

# Economie des eaux

## Auteurs

Bruno Schädler, présidence	Hydrologie, Office fédéral de l'environnement OFEV
Bodo Ahrens	Atmospheric and Climate Science, EPF Zurich
Rudolf Feierabend	Schweiz. Vereinigung für Schifffahrt & Hafenwirtschaft
Christoph Frei	Services climatologie, MétéoSuisse, Zurich
Roland Hohmann	Rédaction, OcCC, Berne
Thomas Jankowski	Ressources en eaux et eau potable, EAWAG
Ronald Kozel	Hydrogéologie, Office fédéral de l'environnement OFEV
David M. Livingstone	Ressources en eaux et eau potable, EAWAG
Armin Peter	Ecologie aquatique appliquée, EAWAG
Armin W. Petrascheck	Ennetbaden
Martin Pfaundler	Section Gestion des Eaux, Office fédéral de l'environnement OFEV
Andreas Schild	Améliorations structurelles, Office fédéral de l'agriculture OFAG



## 1. Introduction

### Situation

L'économie des eaux inclut toutes les activités humaines ayant trait à l'utilisation et à la protection de l'eau ainsi qu'à la protection contre les dangers de l'eau. Les changements climatiques influent sur ces fonctions de l'économie des eaux du fait qu'ils modifient le cycle hydrologique (cf. chapitre Fondements).

Dans le présent chapitre, les effets des changements climatiques sur l'économie des eaux sont traités en détail pour les domaines suivants:

- Changements dans les eaux naturelles (lacs, biodiversité, poissons)
- Dangers naturels de l'eau (crues, sécheresse)
- Offre et besoin en eau (reconstitution des eaux souterraines, besoins en eau potable et en eau industrielle)
- Utilisations de l'eau (énergie, navigation sur le Rhin)
- Gestion des ressources en eau

Les changements climatiques ont une influence aussi sur d'autres domaines de l'économie des eaux, comme par exemple la navigation intérieure, la valeur récréative de l'eau et l'utilisation de l'eau dans la production de biens. Quoique ces thèmes, et d'autres encore, soient importants, ils ne sont pas abordés ici.

L'économie des eaux n'est pas influencée seulement par les changements climatiques, mais aussi par les activités humaines. Dans le passé, la pression démographique, les changements d'affectation des sols, la consommation et pollution des eaux étaient les facteurs déterminants qui modifiaient constamment ce secteur. Comme conséquences des changements climatiques, il faut considérer non seulement les changements ayant trait à l'utilisation, mais aussi ceux relatifs à l'offre d'eau. On ne sait pas au juste si les modifications en matière d'offre et de consommation d'eau deviendront plus importantes à l'avenir. Dans le cas le moins favorable, elles évolueront en sens contraire (diminution de l'offre et augmentation de la demande).

### Tour d'horizon

#### Basses eaux

Comparée à d'autres régions du monde, la Suisse, qui dispose de quelque 5560 m<sup>3</sup> d'eau par année et habitant, se trouve dans une situation favorable

(Israël 115, Pays-Bas 690, Allemagne 1305, Espagne 2785 m<sup>3</sup> a<sup>-1</sup> hab<sup>-1</sup>). Les précipitations abondantes ainsi que l'effet équilibrant de la fonte des neiges et – dans une mesure qui va diminuant – des glaciers concourront, à l'avenir aussi, à une offre d'eau comparativement élevée.

Suite aux changements climatiques, l'offre d'eau diminuera en été et en automne (cf. chapitre Fondements). Pendant les étés caniculaires, qui seront plus fréquents, même les cours d'eau grands et moyens du Plateau pourront présenter des niveaux aussi bas qu'en hiver. Ceci entraînera aussi la baisse du niveau des eaux souterraines dans les alluvions de vallée pendant l'arrière saison d'été et l'automne.

En même temps, les besoins de l'agriculture en eau d'irrigation augmenteront. Les besoins en eau des écosystèmes de rivières entreront en concurrence avec ceux de différents utilisateurs et régions, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de l'eau souterraine et de celle de petits et moyens cours d'eau. Cette situation de concurrence a des impacts multiples:

- Dans l'agriculture, le manque d'eau peut conduire à des baisses de production.
- La production d'électricité sera affectée par l'offre réduite en eau et les températures de l'eau plus élevées (force hydraulique, prélèvement d'eau de refroidissement).
- Il faut s'attendre à l'avenir à des limitations de la navigation sur le Rhin pendant l'été et l'automne.

#### Crues

Le potentiel de dommages des crues a augmenté de façon marquée pendant les cinquante dernières années. La raison en est la croissance de la population et de l'économie: il se trouve toujours davantage de biens d'infrastructures dans des zones exposées. Cette évolution se poursuivra à l'avenir.

Les scénarios climatiques actuels indiquent une augmentation des précipitations moyennes et de la fréquence et de l'intensité des fortes précipitations pendant le semestre d'hiver. En outre, les précipitations tomberont plus fréquemment sous forme de pluie que de neige. Ces changements font attendre un accroissement de la fréquence des crues avant tout en hiver; ils conduiront aussi à des niveaux des crues plus hauts, avant

tout sur le Plateau et dans le Jura ainsi que dans les Préalpes au-dessous d'environ 1500 mètres. Il n'est pas encore possible de donner des indications précises pour l'été.

Tant l'augmentation attendue du potentiel de dommages que la possibilité de crues plus fréquentes exigent de renforcer la protection contre les hautes eaux. Une réponse possible à ces incertitudes sont les mesures dites de non-regret, qu'incarne par exemple la protection durable contre les crues: si l'intensité des crues reste inchangée, la renaturation et l'élargissement des cours d'eau sont un gain pour l'écosystème; si elle augmente en conséquence des changements climatiques, le risque accru est compensé au moins en partie et minimisé du fait de la prise en compte des surcharges.

### **Ecologie**

La hausse des températures de l'eau aura aussi sur les écosystèmes aquatiques des effets inattendus, qui ne peuvent toutefois pas être estimés.

Dans les lacs, le réchauffement conduira à une stratification en densité plus stable et à une diminution de la teneur en oxygène de l'eau profonde. Il s'ensuivra une augmentation du risque de manque d'oxygène dans les lacs mésotrophes et peut-être aussi oligotrophes.

### **Mesures**

La gestion régionale/suprarégionale des ressources se présente comme mesure contre les basses eaux. Elle nécessite une nouvelle approche dans le sens d'une gestion intégrale, incluant les eaux de tout un bassin versant.

La gestion des lacs permet de réduire et déplacer les variations. A l'avenir, les actuels schémas de régulation devront être adaptés en fonction des nouvelles conditions (nouvelles fonctions des objectifs et optimisation des buts). La pression incitant à gérer des lacs aujourd'hui non régulés augmentera à l'avenir. On connaît mal les problèmes écologiques y relatifs. Il faut s'attendre à des impacts sur la végétation des rives, par exemple sur les effectifs de roseaux et sur d'autres communautés de plantes qui sont dépendants des variations naturelles du niveau des eaux.

La stratégie souple de la Suisse en matière de crues implique des mesures d'aménagement du territoire visant à limiter le potentiel de domma-

ges, la diminution de la vulnérabilité des objets, des mesures de protection en matière de génie civil ainsi que des mesures d'urgence en cas de surcharge. Cette stratégie a fait ses preuves lors des crues d'août 2005. Partout où elle a été mise en œuvre, les dommages ont pu être sensiblement réduits en comparaison d'autres crues semblables. Un réexamen permanent de la situation du point de vue des risques est une condition pour assurer l'efficacité à long terme de cette stratégie, car tant le potentiel de dommages que le danger se modifient continuellement.

A l'avenir, les bassins d'accumulation alpins pourraient servir davantage aussi à retenir les pointes de crues. Leur utilisation comme installations polyvalentes prendra plus d'importance.

### **Lien avec d'autres thèmes**

#### **Agriculture**

Besoins de l'agriculture en eau d'irrigation. Baisse de production à cause du manque d'eau d'irrigation..

#### **Tourisme**

Effets sur le tourisme des dangers naturels relatifs à l'eau. Effets sur le tourisme des changements de l'offre en eau (niveaux des lacs et des cours d'eau plus bas en été: baignade / navigation voyageurs). Approvisionnement en eau des installations d'enneigement.

#### **Energie**

Production hydroélectrique en cas d'offre réduite en été et automne. Influence d'événements extrêmes sur la force hydraulique. Influence de la hausse de température de l'eau sur l'utilisation d'eau de refroidissement par les centrales thermiques et nucléaires dotées d'un refroidissement en circuit ouvert (Beznau et Mühleberg). Changements dans la demande en énergie en été et hiver.

#### **Secteur financier**

Besoins en investissements. Assurances contre les dommages.

#### **Infrastructures**

Protection contre les crues, installations d'irrigation, canalisation, mise en réseau des systèmes dans le sens d'une gestion intégrale des eaux.

## 2. Changements affectant les cours d'eau naturels

### Température de l'eau

**Les changements climatiques ont une influence immédiate sur les températures de l'eau. En Suisse, les températures de l'eau des rivières et de la couche superficielle des lacs du Plateau augmenteront d'ici 2050 d'environ 2 °C par rapport à 1990.<sup>1</sup> Le risque de manque d'oxygène s'accroîtra dans les eaux profondes des lacs du Plateau.<sup>2</sup>**

Au cours des décennies passées, les températures de l'eau des rivières ont augmenté parallèlement aux températures de l'air (figure 1).<sup>3</sup> Dans les lacs, le réchauffement fut plus important dans la couche superficielle soumise à l'action du brassage qu'en profondeur. La stabilité de la stratification en densité a ainsi augmenté et la période de stratification stable dure plus longtemps en été. Dans le lac de Zurich,<sup>4</sup> un réchauffement de 0.24 °C par décennie a été observé depuis les années 1950 dans la couche de surface et de 0.13 °C par décennie en eau profonde. La stratification stable dure en gros deux à trois semaines de plus.

Dans les lacs du Plateau qui ne sont pas périodiquement gelés, la fréquence des brassages tend à diminuer en hiver. De ce fait, moins d'oxygène parvient dans les eaux profondes. Ce n'est pas le cas des lacs situés en altitude, qui sont régulièrement gelés; mais le brassage y a lieu plus tôt au printemps et plus tard en automne.

Selon le scénario, les cours d'eau se réchaufferont d'environ 2° C d'ici 2050 par rapport à 1990. Dans les lacs du Plateau, la couche de surface continuera de se réchauffer davantage que l'eau profonde et la stabilité et la durée de la stratification en densité augmenteront. La durée de la période pendant laquelle un brassage complet peut avoir lieu se raccourcira encore, la fréquence des brassages et l'apport d'oxygène dans l'eau profonde continueront de diminuer. Dans les lacs qui présentent aujourd'hui une teneur suffisante en oxygène, le risque de manque d'oxygène s'accroîtra en profondeur.

Avec les changements climatiques, il faut s'attendre à ce que les lacs du Plateau situés à basse altitude gèlent plus rarement et que la couverture de glace de ceux situés plus haut persiste moins longtemps. Dans les lacs de montagne, la diminution de la couverture annuelle de glace entraînera une augmentation de la production biologique et un besoin accru en oxygène.

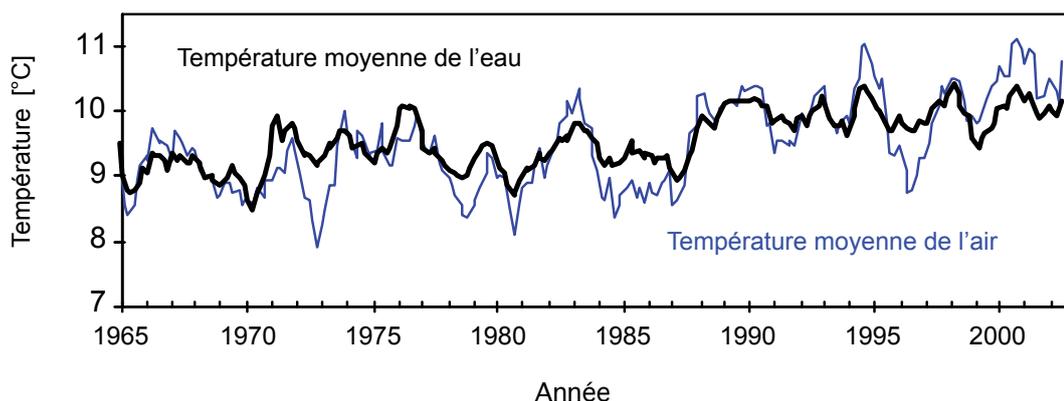


Figure 1: L'augmentation de la température moyenne de l'eau dans les lacs suisses (courbe noire) depuis 1965 évolue parallèlement à l'accroissement de la température moyenne de l'air (courbe bleue).<sup>3</sup>

## Organismes microscopiques et de petite taille

**Les températures de l'eau de surface des lacs ont augmenté en hiver au cours des dernières décennies, ce qui a accru la stabilité thermique et modifié les conditions de circulation. Il s'en est ensuivi des décalages temporels dans la chaîne alimentaire et – dans les lacs bénéficiant d'une teneur suffisante en oxygène – une diminution de la diversité du plancton. Dans les lacs qui présentent aujourd'hui une teneur suffisante en oxygène, le réchauffement futur peut conduire à une dégradation des conditions de vie.<sup>2</sup>**

Des prévisions approfondies sur les changements qui affecteront la biodiversité aquatique jusqu'en 2050 ne sont pas possibles dans l'état actuel des connaissances. La faculté et la vitesse d'adaptation sont spécifiques aux espèces et ne peuvent pas être prévues. Par contre, certains changements peuvent faire l'objet de prévisions qualitatives. Dans les lacs, la chaîne alimentaire subit un décalage temporel sous l'effet du réchauffement. Au printemps, la pression de prédation du zooplancton met fin à la floraison des algues. Suit alors ce qu'on appelle la phase des eaux claires. Vu que le zooplancton présente des taux de croissance et de prédation plus élevés lorsque la température de l'eau est plus haute, la période des eaux claires a lieu plus tôt après des hivers chauds qu'après des hivers froids. Il ressort des observations que la phase des eaux claires a pris une avance d'en-

viron deux semaines au cours des vingt dernières années en raison du réchauffement. Selon le scénario climatique, la phase des eaux claires continuera de prendre de l'avance à l'avenir; ceci n'est toutefois pas possible à l'infini.

Depuis les années 1970, des mesures coûteuses (épuration des eaux usées, collecteurs périphériques) ont fait diminuer les concentrations hivernales en phosphate. Simultanément, on observe une augmentation de la diversité du phytoplancton. Les températures hivernales chaudes pendant les dernières décennies ont eu un effet négatif sur la diversité du phytoplancton dans les lacs présentant une teneur en oxygène suffisante. Cette évolution se poursuivra probablement avec le réchauffement futur. L'influence de ce dernier n'est pas claire pour les lacs dont la teneur en oxygène est insuffisante.

## Poissons

**Le réchauffement des eaux a une influence sur les poissons d'eau froide; l'habitat propice à ces animaux se rétrécit et la composition en espèces se modifie. Tant les poissons d'eau froide que d'eau chaude profitent des hivers plus chauds.**

Dans le passé, les interventions humaines dans l'hydrologie et la morphologie des cours d'eau étaient des facteurs d'influence importants pour les poissons. Cela restera vrai à l'avenir. Suite au réchauffement des cours d'eau suisses de 0.4-1.6 °C au cours des vingt-cinq dernières années (figure 1), la zone à truites s'est retirée 100-200 m plus haut.<sup>3</sup> Une évolution similaire a été observée en Amérique du Nord: dans les Montagnes Rocheuses, la surface propice à l'habitat des truites a diminué de 17% pour un réchauffement de l'eau de 1 °C en juillet.<sup>5</sup>

Des estimations montrent que pour un réchauffement de 2 °C jusqu'en 2050, les espaces de vie des salmonidés diminueront en Suisse de  $\frac{1}{5}$  à  $\frac{1}{4}$  par rapport à aujourd'hui. Tant les poissons d'eau froide que d'eau chaude profitent de températures hivernales plus chaudes; leurs phases de croissance durent plus longtemps et les poissons grandissent plus vite. Une conséquence sera que les eaux deviendront plus propices aux carpes (cyprinidés) et à des espèces de poissons exotiques. Des maladies telles que la MPR (maladie proliférative des reins) se propageront avec l'augmentation de la température des eaux.<sup>6</sup>

### 3. Dangers naturels de l'eau

**Suite aux changements climatiques, il faut s'attendre à des crues plus nombreuses et en partie plus importantes en hiver et au printemps à des altitudes inférieures à env. 1500 m. Les périodes sèches augmenteront de façon marquante en été.**

#### Crues

La formation de crues dépend fortement du régime des précipitations. Dans le passé, il y avait des périodes pendant lesquelles les crues étaient nombreuses et d'autres où ces événements étaient moins fréquents. Il semble que depuis environ vingt ans, les grosses crues (été 1987, septembre 1993, mai 1999, octobre 2000, août 2005) se produisent plus souvent qu'au cours des décennies antérieures du 20<sup>e</sup> siècle.

Une analyse des tendances des écoulements mesurés<sup>7</sup> dans les petits et moyens bassins versants de Suisse (période 1930–2000) a permis de constater une augmentation des écoulements annuels dans nombre des cours d'eau examinés. Elle est causée principalement par un accroissement des écoulements en hiver et au printemps. L'augmentation observée des précipitations hivernales intenses<sup>8</sup> peut expliquer, au moins en partie, cette tendance des écoulements.

Selon l'état actuel des connaissances, différents changements dans le régime des précipitations sont possibles à l'avenir, qui peuvent influencer sur la fréquence des crues (cf. chapitre Fondements). On compte avec une augmentation des précipitations moyennes en hiver. Celles-ci tomberont plus souvent et jusqu'à de plus grandes altitudes

sous forme de pluie au lieu de neige. Ces deux facteurs devraient conduire à un accroissement des écoulements moyens en hiver et jusqu'au cours du printemps.<sup>9,10</sup> En outre, nombre d'analyses au moyen de modèles climatiques globaux et régionaux concluent que l'intensité moyenne des précipitations et la fréquence des précipitations fortes et extrêmes devraient augmenter en hiver en Europe centrale et septentrionale.<sup>11,12,13,14</sup> Le dépouillement de résultats récents de modélisations indique aussi une augmentation des fortes précipitations en Europe centrale au printemps et en automne. Les résultats pour l'été divergent fortement. Il n'est guère possible non plus de fournir des données qualitatives pour cette saison, mais dans de nombreux modèles, la diminution des précipitations moyennes va de pair avec une plus forte intensité des précipitations.<sup>11,15</sup>

A part l'intensité et la durée des précipitations, l'état du bassin versant joue aussi un rôle décisif dans la formation des crues. La capacité d'écoulement est plutôt réduite en été par l'augmentation moyenne de la température et la diminution des précipitations.

En raison des changements attendus dans le régime des précipitations, il faut compter – avant tout en hiver et pendant les saisons de transi-

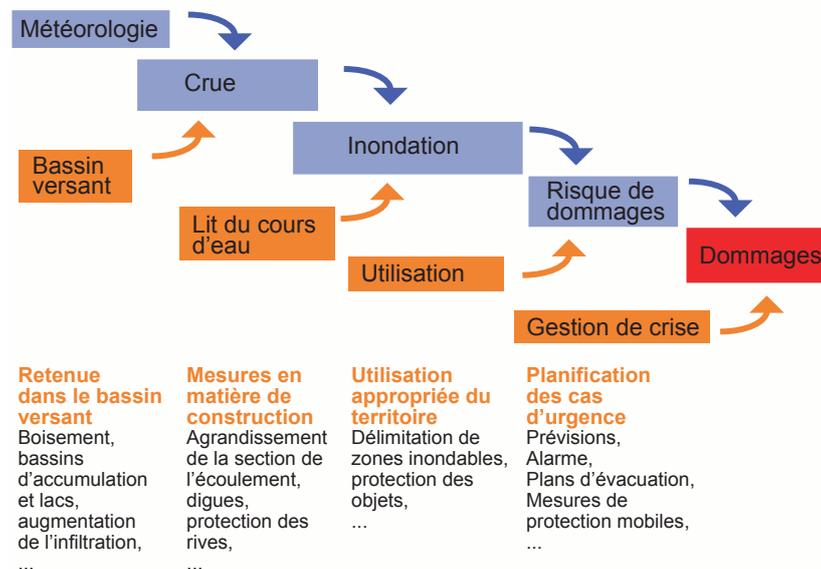


Figure 2:  
Les crues ne causent des dommages que lorsque toute une série de conditions sont réunies. Il s'ensuit qu'il existe aussi de nombreuses possibilités de faire face à ces événements.  
(Source: OFEG – OFEV).

### Détournement en cas de surcharge

Afin de limiter les dégâts à un niveau supportable en cas de crue d'ampleur exceptionnelle, les masses d'eau excédentaires sont déviées vers des aires moins sensibles en termes de dommages. Cette mesure d'urgence a été appliquée lors de la crue d'août 2005. Entre 25 et 50% du débit de crue a été dévié vers des places de sport, des aires agricoles, des parkings et d'autres zones peu sensibles situées en marge de l'agglomération. Ce type de mesure doit être préparé au niveau des constructions et de l'aménagement du territoire.



Figure 3: En août 2005, la crue de l'Engelberger Aa a été déviée de manière à éviter la zone construite, sensible en termes de dommages. (Source: Forces aériennes suisses)

tion et surtout dans les moyens et grands bassins versants du Jura, du Plateau, des Préalpes et du Tessin – avec des crues plus fréquentes et en partie plus grandes que dans les conditions climatiques actuelles. A ceci s'ajoute que l'augmentation de la température entraîne une alternance plus fréquente entre chute et fonte de neige; il s'ensuit qu'en bordure des Alpes, l'écoulement est souvent la somme de plusieurs précipitations journalières. Vu que l'évaporation est faible en hiver, il ne faut pas s'attendre à des effets de compensation significatifs. Dans les petits bassins versants du Plateau et dans les Alpes, les plus grandes crues surviennent le plus souvent en été après des averses orageuses courtes mais intenses. On ne sait pas au juste si et dans quel sens leur fréquence changera.

En haute montagne, on ne s'attend pas à ce que les crues subissent une influence significative, car même si les précipitations augmentent en hiver, elles ne formeront toujours pas de crues, vu qu'elles tombent en partie sous forme de neige. On s'attend à une intensification de la fonte des neiges au printemps. Il pourrait s'ensuivre une augmentation du danger de crues en cas de superposition de la fonte des neiges et d'épisodes de pluie. En été, il faudra compter généralement avec moins d'eau de fonte et des sols plus secs. Les dommages dus aux crues sont la conséquence du conflit entre l'extension naturelle des crues et l'utilisation humaine des bassins versants (figure 2). Au cours des cinquante années passées, le potentiel de dommages des crues a fortement

augmenté; c'est une conséquence du développement économique. Toujours plus d'infrastructures sont construites dans des zones exposées. Indépendamment des changements climatiques, ce potentiel de dommages plus élevé exige un renforcement de la protection contre les crues.

En matière de protection contre les crues, la Suisse suit une stratégie souple qui vise en premier lieu à éviter des dommages, et non forcément à empêcher les inondations. Cette stratégie implique une série de mesures qui, vu les incertitudes, doivent être appliquées en combinaison. Les principes suivants sont importants à cet égard:

- Des mesures d'aménagement du territoire doivent être prises pour empêcher le potentiel de dommages de s'accroître encore plus; il faut éviter de bâtir dans des zones menacées.
- En ce qui concerne les bâtiments existants, et dans les zones moins menacées, la vulnérabilité des objets doit être atténuée par une protection adéquate. Cela permet de freiner l'augmentation future du potentiel de dommages et de rendre moins souvent nécessaires des mesures de génie civil.
- Des mesures de génie civil sont prises lorsque l'aménagement du territoire et la protection des objets ne suffisent pas. Leur ampleur est à déterminer selon des critères économiques, ce qui implique de considérer les objectifs de protection de façon nuancée – plus les valeurs à protéger sont grandes, plus le niveau de protection doit être élevé. Pour les sites construits existants, les évaluations se basent d'ordinaire sur une crue centennale ou tricentennale.
- Que les probabilités calculées pour la crue de projet soient valables ou non, une crue de plus grande ampleur peut survenir. Une planification d'urgence doit être préparée pour ce cas de surcharge. Son but est de limiter les dommages à un niveau supportable au cas où l'ampleur du sinistre dépasserait nettement la crue de projet. Les concepts envisageables peuvent prévoir des évacuations, des digues mobiles ou des mesures d'aide d'urgence (cf. encadré).

L'avantage essentiel de cette stratégie est que les ouvrages de protection sont dimensionnés sur la base de probabilités connues. Leur rentabilité est ainsi assurée pour les conditions actuelles et le sera dans une mesure encore plus grande si le danger de crues s'accroît dans un climat futur. La prise en compte d'une crue beaucoup plus importante dans la planification limite jusqu'à un certain degré les dommages aussi en cas d'augmentation du danger de crue. Elle procure un sursis jusqu'à ce que des bases plus fiables soient à disposition quant à l'évolution de la situation du risque. Le suivi permanent de cette dernière est la condition d'une efficacité à long terme, vu que tant le potentiel de dommages que la situation du danger se modifient sans cesse.

### Sécheresse

En Suisse, les dernières grandes sécheresses remontent à 1947 et 2003. La canicule de l'été 2003 a causé pour environ 500 millions de CHF de dommages dans l'agriculture. Elle n'a toutefois pas provoqué un manque d'eau mettant la vie en danger. Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, on n'a pas relevé de tendance systématique de la fréquence de longues périodes sans précipitations.<sup>8</sup>

Selon le scénario, les précipitations diminueront en été et la probabilité de périodes sèches augmentera. Les modélisations prévoient aussi une augmentation des périodes extrêmement sèches.

Comparée à d'autres régions du monde, la Suisse se trouve aujourd'hui dans une situation favorable. Les précipitations abondantes ainsi que l'effet équilibrant de la fonte des neiges et – dans une mesure qui va diminuant – des glaciers concourent, à l'avenir aussi, à une offre en eau comparativement élevée. Pour prévenir des pénuries dans l'approvisionnement en eau, les infrastructures y relatives doivent être développées à temps avec mesure, en prenant en considération les prévisions des besoins et la durée des travaux.

Dans le régime d'écoulement des hautes Alpes, qui dépend de la couverture neigeuse hivernale et de la fonte des neiges, l'augmentation des températures et des précipitations hivernales devrait conduire à de plus hauts niveaux des eaux durant la période d'étiage d'hiver.

## 4. Offre et besoin en eau

### Reconstitution des eaux souterraines

**Suite aux changements climatiques, la reconstitution des eaux souterraines tendra à augmenter en hiver et à diminuer en été et en automne. Dans l'ensemble, les niveaux des eaux souterraines baisseront légèrement.**

83% des besoins de la Suisse en eau potable et industrielle sont couverts par les eaux souterraines, soit 44% provenant de sources dans les aquifères en milieu karstique et fissuré et 39% de puits filtrants en roche meuble (figure 4). Les aquifères dans la roche meuble présentent un écoulement lent de l'eau souterraine et sont en général importants. En milieu karstique, l'eau souterraine s'écoule rapidement, raison pour laquelle ces sources ont d'importants débits à la suite de précipitations. Les sources en milieu fissuré ont un écoulement plus régulier, mais sont en général peu productives. C'est pourquoi les divers types d'aquifères réagissent aux changements climatiques dans une mesure et des délais différents.

Suite aux changements climatiques pronostiqués, la reconstitution des eaux souterraines va plutôt augmenter en hiver du fait que les précipitations tomberont davantage sous forme de pluie. En été et en automne, la reconstitution des eaux souterraines diminuera en raison de températures plus hautes, de l'augmentation des périodes sèches ainsi que de la concentration sous forme de fortes précipitations

sur le Plateau et dans les Préalpes. L'infiltration des eaux de surface alpines diminuera un peu.

Ces changements dans la reconstitution des eaux souterraines ont pour effet que le débit des sources proches de la surface et alimentées par un bassin versant de faible étendue, de même que celui des aquifères karstiques, subiront des variations saisonnières plus fortes et pourront en partie tarir en été et en automne. Dans les gisements d'eau souterraine situés dans des alluvions de vallée sous le régime d'écoulement du Plateau, il faut s'attendre à une baisse du niveau des eaux souterraines en été et en automne. Les niveaux des nappes pluvéatiques dans les alluvions de vallée sous régime d'écoulement alpin, qui présentent leur maximum saisonnier en été, n'enregistreront qu'une faible baisse. Néanmoins, il faut compter, dans ce cas aussi, avec des niveaux plus bas pendant les étés caniculaires, qui seront plus fréquents, et pendant l'arrière-saison d'été et l'automne, en raison du ralentissement de la fonte des glaces. On s'attend également à une légère baisse des niveaux des aquifères profonds.



Figure 4: Répartition de différents aquifères en Suisse.<sup>16</sup>

### Besoin en eau potable et en eau industrielle

**En conséquence des changements climatiques, les situations de concurrence entre différents utilisateurs et utilisations de l'eau seront plus fréquentes. Les conditions d'approvisionnement en eau potable ne seront affectées que localement et pendant des durées limitées. Les besoins en eau d'irrigation augmenteront dans l'agriculture.**

Les changements climatiques influent sur les conditions d'approvisionnement en eau potable. Les effets diffèrent fortement selon la région et la période. Les mesures destinées à

éviter les difficultés d'approvisionnement en eau potable et à augmenter la sécurité à cet égard incluent l'utilisation d'eaux de surface (lacs), le développement des réseaux d'eau pota-

ble et l'exploitation de nouvelles ressources en eau souterraine.

La baisse des précipitations en été fait diminuer les réserves d'eau dans le sol. Des températures plus élevées entraînent une évaporation plus intense et accroissent le besoin des plantes en eau (transpiration). Des périodes sèches plus longues et plus fréquentes conduisent ainsi à un assèchement du sol. Par la suite, l'encroûtement du sol réduit par endroit la capacité de ce dernier à absorber l'eau et les fentes de sécheresse diminuent son aptitude à la stocker; la capacité de formation d'humus s'amointrit.

La diminution de l'offre en eau et l'augmentation des besoins d'irrigation de l'agriculture conduiront à une situation de concurrence entre différents utilisateurs et utilisations, impliquant par exemple les riverains concernés. L'eau deviendra un bien disponible en quantités toujours plus mesurées en été – encore que les situations de pénurie resteront limitées dans le temps et dans l'espace. Il deviendra toujours plus nécessaire de l'exploiter judicieusement, ce qui aura des conséquences sur les priorités, les droits et les prix d'utilisation. L'introduction de mesures de compensation et d'irrigation nécessitera d'une part des règles et d'autre part de nouvelles infrastructures.

## 5. Utilisation de l'eau

**La production d'énergie est une forme d'utilisation très importante de l'eau en Suisse. Suite aux changements climatiques, la quantité d'électricité générée dans des centrales à accumulation et au fil de l'eau diminuera. La navigation sur le Rhin sera perturbée plus souvent à l'avenir par de longues périodes de très bas niveau des eaux.**

### Energie

La Suisse couvre en gros 60% de sa demande en électricité, soit  $\frac{1}{8}$  de ses besoins totaux en énergie, par la force hydraulique.

Les changements climatiques conduiront, en particulier dans l'espace alpin, à une correction saisonnière des régimes d'écoulement. Les débits augmenteront en hiver et au printemps et diminueront en été et en automne. Les exploitants de centrales électriques disposeront ainsi d'une plus grande marge de flexibilité. A l'avenir, la gestion des capacités d'accumulation prendra en compte, à part la compensation des variations saisonnières, également les fluctuations du marché de l'électricité. Dans l'ensemble, il faut s'attendre à une baisse de la production hydroélectrique par les centrales à accumulation, du fait que moins d'eau sera à disposition: les précipitations annuelles diminueront et l'évaporation augmentera.

Les basses eaux pendant l'arrière-saison d'été et l'automne limiteront la production de courant des centrales au fil de l'eau sur le Plateau. Celles-ci pourront d'autre part tirer parti des débits plus importants en hiver et au printemps, étant donné qu'aujourd'hui, la capacité des turbines n'est guère utilisée pleinement pendant cette période de l'année.<sup>17</sup> Il faudra compter dans l'ensemble avec une légère dimi-

nution de la production d'électricité des centrales au fil de l'eau.<sup>18</sup>

Les crues et l'instabilité des pentes augmenteront avec les changements climatiques; de grands mouvements de terrain notamment pourront menacer des installations annexes des centrales, comme p.ex. des conduites d'eau sur des pentes raides. De même, le transport de sédiments, le charriage de fond et les débris flottants pourraient augmenter et donc amplifier et accélérer le comblement des lacs d'accumulation.<sup>19,20</sup>

La production d'électricité des centrales nucléaires et d'autres centrales thermiques sera aussi affectée par les changements climatiques. En raison de la hausse des températures de l'eau et de la diminution des débits, les cours d'eau fourniront moins de capacité de refroidissement à ces installations, ceci notamment durant des canicules comme celle de l'été 2003.

De par la politique climatique, la force hydraulique acquerra des avantages économiques en tant qu'énergie renouvelable et neutre du point de vue du CO<sub>2</sub>.

### Navigation sur le Rhin

15% de la quantité de marchandises relevant du marché extérieur passent par les ports du Rhin, et même 35% de celle des produits pétro-

liers. Chaque année, 9 millions de tonnes de marchandises sont acheminées en Suisse par le Rhin.

Les basses et hautes eaux peuvent amener à limiter la navigation sur le Rhin. En 2003, la quantité transportée a marqué un recul de 5.8% et la performance du transport diminué de 9.9% par rapport à l'année précédente. Cette baisse est à attribuer en premier lieu au faible débit pendant la seconde moitié de l'année. En raison du bas niveau des eaux, les bateaux ne pouvaient pas supporter la même charge qu'en situation normale. En cas de hautes eaux, la navigation sur le Rhin est interrompue lorsque le niveau des eaux à Rheinfelden est supérieur à 4.30 m. En mai 1994, la navigation entre Bâle et Rheinfelden a été suspendue durant treize jours. En 1999, elle a été interrompue durant cinq jours en février et durant trente-huit jours du 12 mai au 16 juin.

Les changements climatiques auront une influence sur l'écoulement. Actuellement, le Rhin a un débit stable, grâce à l'alimentation par l'eau de fonte et aux précipitations dans les Alpes au printemps et en été, et grâce aux précipitations dans les régions de plus basse altitude en automne et hiver. Aujourd'hui, l'eau provenant de la fonte de la couverture neigeuse hivernale et des glaciers est une source importante assurant un écoulement régulier en périodes de faibles précipitations. Cette influence compensatrice diminuera en permanence avec la fonte des glaciers. La probabilité de longues périodes de très bas niveau des eaux augmentera jusqu'en 2050. Bien que cela ne compromette pas le maintien de la navigation sur le Rhin, la fiabilité de cette dernière tout au long de l'année pourrait être affectée. Les progrès des prévisions saisonnières de l'évolution du temps et donc aussi du niveau des eaux simplifieront à l'avenir la planification logistique et rendront celle-ci plus sûre.

## 6. Gestion renforcée des ressources en eau

**La Suisse dispose aujourd'hui d'une offre en eau assez bien équilibrée dans l'espace et le temps. En raison des changements climatiques, l'offre naturelle en eau ne couvrira plus tout le temps ni partout les besoins futurs.**

Comme conséquence des changements climatiques, le régime d'écoulement deviendra un peu plus égal dans les Alpes et présentera davantage de périodes de basses eaux et de sécheresse sur le Plateau. Selon le scénario climatique, les périodes de grande chaleur et de sécheresse augmenteront. Ceci aura pour effet que l'eau – limitée par période et par endroit – sera disponible en été en quantité toujours plus mesurée.

Les changements climatiques auront aussi une influence sur les prétentions relatives à l'utilisation de l'eau. En période de basses eaux, les usagers des lacs et les riverains situés en aval revendiqueront une augmentation de débit pour la navigation, la protection des eaux, le prélèvement d'eau potable et l'irrigation de même que pour les loisirs et la détente.

Les réductions saisonnières et régionales de l'offre en eau et l'évolution des prétentions ayant trait à son utilisation rendront nécessaire une gestion quantitative de l'eau, à défaut de laquelle les exigences ne pourront plus être toutes satisfaites dans la même mesure.

Dans le cas des lacs régulés, les actuels schémas de régulation devront être adaptés aux futures exigences. Les autres lacs (p.ex. le lac de Constance) feront l'objet d'appels toujours pressants demandant qu'ils soient aussi régulés.

La gestion intrarégionale implique le renforcement des instruments au service de l'économie des eaux (réseaux interconnectés et gestion des réservoirs et des lacs), afin de pouvoir assurer l'équilibre requis entre l'offre (naturelle) et les besoins.

Au niveau de l'organisation, la gestion intégrale par bassin versant exige des adaptations administratives institutionnelles (nouvelle réglementation des compétences; coordination et adaptations juridiques), vu que les compétences, attribuées jusqu'ici à très petite échelle, ne fournissent pas une structure efficace à cette fin.

A part les approches ayant trait à la gestion, des mesures sont à prendre aussi au niveau de la demande, notamment dans l'agriculture (de l'utilisation efficace de techniques d'irrigation au choix des cultures) et au chapitre des besoins en eau potable et industrielle.

## Bibliographie et notes

- 1 F. Peeters, D. M. Livingstone, G.-H. Goudsmit, R. Kipfer, and R. Forster. Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. In: *Limnol. Oceanogr.*, 47(1), 2002, 186–197.
- 2 D. M. Livingstone and D. M. Imboden. The prediction of hypolimnetic oxygen profiles: a plea for a deductive approach. In: *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 53(4), 1996, 924–932.
- 3 R. E. Hari, D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm and H. Güttinger. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. In: *Global Change Biol.*, 12, 2006, 10–26.
- 4 D. M. Livingstone. Impact of secular climate change on the thermal structure of a large temperate central European lake. In: *Clim. Change* 57, 2003, 205–225.
- 5 C. J. Keleher and F. J. Rahel. Thermal limits to salmoid distributions in the Rocky Mountain Region and potential habitat loss due to global warming: a geographic information system (GIS) approach. In: *Transaction of the American Fisheries Society* 125, 1996, 1–13.
- 6 P. Burkhardt-Holm, W. Giger, H. Güttinger, U. Ochsenbein, A. Peter, K. Scheurer, H. Segner, E. Staub, and M. J.-F. Suter. Where have all the fish gone? In: *Env. Science & Technology* 39 (21), 2005, 441A–447A.
- 7 M. V. Birsan, P. Molnar, M. Pfaundler und P. Burlando. Trends in schweizerischen Abflussmessreihen. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 1/2, 2004, 29–38.
- 8 J. Schmidli and C. Frei. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. In: *Int. J. Climatol.*, 25, 2005, 753–771.
- 9 F. Bultot, D. Gellens, B. Schädler and M. Spreafico. Effects of climate change on snow accumulation and melting in the Broye catchment (Switzerland). In: *Clim. Change*, 28, 1994, 339–363.
- 10 J. Kleinn. Climate change and runoff statistics in the Rhine basin: A process study with a coupled climate-runoff model. Diss. ETH Nr. 14663., 2002.
- 11 J. Räisänen, U. Hannson, A. Ullerstig, R. Döscher, L. P. Graham, C. Jones, H. E. M. Meier, P. Samuelsson, and U. Willén. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two global models and two forcing scenarios. In: *Climate Dyn.*, 22, 2004, 13–31.
- 12 M. Ekström, H. J. Fowler, C. G. Kilsby, and P. D. Jones. New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. In: *J. Hydrol.*, 300, 2005, 234–251.
- 13 C. Frei, R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli and P. L. Vidale. Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models. In: *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 111, 2006, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- 14 OcCC (Hg.). *Extremereignisse und Klimaänderung*. Bern, 2003.
- 15 J. H. Christensen and O. B. Christensen. Severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421, 2003, 805–806.
- 16 BUWAL. *Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt*. Bundesamt für Umweltschutz, Wald und Landschaft, Bern, 2004.
- 17 D. Vischer und S. Bader. Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 7/8, 1999.
- 18 M. Piot. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftproduktion in der Schweiz. In: *Wasser Energie Luft*, Heft 11/12, 2005.
- 19 IG Wasserkraft, VSE, ProClim, OcCC, NCCR Climate. *Wasserkraft und Klimawandel in der Schweiz – Vision 2030*, 2003.
- 20 A. Schleiss und C. Oehy. Verlandung von Stauseen und Nachhaltigkeit. In: *Wasser, Energie, Luft*, 94 (7/8), 2002, 227–234.