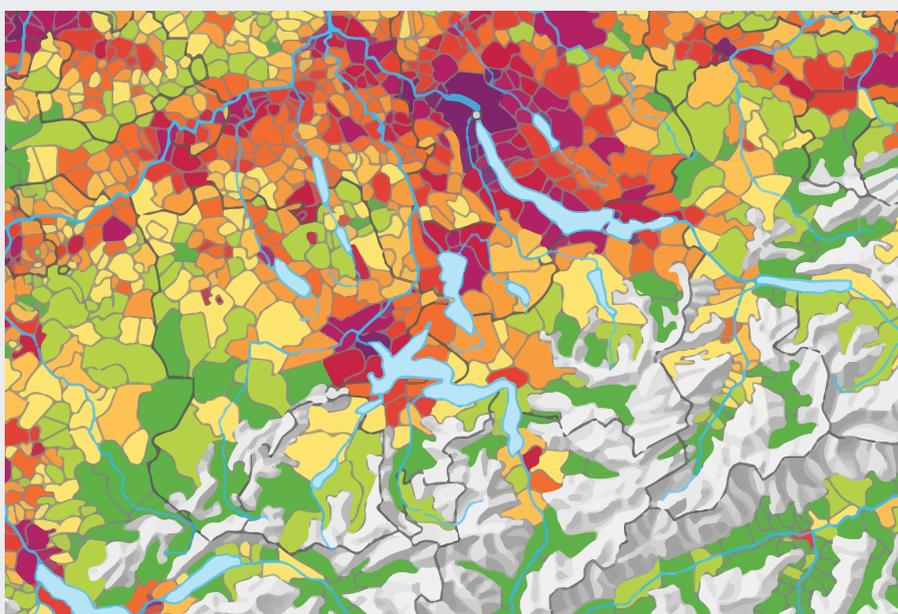
Selon l'Eawag [6], les informations relatives à l'âge, à l'état et au besoin d'assainissement des infrastructures d'approvisionnement en eau n'étant que sporadiques, il n'est pas possible de dresser un bilan global au niveau national. Les investissements annuels dans les infrastructures d'approvisionnement en eau sont estimés par la SSIGE à CHF 800 millions, une estimation qui laisse supposer qu'au moins les principales installations d'approvisionnement en eau répertoriées dans les statistiques de la

SSIGE investissent régulièrement dans leurs infrastructures [2]. Le montant des investissements réalisés par les petites installations (env. 90%) n'est en revanche pas connu [6]. Les spé-

cialistes estiment que le besoin en investissements de celles-ci devraient fortement augmenter dans un avenir proche [6].

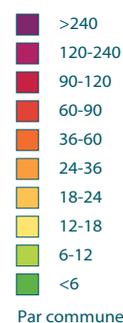
ENCADRÉ 1 | Besoins en eau couverts par l'approvisionnement public en Suisse

Alors que les besoins en eau correspondent à peine à 2% du volume de précipitations annuelles en moyenne nationale, ils varient fortement selon les régions. Il est possible d'illustrer ces différences en exprimant le besoin en eau sous forme de colonne d'eau (mm/an) sur l'ensemble de la surface (cf. ill. 3). Les valeurs ainsi obtenues peuvent être mises en regard des ressources locales en eau. Le renouvellement direct des eaux souterraines alimentées par l'infiltration des précipitations sur le Plateau représente, par exemple, 300-400 mm/an. Supposons que la moitié s'infiltré dans les nappes d'eau souterraine exploitables et qu'environ 20% peuvent être exploités, les ressources en eaux souterraines disponibles grâce au renouvellement direct de l'eau souterraine au niveau local s'élèvent à 30-40 mm/an. Dans de nombreuses régions du Plateau, les besoins en eau sont plus élevés. Ces régions doivent donc importer de l'eau, infiltrée par les berges, provenant des cours d'eau alpins et préalpins.



Ill. 3: besoins en eau en mm/an couverts par l'approvisionnement public en eau; calcul effectué sur la base de la densité de population et de la consommation moyenne par habitant.

Besoins en eau en mm/an



Tab. 1: infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées en Suisse: aperçu de la valeur de remplacement, des coûts annuels et des investissements.

		Valeur de remplacement (en milliards de CHF)	Coûts annuels (en milliards de CHF/a)	Investissements (en millions de CHF/a)
Approvisionnement en eau				
Installations publiques		15-20	1,5	188
Réseaux publics	59 000 km	35		609
Infrastructures privées		60,6	1,2	?
Total		110-115,6	2,7	797
Traitement des eaux usées				
STEP centrales	839	13,6	1	254
Canalisations publiques	49 110 km	66,4	1,2	535
Evacuation des eaux de bien-fonds	42 000 km	34-40	1-1,2	?
Total		114-120	3,2-3,4	789
Montant total infrastructures hydrauliques		224-236	5,9-6,1	



► Le réseau suisse d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées compte quelque 59 000 km de conduites d'eau publiques et 49 000 km de canalisations d'évacuation des eaux usées. Chaque année, près de 1350 km de conduites publiques (eau et eaux usées) sont remplacées.

A gauche: SWIP; au milieu et à droite: photos Max Maurer

Evacuation des eaux usées en Suisse

Chiffres clés

L'évacuation des eaux usées s'effectue via un réseau public d'environ 49 000 km [7]. Celui-ci est constitué à 70% en système unitaire où un seul réseau achemine les eaux pluviales et résiduaires jusqu'à la station d'épuration (STEP) et à 30% en système séparatif, où deux réseaux séparés acheminent d'une part les eaux résiduaires à la STEP, et d'autre part les eaux pluviales au cours d'eau. En cas de fortes précipitations, il arrive que les systèmes d'assainissement unitaires déversent l'eau de pluie et les eaux résiduaires diluées directement dans les cours d'eau [11].

Environ 839 STEP centrales, avec plus de 100 équivalents-habitant², assainissent environ 1400 millions de m³ d'eaux usées par an [7]. Selon VSA/IC [7], 7,5 millions d'habitants étaient raccordés à une STEP centrale en 2010 [7], ce qui correspond à un taux de raccordement de 96,7% [7]. En moyenne, la production d'eaux usées s'élève à 511 litres par jour et par habitant. La plupart est traitée par les grandes STEP: 74 STEP (9%) avec plus de 50 000 équivalents-habitants assainissent environ 47% de la production d'eaux usées quotidienne, alors que 555 stations d'épuration (66%) avec moins de 10 000 équivalents-habitants n'assainissent qu'environ 16% de la production d'eaux usées [7]. En plus des STEP centrales et du réseau public, plus de 3000 petites stations d'épuration avec moins de 100 équivalents-habitants [8] complètent le réseau suisse d'évacuation des eaux usées. Leur réseau d'évacuation des eaux s'étend sur environ 42 000 km, quelque 1 700 000 ménages y sont raccordés [9].

Coûts annuels et valeur de remplacement

Selon des estimations de la référence [7], la valeur de remplacement des infrastructures publiques des eaux usées s'élève à environ CHF 80 milliards (cf. tab. 1). A l'instar de l'approvisionnement en eau, les canalisations souterraines constituent le capital principal des installations d'évacuation des eaux usées en Suisse. Si l'on considère également la valeur de remplacement des 42 000 km de canalisations des bien-fonds et de l'infrastructure des quelque 1 700 000 ménages raccordés qui représente entre CHF 34 et 40 millions

[9], [5], la valeur de l'ensemble des infrastructures d'évacuation des eaux usées en Suisse se monte alors à environ CHF 120 milliards, soit CHF 16 000 par habitant.

Le montant total des coûts d'exploitation et de capital des infrastructures assurant l'évacuation des eaux usées s'élève à CHF 2,2 milliards par an (cf. tab. 1). Des investissements de l'ordre de CHF 790 millions sont réalisés chaque année dans les infrastructures publiques d'évacuation des eaux usées [7]. Selon VSA/IC [7], «le volume d'investissement (...) est important, même si la comparaison avec les amortissements théoriques (CHF 414 millions pour les installations d'épuration, CHF 839 millions pour les canalisations) montre que les investissements sont inférieurs à la perte de valeur économique». Parallèlement, des investissements sont prévus pour développer et optimiser environ 100 stations d'épuration sur les 839 existantes. Les mesures de développement, y compris l'installation de nouveaux équipements permettant de réduire encore les micropolluants, sont estimées à environ CHF 1,2 milliard [10], ce qui augmente encore les coûts annuels d'épuration des eaux usées d'environ 10-15%.

Quantité, transport et prix des eaux usées

Le réseau d'évacuation des eaux usées traite environ 2 milliards de m³ d'eaux usées par an. Estimé à 10 milliards de tonnes-kilomètres, le réseau d'évacuation des eaux usées représente l'une des principales entreprises de transport en Suisse. Sur 2 milliards de m³ d'eaux usées, 1,4 milliard de m³ sont transportés jusqu'aux STEP. Ce volume se compose à 45% des eaux usées provenant des ménages et de l'industrie, à 40% des eaux parasites³ et à 15% des eaux de ruissellement [8]. Si les eaux de ruissellement (15%) ne représentent habituellement que la plus petite partie du volume annuel des eaux usées, leur part peut toutefois varier fortement. En cas de précipitations moyennes à fortes, les eaux de ruissellement représentent en effet la plus grande partie des eaux usées [8]. Mais en règle générale, seul le double du débit des eaux usées par temps sec peut être transféré vers les STEP. En cas de fortes pluies prolongées, l'excès d'eaux usées et d'eaux de ruissellement est déversé directement dans les cours d'eau [11].

Selon les estimations du VSA/IC [7], la charge moyenne de polluants affluant dans les STEP

«Les conduites ont une longue durée de vie. Ainsi, ce qui est construit par une génération est utilisé par la suivante. Une autre génération se charge ensuite du remplacement, de la réparation et de l'assainissement. Nous sommes cette génération.»

Max Maurer
Coresponsable du projet SWIP
Eawag



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



s'élève à 490 180 tonnes de polluants organiques (en DCO)⁴, 40 874 tonnes d'azote et 6 433 tonnes de phosphore par an (cf. tab. 2). Le rendement d'épuration moyen des STEP s'élève à 92% pour les polluants organiques (en DCO), 47% pour l'azote et 89% pour le phosphore [7]⁵. La capacité d'assainissement tend à augmenter proportionnellement à la taille des stations [7]. Cette remarque concerne en particulier l'élimination de l'azote [7]. Les pertes au niveau du réseau ne sont pas prises en compte dans ces statistiques. Le prix moyen pour la collecte, le transport et l'assainissement de 1000 litres d'eaux usées (dans les 300 communes suisses comptant plus de 5000 habitants) s'élève à CHF 1.80 [12], [8].

Age, état et besoin d'assainissement

Selon Maurer et al. [8], les informations relatives à l'âge, à l'état et au besoin d'assainissement des infrastructures d'évacuation des eaux usées n'étant que sporadiques, il n'est pas possible de dresser un bilan global au niveau national. Une étude de Maurer et Herlyn [9] qui analyse l'état de 4500 kilomètres de canalisations publiques, soit 10% du réseau, démontre toutefois qu'environ 23% des canalisations publiques présentent des dommages substantiels (classe de dégât VSA: 0 à 2). Une étude du canton de Zurich ayant analysé l'état de 8700 m de canalisation de bien-fonds dans huit communes du canton de Zurich a en outre révélé qu'environ deux tiers des canalisations de raccordement ont besoin d'être assainies [13]. Le coût des mesures d'assainissement nécessaires dans le canton de Zurich est estimé à CHF 1 milliard [13]. Les spécialistes considèrent que 50 à 80% des canalisations de raccordement de la Suisse ont besoin d'être assainies [8].

L'on possède peu d'informations sur l'état des STEP centrales. La capacité d'assainissement des STEP faisant l'objet d'un contrôle régulier par les cantons [8], le besoin d'assainissement des infrastructures de traitement des eaux usées devrait être modéré.

Ressources en eau

Ce sous-chapitre présente les principaux chiffres clés relatifs à la quantité et à la qualité des ressources en eau potable en Suisse. La Synthèse thématique 1 du PNR 61 offre une vue d'ensemble plus détaillée à ce sujet.

Précipitations, eaux de surface

La Suisse est un pays qui bénéficie de précipitations abondantes, avec 1431 mm/an de précipitations, soit environ 60 km³ d'eau. Environ un tiers des précipitations s'évapore. L'écoulement net de 41 km³ qui en résulte est constitué à 58% d'eau de pluie, à 40% de fonte des neiges et à 2% de fonte des glaciers [14].⁶ Environ la moitié de l'écoulement net provient des aquifères et correspond approximativement à la quantité estimée des ressources en eaux souterraines disponibles pour une exploitation durable (18,6 km³/an), selon une étude de l'OFEV [15]. Selon les données recueillies dans le cadre du projet SWISSKARST du PNR 61 sur les aquifères karstiques, celles-ci s'élèveraient à 20-23 km³/an. (Tab. 3).

Qualité des eaux de surface

La qualité des eaux de surface s'est nettement améliorée depuis le développement du traitement des eaux usées à l'échelle communale à partir des années 1960. Malgré ces mesures, les lacs ont présenté une teneur élevée en phosphore issu des eaux usées et de l'agriculture jusqu'au milieu des années 1980. Ce n'est qu'à la faveur de l'élimination du phosphore dans toutes les STEP communales (troisième étape d'épuration) situées en amont des lacs et de l'interdiction des phosphates dans les lessives en 1986 que la teneur en phosphate des moyens et grands lacs a pu diminuer progressivement à la fin des années 1980. L'élimination de l'azote dans les STEP dans les années 1990 a permis de diminuer la teneur en azote des cours d'eau. L'écologisation de l'agriculture dès les années 1990 a également contribué à la diminution des charges en phosphore et en azote, renforçant encore la tendance. Des mesures supplémentaires seront intro-

► Les spécialistes estiment que 50 à 80% des raccordements domestiques en Suisse nécessitent des mesures d'assainissement. Près de 23% des canalisations publiques présenteraient par ailleurs des dégâts substantiels.

A gauche et au milieu: photos Max Maurer; à droite: SWIP

Paramètres	Charges en amont	Charges en aval	Rendement d'épuration
DCO (t/a)	490 180	37 003	92%
N (t/a)	40 874	21 106	47%
P (t/a)	6 433	724	89%

Tab. 2: charges en amont et en aval, et capacité d'assainissement des STEP en DCO, P et N pour l'ensemble de la Suisse (données extrapolées) [7].

«Il existe de nombreuses sources semblables à celle du Doubs. Mais la quantité exacte de l'eau jaillissant de ces sources n'est pas toujours bien connue. A l'heure actuelle, un certain nombre d'entre elles ont cependant pu être mesurées par nos soins.»

Pierre-Yves Jeannin
Responsable du projet SWISSKARST



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

duites dans les années à venir afin de réduire les micropolluants organiques souvent présents dans les eaux de surface [18].

Ressources en eaux souterraines

Les ressources en eaux souterraines de la Suisse peuvent être divisées en trois catégories principales en fonction de la situation géologique [19]: (a) dépôts de roches meubles, le plus souvent gravier et sable, (b) roches consolidées fissurées et (c) roches calcaires karstifiées. Ce sont généralement les eaux souterraines relativement proches de la surface, dont le temps de séjour dans le sous-sol est relativement bref, qui sont utilisées pour l'approvisionnement en eau, mais parfois aussi des eaux souterraines avec un temps de transit de plusieurs décennies.

D'importants aquifères de roches meubles se trouvent dans les dépôts graveleux des vallées fluviales des Alpes et du Plateau. Ces nappes d'eau souterraine sont alimentées par les infiltrations des cours d'eau et des précipitations ainsi que les écoulements des versants. A l'extérieur des vallées, les aquifères de roches meubles se présentent sous forme de moraines et de hautes terrasses graveleuses. Ces nappes d'eau souterraine sont généralement peu étendues. Des roches consolidées fissurées se trouvent dans les profondeurs du Plateau et des Alpes. Sur le Plateau, il s'agit souvent de grès et de molasse, tandis que dans les régions alpines, des roches cristallines fis-

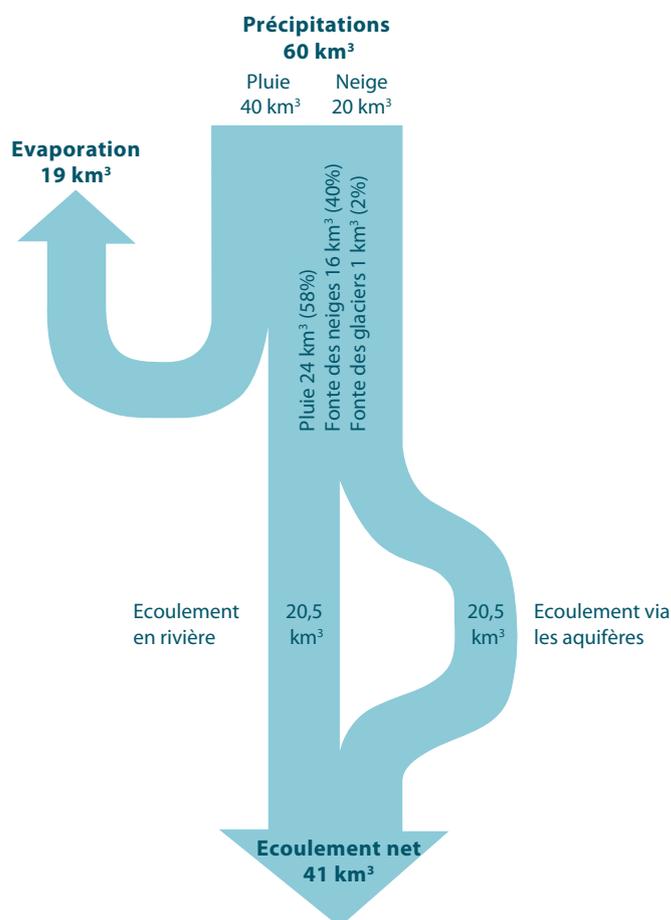
surées, comme le granit et le gneiss, sont plus répandues. Les eaux souterraines s'écoulent à travers un réseau de fissures, alimentant souvent de petites sources.

Les aquifères karstiques sont très répandus dans le Jura et également dans les Alpes. Dans ces aquifères, l'eau circule rapidement à travers un réseau de cavités et alimente des sources importantes. Ce réseau est entouré de zones moins perméables dans lesquelles l'eau est stockée pendant des semaines voire des mois, contribuant ainsi au débit de base. Par principe, ce type d'aquifère réagit très rapidement aux précipitations.

Jusqu'à présent, les nappes d'eau souterraine dans les aquifères karstiques étaient moins connues que celles présentes dans les aquifères de roches meubles. Dans le projet du PNR 61 «Vers une gestion durable des eaux karstiques en Suisse», une nouvelle méthode a été développée afin de quantifier plus précisément l'extension des aquifères karstiques en Suisse (SWISSKARST [20]) (cf. encadré 2). Les résultats du projet indiquent que les ressources en eaux karstiques de la Suisse s'élèvent de 6 à 9 km³/an au lieu des 3,79 km³/an estimés par Sinreich et al. [15].

Une étude conduite par l'OFEV offre une vue d'ensemble des quantités d'eau contenues dans ces trois types d'aquifères [15]. A cet égard, l'on opère une distinction entre volume global et volume des ressources disponibles pour une exploitation durable. Ce dernier

III. 4: régime des eaux moyen en Suisse (chiffres de [14], [16], [17].)



dépend surtout du flux d'eau transitant à travers les aquifères. Le volume d'eau souterraine correspond à la quantité totale d'eaux souterraines pouvant être exploitées. Les ressources en eaux souterraines pouvant faire l'objet d'une exploitation durable se définissent comme les quantités d'eau pouvant être prélevées en moyenne chaque année dans le sous-sol durant une période prolongée sans entraîner une baisse significative du volume d'eau souterraine et de répercussions écologiques [15]. Cette quantité est inférieure au taux de renouvellement des eaux souterraines, car une partie de celles-ci alimente les écosystèmes et assure le débit de base des cours d'eau.

Les aquifères karstiques présentent un plus grand volume d'eau souterraine (tab. 3) que les aquifères fissurés ou les aquifères de roches meubles [15]. Bien que les aquifères de roches meubles contiennent un plus petit volume d'eau souterraine, ce sont eux qui contribuent le plus aux ressources en eaux souterraines exploitables (10,5 km³/an). La majorité de ces ressources provient de nappes d'eau souterraine situées dans les fonds de vallée et présentant un potentiel d'infiltration de l'eau des cours d'eau. Pour les nappes d'eau souterraine à l'extérieur des fonds de vallée, les aquifères karstiques contribuent le plus aux ressources en eaux souterraines selon le projet SWISSKARST, suivis des aquifères fissurés et des aquifères en roches meubles (cf. tab. 3).

Le volume total des prélèvements d'eau souter-

raîne (1,3 km³/an) représentent – en moyenne annuelle – environ 6% des ressources en eaux souterraines qui s'élèvent à 20 à 23 km³/an (cf. tab. 3).

Les ressources en eaux souterraines peuvent cependant varier sensiblement selon les saisons et les conditions météorologiques. Par conséquent, la part d'eaux souterraines exploitées peut, selon les périodes, être supérieure à la part des ressources d'eaux souterraines disponibles. La question du rapport entre exploitation des eaux souterraines et ressources disponibles se pose en particulier durant les périodes de sécheresse.

Qualité des eaux souterraines

En Suisse, la qualité de ces eaux est analysée par la Confédération, les Cantons et les services de distribution d'eau. L'Observation nationale des eaux souterraines (NAQUA) étudie l'ensemble des régions ainsi que les diverses conditions hydrogéologiques et utilisations du sol [21]. Grâce à son réseau d'environ 500 stations de mesure réparties sur l'ensemble du territoire, le module SPEZ fournit des données représentatives sur la présence de polluants dans les eaux souterraines. S'appuyant sur 50 stations de mesure fédérales, le module TREND a pour but d'élaborer une compréhension commune des facteurs et processus qui affectent l'évolution de la qualité des eaux souterraines à court et à long termes [152].

«Après la clôture du projet SWISSKARST, la Confédération s'interroge sur la pertinence d'appliquer cette méthode à l'ensemble du territoire suisse.»

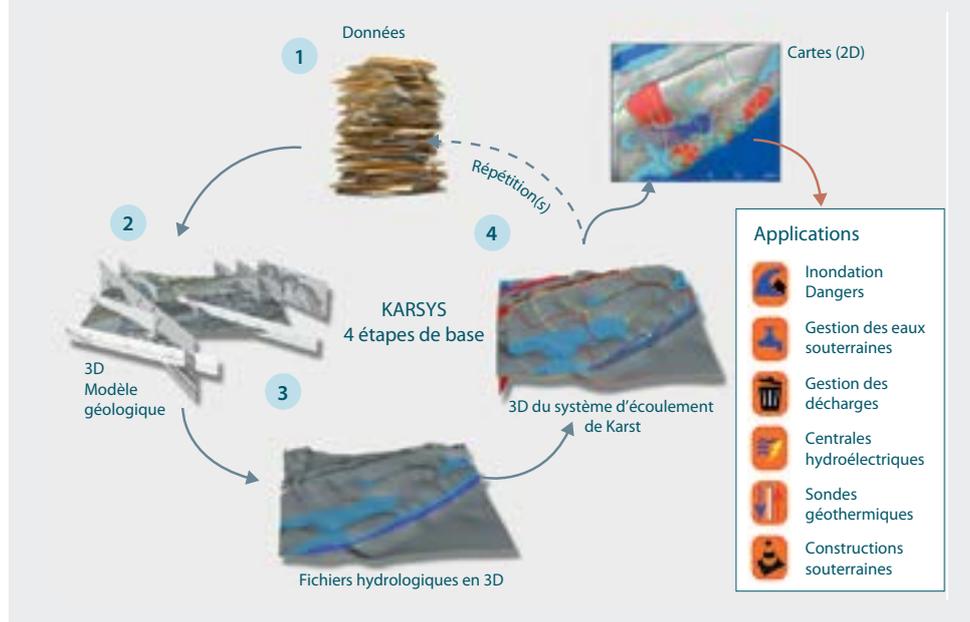
Ronald Kozel
Division Hydrologie OFEV



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

ENCADRÉ 2 | Méthode SWISSKARST de représentation cartographique des aquifères karstiques

L'approche KARSYS se fonde sur des données existantes (1). On conçoit d'abord un modèle géologique 3D (2) où sont indiqués les emplacements des sources et des masses d'eaux souterraines (3). Un modèle hydrogéologique (4) permet ensuite de représenter les principales directions d'écoulement et la délimitation des bassins versants. Différentes cartes peuvent être élaborées à partir du modèle 3D afin d'étayer les projets axés sur la pratique. Quelque 200 systèmes karstiques ont été documentés dans le cadre du PNR 61 (30% de la surface karstique suisse) (SWISSKARST [19]).



III. 5: méthode SWISSKARST de représentation cartographique des aquifères karstiques



► Les substances utilisées par l'agriculture font partie des substances anthropiques le plus souvent décelées dans les eaux souterraines. Il arrive également que l'on retrouve des substances pharmaceutiques dans les stations de pompage situées à proximité des cours d'eau.

A gauche: AGWAM; au milieu: RIBACLIM; à droite: GW-TEMP

Les substances utilisées dans l'agriculture font partie des substances d'origine anthropique les plus fréquemment détectées. Des concentrations de nitrates plus élevées que dans le milieu naturel sont identifiées en nombreux endroits. En 2011 par exemple, des concentrations dépassant les exigences prescrites par l'Ordonnance sur la protection des eaux (25 mg/l) ont été mesurées dans 16% des stations NAQUA [152]. En 2011 également, des produits phytosanitaires et des produits résultant de leur dégradation ont été détectés dans plus de la moitié des stations de mesure [152] surtout dans des zones d'agriculture intensive. L'on constate par ailleurs que les produits de dégradation sont présents plus souvent et dans des concentrations plus élevées que les substances initialement utilisées [152]. Pour l'heure, il n'existe aucune base commune pour évaluer les produits de dégradation présents dans les eaux souterraines.

En plus des substances utilisées dans l'agriculture, des traces d'hydrocarbures volatiles ont été détectées. Ces derniers proviennent généralement de sites pollués. Les hydrocarbures halogénés (tétrachloroéthane, trichloroéthane) comptent parmi les substances les plus fréquentes. En 2011, l'une de ces substances au moins a été décelée dans environ 25% des stations de mesure et les valeurs mesurées se sont avérées supérieures aux exigences de qualité prescrites par l'Ordonnance sur la protection des eaux (1 µg/l) dans 5% des stations de mesure [152]. Du méthyl-tert-butyléther (MTBE) a par ailleurs été décelé

dans 10% des stations de mesure. Des hydrocarbures aromatiques monocycliques ont été identifiés dans 2% des stations de mesure et les mesures correspondantes ne dépassaient que rarement les exigences de qualité prescrites (1 µg/l). Ces résultats démontrent la persistance des hydrocarbures halogénés par rapport aux hydrocarbures aromatiques monocycliques dans les aquifères qui se trouvent en général en conditions aérobies.

D'autres composés organiques, comme des substances pharmaceutiques, ont été détectés à des concentrations de l'ordre du ng/l, en particulier dans les stations de pompage proches des cours d'eau. Ces substances atteignent généralement les eaux de surface via les stations d'épuration et les stations de pompage proches des cours d'eau via la filtration des berges.

Contrairement aux substances chimiques, les contaminations microbiennes n'ont pas été référencées de manière systématique dans le cadre du projet NAQUA. Une étude pilote menée dans les stations de mesure du projet TREND a révélé que les contaminations bactériennes étaient le plus souvent détectées dans le karst (environ 70% des échantillons), dans les aquifères fissurés (environ 50%) et dans les aquifères de roches meubles (environ 7%). Du matériel génétique de virus a en revanche été détecté avec la même fréquence (35 à 50%) dans tous les types d'aquifères. Des protozoaires n'ont été décelés que rarement. Le cas échéant, ces microorganismes évoluent le plus souvent dans les aquifères karstiques

Tab. 3: volume d'eaux souterraines et ressources en eaux souterraines disponibles pour une exploitation durable en Suisse [15].

*) Surface sous le revêtement de molasse jusqu'à 1000 m de profondeur.

**) Dans le cadre du projet SWISSKART du PNR 61, le volume des ressources en eaux souterraines disponibles dans les aquifères karstiques a été revu à la hausse de 3,79 km³/an à 6 à 9 km³/an.

Ainsi le chiffre de 18,6 km³/an calculé dans l'étude de l'OFEV [15] augmente à 20-23 km³/an.

	Surface km ²	Volume d'eaux souterraines km ³	Ressources en eaux souterraines km ³ /an
Aquifères en roches meubles			
Total à l'extérieur/l'intérieur des fonds de vallée	11 651	10,7	2,96/7,56
Très abondant	1088	4,6	-/2,71
Abondant	1713	1,6	0,02/3,74
Peu abondant	8850	4,5	2,94/1,11
Aquifères fissurés			
Peu abondant	33 289	19,8	3,68
Aquifères karstiques			
Abondant	795+3300*	120	6-9**
Total de tous les aquifères		150	20-23

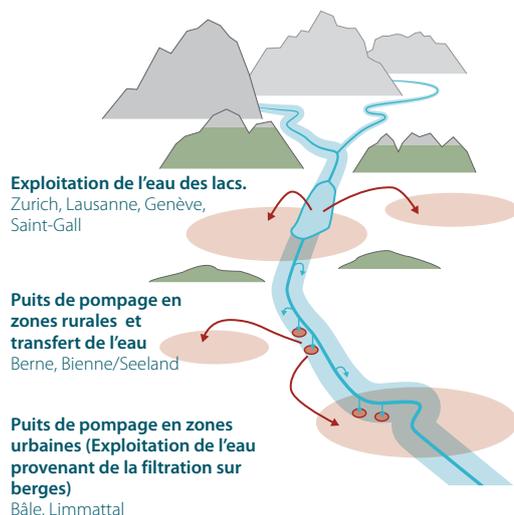
(environ 20% des échantillons). Ces résultats démontrent que les aquifères de roches meubles ont une capacité de filtration supérieure aux aquifères karstiques.

Exploitation des ressources en eau

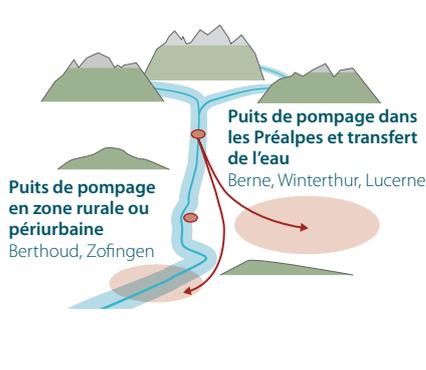
Les principales exploitations de l'eau sur le Plateau sont représentées dans l'illustration 6. Les sources, qui couvrent pratiquement la moitié de l'approvisionnement en eau potable, n'y sont pas représentées. L'eau est présente en quantité importante dans les vallées alpines (ill. 6a). Dans ces vallées, l'eau potable provient des lacs ainsi que des stations de pompage situées en zone rurale et, en partie, en zone urbaine. Les zones urbaines se trouvent souvent dans les vallées avec des sédiments alluviaux bien

perméables, où l'eau des principaux cours d'eau s'infiltre dans les eaux souterraines. De plus, les eaux souterraines sont enrichies artificiellement dans les grandes villes (Zurich, Bâle, Genève). Certaines ressources d'eau souterraine des vallées préalpines sont aussi exploitées de manière intensive (ill. 6b). Dans ce contexte, une partie de l'eau prélevée dans les régions préalpines est transportée sur de longues distances jusqu'au Plateau. Certains aquifères de roches meubles situés à proximité du Jura ou dans les vallées jurassiennes bénéficient d'un afflux d'eau provenant des aquifères karstiques et peuvent donc être très abondants (ill. 6c). Les petites vallées du Plateau ne bénéficiant d'aucun afflux d'eau externe, leurs ressources en eau sont limitées (ill. 6d).

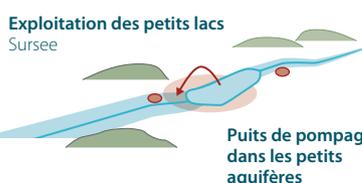
(a) Systèmes influencés par les Alpes



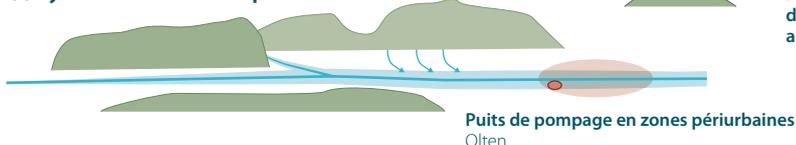
(b) Systèmes influencés par les Préalpes



(d) Systèmes influencés par le Plateau



(c) Systèmes influencés par le Jura



III. 6: principales exploitations de l'eau sur le Plateau par d'importants services d'approvisionnement en eau dans des systèmes influencés par (a) les Alpes, (b) les Préalpes, (c) le Jura et (d) le Plateau. Les sources, qui couvrent 48% de l'approvisionnement en eau potable en Suisse, ne sont pas représentées. Bleu clair: nappes d'eau souterraine abondantes en interaction avec des cours d'eau ou des nappes d'eau souterraine karstiques. Cercles rose pâle: zones urbaines; petits cercles rouge foncé: puits de pompage.

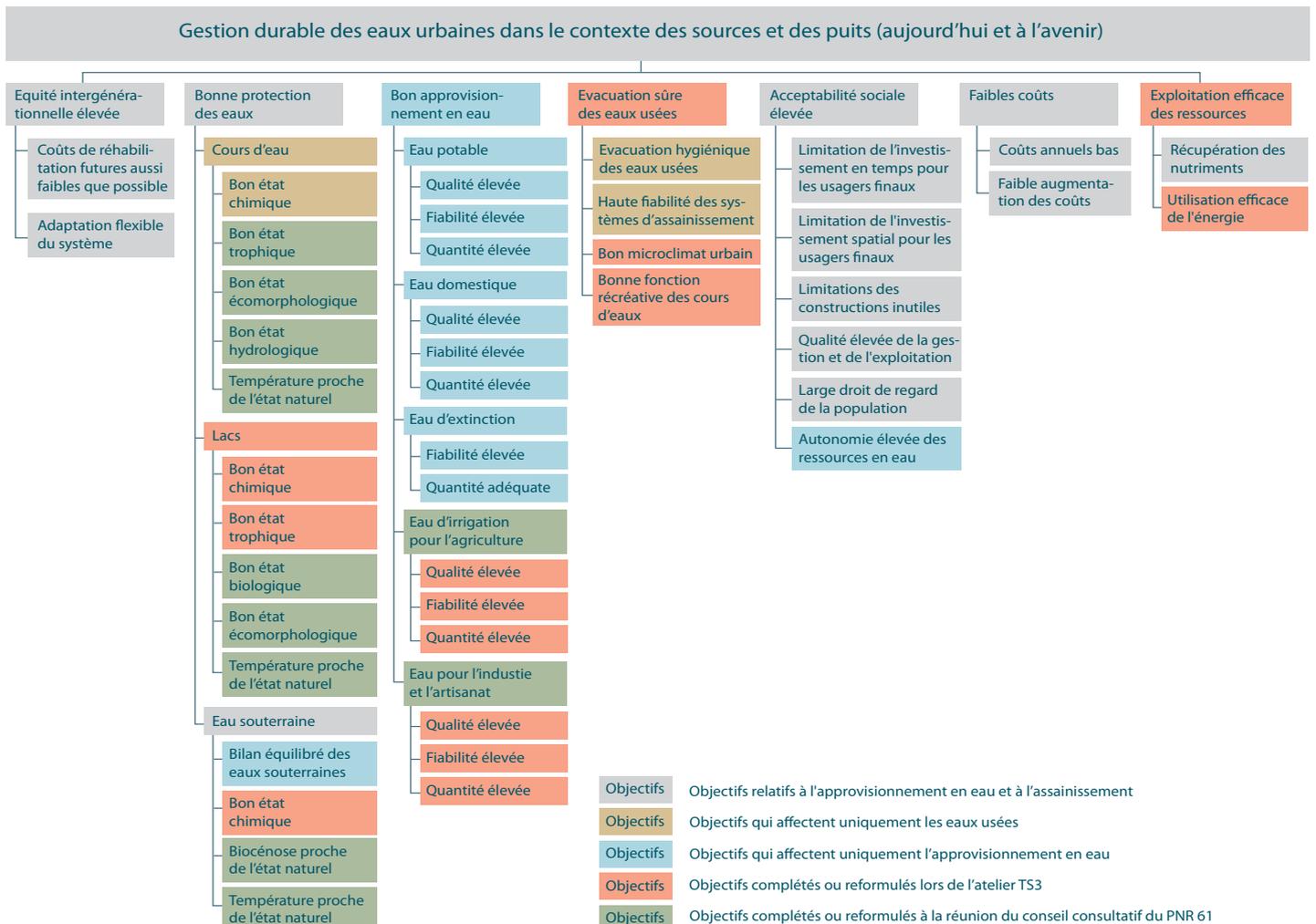
3 Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Le présent chapitre énonce les objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines qui ont été formulés sur la base du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61. Dans le cadre d'un procédé participatif à plusieurs niveaux, Lienert et al. (SWIP [22]) ont identifié les objectifs d'un approvisionnement en eau et d'un traitement des eaux usées de bonne qualité. En vue de l'établissement de la présente synthèse, ces objectifs ont été complétés, au cours de deux ateliers⁷ réalisés en présence des spécialistes du PNR 61, pour prendre en compte des aspects relatifs à une gestion durable de l'eau. Ces objectifs sont représentés dans l'illustration 7.

Nombre de ces objectifs sont également définis dans la législation suisse et s'appuient sur la Stratégie pour le développement durable 2012–2015 adoptée par le Conseil fédéral [23]. Sept objectifs fondamentaux ont été définis sur la base des trois objectifs centraux de

développement durable que sont l'«équité intergénérationnelle», l'«équité intragénérationnelle» et l'«intégrité écologique» [24] (cf. ill. 7). Ces objectifs fondamentaux sont répartis en sous-objectifs hiérarchisés [25]. Cette structure sert ensuite de base à l'évaluation des mesures possibles décrites dans le chapitre 5. Les sept objectifs fondamentaux caractérisent la notion de «développement durable» telle qu'elle est admise par les spécialistes du PNR 61 et reflètent les différentes exigences pour parvenir à une gestion durable des eaux urbaines. Outre les objectifs de coûts, de qualité et de protection, des objectifs de développement durable, comme l'équité intergénérationnelle, l'acceptabilité sociale et l'exploitation efficace des ressources sont également pris en compte de manière explicite. Ces différents objectifs permettent d'évaluer les mesures possibles en fonction de leur impact sur le développement durable. Ces exigences différentes, parfois contradictoires, peuvent entraîner des conflits d'intérêts, par exemple entre protection et exploitation ou entre bon approvisionnement en eau et évacuation sûre des eaux usées et

III. 7: objectifs pour parvenir à une gestion durable des eaux urbaines en tenant compte des sources et des bassins (cf. [22]).





d'autres exploitations. S'il n'existe aucune solution simple pour résoudre ces conflits, ceux-ci peuvent toutefois être minimisés grâce à des dispositions adaptées [26], notamment:

- ▶ une pesée transparente et participative des intérêts, c'est à dire la comparaison entre les différents objectifs et leurs «trade-offs», et l'identification de compromis,
- ▶ une planification à moyen et long termes (cf. mesures possibles «Infrastructures-3», «Ressources en eau-2», «Ressources en eau-5») et
- ▶ une étude intégrale et régionale (cf. mesures possibles «Ressources en eau-3»).

Ces dispositions sont décrites dans le chapitre 5. Le chapitre 6 évalue l'impact des mesures possibles sur le degré de réalisation des objectifs en matière de gestion durable des eaux urbaines. L'importance qu'il convient d'accorder à chacun des objectifs est laissée à la libre appréciation du lecteur. La présente synthèse ne définit dès lors aucun ordre de priorité parmi les différentes mesures possibles.

Equité intergénérationnelle élevée

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de léguer aux générations futures une **charge de réhabilitation aussi faible que possible**.

Contexte: la Suisse possède des infrastructures hydrauliques ayant une longue durée de vie: entre 50 et 100 ans pour les canalisations, par exemple [153]. Afin de garantir durablement l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, il faut réaliser en moyenne des investissements annuels équivalant à 1 ou 2% de la valeur de remplacement des infrastructures concernées. Si les investissements réels sont inférieurs aux besoins théoriques, la génération actuelle reporte la charge financière sur les générations futures (SWIP [22]). Ce principe s'applique également à la garantie à long terme de la disponibilité des ressources en eau de la Suisse: si l'on porte aujourd'hui atteinte à la qualité et à la quantité des ressources en eau, on lègue aux générations futures la charge de mettre à disposition de l'eau potable en quantité suffisante et dans la qualité requise (p. ex. coûts de traitement plus élevés pour une eau de moindre qualité).

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir une **adaptation flexible du système**.

Contexte: la structure des systèmes d'approvisionnement en eau et de traitement des eaux usées détermine leur potentiel d'adaptation aux évolutions futures (p. ex. augmentation ou diminution de la population, baisse de la consommation d'eau, etc.). Les systèmes centraux, comme les infrastructures reliées au réseau, ne sont pas conçus pour s'adapter avec flexibilité aux évolutions futures [27]. Afin de garantir durablement l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, ces systèmes doivent être conçus pour permettre une adaptation flexible aux changements (économiques, écologiques et sociales) des conditions-cadres [28]. Ce principe de flexibilité devrait également être maintenu dans le domaine des ressources en eau. En effet, plus la superficie des sites permettant l'exploitation de l'eau est restreinte (p. ex. constructions dans les vallées fluviales), moins il y a de marge de manœuvre pour garantir l'approvisionnement en eau en cas d'augmentation des besoins et de problèmes concernant la quantité et la qualité de l'eau.

Bonne protection des eaux

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de préserver le **bon état des cours d'eau (hydrologie et écomorphologie)** tout en maintenant un **régime équilibré des eaux souterraines**.

Contexte: le prélèvement d'eaux souterraines abaisse le niveau des nappes, ce qui peut nuire à l'alimentation en eau souterraine des cours d'eau et des écosystèmes (p. ex. zones humides) en période de sécheresse. Il en est de même pour les sources captées: pendant ou après une période de sécheresse, le débit résiduel pour alimenter les cours d'eau et les autres écosystèmes est réduit (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61). L'évacuation des eaux de pluies en zone urbaine réduit le renouvellement des eaux souterraines. Conjugué au déversement des eaux usées, il influe en outre sur la dynamique des cours d'eau.

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de préserver **l'état chimique et biologique** des eaux fluviales, lacustres et souterraines, et de maintenir des **températures de l'eau proches de l'état naturel**.

- ▶ Dans le cadre du projet SWIP, une procédure participative par étapes a permis d'identifier des objectifs pour améliorer l'approvisionnement en eau et l'assainissement des eaux usées.

Toutes les illustrations: SWIP

«Souvent, la problématique réside plus dans les conflits entre les différentes exploitations que dans la quantité d'eau souterraine disponible. C'est pourquoi il importe, à l'avenir, que nous disposions d'un nombre suffisant de sites dédiés à l'exploitation des eaux souterraines afin de pouvoir, en cas de problèmes sur un site donné, exploiter les eaux souterraines sur un autre lieu.»

Daniel Hunkeler
Université de Neuchâtel
Responsable du projet GW-TREND



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



► L'entretien des infrastructures souterraines est coûteux et exige un processus de planification minutieux.

Toutes les illustrations: SWIP

Contexte: les nutriments et les polluants présents dans les eaux usées épurées et les eaux de ruissellement issues des zones urbaines se retrouvent dans les cours d'eau. Ces substances peuvent modifier l'état trophique ainsi que la qualité chimique et biologique des cours d'eau et entraver l'exploitation des eaux. L'exploitation des cours d'eau pour le refroidissement et le chauffage peut en outre modifier la température de l'eau. Des forages non conformes, prévus pour une exploitation à des fins de refroidissement ou de chauffage, peuvent fragiliser la protection naturelle des eaux souterraines.

Bon approvisionnement en eau

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de fournir de l'eau pour les différentes utilisations existantes (eau potable, eau domestique, eau d'extinction d'incendies, eau d'irrigation, eau industrielle), dont la **qualité hygiénique, microbiologique, chimique, physique et esthétique est irréprochable⁸**, sans traitement ou avec un traitement mineur et le plus naturel possible. Les exigences relatives à la qualité de l'eau varient selon le type d'utilisation (eau potable, eau domestique, eau d'irrigation ou eau industrielle).

Contexte: la qualité de l'eau peut être affectée par divers facteurs (SWIP [22]). Elle dépend de la qualité de l'eau brute (eau des lacs, eau de surface et eau de source) et du traitement éventuellement requis, mais également de l'état des installations et des canalisations (SWIP [22]). Des sources diffuses de polluants (p. ex. l'agriculture) et des sources ponctuelles (p. ex. sites contaminés) situées dans les bassins versants de captages d'eau peuvent altérer la qualité de l'eau brute. De même, toute infraction à la législation sur les zones protégées, les fortes précipitations ou encore les épisodes de crue peuvent affecter la qualité de l'eau [29], [30] (voir aussi le chapitre 4).

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir un approvisionnement fiable en mettant à disposition de l'eau **en quantité suffisante et avec une pression suffisante**. Les exigences varient également selon le type d'utilisation (eau potable, eau domestique, eau d'irrigation ou eau industrielle).

Contexte: l'approvisionnement suffisant en eau peut être entravé par plusieurs facteurs.

Ainsi, des périodes de sécheresse prolongées consécutives à une diminution des ressources provenant de nappes d'eaux souterraines à faible capacité de stockage et à des pics de consommation élevés (p. ex. remplissage simultané de toutes les piscines privées) peuvent provoquer des difficultés d'approvisionnement (pression et capacité). En outre, des défaillances techniques survenant au niveau des installations ou des canalisations (p. ex. fissures) peuvent interrompre l'approvisionnement (SWIP [22]).

Evacuation sûre des eaux usées

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir une **évacuation et un déversement hygiéniques des eaux usées** dans les eaux de surface.

Contexte: les eaux usées contiennent des agents pathogènes (bactéries, virus, etc.) dont le type et le nombre dépendent de l'état de santé général de la population [31]. En cas de contact direct ou indirect avec des eaux usées, un individu risque de contracter une maladie [32]. Le contact avec les eaux usées peut en effet provoquer des troubles gastro-intestinaux voire des épidémies, etc. Afin de prévenir les risques de contamination, les services de gestion des eaux urbaines doivent garantir une évacuation hygiénique des eaux usées (SWIP [22]).

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir **une fiabilité élevée du système d'évacuation des eaux**.

Contexte: les canalisations des eaux usées aménagées dans le sous-sol doivent fonctionner comme un tout [27]. Si les canalisations sont endommagées ou mal entretenues, elles peuvent s'effondrer ou se boucher (p. ex. présence de racines ou de gravats), ce qui peut provoquer des refoulements dans les canalisations des eaux usées et, partant, des inondations. De fortes précipitations peuvent également entraîner des refoulements, le système d'évacuation des eaux étant surchargé. Afin de protéger les zones habitées des inondations, les systèmes d'évacuation des eaux usées doivent être en bon état et offrir une capacité suffisante.

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir une **bonne qualité de l'habitat et un bon renouvellement des eaux**.

Contexte: les zones habitées, en particulier les villes, n'ont pas le même climat que les zones périphériques. En raison de la prédominance de surfaces asphaltées, du peu d'espaces verts, des rejets de chaleur des bâtiments, de la circulation et de l'industrie ainsi que de la mauvaise aération, la température moyenne est plus élevée et l'air plus sec dans les villes [33]. Aujourd'hui déjà, l'effet d'«îlot de chaleur urbain» peut entraîner une élévation des températures jusqu'à 10° C par rapport aux zones périphériques [35].

Acceptabilité sociale élevée⁹

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de limiter, **dans le temps et dans l'espace**, la construction, l'entretien et l'exploitation de systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement des eaux (SWIP [22]).

Contexte: des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement des eaux décentralisés sont souvent installés directement chez les consommateurs (p. ex. cave ou jardin). Souvent, les particuliers sont également responsables de l'entretien et de l'exploitation des systèmes. En revanche, l'exploitation et l'entretien des systèmes centraux, notamment des infrastructures reliées au réseau, est du ressort des spécialistes. Les consommateurs n'ont pas besoin de consacrer du temps à leur entretien et leur exploitation, pas plus qu'ils ne sont tenus de réserver de l'espace sur leur propriété privée.

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de limiter les **activités de constructions inutiles** (SWIP [22]).

Contexte: différentes infrastructures de réseau se partagent actuellement l'espace souterrain (approvisionnement en gaz, en électricité, en chaleur et en eau, évacuation des eaux usées, transports et télécommunications). Les activités de construction inutiles qui occasionnent des interruptions de l'approvisionnement, de la poussière et du bruit et qui gênent la circulation peuvent être évitées à la faveur d'une bonne concertation entre les différents secteurs en matière de planification et d'entretien des infrastructures.

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir une **gestion de qualité** des systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées, une **large implication de la population** dans le processus de décision (**codécision**) ainsi qu'une **autonomie élevée par rapport à la gestion des ressources en eau** (SWIP [22]).

Contexte: la qualité de la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées joue un rôle déterminant dans l'acceptabilité sociale des différentes infras-

tructures. Il en est de même pour l'implication de la population dans la planification des systèmes (IWAQA [36]) et l'autonomie des communes en ce qui concerne les ressources en eau utilisées pour l'approvisionnement en eau potable (SWIP [22]).

Faibles coûts

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir de **coûts annuels bas** et de limiter **l'augmentation des coûts**.

Contexte: les coûts annuels comportent les coûts d'exploitation (frais de personnel et de matériel) et les coûts du capital (amortissements et intérêts). Les infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées reliées au réseau se caractérisent par des coûts du capital élevés. Pour l'amortissement des infrastructures, il convient de privilégier une approche fondée sur la durée de vie. Dans de nombreux modèles, une forte augmentation des coûts se traduit par une forte augmentation des taxes, raison pour laquelle il est difficile de recueillir le soutien des responsables politiques [37], [38].

Exploitation efficace des ressources

L'objectif d'une gestion durable des eaux est de garantir la **récupération de substances nutritives** à partir des eaux usées.

Contexte: les eaux usées contiennent des substances nutritives précieuses, notamment l'azote et le phosphore. Compte tenu de la raréfaction des ressources naturelles (p. ex. phosphore), l'évacuation des eaux usées doit être conçue de manière à ce que des substances nutritives précieuses puissent être récupérées et réutilisées (SWIP [22]).

L'objectif d'une gestion durable des eaux urbaines est de garantir une **utilisation efficace de l'énergie**.

Contexte: les eaux usées contiennent également de l'énergie thermique et chimique: l'énergie thermique peut être exploitée à l'aide d'échangeurs de chaleur et de pompes à chaleur pour le refroidissement ou le chauffage [154]. L'énergie chimique contenue dans les eaux usées peut ensuite être transformée en électricité ou en chaleur. Afin de réduire la consommation en ressources naturelles (particulièrement les combustibles fossiles), l'évacuation des eaux usées peut être conçue de manière à exploiter efficacement l'énergie contenue dans les eaux usées. Il en est de même pour l'approvisionnement en eau: le captage, le traitement et la distribution de l'eau peuvent être conçus pour exploiter efficacement l'énergie [39], [40].

4 Défis liés à une gestion durable des eaux urbaines

Le présent chapitre aborde les défis actuels et futurs que pose une gestion durable des eaux urbaines en Suisse¹⁰ et analyse les rapports de causalité sous-jacents. L'analyse est fondée sur l'approche DPSIR (Drivers/forces, Pressures/pression, State/état, Impact/impacts, Responses/réponses) [41] qui permet d'examiner les rapports de causalité entre les différents facteurs influençant le système de gestion des eaux urbaines. L'analyse sert de référence à l'élaboration des mesures possibles en vue de garantir une gestion durable des eaux urbaines en Suisse (cf. chapitre 5).

Les défis ont été identifiés dans le cadre d'un atelier réunissant notamment des spécialistes du PNR 61. Les spécialistes et les membres du groupe d'encadrement ont évalué l'importance de chacun de ces défis avant de déterminer, sur cette base, les évolutions à analyser en priorité (cf. annexe I). En font notamment partie le changement climatique, en particulier l'augmentation des périodes de sécheresse, la hausse des températures de l'eau, l'augmentation des fortes précipitations et des crues, ainsi que le vieillissement des infrastructures, les évolutions de la population, de l'urbanisation et de l'économie et les modifications des conditions-cadres institutionnelles. Avant le PNR 61, les connaissances des conséquences du changement climatique sur les ressources en eau, en particulier les eaux souterraines, ainsi que sur l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées présentaient des lacunes. Le PNR 61 avait pour objectif de contribuer à lever les incertitudes et combler les lacunes.

Les résultats du PNR 61 présentés ci-après indiquent qu'à moyen terme, c'est-à-dire dans les 20 à 40 prochaines années, les évolutions économiques et sociales ainsi que la croissance urbaine et démographique auront un impact bien plus important que celui du changement climatique sur la gestion des eaux urbaines. Le changement climatique joue un rôle sur le long terme dans la mesure où il fixe les conditions-cadres d'une gestion durable des eaux urbaines (cf. PNR 61 [42]).

Changement climatique Augmentation des périodes de sécheresse

(a) Répercussions sur le volume d'eaux souterraines

Une hausse des températures associée à une baisse des précipitations en été influenceront sur le régime des eaux de surface et des eaux souterraines. Reste à savoir si ces facteurs posent un défi en tout temps ou seulement pendant

les années extrêmes avec des périodes de sécheresse particulièrement longues, comme en 2003.

Le projet de recherche «Groundwater resources under changing climatic conditions» (PNR 61) a analysé les répercussions du changement climatique sur les nappes d'eau souterraine proches de la surface (GW-TREND [43], [44], [45]), celles-ci jouant un rôle déterminant dans l'approvisionnement en eau potable. Le projet a examiné en particulier les nappes d'eau souterraine du Plateau qui ne sont pas alimentés par les grands fleuves alpins (cf. ill. 6). Dans cette perspective, les chercheurs ont analysé le comportement des différents types d'aquifère par le passé et modélisé leur comportement futur (cf. encadré 3). Une attention particulière a été accordée à la quantification des incertitudes liées à la modélisation, (a) incertitudes inhérentes aux différents modèles climatiques globaux et régionaux et (b) incertitudes relatives à la description des processus d'infiltration et d'écoulement (GW-TREND [43]).

Le projet de recherche a d'abord analysé l'impact du changement climatique sur le renouvellement des eaux souterraines en examinant: (a) la recharge directe des eaux souterraines par l'infiltration de l'eau de pluie (GW-TREND [43]) et la recharge indirecte des eaux souterraines par (b) l'infiltration des eaux fluviales ou (c) par des afflux souterrains (GW-TREND [46]). Les résultats de l'analyse montrent qu'à l'exception des années extrêmes, le taux moyen annuel de recharge directe des eaux souterraines ne variera guère (GW-TREND [43]).

Les modifications mineures s'expliquent par le fait qu'aujourd'hui déjà, le taux de recharge directe des eaux souterraines est relativement faible en été, et que la hausse des températures et la baisse des précipitations n'ont qu'une influence modérée sur le renouvellement des eaux souterraines. De plus, l'augmentation des précipitations durant les mois d'hiver compense la recharge plus faible des eaux souterraines en été. Ces changements mineurs sont du même ordre de grandeur que les différences observées dans la recharge des eaux souterraines en fonction des cultures sélectionnées (GW-TREND [45]).

Si le renouvellement direct des eaux souterraines n'évoluera que modérément en moyenne annuelle, celui-ci variera selon les saisons (GW-TREND [43]) (cf. encadré 3). Ainsi, la période durant laquelle les eaux souterraines ne se rechargent pas ou peu sera prolongée de un ou deux mois. Ces périodes qui durent aujourd'hui de juin à août devraient s'étendre à l'avenir de mai à octobre. L'allongement de cette période de faible recharge des eaux souterraines s'explique par une hausse



ENCADRÉ 3 | Quel est l'impact du changement climatique sur la recharge directe des eaux souterraines?

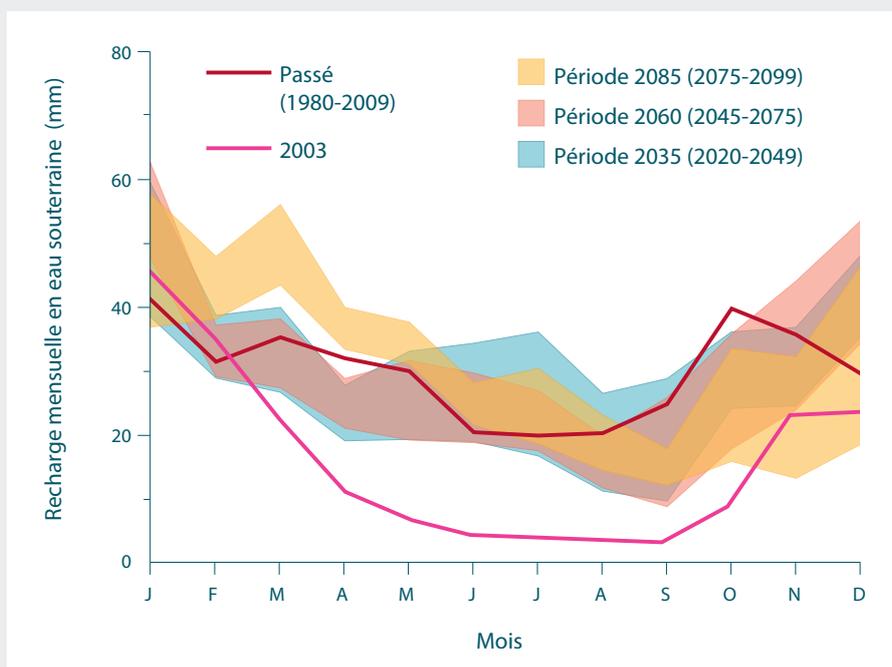
Dans le cadre du projet de recherche «GW-TREND» du PNR 61, l'évolution de la recharge directe des eaux souterraines a été évaluée à l'aide d'une modélisation mathématique. Pour ce faire, la recharge durant une période de contrôle de 30 ans (1980-2009) a été comparée à la recharge durant trois périodes futures autour des années 2035, 2060 et 2085 (GW-TREND [43]). Afin de prendre en compte les incertitudes relatives aux prévisions climatiques, dix modèles climatiques différents du projet européen ENSEMBLES ont été utilisés. L'illustration 8 représente les résultats pour le site de Wohlenschwil, Argovie. Le taux moyen de recharge mensuelle des eaux souterraines est représenté en mm/an.

Les prévisions varient fortement selon les modèles climatiques. Malgré tout, l'on constate une évolution de la répartition saisonnière de la recharge des eaux souterraines. Durant les périodes 2035 et 2060, la recharge à la faveur d'une augmentation des précipitations en décembre, janvier et février, et également en mars et en avril pour la période 2085. Dans le même temps, les eaux souterraines se rechargent moins aux mois d'août, septembre et octobre en raison d'une augmentation de l'évapotranspiration. On observe donc une répartition plus irrégulière sur l'ensemble de l'année qui peut entraîner une baisse du niveau des eaux souterraines, en particulier au niveau des nappes aquifères disposant d'une faible capacité de stockage, mais également une diminution du débit des sources à la fin de l'été. La moyenne annuelle varie légèrement en fonction du modèle climatique utilisé, selon ce qui prédomine, l'augmentation en hiver ou la diminution en fin d'été. Le comportement des nappes et des sources face à un faible renouvellement durant une période prolongée dépend donc des capacités de stockage de l'aquifère sous-jacent (voir également l'encadré 4).

Une comparaison avec 2003 (ill. 8, ligne rose) montre que cette année présente un taux de recharge très faible durant l'été. Il s'agit d'une situation extrême qui n'est pas représentative des conditions moyennes attendues dans le futur.

► Tandis que le renouvellement direct des eaux souterraines ne change guère d'une année à l'autre, la répartition saisonnière est soumise quant à elle à des variations importantes. Ainsi, la période durant laquelle les eaux souterraines ne se renouvellent pas ou peu sera prolongée de un ou deux mois.

Toutes les illustrations: GW-TREND



III. 8: évolution de la recharge directe des eaux souterraines. Valeurs mensuelles moyennes pour la période 1980-2009 (ligne rouge) et pour les périodes futures 2035, 2060 et 2085. La recharge des eaux souterraines calculée pour l'année 2003 est représentée à titre de comparaison (ligne rose).

du déficit d'humidité du sol dû à une augmentation de l'évapotranspiration. Le déficit d'humidité doit d'abord se résorber pour que les eaux souterraines puissent se résorber.

Le projet de recherche «Towards a sustainable management of Karst in Switzerland» du PNR 61 a analysé les conséquences du changement climatique sur la recharge des eaux souterraines dans les systèmes karstiques du Jura et des Préalpes. Les résultats de l'analyse montrent que, dans ces régions aussi, la recharge directe des eaux souterraines névo-luera que modérément (SWISSKARST [47]).

Même si de nombreuses sources karstiques en Suisse sont alimentées par des bassins versants importants, l'augmentation des périodes de sécheresse affectera néanmoins leurs débits. Ainsi, l'analyse des courbes de tarissement a montré que, si les eaux souterraines ne se renouvelaient pas durant six mois dans le Jura, de nombreuses sources karstiques présenteraient un débit inférieur (1 à 3 l/s par km²) à celui d'aujourd'hui (3 à 5 l/s par km²). Par conséquent, le débit minimal diminuera par rapport à aujourd'hui, mais la plupart des sources ne tariront pas pour autant (SWISSKARST [47]). De nombreuses sources constituant cependant la ressource principale en eau de certains fleuves, ceux-ci seront à l'avenir alimentés avec deux ou trois fois moins d'eau de source qu'actuellement (SWISSKARST [46]).

Dans les Alpes, les sources karstiques réagiront différemment aux périodes de sécheresse: les débits d'été des systèmes karstiques alimentés par des bassins versants situés à moins de 1800 m d'altitude auront tendance à s'épuiser. Actuellement, les systèmes karstiques situés à plus de 1800 m d'altitude connaissent de longues périodes de sécheresse sévère en hiver. A l'avenir, ces périodes seront moins longues et moins marquées. La période de sécheresse estivale sera également plus courte (septembre). C'est pourquoi en été, les débits de ces systèmes devraient être au moins équivalents à ceux des périodes de sécheresse hivernale actuelles [48]. Cependant, cette affirmation doit encore être confirmée par d'autres analyses.

Les périodes de sécheresse se répercutent plus directement sur l'humidité du sol et les cultures agricoles que sur le débit des sources. Les aquifères réagissent bien plus lentement que les sols et peuvent compenser une répartition moins régulière du renouvellement des eaux souterraines (GW-TREND [43]). En ce qui concerne l'exploitation des eaux souterraines en tant que ressource d'eau potable, il faut cependant considérer que les besoins en eau peuvent augmenter nettement en cas de sécheresse prolongée.

Le changement climatique entraîne également un décalage du débit des fleuves [49]: à l'avenir, les fleuves ayant un débit maximal en été (régime nival et glaciaire) se feront plus rares. Sur le Plateau, les fleuves présenteront un nouveau type de régime (pluvial de transition) caractérisé par un débit minimum mar-

qué en août et un débit maximum en janvier et en mars [49]. Dans les cours d'eau des Préalpes et des Alpes, la période d'étiage se décalera de l'hiver à la fin de l'été. Le décalage dans le temps du débit des fleuves influera sur la recharge des eaux souterraines par infiltration de l'eau fluviale.

Les ressources de nombreux aquifères situés dans les vallées sont tributaires du renouvellement des eaux souterraines par infiltration de l'eau fluviale (RIBACLIM [50], [51]). Cela vaut surtout en présence d'une dynamique de débit élevée (RIBACLIM [52], [53]) laquelle garantit un renouvellement régulier du lit d'un cours d'eau. Le renouvellement s'effectue généralement de manière naturelle, mais il est possible de l'intensifier en aménageant des puits de pompage à proximité des cours d'eau (infiltration induite) (RIBACLIM [54], [55]). Les aquifères alimentés par les cours d'eau alpins des zones glaciaires ne seront concernés par la baisse des débits en été que dans un avenir lointain [49]. Durant les prochaines décennies, ces cours d'eau présenteront encore un débit important durant les mois d'été en raison de la fonte des glaciers. Même après le recul des glaciers, le débit d'étiage des grands fleuves alpins sera toujours bien plus important que le débit des eaux souterraines. En revanche, certains tronçons fluviaux des régions préalpines et des régions alpines sans glacier dotés d'un lit perméable risquent de s'assécher en raison de l'infiltration des eaux fluviales dans les aquifères surtout dans de petits bassins versants (GW-TREND: [46]). Certains tronçons fluviaux s'assèchent d'ores et déjà durant certaines périodes dans les conditions climatiques actuelles, par exemple dans le Haut-Emmental, la vallée de la Töss et le Fricktal.

Dans les cours d'eau fortement colmatés ou ceux présentant un débit d'étiage supérieur au débit maximal de l'aquifère, le débit de surface se maintient lors des périodes de sécheresse. L'infiltration naturelle ou induite peut cependant diminuer fortement et de manière non-linéaire en fonction du niveau de l'eau. Par exemple, le canal de Hagneck situé dans le Seeland ne contribue pratiquement pas à la recharge des eaux souterraines lorsque les débits sont faibles (GW-TREND [56]).

Si l'infiltration des eaux fluviales diminue de manière significative ou si certains tronçons fluviaux s'assèchent, alors la disponibilité des eaux souterraines dépendra davantage de l'eau stockée ou des apports latéraux. Le degré de disponibilité de l'eau pouvant être exploitée au moyen de puits de pompage est fonction de la vitesse à laquelle les aquifères des vallées se vident et dans quelle mesure de tels systèmes sont secondés par des débits provenant d'aquifères plus profonds qui réagissent plus lentement. Soulignons que la quantité d'eau stockée ne sert pas seulement à la production d'eau potable, mais qu'elle alimente aussi des écosystèmes dépendant des eaux souterraines ou participe, en aval, au débit de base des cours d'eau.

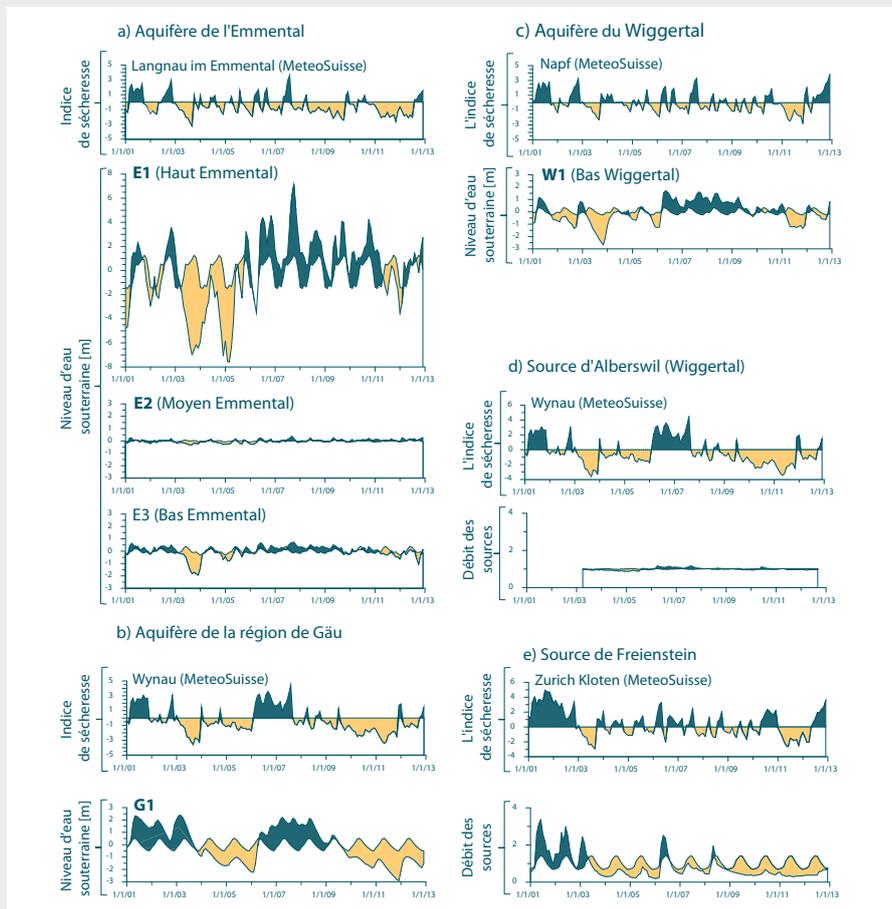
ENCADRÉ 4 | Quelles sont les répercussions des périodes de sécheresse sur les différents aquifères?

La canicule de 2003 et l'année 2011 avec un printemps et un automne secs fournissent de précieuses indications sur le comportement des aquifères en période de sécheresse, comme en témoignent les exemples ci-après (GW-TREND [155]). Les conditions météorologiques de chaque région sont représentées par un indice de sécheresse tenant compte des précipitations et de l'évapotranspiration (Palmer Drought Severity Index).

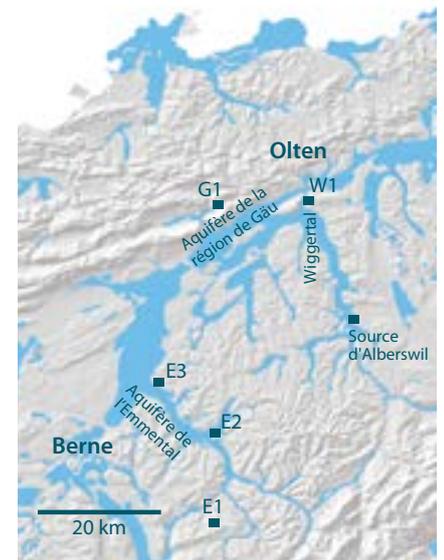
La réaction aux périodes de sécheresse peut beaucoup varier au sein d'une vallée, comme le montre l'exemple de l'Emmental. En cas de sécheresse, le niveau d'eau souterraine diminue rapidement et fortement dans la partie supérieure de la vallée (E1). Dans les vallées préalpines plus raides, le niveau d'eau souterraine baisse rapidement dès que l'infiltration des cours d'eau diminue. Cependant, ce niveau ne s'abaisse pas dans toute la vallée. Le niveau d'eau souterraine reste stable dans la partie centrale (E2) en raison de l'importante quantité d'eau qui afflue – en différé – de la vallée principale et des vallées latérales. En revanche, dans les parties plus plates des vallées du Plateau, les niveaux de l'eau souterraine diminuent fortement, comme dans le Bas Emmental (E3) et le Bas Wiggertal (W1). Cette baisse peut être imputée à une infiltration plus faible dans les cours d'eau qui sont plus fortement colmatés. Tant dans le bas que le haut Emmental et Wiggertal, le niveau augmente rapidement dès qu'il pleut à nouveau. Lors de précipitations, le débit des rivières alimentées par des bassins versants préalpins pentus augmente à nouveau rapidement: les rivières alimentent alors efficacement les aquifères.

Ce n'est pas le cas de l'aquifère de Gäu, surtout alimenté par une recharge directe des eaux souterraines et un afflux important du Jura. Le système réagit lentement et les effets des vagues de sécheresse successives s'accumulent (G1). Ainsi, le niveau d'eau le plus bas n'a pas été atteint en 2003, mais en 2011, après plusieurs années de précipitations inférieures à la moyenne. Les précipitations ne permettent pas aux eaux souterraines de se renouveler aussi rapidement, étant donné qu'une grande quantité d'eau sert d'abord à combler le déficit d'humidité du sol avant de contribuer à la recharge directe des eaux souterraines.

Les sources peuvent réagir de manière très différente aux périodes de sécheresse, comme en témoignent deux exemples. La source molassique d'Alberswil réagit à peine aux épisodes de sécheresse, alors que le débit de la source de Freienstein, qui est alimentée en partie par des couches de gravier, diminue rapidement et de manière constante. Les couches de gravier stockent l'eau pendant moins de temps que la molasse, assez peu perméable. La recharge directe des eaux souterraines prend plus de temps que dans certains aquifères des vallées en raison du déficit d'humidité du sol qui s'accumule durant les périodes de sécheresse dans les zones à basse altitude.



III.9: répercussions des périodes de sécheresse sur les différents types d'aquifères. Divergence des conditions mensuelles moyennes. Les débits de source sont normés par rapport au débit moyen calculé sur plusieurs années (sans dimension). Le jaune correspond à un déficit en eau, le bleu à une humidité supérieure à la moyenne. L'indice de sécheresse prend aussi bien en compte les précipitations que l'évapotranspiration.





► En période de sécheresse, les eaux usées insuffisamment purifiées risquent de détériorer la qualité des cours d'eau. Par ailleurs, les processus de dégradation photochimique sont susceptibles d'augmenter le degré d'autoépuration des cours d'eau.

A gauche: DROUGHT-CH; au milieu et à droite: RIBACLIM

La quantité d'eau stockée pouvant être prélevée dépend (a) de la profondeur de l'aquifère, (b) de l'emplacement et de la profondeur des puits de pompage et (c) de la variation de la qualité de l'eau dans le temps et dans l'espace. Pour les aquifères au fond des vallées qui ne sont pas directement reliés à des cours d'eau ou à des écosystèmes (p. ex. des forêts alluviales), la baisse du niveau des eaux souterraines n'a pas d'influence directe sur les écosystèmes (p. ex. aquifère de Gäu). Mais même les petites nappes d'eau souterraine situées dans les régions préalpines peuvent présenter un important volume de stockage dynamique (GW-TREND [46]). En raison des gradients régionaux plus élevés, l'eau continue d'affluer vers les puits de pompage durant plusieurs mois, même lorsque les nappes d'eau souterraine sont peu alimentées.

(b) Répercussions sur la qualité des eaux souterraines

Les périodes de sécheresse peuvent avoir des répercussions variées sur la qualité des eaux souterraines (RIBACLIM [51], [54]). Pour

les systèmes qui dépendent avant tout de la recharge directe des eaux souterraines, la charge en polluants à courte durée de vie (p. ex. contaminations microbiennes) diminue, car les apports extérieurs sont bloqués. Mais les périodes de sécheresse peuvent également laisser des séquelles: l'évapotranspiration importante et le fait que les plantes absorbent moins de substances nutritives en période de sécheresse peuvent augmenter la concentration de la solution du sol. Lors des périodes humides consécutives aux périodes de sécheresse, la solution de sol concentré est lixivié en profondeur. Ainsi, durant les années humides qui ont suivi 2003, l'on a constaté une augmentation de la concentration en nitrates en maints endroits. Lors des périodes de sécheresse, des fissures peuvent également se former au niveau du sol. Celles-ci favorisent le transport de polluants. Cependant, les connaissances acquises à ce sujet ne sont pas suffisamment approfondies.

Dans les systèmes par infiltration des eaux fluviales, la qualité de l'eau souterraine dépend de l'évolution de la qualité de l'eau des cours

ENCADRÉ 5 | Les processus photochimiques entraînent-ils une autoépuration accrue des eaux de surface (RIBACLIM)?

Les antibiotiques sulfamidés sont largement utilisés dans la médecine vétérinaire et humaine. Ils peuvent avoir des effets indésirables sur les cours d'eau (p. ex. effets écotoxicologiques [59] ou développement de gènes résistants aux antibiotiques dans l'environnement [60], [61], [62]). Les STEP représentent la porte d'entrée principale de ces substances dans les eaux de surface. Cependant, ces substances rejoignent également les eaux de surface par le biais de déversements diffus effectués par l'agriculture ou la pisciculture.

Les antibiotiques sulfamidés sont photosensibles: sous l'influence de la lumière du jour, ils sont soumis à des réactions photochimiques qui entraînent leur dégradation. Le projet de recherche RIBACLIM a sélectionné deux de ces antibiotiques (la sulfadiazine et le sulfaméthoxazole) pour analyser leurs taux de dégradation photochimique dans l'eau dans des conditions semblables à leur environnement (RIBACLIM [58]).

Si l'on considère une rivière de la taille de la Thur et une qualité de l'eau équivalente, la sulfadiazine et le sulfaméthoxazole se décomposent de moitié en respectivement $\approx 3,5$ jours et ≈ 13 jours. La durée de demi-vie moyenne peut fortement diminuer en cas de beau temps estival et de faible débit. Les conditions climatiques hivernales peuvent au contraire inhiber l'autoépuration photochimique. Pour le triméthylphénol, un marqueur très bien étudié dans le cadre de la photochimie des eaux de surface [63], les durées de dégradation sont environ deux fois plus courtes que pour la sulfadiazine. Des études antérieures ont permis de découvrir des polluants, par exemple le très répandu triclosan [64], un biocide dont la dégradation photochimique est bien plus rapide que celle des composés précités (durée de demi-vie ≈ 30 min, [64]). Cependant, un grand nombre de polluants résistent à la dégradation photochimique. Parmi ceux-là, on peut nommer l'herbicide métolachlore et ses métabolites métolachlore-OXA et métolachlore-ESA [65]. L'autoépuration photochimique d'une eau de surface doit dès lors être considérée comme un processus très sélectif.

d'eau et du taux d'infiltration de l'eau fluviale (RIBACLIM [52]). Une dilution insuffisante des eaux épurées et/ou des eaux souterraines polluées exfiltrées peut dégrader la qualité de l'eau des cours d'eau durant les périodes de sécheresse (RIBACLIM [57]). Dans le même temps, des processus de dégradation photochimiques peuvent favoriser l'autoépuration des cours d'eau. Néanmoins, une détérioration de la qualité des eaux souterraines n'a pas pu être démontrée. (RIBACLIM [58]) (voir aussi l'encadré 5).

(c) Répercussions sur l'évacuation des eaux usées

Plus la part d'eaux usées dans les cours d'eau est importante, moins les polluants déversés avec les eaux épurées sont dilués. Il faut donc s'attendre à des concentrations plus élevées de polluants dans les cours d'eau recevant beaucoup d'eaux usées [8].

L'illustration 10 montre la dilution des eaux usées de 742 STEP (>500 équivalents-habitants) dans les cours d'eau en Suisse en 2011. L'illustration 10 de gauche indique que plus de 40% des STEP déversent leurs eaux épurées dans des cours d'eau, dans lesquels la part d'eaux usées est supérieure à 5% (rapport de dilution de 1:20 ou inférieur). En cas d'augmentation de la population et de baisse simultanée du débit des eaux (ou en cas de modification du régime de débit suite à l'augmentation des périodes de sécheresse), les exigences numériques de l'ordonnance sur la protection des eaux et les critères de qualité écotoxicologiques en aval des points de déversement des eaux usées risquent plus souvent de ne pas être respectées, en particulier dans les petits cours d'eau (cf. [66]). Cela peut donc nécessiter d'améliorer le taux d'élimination des polluants dans les STEP, de supprimer certaines stations ou de déverser les eaux usées dans des cours d'eau plus importants présentant un taux de dilution supérieur (cf. Mesures possibles, infrastructures-6).

Aujourd'hui déjà, dans le sillage de la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), les STEP qui déversent leurs eaux usées dans des cours d'eau présentant

un faible taux de dilution sont dotées d'un équipement supplémentaire pour l'élimination de micropolluants (cf. Mesures possibles, infrastructures-6).¹¹ Si des objectifs numériques devaient également être définis pour des composés-traces organiques, il faudrait prendre davantage en compte l'impact du changement climatique dans le cadre du renforcement de l'efficacité d'épuration des STEP. L'illustration 10 indique également que les rejets thermiques provenant des stations d'épuration peuvent être substantiels dans les cours d'eau, en particulier lorsque les eaux usées sont utilisées pour le refroidissement des bâtiments en été (cf. [8]). En cas d'augmentation de la température de l'eau et de diminution simultanée du débit des cours d'eau, il faut s'attendre à une baisse de la capacité des cours d'eau à retenir la chaleur [68]. Cette remarque s'applique particulièrement aux petits cours d'eau recevant beaucoup d'eaux usées (cf. Mesures possibles, infrastructures-6).

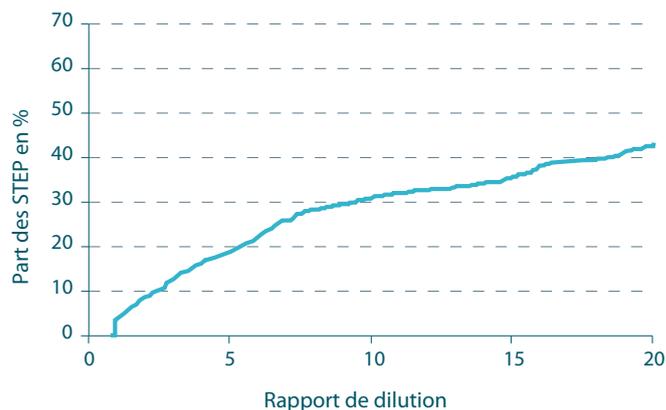
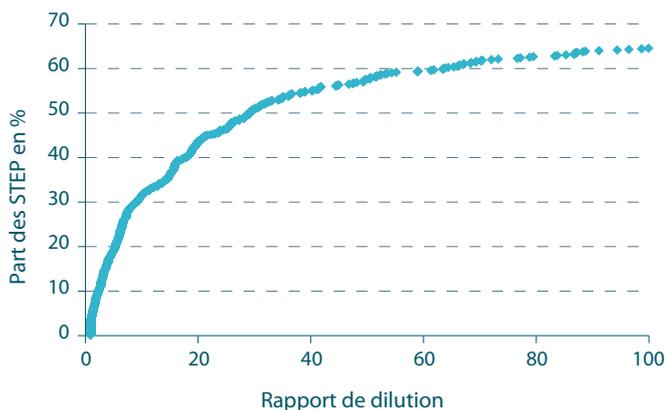
Hausse des températures

(a) Répercussions de l'augmentation des températures sur les eaux souterraines proches des cours d'eau

Les modèles climatiques prévoient une augmentation des températures de l'air durant les prochaines décennies. En été, dans les cours d'eau non alimentés par l'eau des glaciers ou après la fonte des glaciers, il faut s'attendre non seulement à une diminution des débits, mais également à une augmentation de la température de l'eau. Des données historiques montrent que la température des cours d'eau a augmenté à toutes les altitudes en Suisse durant les dernières décennies [69]. Cependant, l'augmentation n'a pas été continue, elle s'explique en grande partie par la hausse soudaine des températures à la fin des années 1980 en raison de la modification à grande échelle du régime climatique de l'hémisphère nord [69], [70].

La température des eaux souterraines proches des cours d'eau reflète, de manière atténuée et décalée dans le temps, les variations de températures du cours d'eau. Une augmentation de la température des cours d'eau peut

III. 10: part cumulative des 742 stations d'épuration avec plus de 500 EH en Suisse en 2011, qui déversent leurs eaux usées dans des cours d'eau, dans lesquels la part d'eaux usées est supérieure à 1% (rapport de dilution de 1:100 ou inférieur, illustration de gauche) ou bien à 5% (rapport de dilution de 1:20 ou inférieur, illustration de droite) [67].



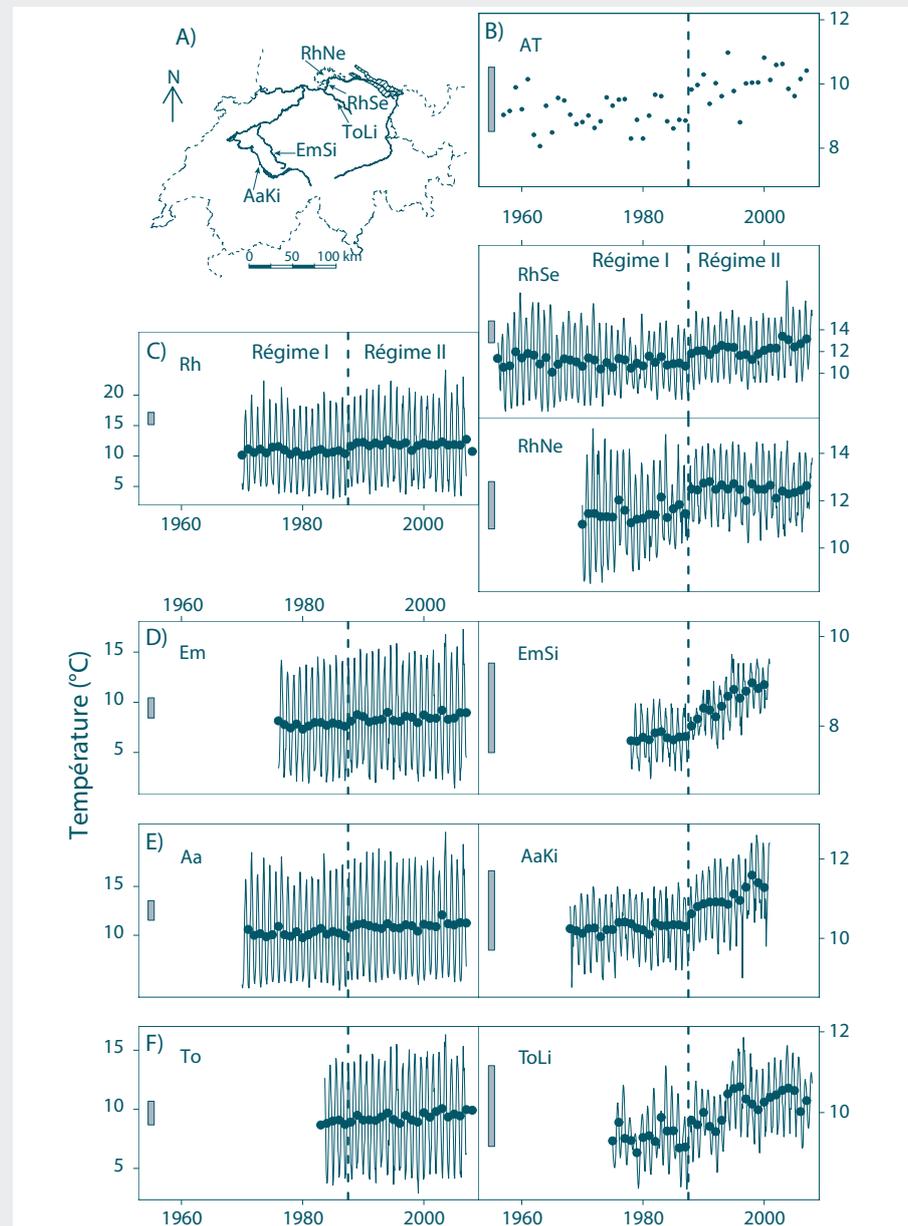
entraîner à son tour une augmentation de la température des eaux souterraines, ce qui peut affecter la qualité des eaux souterraines, en particulier en été (GW-TEMP [71]).

Le projet de recherche «Response of Swiss groundwaters to climatic forcing and climate change: analysis of the historical instrumental record» (PNR 61) a examiné si une hausse de la température des eaux souterraines pouvait déjà être décelée à partir des données relevées les décennies précédentes. Les résultats de ce projet laissent supposer que la température des

eaux souterraines d'aquifères alimentés par des fleuves subira de plein fouet les effets du changement climatique (GW-TEMP [72]). Dans ce type d'aquifères, qui assurent 25% de l'approvisionnement en eau potable de la Suisse, la température des eaux souterraines a augmenté, au cours des 30 à 50 dernières années, proportionnellement à la température de l'air dans les régions correspondantes. Des analyses détaillées de cinq aquifères du Plateau montrent une augmentation de la température de 0,5-0,7° C par décennie pour la période 1980-2000 (GW-

ENCADRÉ 6 | Peut-on déjà constater un changement de température dans les eaux souterraines?

La hausse des températures de l'air et des cours d'eau en Suisse a également entraîné une forte hausse de la température de l'eau des aquifères alimentés par des cours d'eau. Cependant, ce réchauffement n'a pas été continu, mais a été engendré par une forte et brusque hausse des températures à la fin des années 1980. L'accroissement de la température de l'air résulte d'une brusque modification du climat dans de nombreuses régions de l'hémisphère nord à la fin des années 1980; une modification due à une évolution de l'oscillation arctique. Les exemples montrent que, dans les aquifères alimentés par des cours d'eau, la température des eaux souterraines est largement influencée par les phénomènes climatiques à grande échelle.



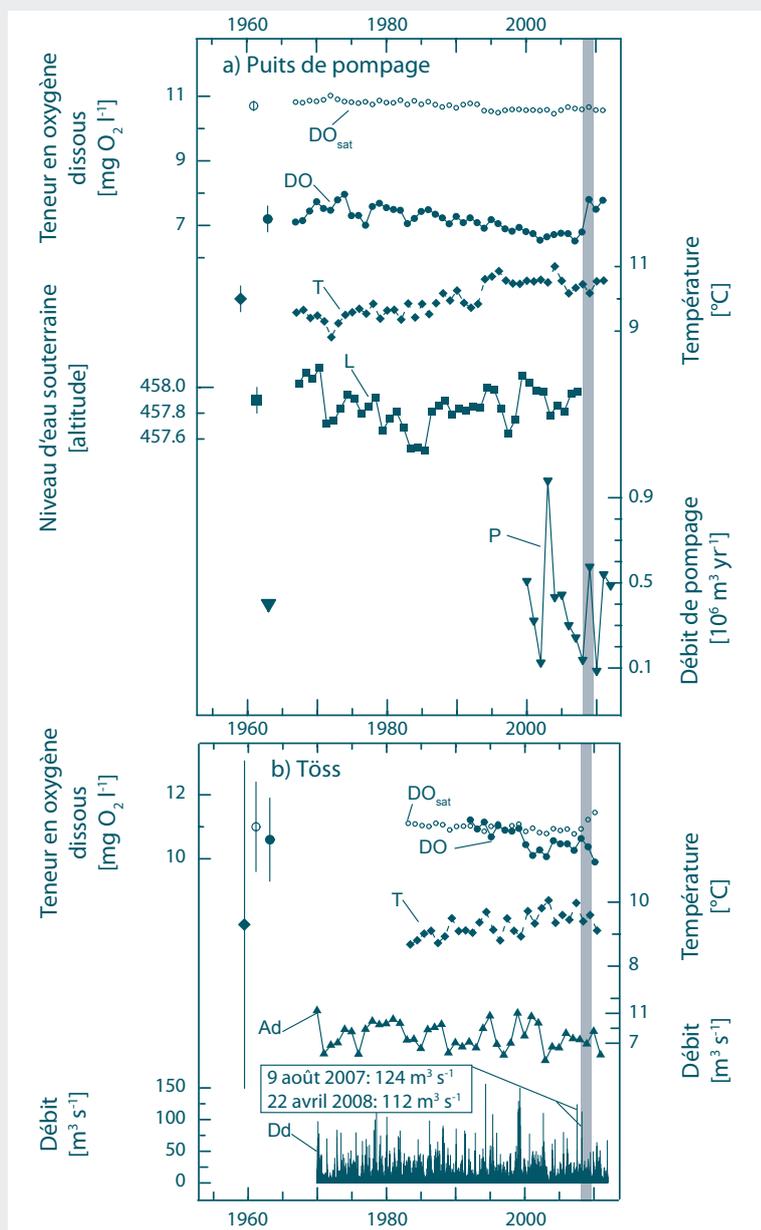
III. 11: (A) Carte des stations de mesure. (B) Moyennes annuelles de la température de l'air. (C-F) Moyennes mensuelle (lignes) et annuelle (points) des températures mesurées des eaux fluviales (à gauche) et des eaux souterraines (à droite). Le régime I (jusqu'à 1987 inclus) est séparé du régime II (après 1988) par une ligne verticale en pointillés. Afin de faciliter la comparaison des différentes séries de mesures, le rectangle gris sur le côté gauche de chaque schéma affiche une différence de température de 2° C (GW-TEMP [72]).

TEMP [72]) (cf. encadré 6). Cette augmentation de la température des aquifères est du même ordre que celle des cours d'eau et est à peine inférieure à la hausse des températures de l'air dans la région. Sur la même période, la température de l'air a progressé en moyenne de 0,7° C par décennie. L'analyse a aussi démontré que la hausse des températures n'avait pas été conti-

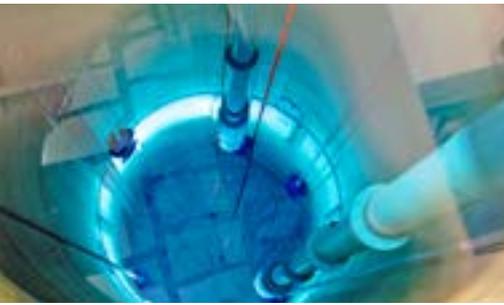
nue, mais qu'elle avait lieu par à-coups. C'est surtout à la fin des années 1980 que la température des eaux souterraines de tous les aquifères a enregistré une hausse soudaine et forte (GW-TEMP [72]). Cette hausse fait écho à l'augmentation subite des températures de l'air et des cours d'eau [69]. Une modification soudaine du climat dans de nombreuses régions de l'hémis-

ENCADRÉ 7 | Peut-on déjà constater une évolution de la concentration d'oxygène dans les eaux souterraines?

L'exemple d'une station de pompage des services d'approvisionnement en eau de Winterthur, station située sur la Töss dans le Linsental, illustre différents processus qui sont abordés dans le texte. L'illustration montre la hausse de la température des eaux de surface et des eaux souterraines par le passé, une hausse qui a provoqué une diminution constante de la concentration en oxygène. Grâce à l'augmentation du taux de pompage à la suite d'un test réalisé en 2009, les eaux fluviales riches en oxygènes se sont infiltrées plus rapidement et en plus grande quantité dans les eaux souterraines, ce qui a engendré une augmentation soudaine et importante de la concentration d'oxygène entre 2008 et 2009. Cependant, le taux de pompage élevé en 2003 n'a eu aucun impact sur la concentration en oxygène des eaux souterraines. Il semble que les eaux fluviales riches en oxygènes se soient infiltrées plus rapidement et en plus grande quantité dans les eaux souterraines uniquement parce que les fortes crues de 2007 et 2008 avaient préalablement permis un décolmatage du lit du fleuve.



III. 12: séries de données chronologiques comprenant différentes variables (a) d'une station de pompage rattachée aux services d'approvisionnement en eau de Winterthur, située sur la Töss dans le Linsental et (b) de la Töss. L'illustration présente les moyennes annuelles de la concentration en oxygène (DO), la température (T), la saturation en oxygène calculée à partir des températures (DO_{sat}), le niveau des eaux souterraines (L) et le taux de débit (Ad). L'illustration indique en outre le volume d'eau souterraine pompé annuellement (P) et le débit journalier moyen (Dd). Les symboles et lignes sur la partie gauche des illustrations représentent les valeurs moyennes et l'amplitude de variation des séries chronologiques. La surface grisée met en évidence la période 2008/2009, durant laquelle la concentration en oxygène a fortement augmenté (GW-TEMP [77]).



► Des mesures relevées au fil du temps démontrent que la température des eaux souterraines des aquifères irrigués par des rivières réagit fortement au changement climatique. Dans ce type d'aquifères, la température des eaux souterraines a augmenté au cours des dernières 30 à 50 années dans les mêmes proportions que la température de l'air dans la région concernée.

A gauche: photo Max Maurer; au milieu et à droite: GW-TEMP

phère nord [73] – elle-même en partie imputable à une modification de l'oscillation arctique [74] – en est vraisemblablement la cause. Dans le cadre du projet de suivi «Prediction of the impact of climate change on groundwater temperature and temperature-related groundwater quality indicators» (PNR 61), différents modèles statistiques ont été créés afin de prévoir, sur la base de la température de l'air relevée dans la région, les moyennes mensuelles des températures des eaux souterraines dans les aquifères concernés (GW-TEMP [75], [76]). Les résultats de cette modélisation montrent que, d'ici la fin de ce siècle, il faut s'attendre à un réchauffement des eaux souterraines par rapport à la période de contrôle 1980-2009. Selon les scénarios d'émissions (A1B, A2 et RCP3PD), la température des eaux souterraines des aquifères alimentés par des cours d'eau augmentera d'environ 2,5° C (scénario A2) ou de 1° C maximum (scénario RCP3PD) d'ici à 2099 (GW-TEMP [75], [76]). Si

les prévisions quant à l'évolution saisonnière de la température des eaux souterraines manquaient de précision, il en ressort cependant qu'il faut s'attendre à un réchauffement significatif durant les mois d'été et d'automne.

En ce qui concerne ces mêmes aquifères, des mesures historiques ont montré que la concentration en oxygène des eaux souterraines a enregistré, sur le long terme, un recul qui est inversement proportionnel au réchauffement (GW-TEMP [77]). Le recul de la concentration en oxygène s'explique par l'augmentation de l'activité microbienne dans la zone hyporhéique, elle-même occasionnée par la hausse de la température des eaux de surface et des eaux souterraines (GW-TEMP [77], RIBACLIM [54]).

Cela étant, la concentration en oxygène dans les eaux souterraines n'est pas seulement déterminée par l'activité microbienne dans la zone hyporhéique, mais également par des facteurs hydrologiques locaux (RIBACLIM

ENCADRÉ 8 | Faut-il installer des procédés de déferrisation et de démantanisation au niveau des captages d'eau potable?

Dans le cadre du projet de recherche «Riverbank filtration under climate change scenarios» du PNR 61, la dynamique des processus d'oxydoréduction lors de la filtration des berges et leur dépendance par rapport aux variables déterminées par le climat (température et débit) a été analysée à l'aide de recherches de terrain et d'expériences au moyen de colonnes (RIBACLIM [51, 57]). Les matières organiques particulaires (MOP) ont été identifiées comme les plus importants donneurs d'électrons pour la consommation d'oxygène dissous (DO) en période estivale. Il est apparu que la consommation de DO et la consommation estimée de MOP dépendaient fortement de la température. En cas de taux d'écoulement élevé, la consommation de DO était supérieure, sans doute en raison d'un apport supplémentaire de MOP dans le lit du cours d'eau (RIBACLIM [52]).

Dans la station de mesure située sur la Thur (Niederneunforn), le DO était le plus important accepteur d'électrons pour la dégradation de MOP (RIBACLIM [52]). En été, le DO était quasiment épuisé. Cependant, aucune dénitrification n'a été observée. De même, la majorité des aquifères suisses alimentés par des cours d'eau sont (sub)oxiques. Le nitrate tamponne le système d'oxydoréduction avant que des conditions de réduction de Mn(III/IV) et de Fe(III) ne s'établissent. Actuellement, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser ou d'installer des procédés de déferrisation et de démantanisation (RIBACLIM [52]). Lors de futures vagues de chaleur, une quantité plus importante de MOP pourrait cependant entraîner un épuisement complet de DO et de nitrate, ce qui libérerait du Mn(II) et du Fe(II). Comme l'origine, la qualité et la quantité de MOP et leur apport réel dans le lit du fleuve sont très difficiles à estimer, il est pour ainsi dire impossible de planifier et de mettre en œuvre des stratégies directes d'intervention (RIBACLIM [51]). C'est pourquoi les auteurs recommandent un monitoring à long terme des conditions d'oxydoréduction au niveau des systèmes de filtration des berges (oxygène, nitrates, carbone organique dissous), qui se caractérisent par des cours d'eau directement raccordés aux eaux souterraines ou par un bassin versant sans bassin de rétention. Un tel monitoring à long terme permettrait de prendre des mesures adéquates au bon moment en prenant en compte les conditions hydrogéologiques spécifiques locales (RIBACLIM [51]) (cf. Mesures possibles, connaissances-2).



[51], [52]). La concentration en oxygène des eaux souterraines peut en particulier s'améliorer sous l'effet conjugué de plusieurs facteurs, notamment des épisodes de crues qui entraînent un décolmatage du lit du fleuve, des prélèvements d'eau importants et une augmentation du débit à long terme (voir aussi l'encadré 7). En admettant que des crues surviennent régulièrement, la diminution à long terme de la concentration d'oxygène dans les eaux souterraines est sans cesse entrecoupée par des augmentations à court terme. Celles-ci contrebalancent la tendance à la baisse observée sur le long terme, si bien qu'il ne faut pas s'attendre à une hypoxie prolongée (GW-TEMP [71], [77]).

Le projet de recherche «Riverbank filtration under climate change scenarios» du PNR 61 a analysé les répercussions possibles du changement climatique (augmentation des températures et diminution des débits) sur la qualité des eaux souterraines proches de cours d'eau (RIBACLIM: [50], [52-54]) (cf. encadré 8). Une diminution des débits en été peut réduire la dilution des eaux usées épurées et, partant, augmenter la concentration de polluants dans les puits de pompage (cf. Répercussions sur l'évacuation des eaux usées). L'augmentation conjuguée de la température de l'eau et des concentrations en carbone organique peut accroître la consommation en oxygène dans les cours d'eau et les sédiments fluviaux. Il en résulte un manque d'oxygène qui peut, d'une part, ralentir la dégradation des polluants et, d'autre part, favoriser la dissolution de minéraux de fer et de manganèse, deux effets indésirables pour l'approvisionnement en eau.

Dans le cadre du projet de recherche PNR 61, les recherches de terrain (axées sur les captages d'eau le long de la Thur) et les expériences menées au moyen de colonnes ont mis en évidence que les principaux facteurs d'influence pour la consommation d'oxygène étaient la température et la matière organique particulaire (RIBACLIM [52], [54], [57]). Les expériences menées au moyen de colonnes ont permis de démontrer que la matière organique dissoute jouait un rôle secondaire dans le processus de consommation d'oxygène (RIBACLIM [57]). De plus, l'augmentation du débit jusqu'à un certain seuil (env. 50 m³/s) peut quadrupler les taux de consommation d'oxygène (RIBACLIM [54]), un phénomène probablement dû à un apport accru de

matière organique particulaire dans le lit de la rivière (RIBACLIM [52-54]). Dans des conditions extrêmes (étiage et températures élevées, crue et températures élevées), une station de mesure située à proximité de la rivière a relevé une consommation intégrale de l'oxygène. La concentration de nitrates mesurée simultanément n'avait quant à elle guère évolué. Dans la zone d'infiltration, le nitrate a donc atténué la réaction d'oxydoréduction, empêchant par là même que des conditions réduisant le manganèse ou l'oxyde de fer ne se mettent en place (RIBACLIM [52]). Ces conclusions ont été confirmées par les expériences réalisées au moyen de colonnes (RIBACLIM [57]): des températures élevées ont entraîné la formation de nitrite et d'ammonium (dénitrification partielle). Lorsque le nitrate et son effet tampon sur l'oxydoréduction ont été écartés, cela libère surtout du manganèse dissout provenant de manganoxyde naturel. Bien que les recherches de terrain n'aient révélé qu'une évolution mineure de la concentration de nitrate, l'on ne peut cependant pas exclure la formation de nitrites en petite quantité. En raison de leur toxicité élevée, les nitrites représentent un problème pour la qualité de l'eau (RIBACLIM [54], [57]).

(b) Répercussions de l'augmentation des températures sur les eaux souterraines éloignées des cours d'eau

Généralement, la température des eaux souterraines qui sont enrichies par les infiltrations des eaux pluviales varie peu (<3° C) autour de la température moyenne de surface. Par conséquent, on s'attend à ce que la température des eaux souterraines augmente lentement avec le réchauffement climatique. Contrairement aux eaux souterraines proches des cours d'eau, il n'existe en Suisse que peu de séries de données chronologiques pour ce type d'eaux souterraines. Cependant, les données disponibles et les études menées à l'échelle internationale (p. ex. [78], [79]) montrent que les eaux souterraines éloignées des cours d'eau continueront de se réchauffer de manière atténuée et décalée dans le temps.

Entre 1989 et 2012, une hausse de la température d'environ 0,5° C a pu être constatée dans les systèmes karstiques [80], [81]. L'analyse de la température de la Milandrine, une rivière souterraine du canton du Jura, a montré que les variations annuelles de la tem-

► A l'heure actuelle, il n'est pas nécessaire de procéder à la mise en place de procédures de déferrisation et de démantanisation dans les captages d'eau potable.

A gauche: RIBACLIM; au milieu: photo Andreas Scholtis, Office de l'environnement du canton de Thurgovie, GW-TREND; à droite: photo Max Maurer

pérature de l'air ne se répercutent pas sur la température de l'eau de la rivière (ill. 13). Le système karstique atténue et décale dans le temps ces variations annuelles. Toutefois, la température moyenne de l'eau évolue parallèlement à la température moyenne de l'air. On peut observer des tendances semblables dans d'autres sources karstiques [80]. A l'image des eaux souterraines (voir aussi l'encadré 7), la concentration en oxygène a légèrement diminué dans les eaux karstiques. Cependant, il ne s'agit pas d'une baisse critique.

En outre, une augmentation significative des concentrations de calcium et de carbonate (Ca^{2+} et HCO_3^-) ainsi que de la conductibilité électrique a pu être observée dans les systèmes karstiques. Cette hausse est très probablement dû à la hausse observée des températures annuelles moyennes qui augmentent et prolongent l'activité biologique des sols. Une diminution des concentrations de chlorure et de sulfate (Cl^- et SO_4^{2-}) a également pu être observée. Cependant, aucun lien de cause à effet avec le changement climatique n'a pu être établi avec précision.

(c) Répercussions de l'augmentation des températures sur les cours d'eau

La hausse des températures de l'eau peut constituer un facteur de stress pour les organismes aquatiques: une augmentation de la température de l'eau entraîne une diminution de la concentration en oxygène, deux facteurs qui peuvent renforcer les effets écotoxicologiques [85], [82] et provoquer un dépassement des températures tolérées par certaines espèces aquatiques [83], [84]. Ainsi, la hausse de la température de l'eau peut également

affecter le milieu naturel, contraignant, par exemple, les truites de rivière à migrer vers des zones situées plus en altitude. De plus, il existe pour les truites une plus forte probabilité de maladie rénale proliférative («proliferative kidney disease», PKD) [69]. Si des obstacles entravent leur déplacement ou s'il n'y a pas de cours d'eau supérieurs plus froids dans le bassin versant, la hausse de la température de l'eau peut entraîner une réduction de l'habitat des truites de rivière.

Cependant, les températures de l'eau ne sont pas uniquement influencées par le rayonnement solaire, mais également par le volume de débit [85], [86]. Lorsque des épisodes d'étiage et de canicule surviennent en même temps, cela peut engendrer des répercussions particulièrement négatives pour les écosystèmes [84]. Dans le cadre des projets de recherche IWAQA et AGWAM (PNR 61), les températures de l'eau des cours d'eau ont été modélisées en tenant compte de différents scénarios de changement climatiques et de gestion du bassin versant de la Broye (AGWAM, IWAQA [87], IWAQA [88]). Les résultats de la modélisation réalisée sur la base d'une simulation des variables climatiques pour une période de contrôle (1981-2010) et une période de référence (2036-2065) sont représentés pour quatre sites sur l'illustration 14.

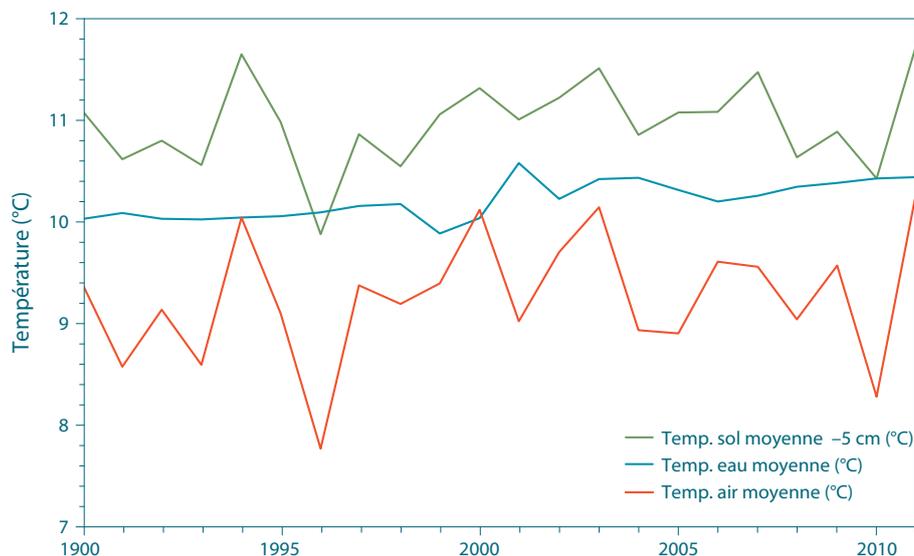
Les résultats de l'étude montrent une augmentation des valeurs moyennes journalières de la température de l'eau sur toute l'année pour les quatre sites. Cette augmentation va de pair avec la hausse de la température de l'air qui est particulièrement prononcée en été lors de faibles précipitations (en moyenne $4,5^\circ\text{C}$ entre juin et août). En été, la température

ENCADRÉ 9 | Le boisement des rives peut-il efficacement contrecarrer la hausse des températures de l'eau (AGWAM)?

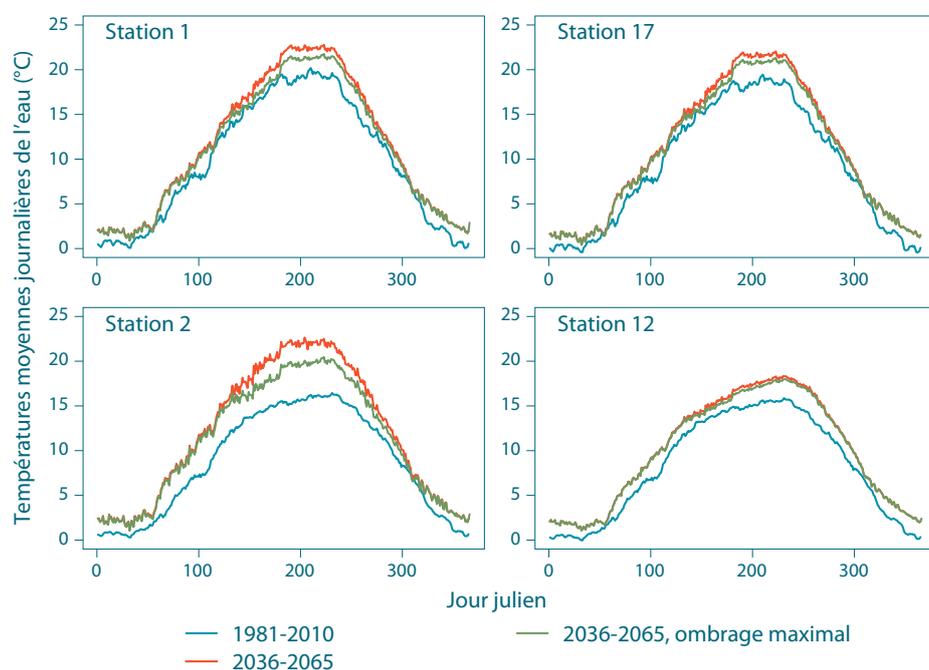
Le projet de recherche «Water demand in Swiss agriculture and sustainable adaptive options for land and water management to mitigate impacts of climate change» du PNR 61 a modélisé les répercussions de différentes mesures sur la température de l'eau des cours d'eau. L'une de ces mesures est l'ombrage des cours d'eau (AGWAM, IWAQA [87]). On a considéré qu'une augmentation de la végétation des rives permettrait de porter à environ 50% la part d'ombre pour une rivière aussi large que la Broye (environ 12 m).

Les résultats de la modélisation montrent que l'ombrage des cours d'eau atténuerait nettement la hausse des températures engendrée par le changement climatique. Selon les prévisions, un reboisement des rives permettrait de réduire, en juillet et en août, l'augmentation de la température de l'eau de 2°C à l'embouchure de la Broye et de $2,6^\circ\text{C}$ au niveau d'un affluent majeur en plaine. En revanche, les températures de l'eau des sites plus en altitude seraient moins influencées par un reboisement des rives, car ils sont déjà largement ombragés aujourd'hui. La hausse des températures ne pourra toutefois pas être totalement compensée par le boisement des rives (AGWAM, IWAQA [87]).

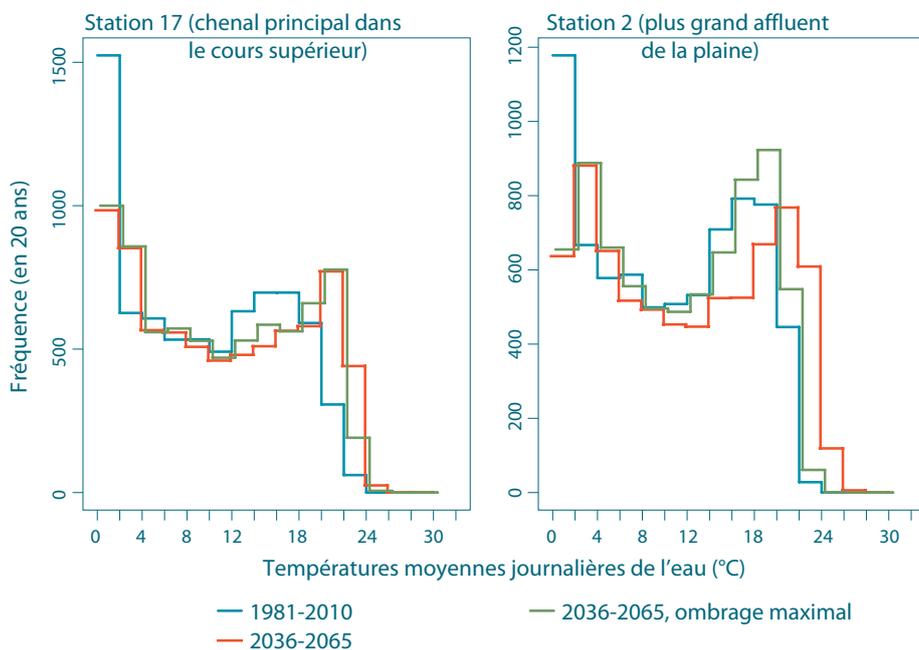
Les résultats montrent également que le boisement des rives est aussi très efficace pour atténuer les températures maximales (cf. ill. 15). Toutefois, le reboisement des rives ne constitue pas une mesure suffisante pour compenser totalement l'impact du changement climatique. Dans les petits cours d'eau de faible largeur en particulier, le boisement des rives diminue certes les températures maximales, mais réduit également la croissance des plantes aquatiques [92] et augmente l'apport de matière organique, laquelle constitue une importante source de nourriture pour les invertébrés. Dans les plus grands cours d'eau, des mesures réduisant d'autres facteurs de stress peuvent contribuer à atténuer les répercussions du changement climatique sur les organismes et écosystèmes aquatiques. L'amélioration de l'hydromorphologie en fait partie [93], [94].



III. 13: température annuelle moyenne de la Milandrine, une rivière souterraine du canton du Jura. La température de l'eau augmente parallèlement à la température de l'air, et se situe entre les températures de l'air et du sol (-5 cm). Les variations météorologiques annuelles sont atténuées et décalées dans le temps [80].



III. 14: températures moyennes journalières de l'eau (déterminées sur une période de simulation de 20 ans) à certains emplacements du bassin versant de la Broye. Station 1: embouchure; station 2: plus grand affluent de la plaine; station 12: affluent moyen; station 17: chenal principal du cours supérieur. Ligne bleue: climat actuel simulé pour la période de contrôle (1981-2010); ligne rouge: climat futur simulé pour la période de référence (2036-2065); ligne verte: climat futur simulé pour la période de référence (2036-2065) avec davantage d'ombrage (AGWAM, IWAQA [87]).



III. 15: répartition de la fréquence des températures de l'eau simulées sur une période de 20 ans (intervalles de 2° C) pour des scénarios sélectionnés et pour deux emplacements du bassin versant de la Broye. Station 17: chenal principal dans le cours supérieur; station 2: plus grand affluent de la plaine; ligne bleue: climat actuel simulé pour la période de contrôle (1981-2010); ligne rouge: climat futur simulé pour la période de référence (2036-2065); ligne verte: climat futur simulé pour la période de référence (2036-2065) avec davantage d'ombrage (AGWAM, IWAQA [87]).

moyenne de l'eau des sites est dès lors de 23°C (AGWAM, IWAQA [87]).

Les résultats confirment les prévisions antérieures d'une hausse des températures de l'eau à l'échelle mondiale: sous l'effet de la hausse du rayonnement, les hausses de température les plus importantes sont attendues au niveau des cours d'eau avec un régime de débit présentant un caractère saisonnier. Pendant les étages, ceux-ci présentent les températures de l'eau les plus élevées [84]. Ainsi, selon les prévisions, les valeurs moyennes annuelles du Rhin devraient augmenter de l'ordre de 1,9°C, voire de 2,8°C pour le 95^e percentile des températures les plus élevées [84]. Les prévisions correspondantes pour la Broye, un affluent du Rhin avec un débit saisonnier, s'élèvent respectivement à 1,9°C et 2,7°C (AGWAM, IWAQA [87]) (cf. encadré 9).

L'illustration 15 représente la répartition de la fréquence des températures de l'eau simulées sur une période de 20 ans pour la période de contrôle (1981-2010) et la période de référence (2036-2065) à deux emplacements situés dans le bassin versant de la Broye. À la lumière des scénarios climatiques futurs, l'analyse de la répartition de la fréquence montre que les températures plus élevées devraient être plus fréquentes et que les températures maximales pourraient dépasser 26°C.

Afin de prévoir les répercussions de la hausse des températures de l'eau sur la composition des espèces d'invertébrés, le modèle «Streambugs» été développé dans le cadre du projet de recherche «Integrated Management of River Water Quality» du PNR 61 (IWAQA [89]). Ce modèle prend en compte les plages de tolérance en matière de températures de l'eau. Les résultats de la modélisation pour le bassin versant de la Glatt indiquent que l'influence de la température sur la composition des espèces est faible dans le cadre des change-

ments de température prévus pour la période de référence (2036-2065) (IWAQA [88]), [90]). Ce résultat demeure toutefois très incertain, car pour l'instant, les informations disponibles concernant les plages de température tolérées par les invertébrés sont très approximatives et insuffisantes [91].

(d) Répercussions de l'augmentation des températures sur les lacs

Le régime thermique d'un lac est principalement déterminé par seulement quatre valeurs météorologiques: la température de l'air, le degré de couverture nuageuse, l'humidité relative et la force du vent. En raison de la forte influence de la température de l'air sur le régime thermique des lacs, l'augmentation de la température de l'air, observée actuellement à l'échelle mondiale et appelée à se poursuivre à long terme, s'accompagne d'une augmentation des températures des lacs sur le long terme [95]. En Suisse, la hausse des températures de l'eau sur le long terme a d'ores et déjà été observée au niveau de plusieurs lacs: ainsi, la température moyenne du lac de Zurich, qui approvisionne la ville de Zurich et certaines zones de l'agglomération zurichoise en eau potable, a augmenté en moyenne d'environ 0,016°C par décennie entre les années 1950 et 1990 [96]. La température a subi une plus forte hausse dans la partie supérieure de la colonne d'eau que dans la partie inférieure, si bien que la stabilité thermique du lac a nettement augmenté depuis les années 1950. Conséquence: depuis les années 1950, la période de stratification estivale du lac de Zurich s'est prolongée d'environ 2 ou 3 semaines et la période d'homothermie en hiver s'est réduite d'environ autant [96]. La circulation printanière des eaux s'en trouve en partie réduite, ce qui nuit à l'approvisionnement en oxygène des eaux profondes [97], [98], [99].

ENCADRÉ 10 | La prolifération massive d'algues bleues (cyanobactéries) altère-t-elle l'approvisionnement en eau provenant des lacs?

La prolifération massive d'algues bleues pose un problème pour l'approvisionnement en eau dans la mesure où elle pourrait entraîner la présence de cyanotoxines ou de substances sapides ou odorantes dans l'eau prélevée par les installations de captage de l'eau des lacs. Ces substances peuvent être, selon la phase de croissance des cyanobactéries, intracellulaires ou extracellulaires [106], [107]. Si la fraction intracellulaire est majoritaire, il faut séparer les cellules intactes et éviter si possible un endommagement des cellules pour empêcher la libération de toxines intracellulaires ou de substances sapides ou odorantes, p. ex. par le biais de procédés oxydants [107]. Si la fraction extracellulaire est majoritaire, les cyanotoxines et les substances sapides et odorantes peuvent être éliminées grâce à des procédés oxydants. L'efficacité du procédé dépend alors de la réactivité des substances par rapport aux oxydants chimiques sélectionnés [108], [109]. L'ozone et les procédés d'oxydation avancée se basant sur l'ozone peuvent être largement utilisés pour ces substances. Il est également possible d'éliminer les cyanotoxines et les substances sapides et odorantes à l'aide de charbons actifs [110].

En Suisse, l'approvisionnement en eau provenant des lacs s'appuie sur un système multibarrières utilisant des procédés se basant sur l'ozone (ozonation, ozone/peroxyde d'hydrogène) et des procédés absorbants basés sur les charbons actifs (filtration au charbon actif, charbon actif en poudre) ainsi que la séparation des particules (membranes, filtration rapide et lente par le sable). L'association de ces différents procédés permet généralement d'éliminer les cyanotoxines et les substances sapides et odorantes. Il faut cependant procéder à une légère optimisation dans certains cas.

En 2003, l'Europe centrale a connu l'été le plus chaud depuis le début des mesures météorologiques régulières, il y a environ 150 ans. En Suisse, la température moyenne de l'air mesurée cette année-là dépassait de plus de 5° C la valeur moyenne à long terme [100]. Pour le lac de Zurich, la canicule de l'été 2003 s'est traduite par une stabilité thermique anormalement élevée et par une concentration d'oxygène anormalement basse dans les eaux profondes [101]. Selon les prévisions, durant la période 2071-2100, un été sur deux sera au moins aussi chaud que l'été 2003 [100]. Si l'on considère également les répercussions dues à des hivers plus doux, [99] les données historiques augurent que les concentrations d'oxygène des eaux profondes du lac de Zurich seront à l'avenir globalement inférieures à celles d'aujourd'hui. Cette affirmation est corroborée par des modélisations [102]: selon les prévisions, une nouvelle hausse de la température de l'air engendrera une hausse de la température de l'eau dans toutes les couches du lac de Zurich. Les couches supérieures se réchauffant davantage que les couches inférieures, les échanges surface-fond diminueront en fréquence et en intensité, ce qui devrait provoquer une détérioration de l'approvisionnement en oxygène des eaux profondes. En hiver cependant, la situation dépendra fortement de l'évolution future de l'oscillation nord-atlantique qui exerce une influence importante sur le climat et, partant, sur les lacs d'Europe centrale [103], [104].

En plus de la diminution de l'approvisionnement en oxygène des eaux profondes, l'augmentation de la température des eaux de surface favorise la prolifération massive d'algues bleues (cyanobactéries) qui peuvent produire des substances toxiques (cyanotoxines) ou des substances sapides ou odorantes. La présence accrue d'algues bleues après des hivers anormalement doux a déjà pu être observée dans plusieurs lacs européens, notamment dans les lacs de Zurich, de Constance et de Walenstadt [105] (cf. encadré 10).

Augmentation des fortes précipitations et des crues

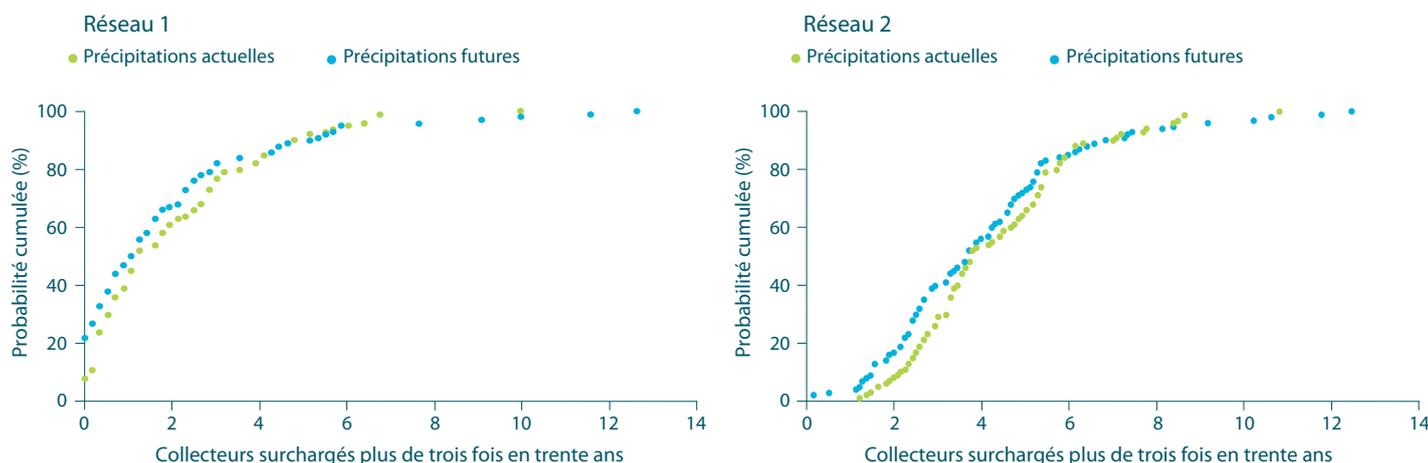
(a) Répercussions sur l'assainissement urbain

Deux types de précipitations sont déterminants pour l'assainissement urbain: de fortes précipitations de courte durée (quelques minutes) et de forte intensité (40-100 mm par heure) et de fortes précipitations de longue durée (plusieurs heures jusqu'à plusieurs jours) et de faible intensité (100-400 mm par jour). Les premières dépassent la capacité d'évacuation des canalisations, tandis que les secondes augmentent la quantité d'eaux usées non épurées qui sont déversées dans les cours d'eau. Différents modèles climatiques prévoient une augmentation des fortes précipitations [111]. Cette augmentation aura des répercussions négatives sur les performances des systèmes d'évacuation des eaux usées [112].

Le projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 a analysé les répercussions du changement climatique sur les performances hydrauliques de certains systèmes d'évacuation des eaux usées en Suisse (SWIP [113]). Le projet a en particulier analysé les cas de surcharge des systèmes d'évacuation des eaux, c'est-à-dire le refoulement causé par de fortes précipitations de courte durée et de grande intensité. Pour ce faire, les modifications des caractéristiques des précipitations prévues sur la base des modèles climatiques à l'échelle régionale et internationale ont été reportées sur les échelles spatiales et temporelles déterminantes pour l'assainissement urbain (SWIP [113]). Cette démarche a été réalisée sur la base de différents modèles climatiques à l'aide du procédé de réduction d'échelle statistique. La quantification des incertitudes a fait l'objet d'un soin particulier. Elle s'est basée sur (a) la variabilité naturelle du climat [114], (b) les différents modèles climatiques à l'échelle régionale et internationale [114] et (c) l'incertitude des différents procédés de réduction d'échelle.

Les résultats de l'analyse de la surcharge de deux systèmes d'évacuation des eaux en uti-

III. 16: part cumulative de regards pour lesquels le critère de mesure d'un maximum de trois surcharges (refoulement au-dessus du couvercle du regard) n'a pas été respecté sur la période simulée de 30 ans. Les résultats représentés concernent deux systèmes d'évacuation des eaux usées dans l'état actuel (illustration de gauche) et aménagé (illustration de droite) en utilisant (i) 100 séries de pluies simulées sur 30 ans pour une période de contrôle (1981-2010) (vert) et (ii) 100 séries de pluies simulées sur 30 ans pour une période de référence (2036-2065) (bleu). Ces dernières se basent sur les résultats des 10 chaînes de modélisation ENSEMBLES (SWIP [115]).





► Avec le changement climatique, les fortes précipitations auront tendance à augmenter. Cette augmentation exercera une influence directe sur le nombre de déversements d'eaux mixtes, donc sur la présence de substances nocives dans les cours d'eaux.

A gauche: photo Philippe Gyarmati; au milieu: photo Max Maurer; à droite: GW-TEMP

lisant trois séries de pluies différentes [mesurées et simulées pour une période de contrôle (1981-2010) et simulées pour une période de référence (2036-2065)] sont représentés à l'illustration 16. Les résultats sont valables pour la région étudiée «Mönchaltorf Aa» dans le canton de Zurich. Les premiers résultats d'un autre projet indiquent que ce résultat peut être extrapolé à l'échelle de la Suisse. Pour la région étudiée, les résultats montrent que

- le signal climatique en lui-même est négligeable par rapport à la variabilité naturelle du climat et à l'incertitude des modèles (SWIP [113]).
- les prévisions relatives à la performance des systèmes d'évacuation sont empreintes de grandes incertitudes. Ces dernières sont avant tout dues à la variabilité naturelle du climat et, dans une moindre mesure, à l'incertitude des modèles climatiques à l'échelle régionale et internationale ou à l'incertitude des différents procédés de réduction d'échelle (SWIP [113]).
- le dimensionnement des systèmes d'évacuation des eaux ne doit pas être adapté en fonction du changement climatique à moyen terme (d'ici à 2050)(SWIP [115]).

Les résultats indiquent que la variabilité naturelle du climat est importante même dans des conditions climatiques stables et qu'elle se reflète dans les prévisions relatives à la performance hydraulique des systèmes d'évacuation des eaux. A l'avenir, les performances de systèmes d'évacuation seront davantage déterminées par la variabilité du climat que par le changement climatique.

L'importance de la variabilité climatique naturelle souligne la nécessité démontrée dans les références [112] et [114] de passer de la méthode de dimensionnement actuelle, basée sur différentes séries de pluies, à une méthode fondée sur des séries de pluies stochastiques. L'utilisation de séries de pluies stochastiques pour le dimensionnement des systèmes urbains d'évacuation des eaux augmente cependant les travaux de simulation et de calcul (SWIP [113]). Les résultats du projet de recherche du PNR 61 constituent une excellente référence pour formuler, sur la base d'analyses supplémentaires, des recommandations spécifiques en matière de dimensionnement des systèmes d'évacuation des eaux.

L'impact du changement climatique sur le déversement des eaux pluviales et résiduaire dans les cours d'eau (via des systèmes d'assainissement unitaires) a été analysé dans le cadre du projet de recherche «Gestion intégrée de la qualité de l'eau de rivière» du PNR 61. Il faut partir du principe que l'augmentation des fortes précipitations s'accompagnera d'un déversement accru des eaux usées non épurées – dont la température sera plus élevée – dans les eaux de surface (IWAQA [88]). Il en résulte non seulement une brusque hausse des températures et des polluants (charge polluante), mais également une hausse soudaine de la quantité d'eau dans les cours d'eau (charge hydraulique). Il faut dès lors s'attendre, en particulier pour les petits cours d'eau, à une augmentation du charriage, qui peut nuire aux systèmes écologiques des cours d'eau, (cf. p. 41).

(b) Répercussions sur les eaux souterraines

Les fortes précipitations peuvent également influencer la qualité et le renouvellement des eaux souterraines [21]. La majorité des nappes d'eau souterraine exploitées pour l'approvisionnement en eau en Suisse étant proches de la surface, de fortes précipitations qui entraînent la migration des polluants de la surface vers l'aquifère peuvent rapidement altérer la qualité de l'eau souterraine. Les captages d'eau souterraine situés à proximité des cours d'eau sont les plus concernés. En raison des gradients hydrauliques élevés lors des crues et de la rupture de couches de colmatage, les eaux fluviales polluées peuvent arriver plus rapidement dans les captages d'eau souterraine. Ce phénomène peut entraîner une pollution microbienne de l'eau souterraine captée. Des précipitations de longue durée peuvent également entraîner un lessivage des polluants provenant du sol qui sont transportés dans l'eau souterraine par le biais de voies d'écoulement préférentielles.

La pollution des eaux sous l'effet de fortes précipitations est un problème récurrent dans les sources karstiques. Cependant, les fortes précipitations n'entraînent pas forcément une dégradation de la qualité des eaux souterraines. La quantité importante d'eau infiltrée peut également contribuer à la dilution de l'eau polluée [116]. Les polluants peuvent non seulement migrer de la surface vers les eaux souterraines, mais également être mobi-



lisés sous l'effet d'une augmentation rapide du niveau de l'eau. Cela peut par exemple être le cas dans les sites contaminés présentant une zone polluée insaturée ou au niveau de réservoirs endommagés installés dans le sous-sol. Les fortes précipitations peuvent compromettre la qualité des eaux souterraines, mais les risques peuvent également provenir des eaux souterraines elles-mêmes [21]. Dans les zones basses des vallées fluviales, l'eau souterraine peut s'infiltrer dans les caves des immeubles ou même atteindre la surface. Ainsi, les zones basses qui ne sont pas directement concernées par le débordement des eaux de surface peuvent également être inondées.

Dans les zones karstiques, les fortes précipitations entraînent une augmentation rapide du niveau des eaux souterraines et des débits des sources. Si le niveau des eaux souterraines augmente plus que la normale, cela entraîne (a) l'inondation des vallées sèches, (b) l'activation de nouvelles sources de déversement inconnues et (c) des tassements et des glissements de terrain. En maints endroits, le potentiel de dégâts de ces trois aspects est très important.

En ce qui concerne le débit des sources, le projet de recherche «Towards a sustainable management of karst water in Switzerland» du PNR 61 a démontré que de fortes précipitations pouvaient activer des seuils souterrains naturels créant des échanges importants entre différents systèmes karstiques. Ceci revient à modifier (agrandir ou réduire) soudainement le bassin d'alimentation d'une source karstique et de la rivière qui en découle (SWISS-KARST [117], [118]). L'estimation des débits de hautes eaux pour la planification des mesures de protection contre les crues dans les régions karstiques nécessite donc la prise en considération de ces seuils (cf. Mesures possibles, connaissances-5).

Viellissement des infrastructures

Les canalisations et les égouts ont une durée de vie très longue, mais limitée. En plus des processus biochimiques et physiques, ce sont surtout des influences extérieures comme les affaissements, les charges mécaniques, etc., qui entraînent une détérioration de leur état avec le temps (SWIP [119]). Cela peut augmenter leur taux de dysfonctionnement (SWIP [22]). En cas de dommages tels que fissures ou rupture des égouts publics ou privés, l'hygiène de l'assainissement ne peut plus être garantie. De l'eau souterraine peut s'infiltrer dans les canalisations et réduire leur capacité. En cas de pluie, on risque d'observer une augmentation des refoulements et des déversements d'eaux pluviales et résiduaires dans les cours d'eau et, partant, une augmentation des charges polluante et hydraulique dans ces derniers. Dans le même temps, l'infiltration d'eau souterraine et la dilution consécutive des concentrations de polluants réduisent la capacité d'assainissement des STEP [8]. Inversement, l'exfiltration des eaux usées dans les sols non saturés peut provoquer une pollution des eaux souterraines [8], [120]. Si, contrairement aux dispositions légales, des conduites d'eau usée se trouvent en zone 2 de protection des eaux souterraines, des pertes par infiltration peuvent polluer l'eau potable, comme le cas de La Neuveville l'a montré [121].

En cas de dommages tels que fissures ou ruptures de canalisations publiques ou privées d'eau potable, les pertes d'eau provenant du réseau de distribution augmentent. Les bosses de rouille, éclatements ou fuites augmentent également le risque d'une prolifération des bactéries dans le réseau d'eau potable. En cas de dépression, notamment à la suite d'ondes de pression, des polluants peuvent pénétrer le réseau de canalisations et compromettre la qualité de l'eau potable.

Afin de planifier l'assainissement d'infrastructures vieillissantes sur le long terme et de pouvoir estimer le besoin de rénovation des réseaux d'eau potable et d'égouts, il faut dis-

► Les conduites d'eau et canalisations d'eaux usées ont une durée de vie très longue, mais limitée dans le temps. Des modèles génériques, développés dans le cadre du projet SWIP, permettent d'établir des prévisions sur le devenir des infrastructures même en l'absence de données complètes.

A gauche et au milieu: SWIP; à droite: photo Max Maurer

«Dans le cadre de la planification financière des communes, il importe tout particulièrement de connaître l'état des canalisations et la probabilité avec laquelle les infrastructures devront être renouvelées aux cours des années à venir. Dans ce cadre, le modèle de dégradation SWIP démontre toute son utilité. Il me permet de proposer un conseil fiable en toute simplicité.»

Alex Benz
Hunziker Betatech



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

ENCADRÉ 11 | Pertes d'eau dans les régions karstiques

Les pertes d'eau du réseau de distribution représentent un risque, en particulier dans les régions karstiques: élargissement et érosion des voies d'écoulement jusqu'aux cavités karstiques et affaissement de la couverture du sol. De nombreux affaissements de ce type, souvent liés à un point d'infiltration, ont été documentés (cf. [122]).



► Des scénarios d'avenir ont été élaborés dans le cadre de la procédure participative du projet SWIP afin de faciliter la prise en compte, au cours du processus de planification, des incertitudes liées aux développements socio-économiques. Des entretiens ont permis de définir des objectifs relatifs à la mise en place d'infrastructures hydrauliques durables.

A gauche et au milieu: photos Max Maurer;
à droite: SWIP

poser de prévisions fiables sur l'état futur des infrastructures (SWIP [123], [124]). Différents modèles de prévisions existent. Cependant, le calibrage de ces modèles reste souvent impossible sur la base des données disponibles en Suisse (informations limitées, pas d'historique des données) (SWIP [123], [124]). C'est particulièrement le cas de nombreuses communes de petite taille. La plupart du temps, il n'existe pour celles-ci pas de données ou uniquement des données couvrant de courtes périodes (SWIP [125]). De plus, des données ont été supprimées ou remplacées lors de rénovations (SWIP [125]); c'est-à-dire qu'il n'existe plus que des données sur les canalisations encore utilisées, mais aucune concernant les canalisations remplacées par le passé (SWIP [124], [126]).

Afin de relever ce défi, des modèles génériques permettant d'estimer l'état futur des infrastructures, y compris à partir de données incomplètes, ont été développés dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 (SWIP [37], [119], [125]). Les modèles prennent en compte le remplacement des canalisations par le passé et diminuent ainsi la surestimation systématique de la durée de vie des canalisations encore utilisées (SWIP [124], [126]). De plus, l'inférence bayésienne permet de résoudre les problèmes de calibrage des modèles inhérents à des données incomplètes. A cet effet, il faut associer des données locales avec les connaissances subjectives de spécialistes ou avec des données rendant compte de l'état d'autres réseaux (SWIP [119], [124], [126]). Cette association permet de réaliser une estimation différenciée des courbes retraçant la durée de vie de différents réseaux d'eau potable (SWIP [126]) et d'assainissement (SWIP [124]), et d'estimer, sur cette base, leur état futur.

Vu la valeur de remplacement élevée des infrastructures des réseaux, les modèles de prévisions précités sont de plus en plus souvent pris en compte dans les processus de décision. Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61, les modèles reposant sur une analyse décisionnelle multicritères et sur une analyse des scénarios ont été associés pour évaluer les stratégies d'assainis-

sement en fonction de différents scénarios futurs (SWIP [138], [127]). Dans cette optique, les principaux objectifs des différents acteurs pour garantir des infrastructures hydrauliques durables ont été pris en compte et examinés avec soin (SWIP [22]) (cf. chapitre 5, Mesures possibles, infrastructures-3).

En vue de l'assainissement des infrastructures hydrauliques vieillissantes, différentes stratégies ont été comparées dans une étude séparée [37]. Dans ce cadre, les objectifs directement influencés par l'état des infrastructures ont été pris en compte. Les objectifs «Équité intergénérationnelle élevée», «Fiabilité élevée» et «Faibles coûts» en font notamment partie. On a alors considéré différentes préférences pour ces trois objectifs (cf. chapitre 3). L'analyse de l'étude de cas a montré qu'une stratégie d'assainissement proactive basée sur le remplacement de 1,5 à 2% des canalisations par an constituerait une base solide dans le cadre des quatre scénarios d'avenir. En conséquence, il conviendrait de la préférer à une stratégie d'assainissement exclusivement réactive (SWIP [37]).

Croissance démographique, économique et urbaine

(a) Croissance démographique

Le nombre d'habitants et la pyramide des âges ont une influence décisive sur la consommation d'eau et sur la quantité d'eaux usées à traiter et à transporter. Généralement, une augmentation de la population s'accompagne d'une hausse de la consommation d'eau et de la quantité des eaux usées à transporter et à traiter [11]. En revanche, une évolution de la structure de la population peut s'accompagner soit d'une augmentation soit d'une diminution de la consommation d'eau et de

la quantité d'eaux usées à traiter [6]. Selon Abegglen et Siegrist [66], la consommation de médicaments augmente avec la hausse de l'âge moyen, ce qui peut entraîner une augmentation de la pollution de l'eau.¹² Ces évolutions se superposent avec les évolutions futures de la consommation d'eau par habitant [128], laquelle dépend du potentiel d'économies résultant d'innovations techniques (p. ex. chasses d'eau des toilettes, machines à laver, etc.).

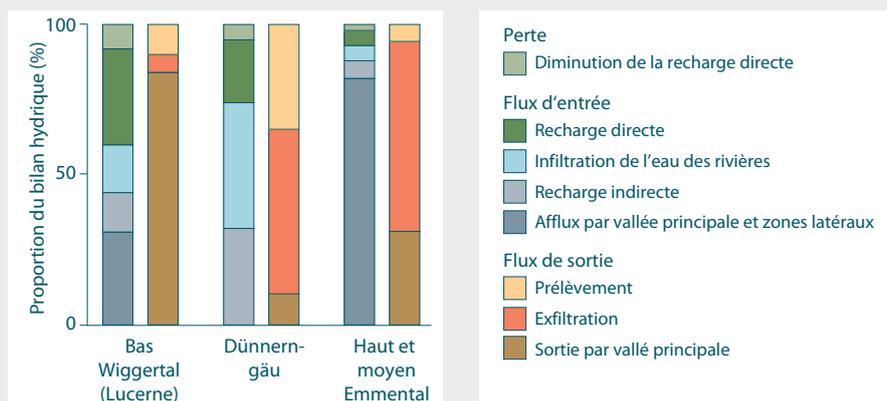
Une diminution substantielle de la consommation d'eau peut entraîner des problèmes temporaires d'évacuation des eaux usées.

ENCADRÉ 12 | Quel est l'impact du développement urbain sur l'approvisionnement en eau potable?

Selon Lanz et al. (2014) [81], les nappes d'eau souterraine les plus abondantes de Suisse sont fortement influencées par les zones urbaines (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61). Citons, parmi celles-ci, les principaux aquifères des vallées du Plateau et des Alpes exploités pour l'approvisionnement en eau potable. En 2004, environ 10% des zones de protection des eaux souterraines étaient situés dans des zones urbaines, la proportion de zones urbaines dans des zones de protection ayant augmenté de 16% entre 1979 et 2004 (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61). Une enquête menée auprès des entreprises assurant l'approvisionnement en eau a montré que la construction sur des zones de protection des eaux souterraines a souvent conduit à l'abandon de stations de captage des eaux souterraines [81]. La construction est également considérée comme l'une des causes d'abandon d'autres captages à l'avenir (c'est-à-dire, durant les cinq à dix prochaines années [81]). L'établissement de nouvelles zones de protection peut s'avérer difficile: les surfaces situées au-dessus de nombreuses nappes d'eau souterraine pouvant être exploitées pour l'approvisionnement en eau potable sont déjà utilisées d'une autre manière, prévues pour une autre utilisation ou ne peuvent pas être protégées conformément à la législation (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61). La garantie d'un nombre suffisamment élevé de sites pour l'approvisionnement en eau potable afin de pouvoir s'adapter avec souplesse aux futures évolutions climatiques et sociales est donc limitée (Mesures possibles: ressources en eau-1).

ENCADRÉ 13 | Quel est l'impact du mitage du territoire sur le bilan hydrique des aquifères de vallée?

De nombreux aquifères de vallée du Plateau dépendent fortement de l'eau importée des régions préalpines ou alpines (cf. ill. 6). Les modifications du renouvellement local et direct des eaux souterraines en raison d'un mitage accru du territoire n'ont qu'une influence modérée sur le bilan hydrique. Afin de quantifier l'impact du mitage accru du territoire sur le renouvellement des eaux souterraines, les débits entrants dans trois aquifères de vallée du Plateau ont été évalués sur la base des bilans hydriques des services cantonaux. La dépendance de ces trois aquifères de vallée au renouvellement direct des eaux souterraines est très variable (cf. ill. 17). Dans le pire des scénarios, l'on a supposé que le renouvellement des eaux souterraines ne se ferait plus dans les surfaces construites, ce qui entraînerait une baisse des débits dans les aquifères de l'ordre de 1 à 8%. Le mitage a donc une influence relativement faible sur le bilan hydrique des aquifères de vallée. En revanche, il augmente la pression sur les zones protégées (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61 et encadré 12).



III. 17: répercussions de l'imperméabilisation sur le bilan hydrique de trois aquifères de vallée.

Avec la diminution du débit par temps sec dans les canalisations, la force d'entraînement diminue, ce qui peut conduire à la formation de dépôts et au colmatage des canalisations, à l'apparition d'odeurs («eaux usées en putréfaction») et à la formation de substances corrosives comme l'hydrogène sulfuré (p. ex. corrosion au niveau des extrémités) [129], [8]. L'augmentation des dépôts et du colmatage des canalisations due à une diminution de la force d'entraînement peut de nouveau entraîner une augmentation de la charge polluante dans l'eau de pluie et les eaux résiduaires déversées dans les cours d'eau [128], [129].

(b) Croissance économique

La croissance économique exerce également une influence déterminante sur la consommation d'eau et la quantité d'eaux usées à traiter. Selon la SSIGE [2], les industries représentent actuellement pratiquement 21% de la consommation quotidienne d'eau potable. Selon Neunteufel [129], une augmentation des activités industrielle et artisanale (croissance économique) entraîne également une hausse de la consommation d'eau et, partant, de la quantité d'eaux usées. Cependant, ces développements sont influencés par l'exploitation de potentiels d'économies, comme l'optimisation des processus hydrauliques, la réutilisation de l'eau industrielle ou autres. C'est pourquoi une corrélation directe entre la croissance économique et la consommation d'eau (et la quantité d'eaux usées) n'est possible que sous certaines conditions.

L'agriculture représente seulement 1% de la consommation quotidienne d'eau potable [130]. Il ne faut pas s'attendre à ce que des évolutions futures dans ce secteur aient une influence significative sur l'approvisionnement en eau.¹³ Cependant, l'accroissement de l'irrigation exerce également une pression accrue sur les ressources en eau (cf. Synthèse thématique ST 2 du PNR 61), mais pas sur les infrastructures de la gestion des eaux urbaines.

(c) Croissance urbaine

Les sols des zones présentant une forte densité de population sont généralement plus imperméables [8], ce qui réduit l'infiltration de l'eau de pluie. De ce fait, les précipitations s'écoulent davantage par le biais des canalisations. En particulier en cas de précipitations extrêmes, cela entraîne une surcharge hydraulique des systèmes d'évacuation des eaux qui provoque l'inondation des caves, des rues, des surfaces, etc. Comme les apports diffus de polluants provenant des zones urbaines ont lieu avant tout sous forme de déversements d'eaux pluviales et résiduaires [131], la charge polluante et hydraulique des eaux usées augmente également avec l'évacuation rapide des précipitations. Dans les zones très densément peuplées avec une proportion élevée de zones habitées reliées au réseau de canalisations, les répercussions sur les petits et moyens cours d'eau sont particulièrement importantes [131].

Une augmentation de l'imperméabilisation dans les zones urbaines s'accompagne géné-

«Selon moi, le pas le plus important que nous devons franchir à l'avenir consiste à renforcer la collaboration avec les communes voisines et le canton.»

Ernst Meili
Responsable technique
de l'approvisionnement en eau
Egg



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

ENCADRÉ 14 | Fragmentation horizontale et verticale du secteur de l'eau (SWIP)

Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61, Lienert et al. (SWIP [132]) ont analysé le rôle joué par les différents acteurs de la planification des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées dans le canton de Zurich. A cet égard, ils ont combiné une analyse classique des acteurs avec une analyse du réseau social. Les résultats de cette analyse montrent une forte fragmentation horizontale et verticale du secteur de l'eau (SWIP [132]): la collaboration entre les différents secteurs, en particulier entre les secteurs de l'approvisionnement et de l'évacuation des eaux usées, est très limitée (fragmentation horizontale). Certains acteurs endossent un rôle d'interface majeur, comme l'Office des déchets, des eaux, de l'énergie et de l'air du canton de Zurich (AWEL) dans la mesure où ils assurent la coordination entre de nombreux autres acteurs et mettent ainsi en relation des secteurs qui, sans leur intervention, n'entretiendraient pas ou peu de relations.

La collaboration entre les acteurs intervenant à différents niveaux de décision (local, cantonal et national) est également limitée (fragmentation verticale). Ainsi, les acteurs locaux, comme les ingénieurs et les communes, interagissent surtout entre eux, mais moins avec les acteurs cantonaux et nationaux. Tout comme l'AWEL, les services des ponts et chaussées des communes assument un rôle d'interface, car ils représentent les deux secteurs concernés (approvisionnement en eau et évacuation des eaux usées, SWIP [132]).

Même si les résultats du projet de recherche confirment une forte fragmentation horizontale et verticale du secteur de l'eau en Suisse, ils ont également pu démontrer qu'une collaboration entre les différents secteurs et niveaux décisionnels est assurée au sein de certains services centraux, avant tout grâce à différents acteurs qui gèrent ensemble le réseau (cf. Mesures possibles, ressources en eau-4). Selon les acteurs concernés, une collaboration accrue entre les secteurs, ainsi qu'entre les différents niveaux de décision (local, cantonal et national) serait nécessaire pour relever les défis que poseront à l'avenir un approvisionnement durable en eau et une gestion des eaux usées en Suisse, et pour améliorer la prise en considération des enjeux régionaux et globaux liés aux bassins versants ainsi que la planification stratégique à moyen et à long termes (SWIP [132]).



ralement d'une réduction des espaces verts et de l'évaporation. La diminution de l'évaporation peut, à son tour, entraîner une hausse de la température de l'air et une baisse de l'humidité de l'air et, par conséquent, exercer une influence négative sur le climat des villes.

Conditions-cadres institutionnelles

Les nouvelles technologies ne s'imposent que timidement dans la gestion des eaux urbaines, notamment en raison de la longue durée de vie des infrastructures [2]. Ce sont généralement les modifications et souvent le durcissement des exigences légales relatives à l'approvisionnement en eau et à l'évacuation des eaux usées qui sont décisives pour l'adoption d'innovations techniques [8]. L'extension des prescriptions légales relatives à la protection des eaux aux éléments traces organiques dans le sillage de la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux et de l'ordonnance sur la protection des eaux en est un exemple.

En plus de l'évolution des prescriptions légales, l'évolution des exigences sociales constitue également un facteur de changement. Une sécurité accrue en matière d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées (cf. Mesures possibles, infrastructures-1) ou l'exigence d'une considération des enjeux régionale et globaux de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées, si possible au niveau des bassins versants naturels ou techniques, en font notamment partie (cf. Mesures possibles, ressources en eau-3 et Synthèse thématique 4).

L'évolution des exigences sociales quant à l'approvisionnement en eau et à l'évacuation des eaux usées se reflète également dans la pression accrue pour améliorer l'efficacité et la transparence des prestations [34]. Cela englobe également l'exigence de transparence accrue en matière de structures des coûts et des prestations qui permet de mettre en relation les prestations souhaitées et les coûts y associés [133]. Selon Vollenweider [137], il n'est pas souvent possible de mettre en relation les prestations souhaitées et les coûts y associés car l'on ne dispose pas des instruments requis, par exemple des indicateurs de performance. La pression accrue pour plus de transparence en matière de prestations ainsi

que de structure des coûts et des prestations est étroitement liée à la volonté de mieux évaluer les prestations et de mieux gérer les contrôles d'efficacité [133] (cf. Mesures possibles, infrastructures-2).

Autres défis

De possibles actes de sabotage au niveau des services d'approvisionnement en eau potable constituent un défi supplémentaire. Selon la SSIGE [135], si des menaces isolées ont été proférées par le passé contre les services d'approvisionnement en eau en Suisse, il n'y a cependant jamais eu de sabotage à ce jour. Ces dernières années cependant, des services d'approvisionnement en eau potable des pays voisins ont fait l'objet de tentatives de sabotage à plusieurs reprises [135].

Les services d'approvisionnement en eau étant des systèmes ouverts s'étendant sur de longues distances, ils sont très exposés aux actes de vandalisme externes [135]. En général, plus un élément du système est central, plus son influence est grande sur l'ensemble du système. Les captages d'eau, les stations d'extraction et de traitement, les réservoirs ainsi que les canalisations de transport sont considérés comme des éléments centraux [135]. Tous ces éléments n'ont pas le même degré d'exposition aux actes de sabotage. L'approvisionnement en eau est exposé aux actes externes de vandalisme, en particulier après un éventuel traitement [135]. C'est pourquoi la sécurité des captages d'eau et des stations de traitement, mais également celle du réseau de distribution, revêtent une importance primordiale [135].

Si, selon [135], l'on ne peut pas se protéger entièrement contre les actes de sabotage, il est toutefois nécessaire de prendre des mesures de planification, d'organisation, de construction et d'exploitation [135]. A cet égard, les recommandations de la SSIGE dans «Protection contre le sabotage des services d'approvisionnement en eau potable» constituent une aide importante pour la définition au cas par cas des mesures nécessaires [135] (cf. Mesures possibles, infrastructures-4).

► Afin d'être en mesure de relever les futurs défis en matière d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées, il est nécessaire que la collaboration soit renforcée aussi bien entre les différents secteurs qu'entre les différents niveaux décisionnels (local, cantonal et national).

A gauche: photo Katrin Simonett; au milieu: SWISSKARST; à droite: photo Patricia Fry

5 Mesures possibles pour garantir une gestion durable des eaux urbaines

Tab. 4: matrice d'influence: quelles mesures possibles pour relever quels défis, sous la responsabilité de quels acteurs?

Le présent chapitre présente des mesures possibles pour relever les défis précités en vue de garantir une gestion durable des

eaux urbaines. Elles ont tout d'abord été élaborées à partir des rapports de causalité analysés dans le chapitre 4 puis discutées

		Défis									Acteurs					
		Augmentation des périodes de sécheresse	Hausse des températures de l'eau	Augmentation des fortes précipitations	Augmentation des crues	Vieillessement des infrastructures	Evolutions de la population, de l'urbanisation et de l'économie	Modifications des conditions-cadres institutionnelles	Autres défis	Confédération	Cantons	Communes	Exploitants	Associations	Recherche	
																Nécessité d'agir Oui/Non
Mesures	Infrastructures	Promotion du «deuxième pilier»	■						■	■	×		×	×		
		Promotion de la gestion globale des infrastructures			■		■		×	■	■		×	×		
		Amélioration de la planification à moyen et long termes	■			■	■				■		×	×		
		Garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise	■		■	■			×	■	■		×	×		
		Promotion d'infrastructures flexibles	■				■				×		×	■	×	
		Promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP	■							■	×		×	×		
		Promotion des systèmes de drainage urbains durables (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)						■			■	×		×	×	
	Ressources en eau	Amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines						■		×	■	×		×		
		Promotion d'une planification de la gestion des ressources en eau	■	■					×	■	×					
		Considération des enjeux régionaux et globaux					■	■	×	■	×					
		Amélioration de la coordination					■	■		■	■					
		Amélioration de l'aménagement du territoire						■		×	■	×				
	Connaissances	Amélioration des bases décisionnelles	■			■				■	×	×	×	×	×	
		Monitoring	■			■				■	×	×	×	×	×	
		Amélioration de l'intégration des connaissances, promotion de l'échange de connaissances et d'expériences	■			■		■		■	×	×	×	×	×	
		Examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels	■			■				×	■	■		×	×	
		Amélioration de la compréhension des processus dans des domaines particulières	■							×	×			×	■	



avec des spécialistes du PNR 61 durant un atelier et complétées sur la base des résultats de leurs recherches et de leurs connaissances spécialisées (cf. annexe I). Dans ce cadre, une distinction a été opérée entre les mesures possibles dans les domaines «Infrastructures», «Ressources en eau» et «Connaissances». L'impact de ces mesures sur l'atteinte des objectifs fixés en matière de gestion durable des eaux urbaines (cf. chapitre 3) est évalué sous l'angle qualitatif dans le chapitre 6.

Les mesures possibles présentées constituent moins des recommandations que des axes stratégiques pour pouvoir relever les défis que posent un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables en Suisse. Tableau 4 synthétise les mesures possibles pour chacun des défis ainsi que les acteurs compétents pour leur mise en œuvre.

Mesures possibles dans le domaine des infrastructures

Infrastructures-1: promotion du «deuxième pilier»

Aujourd'hui, le renforcement du «deuxième pilier»¹⁴ se fonde principalement sur la sensibilité des ressources aux polluants [16, 26, 136]. A l'avenir, il faudra également prendre en compte leur sensibilité aux périodes de sécheresse. Afin de garantir le principe de redondance, il convient de privilégier des ressources en eau indépendantes les unes des autres qui réagissent différemment ou de manière décalée dans le temps aux périodes de sécheresse. La viabilisation de nouveaux points de captage devrait dès lors se baser sur une analyse régionale du comportement des aquifères lors des périodes de sécheresse, comme l'ont démontré les études de cas réalisées dans le cadre du projet de recherche GW-TREND du PNR 61 (cf. Mesures possibles, connaissances-5). Elle devrait également se fonder sur l'analyse des risques locaux et régionaux afin d'éviter une dégradation de la qualité des eaux souterraines en raison de fortes précipitations ou de crues [30] (cf. Mesures possibles, infrastructures-4).

Infrastructures-2: promotion de la gestion globale des infrastructures

Une gestion globale des infrastructures garantit le maintien à long terme des performances des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées [17], 26]. L'objectif est de piloter la gestion, l'extension et la rénovation des infrastructures de manière à ce que les prestations définies soient réalisées sur le long terme en utilisant les ressources de manière optimale et en prenant un minimum de risques [137]. Une gestion globale des infrastructures suppose: (a) l'inventaire des infrastructures, y compris leur âge, leur valeur d'acquisition et leur valeur de remplacement, les rapports de propriété, etc., (b) l'évaluation de l'état des infrastructures, (c) la planification et la coordination des mesures, (d) la planification du budget et des coûts, (e) l'élaboration d'une stratégie en matière d'infrastructures, (f) la définition d'objectifs de performance et d'indicateurs clés et (g) la garantie de la continuité des performances et de la mise à jour des infrastructures [137]. La promotion d'une gestion globale des infrastructures peut, par exemple, se baser sur le «Manuel de gestion des infrastructures communales» mandaté par l'Agenda 21 pour l'eau et élaboré par la Confédération, les cantons et les associations professionnelles [137].

Infrastructures-3: amélioration de la planification à moyen et long termes

Une planification à moyen et à long termes des infrastructures (cf. SSIGE [138]) permet l'optimisation de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées. Ceci afin d'atteindre les objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines développés dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» (SWIP [22]) et présentés dans le chapitre 3. Comme ce sont surtout les infrastructures des réseaux qui ont un horizon de planification de 50 ans et plus, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes liées à la planification des infrastructures et de les intégrer de manière transparente au processus de décision [139]. Les incertitudes liées à la disponibilité limitée des données ou relatives aux futures évolu-

► Les différentes mesures possibles ont fait l'objet d'un débat avec les expertes et experts du PNR 61 dans le cadre d'un atelier spécial.

Toutes les illustrations: photos Patricia Fry

«Nous avons remarqué l'importance de procéder à une analyse décisionnelle lorsqu'il s'agit de prendre des décisions particulièrement complexes. Il est important, dans de telles situations, d'intégrer dans le processus décisionnel aussi bien les données objectives que les préférences et points de vue subjectifs des différents acteurs.»

Judit Lienert
 Coresponsable du projet SWIP
 Eawag



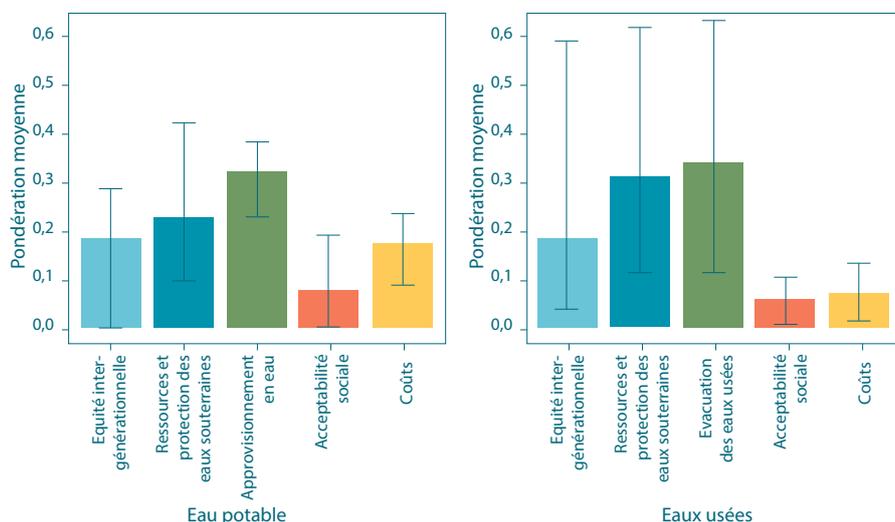
Pour plus d'informations 📄 SWIP
 sous www.pnr61.ch

ENCADRÉ 15 | Approche SWIP pour la planification à long terme d'infrastructures durables

Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» (SWIP) du PNR 61, des méthodes ont été développées pour améliorer la planification à long terme des infrastructures d'hydraulique urbaine. Les méthodes développées favorisent la transition d'une approche fondée sur le principe de «réparation» des problèmes à une planification prévisionnelle des infrastructures. En résumé, cette approche SWIP comprend les étapes suivantes (SWIP [22]):

- Définition du problème décisionnel et des limites du système.** Cette première étape vise à définir le problème décisionnel. Une analyse des acteurs permet de définir ceux qui jouent un rôle dans le processus de planification des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées. Cette étape comprend aussi l'élaboration de scénarios prévisionnels, afin de pouvoir prendre en compte les incertitudes relatives aux évolutions socio-économiques futures («boom», «doom», «qualité de vie» et «statu quo») dans le processus de planification.
- Définition des objectifs.** Cette deuxième étape vise à identifier les objectifs principaux pour un bon approvisionnement en eau et une évacuation sûre des eaux usées. Tous les sous-objectifs sont rendus opérationnels à l'aide de ce que l'on appelle des «attributs» (indicateurs). Cette opérationnalisation permet d'estimer dans quelle mesure une variante remplit le sous-objectif correspondant.
- Elaboration de variantes.** Dans cette étape, les variantes (mesures possibles) sont générées à l'aide de ce que l'on appelle un «tableau morphologique» (strategy generation table). Ces variantes se distinguent les unes des autres en fonction de divers aspects: structure organisationnelle, stratégie financière, étendue géographique, entretien et exploitation, ainsi que les techniques relatives à l'eau potable et à l'assainissement. Ceci offre un large éventail de variantes (centralisées à décentralisées) en vue de garantir l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées.
- Evaluation des conséquences.** Dans cette étape, on évalue pour chaque variante le degré d'atteinte du sous-objectif ou de l'attribut selon les scénarios prévisionnels considérés. L'estimation des conséquences se base sur des estimations des spécialistes ou des modélisations.
- Formulation de préférences.** Cette étape vise à relever, lors d'entretiens, les différentes «préférences subjectives» des acteurs du processus de planification. Le relevé des préférences permet d'expliquer l'importance que les acteurs accordent aux différents objectifs liés à un bon approvisionnement en eau et à une évacuation sûre des eaux usées (cf. ill. 18).
- Association des prévisions et des préférences.** Cette étape vise à mettre en relation les «préférences subjectives» des acteurs et les «prévisions objectives» des modèles ou des spécialistes afin d'identifier les variantes qui s'avèrent prometteuses pour les acteurs et les plus concluantes selon les différents scénarios prévisionnels. La prise en considération de ces deux variables améliore la transparence des décisions et favorise une analyse critique des causes qui expliquent les évaluations des acteurs du processus de planification. L'analyse critique peut également stimuler l'émergence de nouvelles variantes consensuelles qui ont plus de chances d'être mises en œuvre dans le cadre d'un futur processus décisionnel démocratique [149] (IWAQA [36], SWIP [22]).
- Mise en œuvre, suivi et contrôle.** Cette étape ne faisait pas partie des objectifs du projet de recherche. Les lacunes entre théorie et pratique devront être comblées dans le cadre de futurs projets. (www.eawag.ch/swip).

III. 18: pondération moyenne par dix acteurs du secteur de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées pour les cinq objectifs principaux. Des rectangles colorés représentent la pondération moyenne des dix acteurs, les barres d'erreurs représentent la différence entre les pondérations moyennes des différents acteurs (SWIP [125]).



tions socio-économiques sont importantes. La planification à moyen et long termes des infrastructures devrait s'appuyer sur la planification de la gestion des ressources en eau (cf. Mesures possibles, ressources en eau-2) et la garantie de l'approvisionnement en eau potable dans les situations d'urgence (cf. Mesures possibles, infrastructure-4).

Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 (cf. encadré 15), des méthodes et instruments ont été développés dans le but d'optimiser la planification à moyen et long termes en prenant en compte les incertitudes (données limitées et évolutions futures).

Les résultats du projet de recherche montrent que, (a) la prise en compte des incertitudes existantes, (b) l'utilisation de scénarios prévisionnels appropriés et (c) l'implication des différents acteurs dans les processus de planification et de décision permet d'identifier des mesures pertinentes (cf. ill. 19).

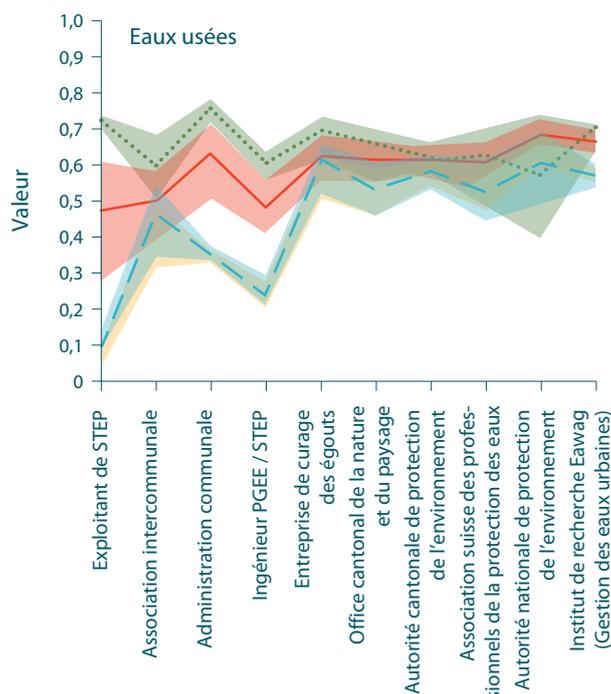
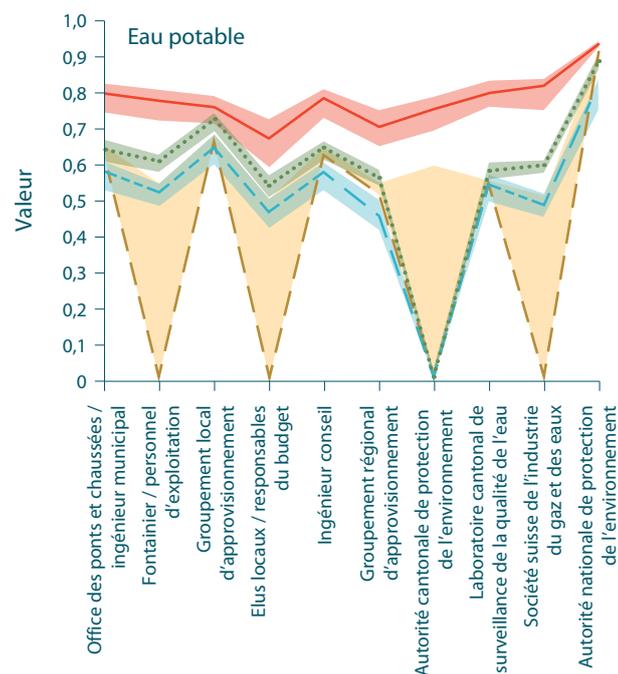
Les résultats de l'analyse décisionnelle multicritères concernant l'eau potable sont représentés, à titre d'exemple, dans l'illustration 19. Dans le scénario «statu quo», c'est la variante A1 (établissement intercommunal, approvisionnement centralisé, investissements d'assainissement modérés: voir courbe rouge dans l'ill. 19, eau potable) qui obtient les meilleurs résultats. Elle a reçu les meilleures notes de la part de l'ensemble des acteurs (entre 0,7 et 0,95; l'éventail des notes allant de 0 = aucun objectif atteint à 1 = tous les objectifs complètement atteints) (SWIP [141]). Une analyse détaillée des résultats prenant en compte les incertitudes parmi les préférences montre que les investissements d'assainissement jouent un rôle déterminant dans la hiérarchi-

sation des variantes dans la mesure où celles-ci influencent les objectifs auxquels les acteurs accordent une grande importance (préférence subjective) (SWIP [38], [141]). Les objectifs «Qualité élevée de l'eau», «Fiabilité élevée des systèmes d'assainissement des eaux» et «Faibles charges de réhabilitation à l'avenir» en font notamment partie. C'est pourquoi les variantes privilégiées étaient celles qui prévoyaient un assainissement fiable de l'eau potable et une gestion proactive de la réhabilitation des installations (remplacement annuel $\geq 1\%$ selon l'état des canalisations).

Les résultats concernant les eaux usées sont représentés à droite dans l'ill. 19. Dans le scénario «statu quo», mais également dans tous les autres scénarios non représentés ici, c'est la variante 4 (responsabilité partagée, évacuation des eaux usées décentralisée au moyen d'installations high-tech, investissements d'assainissement élevés, cf. ill. 19, eaux usées) qui a été plébiscitée (SWIP [141]). «Les divergences entre les notes attribuées par les acteurs locaux s'expliquent par leurs préférences individuelles. Ainsi, le responsable de station d'épuration (n°1) et l'ingénieur local (n°4) ont tous deux accordé une grande importance à l'objectif «Équité intergénérationnelle élevée» (détails dans le projet SWIP: Zheng et al., en prép.). Plus les investissements d'assainissement et la flexibilité étaient élevés, mieux les variantes étaient notées. Pour d'autres acteurs, notamment le représentant de l'office cantonal de protection de l'environnement (n°6), les objectifs «Bon état chimique des cours d'eau» et «Faible pollution des eaux souterraines» étaient particulièrement importants. Cependant, comme les variantes relatives à ces objectifs présentent de fortes similitudes, leur évaluation présente peu de différences.» (SWIP [141])

III. 19: classement de quatre des onze variantes concernant le secteur de l'eau potable et celui des eaux usées dans la région étudiée «Mönchaltorfer Aa» par dix acteurs dans le cadre du scénario «statu quo». Les lignes relient les valeurs moyennes (médiane), les surfaces colorées représentent la part d'incertitude. Celle-ci est due à l'incertitude relative aux prévisions concernant les attributs. 0 = note la plus faible, objectif non atteint; 1 = meilleure note, tous les objectifs atteints. Les variantes A1 à A4 sont décrites de manière plus détaillée dans Scholten et al. [141].

- Structure intercommunale, système centralisé, effort de rénovation prévu: moyen
- Entrepreneurs sous contrat, système centralisé, effort de rénovation prévu: faible
- Responsabilité privée, systèmes simples décentralisés, effort de rénovation prévu: faible
- ... Responsabilité mixte, systèmes décentralisés high-tech, effort de rénovation prévu: moyen ou élevé





► Des instruments et des méthodes spécifiques ont été développés dans le cadre du projet SWIP afin d'améliorer la planification à long terme des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées.

Toutes les photos: Max Maurer

«Les approches régionales sont souvent intéressantes. Il est parfois judicieux d'envisager des solutions décentralisées dans les zones rurales. Nous nous y employons dans une petite commune où il aurait peut-être déjà mieux valu le faire 30 ans auparavant. Nous souhaitons intégrer les habitants à cette démarche.»

Martin Würsten
Responsable de l'Office de l'environnement du canton de Soleure



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

Infrastructures-4: garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise

Conformément aux dispositions de l'ordonnance sur la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise (OAEC), les services d'approvisionnement en eau disposent aujourd'hui déjà de plans de mesures pour garantir l'approvisionnement en eau potable dans les situations de crise (cf. [142]). Il faudra contrôler à l'avenir si ces plans de mesures s'avèrent suffisants, y compris pour gérer des situations à risque non définies dans le cadre de l'OAEC. Les fortes précipitations et les crues [30], les coupures d'électricité et les dysfonctionnements et accidents, ainsi que les périodes de sécheresse prolongée avec des besoins en eau particulièrement élevés (p. ex. pour l'irrigation, le refroidissement ou l'extinction de feux) ou encore les pénuries d'eau résultant du tarissement des sources, la baisse du niveau des eaux souterraines ou des lacs et la diminution des débits en font notamment partie [26]. Des dispositifs de surveillance, d'alarme et de piquet permettent aux services d'approvisionnement en eau de prendre les bonnes décisions en temps de crise et de gérer au mieux les événements exceptionnels [17], [26], [136]. Associés aux mesures de prévention et de protection contre le sabotage (cf. SSIGE [135]), ces dispositifs offrent une base solide pour garantir l'approvisionnement en eau potable, y compris en temps de crise (cf. SSIGE [143]).

Infrastructures-5: promotion d'infrastructures flexibles

Vu la faible capacité d'adaptation des infrastructures de réseau, il faut trouver des solutions plus souples [28], susceptibles d'être intégrées dans les systèmes existants afin de

proposer de nouvelles options pour l'avenir [28]. A titre d'exemple, citons l'utilisation de concepts modernes de protection contre les incendies dans certains quartiers périphériques (SWIP [125]), le captage et le traitement séparés de l'urine (cf. encadré 16) ou l'exploitation centrale d'installations décentralisées.

Infrastructures-6: promotion de la remise en état et/ou de la fusion des stations d'épuration des eaux usées (STEP)

La diminution du débit des cours d'eau due à l'augmentation des périodes de sécheresse et à la modification du régime de débit peut contribuer à une dilution insuffisante des eaux usées épurées [16]. Dans ce contexte, les performances et l'emplacement des STEP revêtent une importance accrue. Les petites installations présentent souvent une capacité de traitement inférieure aux grands ouvrages à des coûts spécifiques plus élevés [7]. En regroupant les stations d'épuration, le débit de base de certains cours d'eau ne serait plus alimenté par les rejets des STEP, ce qui améliorerait la qualité de l'eau à long terme (cf. [145]).¹⁵ Toutefois, il faudrait déterminer au préalable si, en cas de diminution du débit, ce regroupement de STEP ne risquerait pas d'affecter le bilan hydrique des petits bassins versants, notamment dans les cas où une station d'épuration déverse ses eaux dans de plus grands cours d'eau situés au-delà du bassin versant. Lors de la planification des bassins versants, il faudra prêter une attention particulière aux stations qui déversent leurs eaux épurées dans les cours d'eau utilisés pour l'approvisionnement en eau potable, que ce soit directement ou indirectement (par infiltration dans la nappe) [66].

Les nouvelles prescriptions relatives à la pro-

ENCADRÉ 16 | Captage et traitement séparés de l'urine

L'urine représente moins de 0,5% de la quantité d'eaux usées. En revanche, elle contient plus de 75% de l'azote, 50% du phosphore et une grande partie des hormones et produits pharmaceutiques qui sont traités dans les STEP [27]. Ainsi, l'urine participe de manière importante à la pollution arrivant aux STEP [144]. Selon Maurer [28], des dispositifs technologiques peuvent s'intégrer de manière très souples aux infrastructures existantes. Grâce à un traitement ciblé de l'urine, il serait également possible de compenser les pics de pollution consécutifs aux précipitations dans le système unitaire des stations d'épuration [27]. Une séparation et un traitement séparé de l'urine permettrait en outre d'éviter d'éliminer des substances nutritives et, accessoirement, d'utiliser ces substances nutritives comme engrais agricole après un traitement adapté [27].



tection des eaux qui visent l'élimination des micropolluants dans les STEP constituent un bon moyen pour planifier et mettre en œuvre des mesures adaptées [66].

Infrastructures-7: promotion des systèmes de drainage urbains durables (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)

Les mesures qui réduisent ou retardent l'évacuation des eaux usées sont communément désignées au niveau international par le terme «Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)». Le but de ces mesures est de (a) diminuer la quantité d'eau maximale s'écoulant d'abord dans les canalisations puis dans les cours d'eau, (b) prolonger la durée de l'écoulement et (c) traiter une plus grande quantité d'eaux pluviales et résiduaires [11]. Les mesures ne sont toutefois pas adaptées pour atténuer les répercussions d'événements extrêmes, comme des précipitations de courte durée et de forte intensité ou des fortes précipitations de longue durée.

De plus, de nombreuses mesures SUDS intelligemment intégrées dans le paysage urbain permettent de végétaliser des zones urbaines. En été, ceci minimise les répercussions de la hausse de la température et la baisse de l'humidité de l'air, améliore ainsi le climat urbain et, partant, la qualité de vie. Il est cependant nécessaire de renforcer la collaboration entre les urbanistes, les architectes et les responsables de l'assainissement urbain.

Mesures possibles dans le domaine des ressources en eau

Ressources en eau-1: amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines

Les captages d'eau potable ne peuvent être durablement protégés que par l'établissement de zones de protection [136]. Depuis 1971, la loi sur la protection des eaux impose aux cantons de définir de manière contraignante des zones de protection des eaux souterraines autour des captages d'intérêts public, de fixer les mesures de protection nécessaires dans la réglementation correspondante et de veiller à leur respect [136]. De nombreux cantons n'ont pas encore défini, conformément à la loi, de zones de protection des eaux souterraines

pour tous les captages [17] ou avaient déjà défini des zones de protection avant l'entrée en vigueur de la nouvelle ordonnance sur la protection des eaux (1998) et des instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines (2004) qui, à ce jour, ne répondent plus aux prescriptions légales relatives aux zones de protection des eaux souterraines.

Afin de pouvoir disposer, à l'avenir également, d'eau potable de qualité et en quantité suffisantes, il faudrait définir de manière définitive des zones de protection des eaux souterraines conformes à la législation en vigueur à proximité de tous les captages existants, mais également contrôler régulièrement les zones de protection déjà définies. Afin de garantir durablement l'approvisionnement en eau potable, des périmètres de protection des eaux souterraines devraient également être définis autour des sites concernés [17]. Afin de pouvoir s'adapter de manière flexible aux évolutions climatiques et sociales (p. ex. hausse ou baisse de la consommation d'eau, etc.), il conviendrait de préserver un nombre suffisant de sites (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61).

Ressources en eau-2: promotion de la planification de la gestion des ressources en eau

Une planification de la gestion des ressources en eau au niveau des bassins versants permet de préserver durablement un équilibre entre ressources et besoins en eau [16], [17], [26]. Une telle planification ne concerne pas seulement l'approvisionnement public en eau (eau potable, eau d'usage et eau d'extinction), mais tient également compte de tous les intérêts de protection et d'utilisation pour garantir une approche suprasectorielle [26].

Afin de pouvoir planifier la gestion des ressources en eau, il faudrait tout d'abord dresser un bilan des ressources en eau disponibles pour l'exploitation actuelle et future (quantité et qualité) et des exploitations escomptées de l'eau présentement et à l'avenir, idéalement à l'échelle des bassins versants [26] (cf. Mesures possibles, connaissances-1). Cette démarche suppose une amélioration préalable des connaissances relatives aux ressources en eau disponibles et à leur comportement en fonction des différentes conditions climatiques, cette dernière remarque s'appliquant particulièrement aux ressources en eaux souterraines (cf. Mesures possibles, connaissances-5). Les

► Les instruments et mesures développés soutiennent le passage d'une approche réactive basée sur la «réparation» à une approche préventive de planification des infrastructures.

A gauche et au milieu: photos Max Maurer; à droite: SWIP



► Lors de l'octroi de concessions pour l'exploitation de l'eau, il importe avant tout de veiller à ce que les conditions requises pour une gestion durable de l'eau sur le long terme soient correctement remplies. Aussi est-il essentiel que les prélèvements d'eau soient vérifiés par les autorités délivrant les autorisations correspondantes.

A gauche et au milieu: photos Max Maurer;
à droite: photo Daniel Hunkeler

«La collaboration entre les différents secteurs eaux usées et eau potable est très importante. Ce qui est livré par le premier doit être évacué par le second. Les conduites d'eau potable se trouvent le plus souvent au même endroit que les canalisations d'évacuation des eaux usées. Une meilleure collaboration permettrait de réaliser des économies tout en augmentant notre efficacité. Il importe que nous fassions preuve d'ouverture envers les autres branches, car au final, nous sommes tous dans le même bateau.»

Thomas Bodmer
Responsable adjoint de l'approvisionnement en eau et exploitant de la STEP de Mönchaltorf



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

concepts développés dans le cadre des projets de recherche du PNR 61 constituent, à cet égard, une base précieuse (SWISSKARST [20]). A partir de ce bilan, il faudrait identifier les zones à risque présentant un potentiel de déséquilibre entre ressources et besoins en eau [26]. En particulier pour ces zones à risque, une planification de la gestion des ressources en eau devait être réalisée en tenant compte de tous les acteurs et de tous les intérêts en présence afin de prévenir et de résoudre de futurs conflits ou, le cas échéant, de définir correctement les priorités [26]. La planification de la gestion des ressources en eau souligne l'importance des propositions visant à renforcer l'intégration et la coordination dans le domaine de la gestion des eaux telles que formulées dans la synthèse thématique 4 du PNR 61. L'analyse des ressources en eau disponibles pour une exploitation durable devrait également être prise en compte lors de l'octroi de concessions destinées à garantir les exploitations actuelles et futures. Ce dernier point implique aussi le contrôle des prélèvements d'eau par les autorités compétentes en matière d'autorisation (cf. Synthèse thématique 2 du PNR 61).

Ressources en eau-3: considération des enjeux régionaux et globaux

Les défis que posera, à l'avenir, une gestion durable des eaux urbaines sont très variés selon les régions. Par conséquent, les solutions devraient également être adaptées aux situations régionales. Lorsqu'il y a ou qu'il y aura contradiction entre les intérêts de protection et d'utilisation ou interaction entre différents secteurs au sein d'une même région, les enjeux devraient être abordés d'un point de vue global [146], [147].

La considération des enjeux régionaux et globaux nécessite au préalable une analyse de la situation et une définition du bassin versant [146]. Dans le cadre de l'analyse de situation, il faudrait examiner les interactions, les dépendances, les conflits et les synergies entre les secteurs et déterminer, sur cette base, le besoin de coordination au sein et entre les secteurs [146], [147] (cf. Mesures possibles, ressources en eau-4) et définir les objectifs à atteindre au niveau régional.

La définition du bassin versant où ont lieu ces rapports de cause à effet devrait se fonder d'abord sur les limites naturelles des bassins versants (p. ex. eaux de surface et eaux souterraines) ou selon les bassins versants techniques (p. ex. infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux d'une région) et seulement à titre complémentaire sur les délimitations politiques et administratives [146], [147]. L'analyse de la situation et la définition de ces espaces fonctionnels constituent la base de la planification de la gestion des ressources en eau qui doit être considérée comme partie intégrante de la gestion intégrée des eaux par bassin versant (GIE) [26] (cf. Synthèse thématique 4 du PNR 61).

L'augmentation des rejets thermiques dans les eaux (eaux souterraines et eaux de surface) constitue un exemple de conflit d'utilisation (actuel et futur). Puisque les températures de l'eau s'adapteront à la hausse des températures de l'air, en particulier dans les lacs, les cours d'eau et les eaux souterraines proches des fleuves, les conflits s'aggraveront sous l'effet d'une exploitation thermique accrue des eaux (cf. Synthèse thématique 2).

Les conflits actuels et futurs devraient être résolus à moyen et à long termes dans le cadre d'une planification de la gestion des ressources en eau réalisée à l'échelle des bassins versants. Il conviendrait d'adopter une pareille démarche pour gérer au mieux la pression accrue de l'urbanisation au niveau des zones de protection des eaux souterraines, les conflits actuels ou futurs entre protection contre les crues, revitalisation et approvisionnement en eau potable ou encore les conflits d'exploitation entre production agricole et approvisionnement en eau potable. (cf. Mesures possibles, ressources en eau-1 et ressources en eau-5; encadré 12).

Ressources en eau-4: amélioration de la coordination

Au niveau fédéral, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) (ressources en eau) et l'Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV) (eau potable) sont responsables de l'approvisionnement en eau, tandis que l'Office fédéral pour l'approvisionnement économique du pays (OFAE) répond de l'approvisionnement d'urgence en eau. De plus, l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) est impliqué lorsqu'il s'agit de (a) la protection des

ressources en eau contre les détériorations (substances nutritives, pesticides, etc.) et (b) l'utilisation des ressources en eau, par exemple pour l'irrigation. Cette répartition des compétences peut être source d'incohérences et de contradictions [57]. Il conviendrait dès lors d'améliorer, au niveau fédéral, la coordination horizontale entre les différents offices fédéraux, mettre au point une vision commune et la défendre auprès des autres acteurs impliqués [136]. Des mesures de coordination analogues sont en partie nécessaires au niveau cantonal (cf. Synthèse thématique 4 et [147]). Comme l'ont démontré les résultats du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 (SWIP [132]; cf. encadré 14), il faudrait également améliorer la coordination verticale entre la Confédération, les cantons, les communes et les services assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux en tenant compte des compétences existantes en la matière (cf. Synthèse thématique 4).

Ressources en eau-5: amélioration de l'aménagement du territoire

La loi sur l'aménagement du territoire impose une coordination suprasectorielle des activités ayant un impact sur l'organisation du territoire lorsque celles-ci sont incompatibles, concurrentes, interdépendantes ou complémentaires (LAT, art. 2). On entend par activités ayant des effets sur l'organisation du territoire les activités qui modifient l'utilisation du sol ou l'occupation du territoire ou qui visent à les maintenir en l'état. (LAT, art. 1, al 1). Selon la LAT, les enjeux liés à la gestion des ressources en eau doivent être coordonnés avec d'autres intérêts ayant des effets sur l'organisation du territoire et consignés dans les plans d'utilisation et les plans directeurs. Afin de prévenir et de résoudre autant que possible des conflits actuels ou futurs ou, le cas échéant, de définir correctement les priorités (p. ex. pression accrue de l'urbanisation dans les zones de protection des eaux souterraines), les différents intérêts de protection et d'utilisation devraient être identifiés en temps utile et considérés par les autorités responsables de la protection des eaux (y compris la protection de l'eau potable) et de l'aménagement du territoire. Il conviendrait également d'identifier les dangers naturels actuels et futurs (p. ex. risque de crues dans les régions karstiques). Etant donné que, depuis longtemps, l'utilisation du territoire ne se restreint plus à la surface de la terre (de nombreux systèmes, notamment ceux assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées sont situés en sous-sol), l'aménagement du territoire devrait davantage tenir compte de la question de la tridimensionnalité (planification souterraine) et garantir ainsi la coordination suprasectorielle des activités ayant des effets sur l'organisation du territoire, y compris

en sous-sol [148]. C'est pourquoi il faudrait accorder une importance particulière à l'exploitation du sous-sol dans le cadre de l'approvisionnement en eau potable.

Mesures possibles dans le domaine des connaissances

De nos jours, les répercussions du changement climatique sur l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, mais aussi le vieillissement des infrastructures hydrauliques et des STEP font de plus en plus débat. Dans certains domaines cependant, il manque les connaissances de base nécessaires pour définir des mesures concrètes. En outre, les nouveaux défis qui résultent de l'évolution globale et du changement climatique n'ont pas été suffisamment intégrés dans les socles de connaissances. Les mesures possibles proposées ci-après ont donc pour objectif de combler des lacunes, de réduire certaines incertitudes et de créer ainsi les conditions requises pour améliorer la planification et la mise en œuvre de mesures.

Connaissances-1: amélioration des bases décisionnelles

Aujourd'hui, les réseaux de mesures ne répertorient que ponctuellement les données nécessaires à la gestion des ressources en eau [26] (cf. Mesures possibles, ressources en eau-2). Cela étant, une vue d'ensemble à l'échelle de la Suisse des ressources et des besoins en eau de chacune des régions (quantité, qualité) constitue une condition pour pouvoir planifier et mettre en œuvre les mesures adaptées pour une (planification de la) gestion durable des ressources en eau [26]. Il en est de même pour la planification à moyen et long termes des infrastructures hydrauliques. A cet égard, les petites structures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, ainsi que le manque de prescriptions au niveau fédéral compliquent l'élaboration d'une vue d'ensemble nationale des aspects qualitatifs, quantitatifs, financiers et organisationnels inhérents à l'approvisionnement en eau [136] et à l'évacuation des eaux usées [8]. Afin de pouvoir exploiter durablement les ressources en eau et les infrastructures d'hydraulique urbaine, les données relatives à l'état des ressources en eau (quantité, qualité), à l'approvisionnement en eau et à l'évacuation des eaux usées, ainsi que les données concernant les infrastructures correspondantes, doivent être relevées, actualisées et mises à disposition de manière systématique. La réponse au postulat Walter [26] attribue ce rôle aux cantons. Pour les concessions privées d'approvisionnement en eau (industries, agriculture), les cantons devraient également s'assurer que les volumes d'eau prélevés et l'état des infrastructures d'hydraulique urbaine [26] sont bien saisis et déclarés. Il en est de même pour les infrastructures d'assainissement privées comme les évacuations des eaux usées

de bien-fonds ou les installations d'infiltration, industrielles et de prétraitement [8].

Connaissances-2: monitoring

Certains changements liés au climat, par exemple la modification de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes (fortes précipitations, étiage et crues, etc.) ne peuvent être décelés qu'au terme d'une longue période. Souvent, les modifications de l'utilisation des sols n'affectent que progressivement la qualité et la quantité des eaux. Ces évolutions risquent dès lors d'être identifiées trop tard ou mésestimées [16]. Afin de reconnaître à temps les évolutions (p. ex. répercussions de la hausse des températures de l'eau sur la qualité des eaux souterraines) et de pouvoir engager des mesures adaptées en temps voulu, il faudrait développer les systèmes de monitoring existants, archiver les séries de données et les rendre accessibles. Si ces systèmes ne permettent pas de déceler d'importants changements liés au climat, il faudrait envisager de développer de nouveaux systèmes ou d'optimiser le monitoring, en particulier celui des sources. Compte tenu de l'absence de séries de données, il est souvent difficile d'estimer la sensibilité de ces systèmes aux changements liés au climat.

Les chercheurs des projets de recherche GW-TEMP [149] et RIBACLIM [51] du PNR 61 recommandent notamment un monitoring à long terme des conditions d'oxydoréduction des systèmes de filtration des berges, «*qui sont caractérisés par un raccordement hydraulique direct du fleuve aux eaux souterraines, ainsi que par un bassin versant sans bassin de rétention. Des données sur le long terme permettent de prendre des mesures adéquates au bon moment et en tenant compte des conditions hydrogéologiques*» (RIBACLIM [51]).

En plus du développement et de l'exploitation de systèmes de monitoring à long terme, la mise en œuvre de systèmes d'assurance qualité pour l'approvisionnement en eau devrait être améliorée (cf. SSIIGE [150]), par exemple selon l'approche HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points). Le développement de nouveaux capteurs permet de mesurer en continu des paramètres pertinents et de transmettre automatiquement les données mesurées, de manière à ce que les services assurant l'approvisionnement en eau puissent réagir plus rapidement à d'éventuels dangers.

Connaissances-3: amélioration de l'intégration des connaissances, promotion de l'échange de connaissances et d'expériences

De nombreuses données relatives aux ressources en eau et aux infrastructures hydrauliques sont d'ores et déjà disponibles aux niveaux cantonal, régional et local. Mais elles ne sont pas regroupées, harmonisées et évaluées de manière systématique. De plus, il n'y a généralement pas d'obligation légale à échanger des données [26]. Afin d'améliorer les bases de connaissances et de décisions et d'asseoir les mesures permettant de garantir une gestion durable des eaux urbaines sur une base solide, il faudrait améliorer l'intégration des données et des connaissances déjà disponibles en lien à une problématique spécifique (p. ex. données et connaissances de l'Association des chimistes cantonaux de Suisse et des fournisseurs en eau potable ou des offices cantonaux de protection de l'environnement et des eaux). En concertation avec les associations professionnelles nationales (SSIIGE, VSA), la Confédération endosse un rôle de coordination en ce qui concerne le regroupement des secteurs et la coordination suprasectorielle de données et de connaissances.

Afin de s'assurer que les nouveaux enseignements et expériences en matière de recherche puissent être mis en pratique et que les chercheurs puissent traiter les questions pratiques en suspens, une collaboration étroite entre les chercheurs et les acteurs de terrain est primordiale [16]. Bien que les défis décrits dans le chapitre 4 nécessitent avant tout des solutions au niveau national, régional et local, il est important que les acteurs de la gestion des eaux urbaines en Suisse profitent des enseignements et des expériences d'autres pays et mettent dans le même temps leurs connaissances à la disposition de leurs homologues étrangers [16]. C'est pourquoi il faut les encourager à participer aux échanges de connaissances et d'expériences au niveau international.

Connaissances-4: examen du potentiel de réservoirs d'eau naturels et artificiels

Lorsqu'ils sont gérés de manière appropriée, les réservoirs d'eau naturels et artificiels (en particulier pour l'eau potable, l'eau d'usage et l'eau d'extinction, l'eau destinée à l'enneigement et à l'irrigation) peuvent contribuer à mieux gérer les périodes de sécheresse [26]. Les connaissances sur les potentiels des réservoirs naturels et artificiels, y compris sur les aspects techniques, écologiques et économiques y associés (y compris l'enrichissement des eaux souterraines, l'utilisation polyvalente des réservoirs, etc.) demeurent cependant souvent insuffisantes et doivent donc faire l'objet d'une étude à part entière. Cela concerne également l'utilisation de réservoirs d'eau naturels ou artificiels pour la gestion des crues [16], [55]. Cet examen pose les bases

pour définir à l'avenir les mesures supplémentaires éventuellement nécessaires pour faire face aux problèmes de quantité d'eau [16].

**Connaissances-5:
amélioration de la compréhension
des processus dans des domaines
particuliers**

Afin de pouvoir faire face de manière ciblée aux défis d'une gestion durable des eaux urbaines, il est impératif de réduire les incertitudes et de combler les lacunes [16] (cf. Mesures possibles, connaissances-2). La condition est souvent l'amélioration de la compréhension des processus des systèmes hydro(géo)logiques. Ainsi, des incertitudes et des lacunes subsistent quant au comportement des aquifères lors de périodes de sécheresse prolongées, à leurs interactions avec les infrastructures urbaines ou quant au comportement des aquifères karstiques lors de crues. C'est pourquoi la compréhension des processus devrait être approfondie dans le cadre d'études ciblées dans ces domaines.

6 Evaluation de l'impact des mesures

Le présent chapitre évalue, sous l'angle qualitatif, les répercussions éventuelles des mesures possibles identifiées au chapitre 5. L'impact de chaque mesure possible sur les objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines décrits dans le chapitre 3 a été mesuré comme suit: impact positif (+), négatif (-), positif et négatif (+/-) ou inexistant (o). Cette évaluation a été réalisée dans le cadre d'entretiens avec les spécialistes du PNR 61.

Dans ce contexte, chaque mesure possible a été évaluée individuellement par trois spécialistes (cf. annexe I). Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 (SWIP [22]), des attributs ont été définis pour les objectifs. L'évaluation a porté sur chacun de ces attributs.¹⁶ Pour tous les autres objectifs pour lesquels aucun attribut n'avait été défini, les

éventuelles modifications positives ou négatives ont été évaluées par rapport à la situation actuelle. L'évaluation a été réalisée en tenant compte des différences régionales de la Suisse.

Les résultats de l'estimation des spécialistes ont ensuite été évalués et transmis à l'équipe de la synthèse thématique. Les éventuelles divergences entre les évaluations individuelles des trois spécialistes (pour chaque mesure possible) ou entre les spécialistes et l'équipe chargée de la synthèse ont ensuite été discutées et clarifiées. Les évaluations ont alors été compilées afin d'obtenir une estimation globale des répercussions de mesures possibles sur les objectifs fondamentaux (cf. tab. 5). Une description détaillée des répercussions des mesures possibles sur les sous-objectifs est disponible à l'annexe 8.2. Les répercussions décrites correspondent aux meilleures connaissances actuelles des spécialistes du PNR 61.

Tab. 5: impact des mesures sur l'atteinte des objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines.

Mesures		Objectifs en matière de gestion durable des eaux urbaines						
		Equité intergénérationnelle élevée (1)	Bonne protection des eaux (2)	Bon approvisionnement en eau (3)	Evacuation sûre des eaux usées (4)	Acceptabilité sociale élevée (5)	Faibles coûts (6)	Exploitation efficace des ressources (7)
<ul style="list-style-type: none"> + évolution positive - évolution négative +/- évolution positive et négative o aucune évolution ? pas d'estimation possible 								
Infrastructures	Promotion du «deuxième pilier»	+	+	+	o	+/-	-	+/-
	Promotion de la gestion globale des infrastructures	+	+	+	+	+/-	+/-	+
	Amélioration de la planification à moyen et long termes	+	+	+	+	+	+/-	+
	Garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise	+	o	+	o	+/-	-	o
	Promotion d'infrastructures flexibles	+	+	+/o/-	+	+/-	+/-	+
	Promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP	-	+	o	+	+/-	+/-	+/-
Ressources en eau	Promotion des systèmes de drainage urbains durables (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)	+	+/-	o	+	+/-	+/-	+
	Amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines	+	+	+	o	+	+/-	+
	Promotion d'une planification de la gestion des ressources en eau	+	+	+	o	+/o	?	o
	Considération des enjeux régionaux et globaux	+	+/o	+/o	+/o	+	+/-	o
	Amélioration de la coordination	+/o	+/o	+/o	+/o	+	+/-	o
Connaissances	Amélioration de l'aménagement du territoire	+	+	+	+/o	+/-	+/-	o
	Amélioration des bases décisionnelles	o	+	+	+	+	+	o
	Monitoring	o	+	+	+	+	+/-	o
	Amélioration de l'intégration des connaissances, promotion de l'échange de connaissances et d'expériences	o	+	+	+	+	+	+
	Examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels	o	+	+	o	o	o	o
Amélioration de la compréhension des processus dans des domaines particuliers	o	+	+	+	o	+	o	



Grâce à quelles mesures est-il possible d'atteindre les objectifs fondamentaux visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines?

Les résultats des estimations des spécialistes quant à l'impact des différentes mesures sur les objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines (cf. tab. 5) indiquent que de nombreuses mesures identifiées permettent d'atteindre de manière satisfaisante (+) les cinq objectifs fondamentaux «Bonne protection des eaux», «Équité intergénérationnelle élevée», «Bon approvisionnement en eau», «Évacuation sûre des eaux usées» et «Exploitation efficace des ressources». Les mesures «Renforcement de la remise en état et/ou de la fusion des STEP», «Promotion du deuxième pilier» et «Promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS)» (cf. annexe I, constituent des exceptions).

Selon les estimations des spécialistes du PNR 61, la fusion des STEP réduit la capacité d'adaptation des installations aux évolutions futures (hausse ou baisse du nombre d'habitants, etc.). C'est pourquoi, contrairement aux objectifs fondamentaux «Bonne protection des eaux» et «Évacuation sûre des eaux usées», l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée» ne peut que difficilement être atteint par le biais de cette mesure (-). Il en va de même pour l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources» (+/-). Si la fusion des STEP permet d'améliorer la récupération de substances nutritives (+), elle contribue souvent à augmenter la consommation énergétique (-). Cette remarque vaut également pour la mise à disposition de ressources supplémentaires en eau qui soient indépendantes les unes des autres («Renforcement d'un deuxième pilier», cf. annexe I).

La promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) permet d'améliorer l'état chimique et biologique des cours d'eau et des lacs (+) grâce à l'épuration d'une plus grande quantité d'eaux de pluie et d'eaux résiduaires. Dans le même temps, l'état chimique des eaux souterraines risque de se détériorer, car la pollution des eaux souterraines augmente sous l'effet de l'infiltration des eaux de pluie non traitées. Dès lors, cette mesure ne permet d'atteindre l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» que pour les

cours d'eau et les lacs (+), et non pour les eaux souterraines (-) (cf. annexe I).

De manière générale, des investissements financiers sont nécessaires à la mise en œuvre des mesures présentées ici. Ainsi, pour disposer de ressources en eau indépendantes les unes des autres («Encouragement d'un deuxième pilier»), il faut mettre à disposition des canalisations et des capacités supplémentaires qui s'opposent à l'objectif fondamental «Faibles coûts» (-). La même remarque vaut pour la garantie de l'approvisionnement en eau potable dans les situations d'urgence (-). En revanche, d'autres mesures, par exemple «Amélioration de la planification à moyen et à long termes» et «Amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines» ont un impact négatif à court terme (-), mais positif à long terme (+) sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (cf. annexe I).

L'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée» n'est atteint que partiellement à la faveur de quelques mesures (+/-). Selon l'estimation des spécialistes du PNR 61, l'implication de la population dans les processus de décision, par exemple, diminue de pair avec le renforcement d'une gestion globale des infrastructures ou la fusion de STEP. L'objectif d'un droit de regard élevé n'est donc pas atteint à la faveur de cette mesure (-). Cependant, cet objectif peut être réalisé grâce à la promotion d'infrastructures flexibles ou à la promotion de systèmes de drainage urbains durables (SUDS) (+).

Dans ce dernier cas, les consommateurs sont souvent impliqués dans la planification, par exemple pour la décentralisation de STEP ou l'implémentation de SUDS au niveau local (espaces verts, zones de rétention des eaux de ruissellement, etc.). Cependant, ces mesures ne permettent pas d'atteindre les objectifs «Limitation de l'investissement en temps» et «Limitation de l'investissement spatial» (-), car nombre de ces systèmes sont installés chez les consommateurs et que ces derniers sont souvent coresponsables de l'exploitation et de l'entretien de ces systèmes.

L'analyse des résultats montre clairement que les «trade-offs», c'est-à-dire la confrontation des objectifs et l'identification de compromis, constituent des éléments clés pour garantir des processus décisionnels transparents. C'est également l'avis des experts concernant l'im-

► Pour les acteurs locaux de la région étudiée dans le cadre du projet «Monchaltorfer Aa», l'exigence principale formulée était de disposer d'un bon approvisionnement en eau et d'une évacuation sûre des eaux usées, suivie de la mise en place d'une bonne protection des eaux et d'une équité intergénérationnelle prononcée.

A gauche: SWIP; au milieu: IWAQA; à droite: photo Max Maurer

«Les infrastructures actuelles donnent encore de bons résultats. Cependant, un certain nombre d'adaptations permettraient d'obtenir de meilleures prestations. Ces améliorations concernent notamment le renforcement de la collaboration avec les autres communes mais aussi avec d'autres secteurs de l'infrastructure, et surtout la mise en place d'une gestion préventive des rénovations.»

*Lisa Scholten
Doctorante Eawag SWIP*



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



► L'adoption d'objectifs globaux tenant compte de l'ensemble des secteurs et acteurs concernés constitue un premier pas décisif vers un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables.

A gauche: photo Patricia Fry; au milieu: SWIP; à droite: MONTANAQUA

pact des mesures visant une gestion régionale intégrée. Selon les trade-offs pris en compte dans le cadre de la confrontation des différents objectifs et des enjeux régionaux et globaux, la mesure peut (mais ne doit pas nécessairement) avoir des répercussions positives sur les objectifs que représentent une bonne protection des eaux, un bon approvisionnement en eau et une évacuation sûre des eaux usées (cf. annexe I). De manière générale, la considération des enjeux régionaux et globaux augmente l'éventail des mesures possibles de manière à faire émerger une solution de compromis souvent adaptée à l'une des situations locales.

Parmi les sept objectifs fondamentaux, lesquels sont importants?

Outre les objectifs de coûts, de qualité et de protection, les sept objectifs fondamentaux comprennent également des objectifs explicites de développement durable, comme l'équité intergénérationnelle, l'acceptabilité sociale et l'exploitation efficace des ressources. L'importance de chacun des sept objectifs fondamentaux visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines dépend des préférences subjectives des différents acteurs. Pour la région étudiée «Mönchaltorfer Aa», il a été démontré qu'un bon approvisionnement en eau et une évacuation sûre des eaux usées étaient les objectifs les plus importants aux yeux des acteurs locaux, devant une bonne protection des eaux et une équité intergénérationnelle élevée (SWIP [141]; cf. ill. 18). En revanche, l'acceptabilité sociale élevée et la limitation des coûts (surtout dans le cas des infrastructures des eaux usées) jouent un rôle plutôt mineur (SWIP [141]). Il reste à vérifier si ces résultats peuvent être extrapolés à l'ensemble du pays. Cependant, un premier sondage réalisé auprès de 250 Suissesses et Suisses et de 65 collaboratrices et collaborateurs de l'Eawag a montré que, dans l'ensemble, les préférences sont très similaires [151].

De manière générale, il faut toutefois retenir que les sept objectifs fondamentaux reflètent des exigences différentes, parfois contradictoires, pour garantir une gestion durable des eaux urbaines. Ceci peut entraîner des conflits d'intérêts, par exemple, entre protection et exploitation ou entre bon approvisionnement

en eau et évacuation sûre des eaux usées et d'autres utilisations. S'il n'existe aucune solution simple pour résoudre ces conflits, ceux-ci peuvent toutefois être minimisés grâce à des dispositions adaptées [26], notamment:

- une pesée transparente et participative des intérêts, c'est-à-dire la confrontation des différents objectifs et de leurs trade-offs. Cette approche suppose que les objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines soient identifiés au préalable et que l'importance que leur accordent les différents acteurs soit établie et présentée de manière transparente (cf. SWIP [141]). Les objectifs visant à garantir un approvisionnement en eau et une évacuation des eaux usées durables formulés dans la présente synthèse et dans le projet SWIP Lienert et al. [22] constituent une base importante pour structurer un tel processus de concertation participative de manière transparente;
- une planification à moyen et long termes axée sur les objectifs préalablement identifiés comme importants pour garantir une gestion durable des eaux et une optimisation de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées sur la base de ces objectifs. Comme ce sont surtout les infrastructures reliées au réseau qui disposent d'un horizon de planification de 50 ans et plus, il est nécessaire de prendre en compte les incertitudes liées à la planification des infrastructures et de les intégrer de manière transparente au processus de décision;
- une considération des enjeux régionaux et globaux permet de faire émerger une solution de compromis adaptée à la situation locale grâce à la confrontation des différents objectifs.

«A la base, l'intérêt se porte en premier lieu sur le bon fonctionnement des canalisations. Ce n'est qu'ensuite que l'aspect financier est considéré.»

Thomas Bodmer
Responsable adjoint de l'approvisionnement en eau et exploitant de la STEP de Mönchaltorf



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

Perspectives: quelle est la marche à suivre?

Afin d'éviter tout malentendu: l'analyse a démontré qu'il ne s'agit pas d'un pilotage centralisé du système de gestion des eaux urbaines, mais plutôt d'une compréhension commune des objectifs fondamentaux visant à garantir un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables en Suisse, à laquelle les différents secteurs et les acteurs (au niveau local, cantonal et national) devraient se référer.

Premières étapes de cette démarche:

- ▶ Identifier les objectifs permettant de garantir un approvisionnement durable en eau et une gestion des eaux usées en Suisse en intégrant tous les acteurs concernés. Les objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines formulés dans la présente synthèse constituent une base solide pour structurer le processus de concertation participative de manière transparente (chapitre 3).
- ▶ Elaborer des variantes en se basant sur une analyse approfondie du système de gestion des eaux urbaines. Les défis posés par un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables ainsi que les mesures possibles pour les relever avec succès constituent une base solide pour structurer ce processus (chapitres 4 et 5).
- ▶ Evaluer l'impact des mesures possibles sur l'atteinte des objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines. Les entretiens menés avec les spécialistes constituent une base solide pour estimer l'impact de chacune des mesures (chapitre 6 et annexe I).
- ▶ Evaluer et classer les variantes selon le degré d'atteinte des objectifs qui sont importants aux yeux des acteurs («préférences subjectives»). Cela suppose que les préférences subjectives, c'est-à-dire l'importance que les différents acteurs accordent à chacun des objectifs, soient formulées et présentées de manière transparente (SWIP [141]).
- ▶ Identifier des solutions consensuelles en impliquant l'ensemble des acteurs concernés, moyennant une analyse préalable des causes des divergences d'évaluations des variantes par les différents acteurs (IWAQA [36]).

Ces étapes visant un approvisionnement en eau et une gestion des eaux usées durables en Suisse nécessitent dans tous les cas une analyse approfondie de la décision à prendre. Selon la nature de la décision à prendre, ces étapes peuvent être réalisées au niveau local, cantonal ou national et sous l'égide de la Confédération (OFEV), des cantons, des communes ou des associations (VSA, SSIGE).

Notes

- ¹ Les estimations de la SSIGE se fondent sur les données de 359 (sur 3000 au total) services de distribution d'eau pour l'année 2011. Quelque 58% des ménages raccordés ont été recensés par les services interrogés.
- ² L'équivalent-habitant désigne la charge polluante moyenne d'une personne [8].
- ³ Le terme «eaux parasites» désigne les eaux courantes qui ne sont pas polluées: ruisseaux, eau de drainage, eau de refroidissement, fontaines, réservoirs d'eau de source, etc. [11].
- ⁴ La demande chimique en oxygène (DCO) est un paramètre synthétique exprimant la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation complète des matières organiques [11].
- ⁵ En comparaison avec 2005, la capacité d'assainissement des STEP a progressé en moyenne de 2 à 3% pour les polluants organiques (DCO), l'azote (N) et le phosphore (P) [7]. Selon VSA/IC [7], cette évolution favorable s'explique «*par le fait qu'entre 2005 et 2009 de petites stations d'épuration peu performantes ont été rattachées à de plus grandes stations. De plus, les installations existantes ont été en partie modernisées et leur capacité d'assainissement a été optimisée*» [7].
- ⁶ Ces proportions seront fortement modifiées en raison de la hausse des températures engendrée par le changement climatique.
- ⁷ 1^{er} atelier: réalisé dans le cadre de la Synthèse thématique 3 en présence des spécialistes du PNR 61 le 3 mars 2013; 2^e atelier réalisé avec les représentants du Conseil consultatif du PNR 61, le comité de direction et les bureaux de direction (réunion du Conseil du programme le 12 avril).
- ⁸ La qualité esthétique concerne avant tout l'odeur, le goût, la coloration et la turbidité de l'eau.
- ⁹ Les sous-objectifs relatifs à l'acceptabilité sociale qui sont déjà décrits dans d'autres objectifs fondamentaux ne sont plus pris en compte ici. Pour des raisons d'ordre méthodologique, les objectifs ne doivent pas être redondants, c'est à dire qu'ils ne doivent pas porter sur le même aspect [25]. Naturellement, l'acceptabilité sociale est plus grande lorsque les autres objectifs fondamentaux d'une gestion durable des eaux urbaines, p. ex. l'approvisionnement en eau potable de qualité, sont satisfaits. Pour éviter d'énumérer plusieurs fois les mêmes objectifs, seuls les aspects qui n'ont pas encore été abordés dans les autres objectifs fondamentaux sont présentés dans l'objectif fondamental «acceptabilité sociale».
- ¹⁰ Les défis sont ici abordés comme des futures évolutions qui influent sur le système de gestion des eaux urbaines.
- ¹¹ 101 stations d'épuration sur 839 au total, avec plus de 100 équivalents-habitants, seront dotées d'un équipement supplémentaire pour l'élimination des composés-traces organiques. 12 stations d'épuration seront agrandies parce que plus de 80 000 habitants (ou équivalents-habitants) y sont raccordés, 11 stations parce que plus de 24 000 habitants y sont raccordés et qu'elles déversent leurs eaux usées dans des lacs, et 78 stations parce que plus de 8000 habitants y sont raccordés et qu'elles déversent leurs eaux usées dans des cours d'eau, dans lesquels la part cumulative en eaux usées est supérieure à 10% (soit un rapport de dilution de 1:10 ou inférieur).
- ¹² Dans le même temps, la capacité d'assainissement des STEP augmente pour traiter les concentrations plus élevées de polluants.
- ¹³ Il faut s'attendre à ce que les prélèvements d'eau pour l'agriculture utilisent les surcapacités (p. ex. durant la nuit). Cela engendrera uniquement des coûts marginaux qui sont relativement faibles dans le cadre de l'approvisionnement en eau sans traitement et avec une faible puissance de pompage.
- ¹⁴ La notion de «deuxième pilier» implique qu'il faut parfois plus de deux points de captage pour garantir la sécurité d'approvisionnement en eau. Dans cette perspective, les services d'approvisionnement en eau devraient disposer de différents points de captage indépendants afin de garantir un approvisionnement sûr en eau potable, en eau d'usage et en eau d'extinction. Si l'une de ces ressources venait à manquer en raison de la pollution ou de la sécheresse, le «deuxième» permettrait de couvrir les besoins quotidiens en eau potable, en eau d'usage et en eau d'extinction.
- ¹⁵ La fusion physique des STEP englobe également la fusion fonctionnelle. En règle générale, cette démarche améliore la professionnalisation des structures [145] et, partant, la capacité d'assainissement.
- ¹⁶ Les attributs peuvent être considérés comme des indicateurs. Ils décrivent le degré de réalisation d'un objectif.
- ¹⁷ Atelier réalisé dans le cadre de la synthèse thématique 3 en présence des spécialistes du PNR 61 le 3 mars 2013.
- ¹⁸ Atelier réalisé dans le cadre de la synthèse thématique 3 en présence des spécialistes du PNR 61 le lundi 18 novembre 2013.

Index des illustrations

- Ill. 1: connaissances systémiques, connaissances relatives aux objectifs et connaissances relatives aux mesures possibles dans le cadre de la ST 3.
- Ill. 2: représentation schématique de l'approche et de la structure de la synthèse thématique 3.
- Ill. 3: besoins en eau couverts par l'approvisionnement public en eau.
- Ill. 4: régime des eaux moyen en Suisse.
- Ill. 5: méthode SWISSKARST de représentation cartographique des aquifères karstiques
- Ill. 6: principales exploitations de l'eau sur le Plateau par d'importants services d'approvisionnement en eau.
- Ill. 7: objectifs pour parvenir à une gestion durable des eaux urbaines.
- Ill. 8: évolution de la recharge directe des eaux souterraines.
- Ill.9: répercussions des périodes de sécheresse sur les différents types d'aquifères.
- Ill. 10: part cumulative des stations d'épuration qui déversent leurs eaux usées dans des cours d'eau, dans lesquels la part d'eaux usées est supérieure à 1% ou bien à 5%.
- Ill. 11: séries de données chronologiques des températures mesurées dans les eaux souterraines.
- Ill. 12: séries de données chronologiques de la concentration en oxygène mesurée dans les eaux souterraines.
- Ill. 13: température annuelle moyenne de la Milan-drine, une rivière souterraine du canton du Jura.
- Ill. 14: températures moyennes journalières de l'eau à certains emplacements du bassin versant de la Broye.
- Ill. 15: répartition de la fréquence des températures de l'eau simulées sur une période de 20 ans pour des scénarios sélectionnés et pour deux emplacements du bassin versant de la Broye.
- Ill. 16: part cumulative de regards pour lesquels le critère de mesure d'un maximum de trois surcharges n'a pas été respecté sur la période simulée de 30 ans.
- Ill. 17: répercussions de l'imperméabilisation sur le bilan hydrique de trois aquifères de vallée.
- Ill. 18: pondération moyenne par dix acteurs du secteur de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées pour les cinq objectifs principaux.
- Ill. 19: classement de quatre variantes concernant le secteur de l'eau potable et celui des eaux usées dans la région étudiée «Mönchaltorfer Aa» par dix acteurs dans le cadre du scénario «statu quo».

Index des tableaux

- Tab. 1: infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées en Suisse: aperçu de la valeur de remplacement, des coûts annuels et des investissements.
- Tab. 2: charges en amont et en aval, et capacité d'assainissement des STEP en DCO, P et N pour l'ensemble de la Suisse.
- Tab. 3: volume d'eaux souterraines et ressources en eaux souterraines disponibles pour une

exploitation durable en Suisse.

- Tab. 4: matrice d'influence: quelles mesures possibles pour relever quels défis, sous la responsabilité de quels acteurs?
- Tab. 5: impact des mesures sur l'atteinte des objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines.
- Tab. 6: critères et degrés d'importance utilisés pour l'évaluation des défis.
- Tab. 7: résultats de l'évaluation des défis que pose une gestion durable des eaux urbaines par les spécialistes du PNR 61 et les membres du groupe d'encadrement.

Bibliographie

- [1] CASS, ProClim- (1997): Forschung zu Nachhaltigkeit und globalem Wandel – Wissenschaftspolitische Visionen der Schweizer Forschenden. ProClim-, Forum für Klima und Global Change. Académie suisse des sciences naturelles, Berne (uniquement en allemand).
- [2] SSIIGE (2012): Les résultats statistiques des distributeurs d'eau en Suisse 2011. Société suisse de l'industrie des gaz et des eaux, Zurich. 1-36.
- [3] Freiburghaus M. (2012): Les résultats statistiques des distributeurs d'eau en Suisse 2010. Aqua & Gas 3: 54-59.
- [4] Freiburghaus M. (2012): Aufbereitung von Trinkwasser in der Schweiz: Auswertung der SVGW-Statistik 2005 und 2010. Aqua & Gas 9: 78-81 (uniquement en allemand).
- [5] Schalcher H.-R., Boesch H.-J., Bertschy K., Sommer H., Matter D., Gerum J., Jakob M. (2011): Was kostet das Bauwerk Schweiz in Zukunft und wer bezahlt dafür? Etude du projet national de recherche 54 «Développement durable de l'environnement construit», vdf Hochschulverlag ETHZ, Zurich. (uniquement en allemand).
- [6] Eawag (2009): Garantir l'approvisionnement en eau à l'horizon 2025, Eawag, Dübendorf.
- [7] VSA/IC (2011): Coûts et prestations de l'épuration des eaux. Association suisse des professionnels de la protection des eaux, Berne. Organisation Infrastructures communales, Zurich. 1-88.
- [8] Maurer M., Chawla F., Horn J. v., Stauffer P. (2012): Abwasserentsorgung 2025 in der Schweiz. Série de publications de l'Eawag n° 21. Dübendorf. (uniquement en allemand).
- [9] Maurer M., Herlyn A. (2006): Zustand, Kosten und Investitionsbedarf der schweizerischen Abwasserentsorgung. Rapport final pour l'Office fédéral de l'environnement, Eawag, Dübendorf (uniquement en allemand).
- [10] Abegglen C. (2011): Mikroverunreinigungen: Energieverbrauch und Kosten weitergehender Verfahren auf kommunalen ARA. GWA 91 (7): 479-486 (uniquement en allemand).
- [11] Gujer W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft, 3^e édition, Springer, Berlin-Heidelberg-New York (uniquement en allemand).

- [12] DFE (2011): Preisvergleich der Abwasserentsorgung in der Schweiz. Département fédéral de l'économie (uniquement en allemand).
- [13] AWEL (2004): Überwachung der privaten Abwasseranlagen (Grundstücksentwässerungsleitungen) im Kanton Zürich. Zustandserfassung von rund 8700 m Hausanschlussleitungen in 8 Zürcher Gemeinden im Auftrag des AWEL. Résumé des résultats et aperçu. Office des déchets, des eaux, de l'énergie et de l'air du canton de Zurich (uniquement en allemand).
- [14] Blanc P., Schädler B. (2013): L'eau en Suisse – un aperçu. Commission hydrologique suisse, Berne.
- [15] Sinreich M., Kozel R., Matousek F., Jeannin P. Y., Löw S., Stauffer F. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz. *Aqua & Gas* 9: 16-28 (uniquement en allemand).
- [16] OFEV (2014): Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2014-17. Deuxième partie de la stratégie du Conseil fédéral. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [17] OFEV (2014): Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken Herausforderungen und Empfehlungen. Office fédéral de l'environnement. Berne. Connaissance de l'environnement n° 1404 (uniquement en allemand).
- [18] Wittmer I., Moschet C., Simovic J., Singer H. P., Stamm C., Hollender J. (2014): Über 100 Pestizide in Fließgewässern. *Aqua & Gas* 3: 32-43 (uniquement en allemand).
- [19] Bitterli T., Aviolat F., Brändli R., Christe R., Fracheboud S. (2004): Groundwater resources. Federal Office for the Environment. Hydrological atlas of Switzerland HADES, Plate 8.6 (non publié, uniquement en anglais).
- [20] Jeannin P. Y., Eichenberger U., Sinreich M., Vouillamoz J., Malard A., Weber E. (2013): KAR-SYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. *Environmental Earth Sciences* 69 (3): 999-1013 (uniquement en anglais).
- [21] OFEV (2009): Résultats de l'observatoire national des eaux souterraines. Etat et évolution de 2004 à 2006. Office fédéral de l'environnement, Berne. Etat de l'environnement n° 0903.
- [22] Lienert J., Scholten L., Egger C., Maurer M. (2014): Structured decision making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios EURO Journal on Decision Processes (EJDP), special issue on Environmental Decision Making (uniquement en anglais).
- [23] Conseil fédéral (2012): Développement stratégique durable 2012-2015, 25.1.2012.
- [24] Wuelser G., Pohl C., Hadorn G. H. (2012): Structuring complexity for tailoring research contributions to sustainable development: a framework. *Sustainability Science* 7 (1): 81-93 (uniquement en anglais).
- [25] Eisenführ F., Weber M., Langer T. (2010): Rational Decision Making. 1^{re} édition. Springer, Berlin-Heidelberg-New York (uniquement en anglais).
- [26] OFEV (2012): Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Rapport de l'Office fédéral sur le sujet «Eau et agriculture: enjeux futurs» (postulat 10.353 du conseiller national Hansjörg Walter du 17 juin 2010, uniquement en allemand).
- [27] Larsen T. A., Gujer W. (2002): Waste Design, Source Control und On-Site-Technologien: Der Weg zu einer nachhaltigen Siedlungswasserwirtschaft. *KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*. 49. 1372-1379 (uniquement en allemand).
- [28] Maurer M., Gujer W. (2003): Ist unsere Abwasserentsorgung nachhaltig? Article présenté lors de la conférence VSA-Symposium le 14 août 2003 à Winthertur (uniquement en allemand).
- [29] Conseil-exécutif (2011): Wasserversorgungsstrategie 2010. Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du canton de Berne, Office des eaux et des déchets, Berne (uniquement en allemand).
- [30] Gander B. (2009): Klimaänderung und Wasserversorgungen – Informationen und Anpassungsstrategien. *GWA* 4: 241-249 (uniquement en allemand).
- [31] Cornel P., Bischoff A., Müller K., Düppenbecker B. (2012): Hygieneaspekte bei der Wasserwiederverwendung. Article présenté lors du BMBF Forum für Nachhaltigkeit, à Berlin, 23 octobre 2012 (uniquement en allemand).
- [32] Ten Veldhuis J. A. E., Clemens F. H. L. R., Sterk G., Berends B. R. (2010): Microbial risks associated with exposure to pathogens in contaminated urban flood water. *Water Research* 44 (9): 2910-2918 (uniquement en anglais).
- [33] OcCC, ProClim- (2007): Les changements climatiques et la Suisse en 2050. OcCC, ProClim-.
- [34] Ernst Basler & Partner (2007): Wasserwirtschaft Schweiz 2025. Herausforderungen und Handlungsmöglichkeiten. Ein Diskussionsbeitrag zur Zukunftsgestaltung. OFEV, Berne (uniquement en allemand).
- [35] Ernst Basler & Partner, umwelt:dialog, bio-eco (2012): Adaptation aux changements climatiques dans les villes suisses. Office fédéral de l'environnement, Division Climat, Section Rapports et adaptation.
- [36] Reichert P., Schuwirth N., Langhans S. D. (2011): MCWM – Ein Konzept für multikriterielle Entscheidungsunterstützung im Wassermanagement. *Eau énergie air* 103 (2): 139-147 (uniquement en allemand).
- [37] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Mauer M., Lienert J. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research* 49: 124-143 (uniquement en anglais).
- [38] Scholten L., Schuwirth N., Reichert P., Lienert J. (2014): Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis – An application to water supply infrastructure planning. *European*

- Journal of Operational Research (en cours d'impression, uniquement en anglais).
- [39] SSIge, OFEN (2004): Energie in der Wasserversorgung. EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen, Berne (uniquement en allemand).
- [40] Müller E. A., Schmid F., Kobel B. (2002): Wasserversorgungsunternehmen können Energiekosten senken. Energie Wasser Praxis 10: 32-37 (uniquement en allemand).
- [41] Smeets E., Weterings R. (1999): Environmental indicators: Typology and overview. EEA. Copenhagen (uniquement en anglais).
- [42] Borchardt D. (2013): Zunehmende Nutzungen wirken stärker auf Gewässer als der Klimawandel. Aqua & Gas 7/8: 10-14 (uniquement en allemand).
- [43] Moeck C., Baillieux A., Brunner P., Schirmer M., Hunkeler D. (en prép.): Hydrogeological modeling of climate change impacts on a small-scale aquifer (uniquement en anglais).
- [44] Moeck C., Brunner P., Hunkeler D. (en prép.): Predictive uncertainty of groundwater recharge rates caused by climate model chain variability and model simplification (uniquement en anglais).
- [45] Moeck C., Brunner P., Prasuhn V., Hunkeler D. (en prép.): Evaluating the effect of climate change on groundwater recharge for different crop types (uniquement en anglais).
- [46] Käser D., Hunkeler D. (en prép.): Contribution of alluvial groundwater to the outflow of mountainous catchments (uniquement en anglais).
- [47] ISSKA (2013): Toward a sustainable management of karst waters in Switzerland (SWISS-KARST project) – PNR 61 «Sustainable water management», Final Report. Institut suisse de spéléologie et de karstologie, La Chaux-de-Fonds. – Contracting authority: Swiss national science foundation (non publié, uniquement en anglais).
- [48] ISSKA (2011): Die Trinkwasserquelle Tarschlims (Flims, GR). Einzugsgebiet und Schutzzonen. Institut suisse de spéléologie et de karstologie, La Chaux-de-Fonds (non publié, uniquement en allemand).
- [49] OFEV (2012): «Evolution climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). Connaissance de l'environnement n° 1217: 76.
- [50] Diem S., Renard P., Schirmer M. (2013): New Methods to Estimate 2D Water Level Distributions of Dynamic Rivers. Ground Water 51 (6): 847-854 (uniquement en anglais).
- [51] Diem S., Schirmer M., Rudolf von Rohr M., Kohler H.-P. E., Hering J. G., von Gunten, U. (2013): Qualität des Uferfiltrats. Einfluss der klimabestimmten Variablen Temperatur und Abfluss. Aqua & Gas 93 (11): 14-21 (uniquement en allemand).
- [52] Diem S., Rudolf von Rohr M., Hering J. G., Kohler H.-P. E., Schirmer M., von Gunten U. (2013): NOM degradation during river infiltration: Effects of the climate variables temperature and discharge. Water Research 47 (17): 6585-6595 (uniquement en anglais).
- [53] Diem S., Renard P., Schirmer M. (2014): Assessing the effect of different river water level interpolation schemes on modeled groundwater residence times. Journal of Hydrology 510: 393-402 (uniquement en anglais).
- [54] Diem S., Cirpka O. A., Schirmer M. (2013): Modeling the dynamics of oxygen consumption upon riverbank filtration by a stochastic-convective approach. Journal of Hydrology 505: 352-363 (uniquement en anglais).
- [55] Schirmer M. (2013): Revitalisation des rivières, une mesure écologique dans un environnement complexe: le projet RECORD. Aqua & Gas 3: 22-28.
- [56] Jammet N. (2011): Caractérisation et suivi de la relation entre le canal d'Hagneck et les captages de Gimmiz (aquifère nord du Seeland) sous différentes conditions de pompage. MSc, Université de Neuchâtel.
- [57] Rudolf von Rohr M., Hering J. G., Kohler H.-P. E., von Gunten U. (2014): Column studies to assess the effects of climate variables on redox processes during riverbank filtration. Water Research 61: 263-275 (uniquement en anglais).
- [58] Bahnmüller S., von Gunten U., Canonica S. (2014): Sunlight-induced transformation of sulfadiazine and sulfamethoxazole in surface waters and wastewater effluents. Water research 57: 183-192 (uniquement en anglais).
- [59] Białk-Bielińska A., Stolte S., Arning J., Uebers U., Bösch A., Stepnowski P., Matzke M. (2011): Ecotoxicity evaluation of selected sulfonamides. Chemosphere 85 (6): 928-933. (uniquement en anglais)
- [60] Czekalski N., Berthold T., Caucci S., Egli A., Bürgmann H. (2012): Increased levels of multiresistant bacteria and resistance genes after wastewater treatment and their dissemination into Lake Geneva, Switzerland. Frontiers in Microbiology 3 (uniquement en anglais).
- [61] Czekalski N., Gascon Diez E., Bürgmann H. (2014): Wastewater as a point source of antibiotic-resistance genes in the sediment of a freshwater lake. ISME J 8 (7): 1381-1390 (uniquement en anglais).
- [62] Heuer H., Solehati Q., Zimmerling U., Kleinschmid K., Schloter M., Müller T., Focks A., Thiele-Bruhn S., Smalla K. (2011): Accumulation of Sulfonamide Resistance Genes in Arable Soils Due to Repeated Application of Manure Containing Sulfadiazine. Applied and Environmental Microbiology 77 (7): 2527-2530 (uniquement en anglais).
- [63] Canonica S., Freiburghaus M. (2001): Electron-rich phenols for probing the photochemical reactivity of freshwaters. Environmental Science & Technology 35 (4): 690-695 (uniquement en anglais).
- [64] Tixier C., Singer H. P., Canonica S., Müller S. R. (2002): Phototransformation of triclosan in surface waters: A relevant elimination process for this widely used biocide – Laboratory studies, field measurements, and modeling. Environmental Science & Technology 36 (16): 3482-3489 (uniquement en anglais).
- [65] Howe G. E., Marking L. L., Bills T. D., Rach J. J., Mayer F. L. (1994): Effects of water tempera-

- ture and pH on toxicity of the terbufos, trichlorfon, 4-nitrophenol and 2,4-dinitrophenol to the amphipod *gammarus-pseudolimnaeus* and rainbow-trout (*oncorhynchus-mykiss*) *Environmental Toxicology and Chemistry* 13 (1): 51-66 (uniquement en anglais).
- [66] Abegglen C., Siegrist H. (2012): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Office fédéral de l'environnement. Connaissance de l'environnement n° 1214 (uniquement en allemand).
- [67] Ort C., Hollender J., Schaerer M., Siegrist H. (2009): Model-Based Evaluation of Reduction Strategies for Micropollutants from Wastewater Treatment Plants in Complex River Networks. *Environmental Science & Technology* 43 (9): 3214-3220 (uniquement en anglais).
- [68] von Horn J., Jordi B. (2013): Abwasserentsorgung der Zukunft. *Aqua & Gas* 2: 16-23 (uniquement en allemand).
- [69] Hari R. E., Livingstone D. M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Guttinger H. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12 (1): 10-26 (uniquement en anglais).
- [70] North R. P., Livingstone D. M., Hari R. E., Koster O., Niederhauser P., Kipfer R. (2013): The physical impact of the late 1980s climate regime shift on Swiss rivers and lakes. *Inland Waters* 3 (3): 341-350 (uniquement en anglais).
- [71] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2013): Klima und Grundwasser. Rückblicke und Vorhersagen von Temperatur und Sauerstoff mittels historischer Aufzeichnungen. *Aqua & Gas* 7 (8): 28-33 (uniquement en allemand).
- [72] Figura S., Livingstone D. M., Hoehn E., Kipfer R. (2011): Regime shift in groundwater temperature triggered by the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters* 38 (23): L23401 (uniquement en anglais).
- [73] Lo T.-T., Hsu H.-H. (2010): Change in the dominant decadal patterns and the late 1980s abrupt warming in the extratropical Northern Hemisphere. *Atmos Sci Lett* 11: 210-215 (uniquement en anglais).
- [74] Rodionov S., Overland J. E. (2005): Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *Ices Journal of Marine Science* 62 (3): 328-332 (uniquement en anglais).
- [75] Figura S., Livingstone D. M., Kipfer R. (2014): Forecasting groundwater temperature with linear regression models using historical data. *Groundwater* (en cours d'impression, uniquement en anglais).
- [76] Rössler O., Addor N., Bernhard L., Figura S., Köplin N., Livingstone D. M., Schädler B., Seibert J., Weingartner R. (2014): Hydrological responses to climate change: river runoff and groundwater. Dans: CH2014 – Impacts toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, et ProClim: Berne. 57-68 (uniquement en anglais).
- [77] Figura S., Livingstone D. M., Kipfer R. (2013): Competing controls on groundwater oxygen concentrations revealed in multidecadal time series from riverbank filtration sites. *Water Resources Research* 49 (11): 7411-7426 (uniquement en anglais).
- [78] Gunawardhana L. N., Kazama S. (2012): Statistical and numerical analyses of the influence of climate variability on aquifer water levels and groundwater temperatures: The impacts of climate change on aquifer thermal regimes. *Global and Planetary Change* 86-87: 66-78 (uniquement en anglais).
- [79] Kurylyk B. L., Bourque C. P. A., MacQuarrie K. T. B. (2013): Potential surface temperature and shallow groundwater temperature response to climate change: an example from a small forested catchment in east-central New Brunswick (Canada). *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (7): 2701-2716 (uniquement en anglais).
- [80] MFR, ISSKA (2012): Analyse et interprétation des tendances physico-chimiques enregistrées dans le cadre de la surveillance qualitative des points d'eau du réseau hydrométrique de l'A16 (1989-2011). MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne, Delémont, La Chaux-de-Fonds. ISSKA Institut suisse de spéléologie et de karstologie, La Chaux-de-Fonds (non publié).
- [81] Lanz K., Rahn E., Stamm C. (2014): Flächenkonkurrenz zwischen Siedlungswachstum und Trinkwassergewinnung. Eawag-Auswertung einer Umfrage des SVGW bei den Wasserversorgern. http://library.eawag.ch/eawag-publications/openaccess/Eawag_08122.pdf (uniquement en allemand).
- [82] Kim J., Park J., Kim P.-G., Lee C., Choi K., Choi K. (2010): Implication of global environmental changes on chemical toxicity-effect of water temperature, pH, and ultraviolet B irradiation on acute toxicity of several pharmaceuticals in *Daphnia magna*. *Ecotoxicology* 19 (4): 662-669 (uniquement en anglais).
- [83] Souchon Y., Tissot L. (2012): Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* (405) (uniquement en anglais).
- [84] van Vliet M. T. H., Franssen W. H. P., Yearsley J. R., Ludwig F., Haddeland I., Lettenmaier D. P., Kabat P. (2013): Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions* 23 (2): 450-464 (uniquement en anglais).
- [85] Gu R. C., Montgomery S., Al Austin T. (1998): Quantification des effets du débit sur la température des rivières en été. *Hydrological Sciences Journal / Journal Des Sciences Hydrologiques* 43 (6): 885-904.
- [86] Zorn T. G., Seelbach P. W., Rutherford E. S. (2012): A regional-scale habitat suitability model to assess the effects of flow reduction on fish assemblages in Michigan streams.

- Journal of the American Water Resources Association 48 (5): 871-895 (uniquement en anglais).
- [87] Tendall D., Honti M., Gorski S., Stamm C. (en prép.): Catchment-scale Assessment of the Impacts of Climate Change, Irrigation and Shading on a River's Temperature Regime and Aquatic Biota (uniquement en anglais).
- [88] Honti M., Schuwirth N., Riekermann J., Ghielmetti N., Stamm C. (en prép.): Prediction of nutrient and organic micropollutant loads in streams under changing climatic, socio-economic and technical boundary conditions with an integrated transport model (uniquement en anglais).
- [89] Schuwirth N., Reichert P. (2013): Bridging the gap between theoretical ecology and real ecosystems: modeling invertebrate community composition in streams. *Ecology* 94 (2): 368-379 (uniquement en anglais).
- [90] Schuwirth N., Dietzel A., Reichert P. (en prép.): How to predict macroinvertebrate communities in streams: Application of the model Streambugs to the Glatt catchment on the Swiss Plateau (uniquement en anglais).
- [91] Schmidt-Kloiber A., Herung D. (2012): www.freshwaterecology.info – the taxa and autecology database for freshwater organisms, version 5.0 (uniquement en anglais).
- [92] Hutchins M. G., Johnson A. C., Deflandre-Vlandas A., Comber S., Posen P., Boorman D. (2010): Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: Reducing nutrient pollution or riparian shading? *Science of the Total Environment* 408 (21): 5065-5077 (uniquement en anglais).
- [93] Ormerod S. J., Dobson M., Hildrew A. G., Townsend C. R. (2010): Multiple stressors in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology* 55: 1-4 (uniquement en anglais).
- [94] Woodward G., Perkins D. M., Brown L. E. (2010): Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* 365 (1549): 2093-2106 (uniquement en anglais).
- [95] Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G. A., Winder M. (2009): Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography* 54 (6): 2283-2297 (uniquement en anglais).
- [96] Livingstone D. M. (2003): Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. *Climatic Change* 57 (1-2): 205-225 (uniquement en anglais).
- [97] Livingstone D. M. (1997): An example of the simultaneous occurrence of climate-driven "sawtooth" deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes. *Verh Internat Verein Limnol* 26 (2): 205-225 (uniquement en anglais).
- [98] Rempfer J., Livingstone D. M., Forster R., Blodau C. (2009): Response of hypolimnetic oxygen concentrations in deep Swiss perialpine lakes to interannual variations in winter climate. *Verh Internat Verein Limnol* 30 (5): 717-721 (uniquement en anglais).
- [99] Rempfer J., Livingstone D. M., Blodau C., Forster R., Niederhauser P., Kipfer R. (2010): The effect of the exceptionally mild European winter of 2006-2007 on temperature and oxygen profiles in lakes in Switzerland: A foretaste of the future? *Verh Internat Verein Limnol* 55 (5): 2170-2180 (uniquement en anglais).
- [100] Schär C., Vidale P. L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M. A., Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427 (6972): 332-336 (uniquement en anglais).
- [101] Jankowski T., Livingstone D. M., Bührer H., Forster R., Niederhauser P. (2006): Consequences of the 2003 European heat wave for lake temperature profiles, thermal stability, and hypolimnetic oxygen depletion: Implications for a warmer world. *Limnology and Oceanography* 51 (2): 815-819 (uniquement en anglais).
- [102] Peeters F., Livingstone D. M., Goudsmit G. H., Kipfer R., Forster R. (2002): Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnology and Oceanography* 47 (1): 186-197 (uniquement en anglais).
- [103] Livingstone D. M., Dokulil M. T. (2001): Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 46 (5): 1220-1227 (uniquement en anglais).
- [104] Straile D., Livingstone D. M., Weyhenmeyer G. A., George D. G. (2003): The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. eds. J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen and M. Visbeck. American Geophysical Union: 263-279 (uniquement en anglais).
- [105] Weyhenmeyer G. A., Adrian R., Gaedke U., Livingstone D. M., Maberly S.C. (2002): Response of phytoplankton in European lakes to a change in the North Atlantic Oscillation. *Verh Internat Verein Limnol* 28 (3): 1436-1439 (uniquement en anglais).
- [106] Peter A., Köster O., Schildknecht A., von Gunten U. (2009): Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters. *Water Research* 43 (8): 2191-2200 (uniquement en anglais).
- [107] Codd G., Bell S., Kaya K., Ward C., Beattie K., Metcalf J. (1999): Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. *European Journal of Phycology* 34 (4): 405-415 (uniquement en anglais).
- [108] Rodriguez E., Onstad G. D., Kull T. P. J., Metcalf J. S., Acero J. L., von Gunten U. (2007): Oxidative elimination of cyanotoxins: Comparison of ozone, chlorine, chlorine dioxide and permanganate. *Water Research* 41 (15): 3381-3393 (uniquement en anglais).

- [109] Peter A., von Gunten U. (2007): Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water. *Environmental Science & Technology* 41 (2): 626-631 (uniquement en anglais).
- [110] Pirbazari M., Ravindran V., Badriyha B. N., Craig S., McGuire M. J. (1993): GAC adsorber design protocol for the removal of off-flavors. *Water Research* 27 (7): 1153-1166 (uniquement en anglais).
- [111] Orłowsky B. (2012): Erwartete Zunahme von Starkniederschlägen in den kommenden Jahrzehnten in Mitteleuropa. Article présenté lors de la conférence Klimawandel und Extremereignisse, présentation, ETH Zurich, 8 mai 2012 (uniquement en allemand).
- [112] Milly P. C. D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R. M., Kundzewicz Z. W., Lettenmaier D. P., Stouffer R. J. (2008): Climate change – Stationarity is dead: Whither water management? *Science* 319 (5863): 573-574 (uniquement en anglais).
- [113] Egger C., Honti M., Maurer M. (2013): Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Siedlungsentwässerung. Article présenté lors de la conférence Aqua Urbanica 2013 – Gewässerschutz bei Regenwetter, à Dübendorf, 29 juillet 2013 (uniquement en allemand).
- [114] Fatichi S., Ivanov V. Y., Caporali E. (2012): On the search for vital details of climate change. Article présenté lors de la conférence 9th International Workshop on Precipitation in urban areas, Urban Challenges in Rainfall Analysis, à Saint-Moritz, 6 décembre 2012 (uniquement en anglais).
- [115] Maurer M., Lienert J. (2014): La durabilité des infrastructures dans un avenir incertain. *Eawag News* 2: 1-8.
- [116] Pronk M., Sinreich M., Guhl F., Egli T., Felleisen R., Koch M., Köster O., Rätz E., Ramseier C., Rossi P., Schürch N. (2010): Présence de microorganismes dans l'eau souterraine: un premier aperçu national. *GWA* 12: 1059-1071.
- [117] Vouillamoz J., Malard A., Schwab-Rouge G., Weber E., Jeannin P. Y. (2013): Mapping flood related hazards in karst using KAR-SYS approach. Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland). Article présenté dans le cadre de la 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, in Carlsbad, New Mexico, USA, Mai 2013 (uniquement en anglais).
- [118] Malard A., Jeannin P. Y., Sinreich M., Weber E., Vouillamoz J. (2014): Praxisorientierter Ansatz zur kartographischen Darstellung von Karst-Grundwasserressourcen – Erfahrungen aus dem SWISSKARST-Projekt. *Grundwasser* (en cours d'impression, uniquement en allemand).
- [119] Scheidegger A., Scholten L., Maurer M., Reichert P. (2013): Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes. *Water Research* 47 (11): 3696-3705 (uniquement en anglais).
- [120] Rieckermann J., Kracht O., Gujer W. (2003): Wie dicht ist unser Kanalnetz? *Eawag News* 57: 29-31 (uniquement en allemand).
- [121] Maurer A. M., Sturchler D. (2000): A waterborne outbreak of small round structured virus, campylobacter and shigella co-infections in La Neuveville, Switzerland, 1998. *Epidemiology and Infection* 125 (2): 325-332 (uniquement en anglais).
- [122] Waltham T., Bell F., Culshaw M. (2010): Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Berlin, Heidelberg (uniquement en anglais).
- [123] Scheidegger A., Hug T., Rieckermann J., Maurer M. (2011): Network condition simulator for benchmarking sewer deterioration models. *Water Research* 45 (16): 4983-4994 (uniquement en anglais).
- [124] Egger C., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Sewer deterioration modeling with condition data lacking historical records. *Water Research* 47 (17): 6762-6779 (uniquement en anglais).
- [125] Scholten L., Maurer M., Scheidegger A. (2014): Zustandsmodellierung kleiner Versorgungsnetze (Condition modeling of small water supply networks). *Aqua & Gas* 6: 51-58 (uniquement en allemand et en anglais).
- [126] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. *Environmental Modelling & Software* 42: 1-16 (uniquement en anglais).
- [127] Zheng J., Egger C., Lienert J. (en prép.): Multi-criteria decision analysis for water infrastructure planning incorporating stakeholders' preferences (uniquement en anglais).
- [128] Hillenbrand T., Niederste-Hollenberg J., Menger-Krug E., Klug S., Holländer R., Lautenschläger S., Geyley S. (2010): Demografischer Wandel als Herausforderung für die Sicherung und Entwicklung einer kosten- und ressourceneffizienten Abwasserinfrastruktur. Par ordre de l'Office fédéral de l'environnement, Berlin (uniquement en allemand).
- [129] Neunteufel R., Ertl T., Spindler A., Lukas A., Perfler R., Schwarz D., Zessner M., Haberl R. (2012): Technische Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Vienne (uniquement en allemand).
- [130] Weber M., Schild A. (2006): Etat de l'irrigation en Suisse. Rapport relatif au questionnaire 2006. Office fédéral de l'agriculture, Berne.
- [131] Stauer P., Ort C. (2012): Diffuse Einträge aus Siedlungen: Ergebnisse einer Situationsanalyse. *Aqua & Gas* 11: 42-50 (uniquement en allemand).

- [132] Lienert J., Schnetzer F., Ingold K. (2013): Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water (infrastructure planning processes). *Journal of Environmental Management* 125: 134-148 (uniquement en anglais).
- [133] Gianella S., Maurer M. (2006): Infrastrukturmanagement: Internationale Standortbestimmung für den Wasser- und Abwassersektor. *GWA* 9: 733-742 (uniquement en allemand).
- [134] Vollenweider S. (2011): Gestion des infrastructures communales: bilan et besoins à l'exemple du secteur de l'eau. *GWA* 5: 309-314.
- [135] SSIIGE (2010): W1007f. Recommandations. Prévention contre le sabotage des systèmes d'alimentation en eau potable. Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux, Zurich.
- [136] Hartmann D., Meylan B. (2013): Engpässen rechtzeitig vorbeugen. Résultats de l'étude «Approvisionnement en eau 2025». *Aqua & Gas* 9: 16-24 (uniquement en allemand).
- [137] Binggeli S., Dreyer J., Suter M., Kieliger T. (2014): Handbuch kommunales Infrastrukturmanagement. Ebauche de rapport du 31.01.2014. Organisation infrastructures communales, Agenda 21 pour l'eau, Berne (uniquement en allemand).
- [138] SSIIGE (2009): W1005d. Réglementation. Recommandation pour la planification stratégique de l'approvisionnement en eau potable. Société suisse des industries du gaz et des eaux, Zurich.
- [139] Maurer M. (2011): Die zukünftige Wasserinfrastruktur planen. *Eawag News* 70: 22-25 (uniquement en allemand).
- [140] Hostmann M., Borsuk M. E., Reichert P., Truffer B. (2005): Stakeholder values in decision support for river rehabilitation. *Archive d'hydrobiologie, supplément* 155 (1-4): 491-505 (uniquement en anglais).
- [141] Scholten L., Egger C., Zheng J., Lienert J. (2014): Multikriterielle Entscheidungsunterstützung. Neue Ansätze für langfristige Infrastrukturplanung in der Wasserver- und -entsorgung (Multicriteria decision support. New approaches for long-term water supply and wastewater infrastructure planning). *Aqua & Gas* 5: 62-69 (en allemand et en anglais).
- [142] Müller A., Meier T. (2014): Trinkwasser in Notlagen. Mobile Aufbereitungsanlagen von Trinkwasser. *Aqua & Gas* 3: 58-63 (uniquement en allemand).
- [143] SSIIGE (1995): W/VN300d. Wegleitung für die Planung und Realisierung der Trinkwasserversorgung in Notlagen. Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux, Zurich (uniquement en allemand).
- [144] Larsen T. A., Gujer W. (1996): Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology* 34 (3-4): 87-94 (uniquement en anglais).
- [145] Battaglia R. (2014): Regionalisierung der Abwasserreinigung. Wann ist die Regionalisierung sinnvoll? Erfahrung der letzten 10 Jahre im Kt. Bern. *Aqua & Gas* 1 (uniquement en allemand).
- [146] OFEV (2012): Gestion par bassin versant. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement* n° 1204.
- [147] OFEV (2013): Coordination des activités de gestion de l'eau. Office fédéral de l'environnement, Berne. *L'environnement pratique* 1311.
- [148] Natrup W. (2013): Raumplanung: Verstärkt dreidimensional. *Aqua & Gas* 1: 1-11 (uniquement en allemand).
- [149] Figura, S. (2013): The impact of climate change on groundwater temperature and oxygen concentration in Swiss aquifers. *ETH Diss. Nr. 21621* (uniquement en anglais).
- [150] SSIIGE (2003): W1002f. Réglementation. Recommandation pour la planification stratégique de l'approvisionnement en eau potable. Société suisse des industries du gaz et des eaux, Zurich.
- [151] Lienert J., Duygan M., Zheng J. (en prép.): Preference stability overtime using two methods to elicit MCDA-weights for wastewater infrastructure planning (uniquement en anglais).
- [152] www.ofev.admin.ch
- [153] Martin P. (2009): Valeur de remplacement de l'infrastructure environnementale. Tour d'horizon suisse. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement* n° 0920.
- [154] Wanner O. (2009): Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Série de publications de l'Eawag n° 19. Dübendorf (uniquement en allemand).
- [155] Hunkeler D., Käser D., Möck C., Brunner P. (en prép.) Klimaeinflüsse auf die Grundwasser-mengen in der Schweiz.

Equipes

Groupe de projet

- ▶ Daniel Hunkeler (CHYN)
- ▶ Max Maurer (Eawag)
- ▶ Sabine Hoffmann (Eawag)
- ▶ Michiel Pronk (CHYN) (anc.)

Equipe de la synthèse thématique [spécialistes du PNR 61]

- ▶ Pierre-Yves Jeannin (ISSK)
- ▶ Jan Seibert (Université de Zurich)
- ▶ Urs von Gunten (Eawag)
- ▶ David Livingstone (Eawag)
- ▶ Mario Schirmer (Eawag)
- ▶ Judit Lienert (Eawag)
- ▶ Christian Stamm (Eawag)

Groupe d'encadrement

- ▶ Martin Würsten (VSA, canton SO)
- ▶ Urs Kamm (SSIGE)
- ▶ Alex Bukowiecki (infrastructures communales)
- ▶ Heinz Habegger (canton BE)
- ▶ Jürg Suter (canton ZH)
- ▶ Pierre Christe (canton VS)
- ▶ Brigitta Gander (canton SZ, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)
- ▶ Bernhard Gyger (groupe de travail de la fédération hydraulique de la région de Berne)
- ▶ Andreas Frei (Uster)
- ▶ Dominique Bérod (OFEV, division Hydrologie)
- ▶ Marc Schürch (OFEV, division Hydrologie, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)
- ▶ Michael Schärer (OFEV, division Eaux)
- ▶ Federico Matousek (mbn AG, Baden, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)
- ▶ Alex Benz (Hunziker Betatech)
- ▶ Stefan Vollenweider (Agenda 21 pour l'eau)
- ▶ Edi Hoehn (anc. Eawag, PNR 61, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)

Remerciements

Cette synthèse ne serait jamais devenue réalité sans l'engagement remarquable de nombreux spécialistes aux niveaux local, cantonal et national. Nous remercions tout particulièrement les membres de notre groupe d'encadrement pour leur collaboration constructive et leurs remarques pertinentes sur les précédentes versions de ce rapport:

- ▶ Martin Würsten (VSA, canton SO)
- ▶ Urs Kamm (SSIGE)
- ▶ Anton Kilchmann (SSIGE)
- ▶ Alex Bukowiecki (infrastructures communales)
- ▶ Heinz Habegger (canton BE)
- ▶ Jürg Suter (canton ZH)
- ▶ Pierre Christe (canton VS)
- ▶ Brigitta Gander (canton SZ, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)
- ▶ Bernhard Gyger (groupe de travail de la fédération hydraulique de la région de Berne)
- ▶ Andreas Frei (Uster)
- ▶ Dominique Bérod (OFEV, division Hydrologie)
- ▶ Marc Schürch (OFEV, division Hydrologie,

groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)

- ▶ Michael Schärer (OFEV, division Eaux)
- ▶ Federico Matousek (mbn AG, Baden, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)
- ▶ Alex Benz (Hunziker Betatech)
- ▶ Stefan Vollenweider (Agenda 21 pour l'eau)
- ▶ Edi Hoehn (anc. Eawag, PNR 61, groupe de travail sur le climat et les eaux souterraines)

Nous remercions vivement les spécialistes du PNR 61 (équipe de la synthèse thématique) pour leur excellente collaboration, les discussions animées et leurs retours constructifs sur les précédentes versions de ce rapport:

- ▶ Pierre-Yves Jeannin (ISSKA, SWISSKARST)
- ▶ Jan Seibert (Université de Zurich, DROUGHT-CH)
- ▶ Urs von Gunten (Eawag, RIBACLIM)
- ▶ David Livingstone (Eawag, GW-TREND)
- ▶ Mario Schirmer (Eawag, RIBACLIM, GW-TREND)
- ▶ Judit Lienert (Eawag, SWIP)
- ▶ Christian Stamm (Eawag, IWAQA)

Nous remercions également tous nos post-doctorants et doctorants du PNR 61 qui ont largement participé à la conception de ce rapport grâce aux résultats de leurs recherches et à leurs remarques pertinentes:

- ▶ Daniel Käser (CHYN, GW-TREND)
- ▶ Christian Moeck (CHYN, GW-TREND)
- ▶ Danielle Tendall (EPF Zurich, AGWAM)
- ▶ Arnauld Malard (ISSKA, SWISSKARST)
- ▶ Mark Honti (Eawag, IWAQA)
- ▶ Nele Schuwirth (Eawag, IWAQA)
- ▶ Lisa Scholten (Eawag, SWIP)
- ▶ Christoph Egger (Eawag, SWIP)
- ▶ Jun Zheng (Eawag, SWIP)
- ▶ Simon Figura (Eawag, GW-TEMP)
- ▶ Sabrina Bahnmüller (Eawag, RIBACLIM)
- ▶ Samuel Diem (Eawag, RIBACLIM)
- ▶ Matthias Rudolf von Rohr (Eawag, RIBACLIM)

Nous remercions également le comité de direction du PNR 61, en particulier Günter Blösch et Franz Nobilis, le bureau de direction du PNR 61, en particulier Barbara Flückiger et Patricia Fry, ainsi que le Conseil consultatif du PNR 61 pour leur soutien constructif lors de l'élaboration de ce rapport. Enfin, nous souhaitons également remercier les auteurs des synthèses thématiques du PNR 61, Astrid Björnsen Gurung (synthèse thématique 1), Klaus Lanz et Eric Rahn (synthèse thématique 2) et Franziska Schmid (synthèse thématique 4), pour leur précieux concours dans le cadre des synthèses du PNR 61.

Annexe I

Démarche

Formulation des objectifs pour garantir une gestion durable des eaux urbaines

Les objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines ont été formulés sur la base du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61. Dans le cadre d'une approche participative comportant plusieurs niveaux, Lienert et al. (SWIP: 2014a) ont identifié les objectifs permettant de garantir de bonnes infrastructures d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées en Suisse. Les objectifs ont été analysés avec l'aide des spécialistes du PNR 61 lors de deux ateliers⁷ et complétés par les aspects inhérents à une gestion durable des eaux urbaines (cf. chapitre 3). Les objectifs ont servi de base pour l'évaluation de l'impact des différentes mesures.

Identification des défis

Les défis que pose une gestion durable des eaux urbaines ont tout d'abord été identifiés avec le concours des spécialistes du PNR 61 dans le cadre d'un atelier.¹⁷ Les résultats de l'atelier ont été complétés dans le cadre d'une recherche bibliographique exhaustive quant aux défis actuels et futurs de l'approvisionnement en eau et de l'évacuation des eaux usées en tenant compte des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines. Les spécialistes du PNR 61 et les membres du groupe d'encadrement ont ensuite évalué l'importance de chacun de ces défis avant de déterminer, sur cette base, les évolutions à analyser en priorité.

Le tableau 6 décrit les différents critères et leur degré d'importance respective dans le cadre de l'évaluation. En tout, l'évaluation a été réalisée par 7 spécialistes du PNR 61 et 15 membres du groupe d'encadrement. Le nombre de mentions par degré d'importance a été pondéré par les points correspondants et divisé par le nombre total d'évaluations. Le rapport de synthèse s'adressant aux spécialistes du domaine, les estimations fournies par les membres du groupe d'encadrement ont fait l'objet d'une pondération plus importante (pondération double). Les résultats de l'évaluation globale sont représentés dans le tableau 7. Les six défis les plus importants identifiés par les spécialistes du PNR 61 et par les membres du groupe d'encadrement sont

surlignés en orange, et les défis considérés comme importants par les auteurs en jaune. Par souci de concision, seuls les défis surlignés en couleur ont été analysés dans le présent rapport de synthèse. Le défi «Altération de la qualité de l'eau souterraine par l'agriculture» est traité dans la synthèse thématique 2 du PNR 61.

Analyse des rapports de causalité

L'analyse des rapports de causalité des défis actuels et futurs que pose une gestion durable des eaux urbaines a été réalisée à l'aide de l'approche DPSIR (acronyme pour Drivers, Pressures, State, Impact, Responses, Smeets et al. 1999). Cette approche permet d'analyser d'un point de vue causal les rapports entre les différents facteurs ayant une influence sur le système de gestion des eaux urbaines. L'analyse des rapports de causalité sert de base à l'élaboration de mesures en vue de garantir une gestion durable des eaux urbaines en Suisse.

Définition de mesures

La définition de mesures visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines s'est tout d'abord appuyée sur l'analyse des rapports de causalité. Les mesures ont ensuite été discutées avec des spécialistes du PNR 61 durant un atelier¹⁸ et complétées sur la base des résultats de leurs recherches et de leurs connaissances spécialisées. Les mesures ont ensuite été étayées en menant des recherches bibliographiques exhaustives.

Estimation des répercussions des possibilités d'action

L'estimation de l'impact des mesures sur l'atteinte de chacun des objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines a été réalisée par les spécialistes du PNR 61. Chaque mesure a été évaluée individuellement par trois spécialistes du PNR 61 dans le cadre d'entretiens. L'impact de chaque mesure sur les objectifs visant à garantir une gestion durable des eaux urbaines décrits dans le chapitre 3 a été mesuré comme suit: impact positif (+), négatif (-), positif et négatif (+/-) ou inexistant (o). Dans le cadre du projet de recherche «Planification à long terme d'infrastructures durables de distribution et de traitement de l'eau» du PNR 61 (SWIP: Lienert et al. 2014a), des attributs ont été définis pour les objectifs.¹⁶ L'évaluation a porté sur chacun de ces attributs. Pour tous les autres objectifs pour lesquels aucun attribut n'avait été défini, les

Tab. 6: critères et degrés d'importance utilisés pour l'évaluation des défis.

Critère	Importance			
Degré d'importance	très important	important	peu important	pas important
Points spécialistes / groupe d'encadrement	5/10	3/6	1/2	-1/-2

éventuelles modifications positives ou négatives ont été évaluées par rapport à la situation actuelle. L'évaluation a été réalisée en tenant compte des différences régionales de la Suisse.

Les résultats de l'estimation des spécialistes ont ensuite été évalués et transmis à l'équipe de la synthèse thématique. Les éventuelles divergences entre les évaluations individuelles des trois spécialistes (pour chaque mesure possible) ou entre les spécialistes et l'équipe chargée de la synthèse ont alors été discutées et clarifiées. Les évaluations ont ensuite été compilées afin d'obtenir une estimation globale des répercussions de mesures possibles sur les objectifs fondamentaux (cf. tab. 5). Une description détaillée des répercussions des mesures possibles sur les sous-objectifs est disponible ci-après. Les répercussions décrites correspondent aux meilleures connaissances actuelles des spécialistes du PNR 61.

Estimation des conséquences (évaluation)

L'impact des mesures proposées dans les domaines «Infrastructures», «Ressources en eau» et «Connaissances» sur les objectifs fixés en matière de gestion durable des eaux urbaines décrites dans le chapitre 3 est évalué sous l'angle qualitatif. L'on évalue l'impact positif (+), négatif (-) ou inexistant (o) de chacune des mesures sur les sept objectifs fondamentaux (1) «Equité intergénérationnelle élevée», (2) «Bonne protection des eaux», (3) «Bon approvisionnement en eau», (4) «Evacuation sûre des eaux usées», (5) «Acceptabilité sociale élevée», (6) «Faibles coûts» et (7) «Exploitation efficace des ressources». Par souci de concision, les sous-objectifs qui ne sont pas influencés par une mesure (o) ne sont pas présentés ici.

Les résultats de l'évaluation de chacune des mesures par les spécialistes du PNR 61 sont disponibles sous le lien suivant: www.pnr61.ch

Tab. 7: résultats de l'évaluation des défis que pose une gestion durable des eaux urbaines par les spécialistes du PNR 61 et les membres du groupe d'encadrement. Le nombre des mentions par degré d'importance (très important, important, peu important, pas important) a été pondéré en fonction des points correspondants (5, 3, 1, -1 pour les spécialistes du PNR 61, et 10, 6, 2 et -2 pour les membres du groupe d'encadrement) et divisé par le nombre total d'évaluations afin d'obtenir une évaluation globale.

Défis	5	3	1	-1	10	6	2	-2	Evaluation globale	Classement
	Importance pour les spécialistes				Importance pour le groupe d'encadrement					
	très important	important	peu important	pas important	très important	important	peu important	pas important		
Changement climatique										
(a) Augmentation des périodes de sécheresse	3	4			8	7			12,0	1
(b) Hausse des températures de l'eau		6	1		3	9	2		9,0	10
(c) Augmentation des fortes précipitations	2	3	2		5	7	3		9,5	6
(d) Augmentation des crues	3	2	2		4	8	3		9,6	5
Vieillesse des infrastructures										
(a) Planification à moyen et à long termes	3	4			7	7		1	11,2	2
(b) Professionnalisation, degré de centralisation	1	2	3		4	9	1		9,2	7
(c) Besoins en eau à l'avenir – conséquences pour l'approvisionnement en eau potable	3	2	2		3	8	4		9,0	10
(d) Gestion des infrastructures	2	4	1		6	8	1		10,6	3
Intensification de l'occupation du territoire										
(a) Altération de la qualité de l'eau souterraine par l'agriculture	2	3	1		5	7	2		10,2	4
(b) Impact de l'urbanisation sur la qualité de l'eau et la quantité disponible	3	2	1		5	3	7		9,1	8
(c) Prolifération microbienne affectant la qualité de l'eau	2	3	1		6	3	5	1	9,1	8
(d) Mise en œuvre insuffisante des plans de protection des eaux		5	1		2	11	2		8,7	12

Tab. 8: voir www.pnr61.ch Publications > Publications du PNR > Synthèse thématique 3

Mesures possibles dans le domaine des infrastructures

Infrastructures-1: promotion du «deuxième pilier»

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Promotion du «deuxième pilier»	+	+	+	o	+/-	-	+/-

- (1) Équité intergénérationnelle élevée (+):** la promotion du «deuxième pilier» pour garantir l'approvisionnement en eau implique une augmentation des coûts qui est cependant contrebalancée par le fait que la charge de réhabilitation n'est pas reportée sur les générations futures (o). Cette mesure améliore la capacité d'adaptation des infrastructures d'approvisionnement en eau aux changements des conditions-cadres (+) (p. ex. augmentation des périodes de sécheresse). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».
- (2) Bonne protection des eaux (+):** la promotion du «deuxième pilier» améliore la protection des eaux souterraines (+), car la charge des prélèvements d'eau est répartie sur différents sites et ressources. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) Bon approvisionnement en eau (+):** la promotion du «deuxième pilier» améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) Évacuation sûre des eaux usées (o):** la promotion du «deuxième pilier» n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Évacuation sûre des eaux usées».
- (5) Acceptabilité sociale élevée (+/-):** la promotion du «deuxième pilier» peut avoir un impact positif (+) ou négatif (-) sur l'autonomie des ressources en eau des communes. Tout dépend si le lieu de captage est situé à l'intérieur (+) ou à l'extérieur (-) de la commune. Conclusion: selon le cas, cette mesure a globalement un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) Faibles coûts (-):** la promotion du «deuxième pilier» implique une augmentation des coûts annuels (-), car l'exploitation de ressources en eau supplémentaires et indépendantes les unes des autres nécessite des conduits et des capacités supplémentaires. Conclusion: cette mesure a un impact négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) Exploitation efficace des ressources (+/-):** la promotion du «deuxième pilier» peut avoir un impact positif (+) ou négatif (-) sur l'exploitation efficace de l'énergie. Tout dépend si la mise à disposition des ressources supplémentaires en eau augmente (-) ou diminue (+) la consommation d'énergie. Conclusion: selon le cas, cette mesure a globalement un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Infrastructures-2: promotion de la gestion globale des infrastructures

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Promotion de la gestion globale des infrastructures	+	+	+	+	+/-	+/-	+

- (1) Équité intergénérationnelle élevée (+):** la promotion de la gestion globale des infrastructures a un impact positif sur la charge de réhabilitation future (+) et sur l'adaptation flexible du système (+), car elle implique le maintien à long terme des performances des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, ce quelles que soient les incertitudes liées à l'avenir. Conclusion: cette mesure a impact positif sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».
- (2) Bonne protection des eaux (+):** la promotion de la gestion globale des infrastructures a un impact positif sur la qualité chimique des eaux (+), car elle implique notamment une amélioration de l'état (p. ex. réduction des fuites de canalisations) et des performances des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées (p. ex. réduction des déversements d'eau de pluie et d'eaux résiduelles). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) Bon approvisionnement en eau (+):** la promotion de la gestion globale des infrastructures améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure a un

impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».

- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** la promotion de la gestion globale des infrastructures a un impact positif sur l'évacuation et le déversement hygiéniques des eaux usées dans les eaux de surface et les eaux souterraines (+) et sur la fiabilité du système d'évacuation (+), car elle implique notamment une amélioration de l'état (p. ex. réduction des fuites de canalisations) et des performances des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées (p. ex. réduction des déversements d'eau de pluie et d'eaux résiduaires). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/-):** la promotion de la gestion globale des infrastructures implique l'amélioration (a) de la collaboration entre les différents secteurs dans le cadre de la planification des travaux de construction et d'entretien des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées et (b) de la gestion des infrastructures. Cette mesure a dès lors un impact positif sur les objectifs visant à limiter les constructions inutiles (+) et à optimiser la qualité des activités de gestion et d'exploitation (+). En revanche, elle a un impact négatif sur le droit de regard de la population (-), l'implication de la population dans les processus de décision diminuant de pair avec le renforcement de la gestion globale des infrastructures. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** la promotion de la gestion globale des infrastructures peut avoir un impact positif (+) ou négatif (-) sur les coûts annuels. Elle a un impact négatif si les coûts ne sont pas reportés sur les générations futures et, par conséquent, augmentent (-). En revanche, elle a un impact positif lorsque l'on privilégie un entretien préventif, basé sur les risques, qui minimise les dommages et, partant, les coûts (+). Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+):** la promotion de la gestion globale des infrastructures permet d'optimiser l'efficacité énergétique. Elle a dès lors un impact positif sur l'objectif visant à garantir une exploitation efficace de l'énergie (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Infrastructures-3:

amélioration de la planification à moyen et à long termes

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible	1	2	3	4	5	6	7
Amélioration de la planification à moyen et à long termes	+	+	+	+	+	+/-	+

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+):** l'amélioration de la planification à moyen et à long termes a un impact positif sur la charge de réhabilitation future (+), car elle implique notamment l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies de réhabilitation proactives (plutôt que réactives et faisant suite à des problèmes). Elle a également un impact positif sur l'adaptation flexible du système (+), car les incertitudes relatives au changement climatique et aux évolutions socio-économiques futures sont explicitement prises en compte dans le cadre de la planification. Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** l'amélioration de la planification à moyen et à long termes a un impact positif sur la qualité chimique des eaux (+), car les futurs aspects de la protection des eaux sont explicitement pris en compte dans le cadre de la planification. Cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** la planification à moyen et à long termes permet d'optimiser l'approvisionnement en eau dans le cadre des objectifs fixés. Elle améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** la planification à moyen et à long termes permet d'optimiser l'évacuation des eaux usées dans le cadre des objectifs fixés. L'amélioration de la planification a dès lors un impact positif sur l'évacuation et le déversement des eaux usées dans les eaux de surface et les eaux souterraines (+) et sur la fiabilité du système d'évacuation des eaux (+), car elle implique notamment l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies de réhabilitation proactives pour les infrastructures vieillissantes. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+):** l'amélioration de la planification à moyen et à long termes implique une meilleure collaboration entre les différents secteurs dans le cadre de la planification des travaux de construction et d'entretien des infrastructures assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées, ainsi qu'une meilleure gestion des infrastructures. Cette mesure a dès lors un impact positif sur les objectifs «Limitation des constructions inutiles» (+)

et «Qualité élevée des activités de gestion et d'exploitation» (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».

(6) Faibles coûts (+/-): l'amélioration de la planification à moyen et à long termes a un impact à la fois positif (+) et négatif (-) sur l'objectif «Faibles coûts annuels». Selon le degré de détail, les coûts peuvent augmenter à court terme (-), mais diminuer à moyen et à long termes (+). A moyen et à long termes, la planification a un impact positif sur l'objectif de «Faible augmentation des coûts». Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».

(7) Exploitation efficace des ressources (+): l'amélioration de la planification à moyen et à long termes permet d'optimiser l'efficacité énergétique (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Infrastructures-4:

garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise	+	o	+	o	+/-	-	o

(1) Équité intergénérationnelle élevée (+): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise n'implique aucun report de la charge de réhabilitation sur les générations futures (o), mais permet au système d'approvisionnement en eau de s'adapter avec flexibilité (+) en temps de crise. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».

(2) Bonne protection des eaux (o): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (o).

(3) Bon approvisionnement en eau (+): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau» est atteint – au moins, en temps de crise.

(4) Evacuation sûre des eaux usées (o): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées» (o).

(5) Acceptabilité sociale élevée (+/-): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise implique une amélioration de la gestion des services compétents en la matière. Cette mesure a dès lors un impact positif sur l'objectif «Qualité élevée des activités de gestion et d'exploitation» (+). En revanche, elle a un impact négatif sur le droit de regard de la population (-), l'implication de la population dans les processus de décision diminuant avec la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».

(6) Faibles coûts (-): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise tend à augmenter les coûts annuels (-). Conclusion: cette mesure a un impact globalement négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».

(7) Exploitation efficace des ressources (o): la garantie de l'approvisionnement en eau potable en temps de crise n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources» (o).

Infrastructures-5:

promotion d'infrastructures flexibles

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Promotion d'infrastructures flexibles	+	+	+/o/-	+	+/-	+/-	+

(1) Équité intergénérationnelle élevée (+): la promotion d'infrastructures flexibles a un impact positif sur l'objectif visant à limiter autant que possible la charge de réhabilitation future (+), car il permettra de limiter potentiellement les coûts irrécupérables, liés à des infrastructures obsolètes ou inadaptées, répercutés sur les générations futures. Cette mesure a également un impact positif sur l'adaptation flexible des systèmes (+), car les systèmes décentralisés s'adaptent mieux au changement des conditions-cadres (économiques, écologiques et sociales). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».

(2) Bonne protection des eaux (+): la promotion d'infrastructures flexibles a un impact positif sur

la qualité chimique des eaux (+), car la mise en œuvre de systèmes décentralisés permet souvent d'atteindre des taux d'innovation plus élevés et de réagir ainsi plus rapidement aux nouvelles exigences en matière d'assainissement. Cette mesure a également un impact positif sur l'objectif visant à garantir un régime équilibré des eaux souterraines (+), car les systèmes décentralisés permettent de maintenir les ressources en eau dans le bassin versant d'origine ou d'améliorer les performances en matière d'exploitation des eaux. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental de «Bonne protection des eaux».

- (3) **Bon approvisionnement en eau (+/o/-)**: selon les systèmes décentralisés ou selon la qualité de l'eau brute, le procédé de traitement, le temps de séjour de l'eau dans le réseau et le type de matériel utilisé pour les canalisations et les réservoirs, le renforcement de la flexibilité des infrastructures peut avoir un impact positif ou négatif sur l'objectif visant à fournir de l'eau, dont la qualité hygiénique, microbiologique, chimique, physique et esthétique est irréprochable (+/-). L'impact peut être positif lorsque l'eau souterraine est utilisée comme source principale d'eau brute, car elle risque moins d'être exposée à la prolifération des bactéries et à une altération de l'odeur, du goût, de la couleur et de l'opacité. L'impact peut être négatif lorsque c'est l'eau de ruissellement qui est utilisée comme source principale d'eau brute. Il en résulte une altération de la qualité esthétique de l'eau qui nécessite une étape de traitement supplémentaire. Il n'est dès lors pas possible de déterminer avec précision si le renforcement de la flexibilité des infrastructures a un impact positif ou négatif sur l'objectif «Qualité élevée». Cependant, les infrastructures flexibles peuvent être conçues et dimensionnées de manière à garantir, selon les conditions d'exploitation données, le statu quo actuel en termes de qualité (o). L'impact de la mesure sur l'objectif «Fiabilité élevée» de l'approvisionnement en eau n'a pas pu être évalué par les spécialistes du PNR 61. Les répercussions sur l'objectif «Quantité élevée» sont considérées comme inexistantes (o). Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif, négatif ou inexistant sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+)**: la promotion d'infrastructures flexibles a un impact positif sur l'évacuation et le déversement hygiéniques des eaux usées dans les cours d'eau (+) et sur la fiabilité du système d'évacuation des eaux usées (+), car une évacuation plus lente des eaux usées provenant des zones urbaines entraîne une diminution (i) de la pollution des cours d'eau, (ii) de la fréquence de surcharge des systèmes d'évacuation des eaux et (iii) de l'exfiltration des eaux usées provenant des canalisations dans les sols insaturés. Le renforcement de la flexibilité des infrastructures permet d'améliorer le climat urbain (+) et d'augmenter les fonctions esthétique et récréative des cours d'eau (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/-)**: la promotion d'infrastructures flexibles a un impact négatif sur les objectifs «Limitation de l'investissement en temps» (-) et «Limitation de l'investissement spatial» (-). En effet, les systèmes décentralisés en particulier sont souvent installés chez les consommateurs qui sont dès lors responsables de leur entretien et de leur exploitation. Cependant, la mesure a un impact positif sur l'objectif «Limitation des constructions inutiles» (+), car le renforcement de la flexibilité des infrastructures permet de réduire les travaux nécessaires. Elle a également un impact positif sur l'objectif «Large droit de regard» (+), car les consommateurs sont souvent impliqués dans la planification des systèmes locaux, ainsi que sur l'objectif «Autonomie élevée des ressources en eau» (+), car les lieux de captage sont souvent situés au sein d'une commune. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et/ou négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-)**: selon le système, la promotion d'infrastructures flexibles peut avoir un impact positif (+) ou négatif (-) sur les coûts annuels. Comme les systèmes décentralisés s'adapteront progressivement aux évolutions futures, cette mesure aura un impact positif (+) sur l'objectif «Faible augmentation des coûts». Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+)**: la promotion d'infrastructures flexibles, en particulier la mise en œuvre de mesures à la source (séparation de l'urine et récupération de phosphore), a un impact positif sur la récupération des substances nutritives (+). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Infrastructures-6: promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible

Promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP

	1	2	3	4	5	6	7
	-	+	o	+	+/-	+/-	+/-

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (-)**: la promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP n'implique aucun report de la charge financière liée à la réhabilitation sur les généra-

- tions futures (o). En revanche, la fusion des STEP diminue la capacité d'adaptation des systèmes d'évacuation des eaux usées (-). Conclusion: la fusion des STEP (mais pas leur remise en état) a un impact globalement négatif sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** la promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP a un impact positif sur la qualité chimique et biologique des eaux de surface et sur l'état trophique des lacs (+), car la remise en état et/ou la fusion des STEP permet d'optimiser la capacité d'assainissement et ce faisant, de réduire la pollution des eaux de surface. En cas d'infiltration des eaux de surface dans les eaux souterraines, l'amélioration de la qualité chimique des eaux de surface se répercute aussi sur la qualité chimique et les communautés microbiennes des eaux souterraines (biocénose) (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) **Bon approvisionnement en eau (o):** la promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** la promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP a un impact positif sur l'évacuation et le déversement des eaux usées dans les eaux de surface et les eaux souterraines (+), car la remise en état et/ou la fusion ciblée des STEP permet d'augmenter la capacité d'assainissement et ce faisant, de réduire la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines. Cela a également un impact positif sur la fonction récréative des cours d'eau (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/-):** la promotion de la remise en état et/ou de la fusion des STEP a un impact positif sur la qualité de la gestion et de l'exploitation (+), car la fusion des stations d'épuration se traduit souvent par une professionnalisation de leur activité. En revanche, cette mesure a un impact négatif sur le droit de regard de la population (-), car la fusion des STEP diminue souvent l'implication de la population dans les processus de décision. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** la promotion de la remise en état des STEP augmente les coûts annuels (-), alors que la fusion des STEP les diminue dans certains cas (+). Conclusion: la remise en état des STEP a un impact négatif (-) sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» tandis que la fusion des STEP a, dans certains cas, un impact positif (+).
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+/-):** le regroupement des STEP a un impact positif sur la récupération des substances nutritives (+), car les grandes stations d'épuration sont mieux équipées pour récupérer les substances nutritives. Selon la situation, elle peut avoir un impact positif (installations de grande envergure), mais également négatif (capacités supplémentaires de pompage) sur la consommation d'énergie (+/-). L'amélioration des STEP qui prévoit la mise en place d'étapes de traitement supplémentaires pour éliminer les polluants organiques a un impact négatif sur l'objectif «Exploitation efficace de l'énergie» (-). Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources» (+/-).

Infrastructures-7: promotion des systèmes de drainage urbains durables (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS)	+	+/-	o	+	+/-	+/-	+

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+):** la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) a un impact positif sur l'adaptation flexible des systèmes (+), car ils déchargent les systèmes d'évacuation des eaux. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+/-):** la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) a un impact positif sur la qualité chimique et biologique des cours d'eau et des lacs (+) grâce à l'épuration d'une plus grande quantité d'eaux de pluie et d'eaux résiduares. En revanche, la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) peut avoir un impact négatif sur la qualité chimique des eaux souterraines (-), car la pollution peut augmenter sous l'effet de l'infiltration des eaux de pluie. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+/-).
- (3) **Bon approvisionnement en eau (o):** la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) a un impact positif sur l'évacuation et le déversement hygiéniques des eaux usées dans les cours d'eau (+) et sur la fiabilité du système d'évacuation des eaux (+), car les SUDS permettent de

diminuer la quantité d'eau s'écoulant dans les canalisations, de prolonger la durée d'écoulement et, par conséquent, de réduire la pollution des cours d'eau et des lacs (grâce à une diminution de la variabilité des quantités d'eaux usées traitées dans les stations d'épuration). La mesure a également un impact positif sur le climat urbain (+), car la végétalisation et l'intégration de surfaces et de cours d'eau ouverts dans les zones urbaines minimisent la hausse de la température de l'air et la baisse de l'humidité de l'air en été tout en augmentant la fonction récréative de l'eau (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».

- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/-)**: la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) a un impact négatif sur les objectifs «Limitation de l'investissement en temps» (-) et «Limitation de l'investissement spatial» (-), car, selon le type de SUDS, ceux-ci sont installés chez les consommateurs qui sont alors coresponsables de leur entretien et de leur exploitation. La mesure a un impact positif sur l'objectif «Limitation des constructions inutiles» (+), car la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) permet de continuer d'utiliser les capacités existantes et d'éviter ainsi des travaux de construction inutiles. Elle a aussi un impact positif sur l'objectif «Large droit de regard» (+), car les consommateurs sont parfois impliqués dans la planification des SUDS (espaces verts, bassins de rétention des eaux de ruissellement, etc.). Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-)**: la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) peut, selon le type de système utilisé, avoir un impact positif ou négatif sur les objectifs de «Coûts annuels bas» et «Faible augmentation des coûts». Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+)**: la promotion des systèmes de drainage urbains durables (SUDS) a un impact positif sur l'objectif visant à garantir une exploitation efficace de l'énergie (+), car la quantité d'eau traitée par les STEP est inférieure, ce qui diminue la consommation énergétique nécessaire au transport et à l'épuration des eaux usées. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Mesures possibles dans le domaine des ressources en eau

Ressources en eau-1:

amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible

Amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines

1	2	3	4	5	6	7
+	+	+	o	+	+/-	+

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+)**: l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines a un impact positif sur la future charge de réhabilitation (+), car la définition de zones de protection des eaux souterraines permet de garantir à long terme la qualité et la quantité des ressources en eaux souterraines de la Suisse. La mesure a également un impact positif sur l'adaptation flexible des systèmes (+), car la définition de zones de protection des eaux souterraines garantit l'adaptation flexible des futurs systèmes assurant l'approvisionnement en eau. Conclusion: cette mesure contribue à l'atteinte de l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+)**: l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines a un impact positif sur le régime, la qualité chimique et la communauté microbienne (biocénose) des eaux souterraines tout en maintenant leur température à un niveau proche de l'état naturel (+). En cas d'exfiltration des eaux souterraines vers les eaux de surface, l'amélioration de la qualité chimique des eaux souterraines se répercute aussi sur celle des cours d'eau et des lacs (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+)**: l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure contribue à l'atteinte de l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (o)**: l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+)**: l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines a un impact positif sur l'objectif «Autonomie élevée des

ressources en eau» (+), car la définition de zones et de régions de protection des eaux souterraines permet de garantir à long terme les ressources au niveau local. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».

- (6) **Faibles coûts (+/-):** l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines a un impact positif (+) et négatif (-) sur l'objectif «Coûts annuels bas»: elle a un impact négatif (-) à court terme, lorsque les restrictions d'utilisation doivent être compensées et que des terres doivent parfois être dézonées ou acquises par les exploitants (-). En revanche, son impact est positif (+) sur le long terme dans la mesure où, grâce à la définition de zones de protection, il n'y a pas lieu de lever des fonds supplémentaires pour le captage et le traitement de l'eau potable à partir de sources éloignées. Conclusion: cette mesure a un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+):** l'amélioration de la mise en œuvre des mesures d'organisation du territoire relative aux eaux souterraines a un impact positif sur une exploitation efficace de l'énergie (+), car les eaux souterraines d'excellente qualité peuvent être utilisées sans traitement préalable ou avec un traitement mineur. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Ressources en eau-2:

promotion de la planification de la gestion des ressources en eau

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Promotion de la planification de la gestion des ressources en eau	+	+	+	o	+/o	?	o

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+):** la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau a un impact positif sur la future charge de réhabilitation (+), car une planification de la gestion des ressources permet de résoudre des conflits actuels et futurs liés aux ressources en eau. Dès lors, la charge financière inhérente à la mise à disposition d'eau dans la qualité requise et en quantité suffisante n'est pas reportée sur les générations futures. La mesure a également un impact positif sur l'adaptation flexible des systèmes (+), car la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau implique la garantie à long terme des sites de captage d'eau. Conclusion: cette mesure contribue à l'atteinte de l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+), car un plan de gestion global inclut des mesures de protection des eaux adaptées à chacune des utilisations.
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau améliore la sécurité de l'approvisionnement, garantissant ainsi un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (o):** la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/o):** selon les mesures concrètes définies dans le plan de gestion, la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau peut (potentiellement) avoir un impact positif sur les objectifs «Limitation des constructions inutiles» (+/o) et «Qualité élevée des activités de gestion et d'exploitation» (+/o). Il en est de même pour les objectifs «Autonomie élevée des ressources en eau» et «Large droit de regard». Conclusion: cette mesure peut (potentiellement) avoir un impact positif sur l'objectif global «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (?):** les spécialistes du PNR 61 ne peuvent pas évaluer l'impact du renforcement de la planification de la gestion des ressources en eau sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** la promotion de la planification de la gestion des ressources en eau n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Ressources en eau-3:

considération des enjeux régionaux et globaux

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Considération des enjeux régionaux et globaux	+	+/o	+/o	+/o	+	+/-	o

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+):** une considération des enjeux régionaux et globaux a un impact positif sur la future charge de réhabilitation (+) et sur l'adaptation flexible des systèmes

(+), car il est possible de profiter des synergies entre les différents fournisseurs locaux (p. ex. réservoirs communs, amélioration du principe de redondance). Conclusion: cette mesure contribue à l'atteinte de l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».

- (2) **Bonne protection des eaux (+/o):** une considération des enjeux régionaux et globaux a (potentiellement) un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+/o), selon les trade-offs pris en compte dans le cadre de la confrontation des différents objectifs et des enjeux régionaux et globaux. De manière générale, la considération des enjeux régionaux et globaux augmente l'éventail des mesures possibles de manière à faire émerger une solution de compromis souvent adaptée à l'une des situations locales (p. ex. délocalisation d'une STEP régionale vers un cours d'eau plus approprié ou l'amélioration de la réception des travaux effectués sur les installations d'infiltration).
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+/o):** une considération des enjeux régionaux et globaux a (potentiellement) un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau» (+/o), selon les trade-offs pris en compte dans le cadre de la confrontation des différents objectifs et des enjeux régionaux et globaux. Conclusion: cette mesure n'a qu'un impact modéré sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Évacuation sûre des eaux usées (+/o):** une considération des enjeux régionaux et globaux a (potentiellement) un impact positif sur l'objectif fondamental «Évacuation sûre des eaux usées» (+/o), selon les trade-offs pris en compte dans le cadre de la confrontation des différents objectifs et des enjeux régionaux et globaux. Conclusion: cette mesure n'a qu'un impact modéré sur l'objectif fondamental «Évacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+):** une considération des enjeux régionaux et globaux a un impact positif sur l'objectif de «Limitation des constructions inutiles» (+), car elle encourage la collaboration entre différents secteurs. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** une considération des enjeux régionaux et globaux peut avoir un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+/-), selon les trade-offs pris en compte dans le cadre de la confrontation des différents objectifs et des enjeux régionaux et globaux.
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** une considération des enjeux régionaux et globaux n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Ressources en eau-4:

Amélioration de la coordination horizontale et verticale entre les autorités

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Amélioration de la coordination horizontale et verticale entre les autorités	+/o	+/o	+/o	+/o	+	+/-	o

- (1) **Équité intergénérationnelle élevée (+/o):** l'amélioration de la coordination horizontale et verticale entre les autorités peut (potentiellement) avoir un impact positif sur la future charge de réhabilitation (+/o), car elle ouvre la voie à des procédures harmonisées et à des décisions transparentes. Conclusion: cette mesure a (potentiellement) un impact positif sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+/o):** l'amélioration de la coordination peut (potentiellement) avoir un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+/o), car les conflits de protection et d'exploitation sont traités par les autorités. En voici quelques exemples: protection contre les crues et revitalisation versus protection de l'eau potable captée par filtration des berges ayant un impact sur les objectifs «Etat écomorphologique» des cours d'eau et «Bonne qualité chimique» des eaux souterraines; exploitation versus protection des aquifères ayant un impact sur les objectifs «Bonne qualité chimique» et «Température proche de l'état naturel».
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+/o):** l'amélioration de la coordination peut (potentiellement) avoir un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau» (+/o), car les conflits de protection et d'exploitation sont traités en premier lieu par les autorités. En voici un exemple: protection contre les crues et renaturation versus protection de l'eau potable captée par filtration des berges.
- (4) **Évacuation sûre des eaux usées (+/o):** l'amélioration de la coordination peut (potentiellement) avoir un impact positif sur l'objectif fondamental «Évacuation sûre des eaux usées» (+/o). En voici quelques exemples: mise sur pied de solutions plus durables à long terme en ce qui concerne le déversement des eaux usées dans les zones urbaines (p. ex. SUDS, cf. chapitre 5.1.); l'amélioration de la coordination entre les services chargés de l'aménagement du territoire et ceux chargés de l'assainissement urbain a un impact sur les objectifs «Évacuation et déversement hygiéniques des eaux usées dans les eaux de surface et les eaux souterraines», «Fiabilité du système d'évacuation des eaux», «Bon microclimat urbain» et «Bonne fonction récréative des cours d'eaux».

- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+):** l'amélioration de la coordination a un impact positif sur les objectifs «Limitation des constructions inutiles» (+) et «Qualité élevée des activités de gestion et d'exploitation», car elle implique une optimisation de la collaboration entre les différents secteurs. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** l'amélioration de la coordination peut avoir un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+/-): positif, si les investissements sont optimisés et donc réduits (+); négatif, s'il est nécessaire de déployer de nouveaux investissements (-) qui n'avaient pas été réalisés auparavant en raison d'un manque de coordination.
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** l'amélioration de la coordination n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

**Ressources en eau-5:
amélioration de l'aménagement du territoire**

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Amélioration de l'aménagement du territoire	+	+	+	+/o	+/-	+/-	o

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (+):** l'amélioration de l'aménagement du territoire a un impact positif sur la future charge de réhabilitation (+) et sur l'adaptation flexible des systèmes (+), car il permet d'éviter des mesures d'assainissement coûteuses et de garantir durablement la sécurité juridique. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** l'amélioration de l'aménagement du territoire a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+), car une mise en œuvre cohérente de la protection des eaux au moyen de mesures d'aménagement du territoire (p. ex. extension du champ d'application de l'aire d'alimentation des dangers agricoles à d'autres types de dangers) permet de remédier à une altération de la qualité des eaux souterraines, notamment due à la présence de polluants mobiles difficilement biodégradables.
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** l'amélioration de l'aménagement du territoire a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau» (+), car une mise en œuvre cohérente de la protection des cours d'eau au moyen de mesures d'aménagement du territoire permet de protéger l'eau captée en vue de l'approvisionnement en eau potable contre différents facteurs susceptibles d'altérer sa qualité.
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+/o):** l'amélioration de l'aménagement du territoire peut (potentiellement) avoir un impact positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées» (+/o). C'est avant tout l'espace disponible et la densité de population qui déterminent les performances d'évacuation des eaux urbaines.
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+/-):** l'amélioration de l'aménagement du territoire implique une amélioration de la collaboration entre la Confédération, les cantons et les communes, mais également entre différents secteurs (p. ex. approvisionnement en eau et évacuation des eaux usées). Cette mesure a dès lors un impact positif sur les objectifs «Limitation des constructions inutiles» (+) et «Qualité élevée des activités de gestion et d'exploitation» (+). Elle peut en outre avoir un impact positif ou négatif (+/-) sur les objectifs «Limitation de l'investissement en temps» et «Limitation de l'investissement spatial», «Large droit de regard» et «Autonomie élevée des ressources en eau» selon les mesures planifiées et les modalités de leur mise en œuvre. Conclusion: cette mesure a globalement un impact positif ou négatif (+/-) sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** l'amélioration de l'aménagement du territoire peut avoir un impact positif ou négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+/-): positif, lorsqu'une coordination suprasectorielle des activités déterminantes pour l'aménagement du territoire peut améliorer la qualité de l'eau et, partant, réduire éventuellement les coûts de traitement de l'eau (+); négatif si elle s'accompagne de restrictions d'utilisation qui doivent être compensées (-).
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** l'amélioration de l'aménagement du territoire n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Mesures possibles dans le domaine des connaissances

Connaissances-1:

amélioration des bases décisionnelles

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible	1	2	3	4	5	6	7
Amélioration des bases décisionnelles	o	+	+	+	+	+	o

- (1) Équité intergénérationnelle élevée (o):** l'amélioration des bases décisionnelles n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».
- (2) Bonne protection des eaux (+):** des données fiables et une vision globale des ressources en eau d'une région (quantité, qualité) constituent une condition pour pouvoir planifier et mettre en œuvre des mesures adaptées pour une planification de la gestion durable des ressources en eau. Conclusion: l'amélioration des bases décisionnelles a un impact globalement positif sur l'objectif «Bonne protection des eaux».
- (3) Bon approvisionnement en eau (+):** des données fiables et une vision globale de l'état de l'approvisionnement en eau et des infrastructures y afférentes constituent une condition pour assurer durablement l'approvisionnement en eau et ce, en garantissant un approvisionnement fiable (+) ainsi qu'une eau en quantité suffisante (+) et d'excellente qualité (+). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) Evacuation sûre des eaux usées (+):** des données fiables et une vision globale de l'état de l'approvisionnement en eau et des infrastructures y afférentes constituent une condition pour assurer durablement l'approvisionnement en eau et garantir une évacuation et un déversement hygiéniques des eaux usées dans les cours d'eau (+) ainsi qu'une évacuation sûre des eaux usées (+). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) Acceptabilité sociale élevée (+):** l'amélioration des bases décisionnelles a un impact positif sur la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées (+), car des données fiables et une vision globale de l'état des systèmes constituent un préalable à des décisions fondées. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif.
- (6) Faibles coûts (+):** l'amélioration des bases décisionnelles (p. ex. coordination des bases et de la collectes de données) ont un impact positif sur les objectifs «Coûts annuels bas» et «Faible augmentation des coûts», car elle permet d'éviter de réaliser des investissements inappropriés. Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts».
- (7) Exploitation efficace des ressources (o):** l'amélioration des bases décisionnelles n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Connaissances-2:

monitoring

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible	1	2	3	4	5	6	7
Monitoring	o	+	+	+	+	+/-	o

- (1) Équité intergénérationnelle élevée (o):** le monitoring n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Équité intergénérationnelle élevée».
- (2) Bonne protection des eaux (+):** le monitoring est nécessaire pour pouvoir détecter de manière précoce les changements sur le long terme, engager en temps utile les mesures requises et contrôler leur efficacité (p. ex. présence de polluants dans les cours d'eau suite au déversement des eaux usées, modifications induites par le changement climatique des conditions d'oxydoréduction au niveau des zones de filtration des berges). Conclusion: cette mesure a un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».
- (3) Bon approvisionnement en eau (+):** le monitoring est nécessaire pour pouvoir détecter de manière précoce les changements sur le long terme affectant les ressources en eau utilisées pour l'approvisionnement en eau potable (qualité, quantité), engager en temps utile les mesures requises et contrôler leur efficacité (p. ex. modifications induites par le changement climatique des conditions d'oxydoréduction au niveau des zones de filtration des berges). Dès lors, le monitoring a un impact positif sur les objectifs «Qualité élevée de l'eau» et «Quantité élevée». Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) Evacuation sûre des eaux usées (+):** le monitoring est nécessaire pour pouvoir détecter de manière précoce les changements relatifs à la qualité des eaux usées épurées, engager en temps utile les mesures requises et contrôler leur efficacité. Dès lors, le monitoring a un impact positif

sur l'objectif «Evacuation et déversement hygiéniques des eaux usées dans les cours d'eau» (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».

- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+):** le monitoring a un impact positif sur la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux usées (+), car des données fiables sur le long terme constituent un préalable à des décisions fondées. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+/-):** le monitoring a un impact positif et négatif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+/-): négatif, car le maintien et l'amélioration des systèmes de monitoring existants et la conception de nouveaux systèmes de monitoring représentent un coût (-); positif, car le monitoring permet de déceler les problèmes de manière précoce et d'engager en temps utile les mesures requises qui augmentent les coûts à court terme (-) mais permettent de réaliser des économies à long terme (+).
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** le monitoring n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

**Connaissances-3:
amélioration de l'intégration des connaissances, promotion de l'échange
de connaissances et d'expériences**

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Amélioration de l'intégration des connaissances, promotion de l'échange de connaissances et d'expériences	o	+	+	+	+	+	+

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (o):** cette mesure n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact globalement positif sur l'objectif «Bonne protection des eaux» (+).
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact globalement positif sur l'objectif «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact globalement positif sur l'objectif «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact positif sur la gestion des systèmes assurant l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées (+), car elle permet de prendre des décisions sur la base d'informations cohérentes et étayées. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+), car elle permet de tirer les enseignements des erreurs et d'éviter de réaliser des investissements inappropriés.
- (7) **Exploitation efficace des ressources (+):** l'amélioration de l'intégration des bases de données et de connaissances existantes ainsi que la promotion de l'échange de connaissances et d'expériences ont un impact positif sur l'objectif «Exploitation efficace des ressources» (+), car elle permet de mettre en œuvre plus rapidement et plus efficacement des mesures pour la récupération des ressources et l'optimisation énergétique.

**Connaissances-4:
examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels**

Mesure possible	Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines						
	1	2	3	4	5	6	7
Examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels	o	+	+	o	o	o	o

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (o):** cette mesure n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels a un impact positif sur la protection des cours d'eau (+) et sur les eaux souterraines (+), lorsque les

réservoirs sont utilisés pour (a) garantir le débit des cours d'eau durant les périodes de sécheresse ou (b) réguler le régime et la qualité chimique des eaux souterraines. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux».

- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels a un impact positif sur l'approvisionnement en eau en quantité suffisante (+) et dans la qualité requise (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (o):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (o):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (o):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Faibles coûts». Si les coûts augmentent à court terme, l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels peut permettre de réaliser des économies à moyen terme.
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** l'examen du potentiel des réservoirs d'eau naturels et artificiels n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Connaissances-5: amélioration de la compréhension des processus

Objectifs d'une gestion durable des eaux urbaines

Mesure possible

Amélioration de la compréhension des processus

	1	2	3	4	5	6	7
	o	+	+	+	o	+	o

- (1) **Equité intergénérationnelle élevée (o):** cette mesure n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Equité intergénérationnelle élevée».
- (2) **Bonne protection des eaux (+):** l'amélioration de la compréhension des processus a généralement un impact positif sur l'objectif fondamental «Bonne protection des eaux» (+), car une bonne compréhension des processus permet de planifier et de mettre en œuvre des mesures pour améliorer la protection des eaux.
- (3) **Bon approvisionnement en eau (+):** l'amélioration de la compréhension des processus a un impact positif sur l'approvisionnement en eau en quantité suffisante (+) et dans la qualité requise (+). Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Bon approvisionnement en eau».
- (4) **Evacuation sûre des eaux usées (+):** l'amélioration de la compréhension des processus a un impact positif sur l'évacuation et le déversement des eaux usées dans les cours d'eau (+) et sur la fiabilité élevée du système d'évacuation (+). A cet égard, les connaissances relatives aux effets à court terme des polluants provenant des eaux de ruissellement jouent un rôle central. Conclusion: cette mesure a un impact globalement positif sur l'objectif fondamental «Evacuation sûre des eaux usées».
- (5) **Acceptabilité sociale élevée (o):** l'amélioration de la compréhension des processus n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Acceptabilité sociale élevée».
- (6) **Faibles coûts (+):** l'amélioration de la compréhension des processus a un impact positif sur l'objectif fondamental «Faibles coûts» (+), car cette mesure diminue le risque de réaliser des investissements inappropriés.
- (7) **Exploitation efficace des ressources (o):** l'amélioration de la compréhension des processus n'a aucun impact sur l'objectif fondamental «Exploitation efficace des ressources».

Annexe II

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.pnr.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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

P^r D^r Wilfried Haeberli

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.

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.

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.

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.

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.

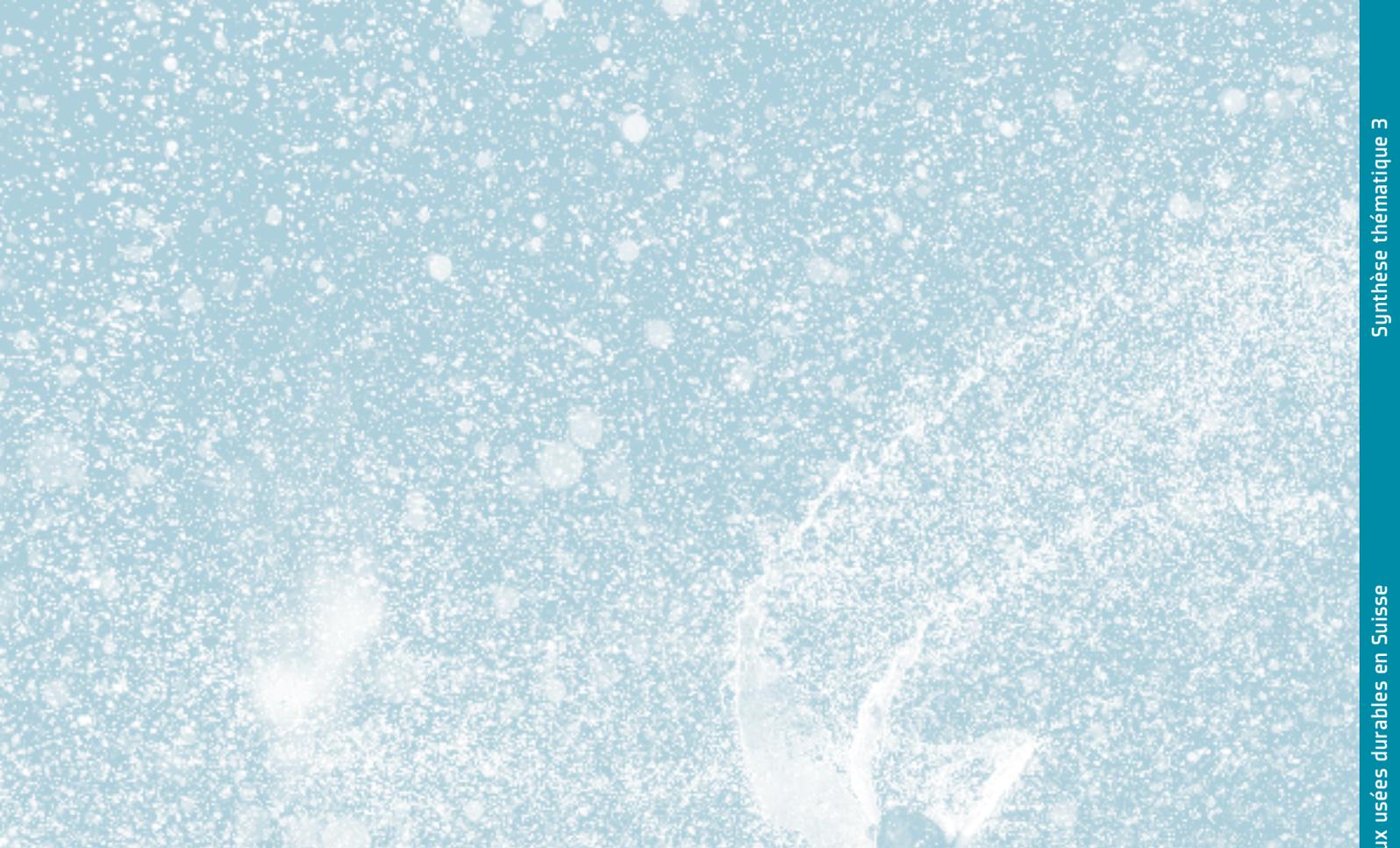
Potentiels et limites de la production de savoir transdisciplinaire au sein des projets de recherche du PNR 61

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 présente synthèse thématique examine les défis actuels et futurs qui se posent pour garantir une gestion durable des eaux urbaines en Suisse. L'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées sont considérés comme un système global qui sera analysé en tenant compte des ressources en eaux souterraines et en eaux de surface. L'analyse se concentre sur les rapports de causalité, la formulation d'objectifs de développement durable, l'élaboration de mesures possibles et l'évaluation de leurs répercussions.

Les défis sont multiples. S'ils ne sont pas nouveaux, ils sont toutefois réinterprétés à l'aune des résultats des recherches actuelles, notamment celles menées sur l'impact du changement climatique. Un catalogue de mesures possibles indique les principales orientations à suivre à l'avenir. Parallèlement aux objectifs de développement durable formulés, la présente synthèse offre un cadre précieux pour structurer de manière transparente le processus de concertation nécessaire à une gestion durable des eaux urbaines.



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

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

ISBN 978-3-9524412-6-8



9 783952 441268 >