

Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique

RAPPORT DE SYNTHÈSE



Réponses brèves à des questions importantes

Le climat

Comment la température évoluera-t-elle à l'avenir ?

Les températures augmenteront en toutes saisons. La plus forte hausse est attendue dans l'arc alpin.

Comment les précipitations changeront-elles dans le futur ?

Les précipitations diminueront très nettement en été jusqu'en 2100. Elles augmenteront légèrement pendant les autres saisons (sauf dans le sud). Les précipitations annuelles augmenteront légèrement sur le versant nord des Alpes ; elles diminueront un peu au sud et dans le sud du Valais.

Comment l'évaporation se modifiera-t-elle ?

L'évaporation s'accroîtra très faiblement. Comparé aux précipitations, ce changement est insignifiant.

Que peut-on dire au sujet des différents événements extrêmes ?

Les vagues de chaleur seront plus fréquentes et de plus longue durée. Aucune affirmation fiable n'est encore possible quant à l'intensité et la fréquence futures des fortes précipitations.

Les prévisions sont-elles sûres ?

Les précipitations surtout font encore l'objet de bien des incertitudes dans les scénarios climatiques. Des tendances nettes existent néanmoins pendant certaines saisons. Mais les incertitudes montrent aussi à quels changements il faut se préparer dans les cas extrêmes.

La neige et la glace

Comment la durée et l'épaisseur du manteau neigeux se modifieront-elles ?

La limite des chutes de neige montera de pair avec la température. A l'avenir, les régions en-dessous de 3500 m d'altitude seront libres de neige en été. D'ici 2100, la durée du manteau neigeux se raccourcira de jusqu'à huit semaines. En outre, l'épaisseur maximale du manteau neigeux à haute altitude diminuera de 50 à 70 pour cent. De ce fait, la contribution de la fonte des neiges au débit des cours d'eau sera fortement réduite.

Comment les surfaces et volumes des glaciers changeront-ils ?

D'ici 2100, nombre de glaciers auront en grande partie disparu. Il ne restera plus qu'à peu près le quart des surfaces et volumes actuels des glaciers suisses.

Les débits

Comment les débits annuels changeront-ils à l'avenir ?

Dans les régions à forte proportion glaciaire, les volumes écoulés annuellement augmenteront de manière transitoire par rapport à aujourd'hui, à long terme toutefois il diminueront. Au Tessin et au sud du Valais, l'écoulement annuel diminuera légèrement d'ici 2100. Sur le versant nord des Alpes, les débits d'écoulements ne se modifieront guère. Ces changements se situeront dans les limites des valeurs que nous connaissons aujourd'hui.

Quelle sera la distribution saisonnière des écoulements annuels ?

Dans les bassins versants englacés et où la neige est abondante, le maximum saisonnier des débits se déplacera clairement de l'été vers le printemps. Les débits moyens diminueront sensiblement en été et en automne et augmenteront légèrement en hiver.

Ces effets des changements climatiques sur l'hydrologie ont-ils d'autres prolongements et peuvent-ils être quantifiés comme cas de figure représentatifs ?

Dans la région des centrales de Mattmark, les débits diminueront en moyenne d'environ 6 pour cent jusqu'en 2035, et d'à peu près 12 pour cent jusqu'en 2085. Dans le bassin versant de l'aménagement hydroélectrique de la Gouggra, les diminutions seront de quelque 9 pour cent pour les deux périodes. Pour les centrales d'Oberhasli, les débits diminueront de 3 (2035) à 7 pour cent (2085).

Le charriage

Comment les volumes et régimes de charriage vont-ils se modifier ?

Les débits d'écoulement étant en baisse, les débits de charriage moyens tendront à diminuer, mais il faut toujours prendre en compte les conditions locales. Les maxima des débits de charriage saisonniers se déplaceront de l'été vers le printemps. Il n'est pas possible de faire des pronostics au sujet des débits de charriage en cas de crues.

Conséquences pour la production et le chiffre d'affaire

Comment le charriage et les volumes de matériaux charriés vont-ils se modifier ?

Suivant le dimensionnement du captage, la quantité d'eau captable peut augmenter – en dépit d'un débit total légèrement en baisse. Ceci tient à un régime d'écoulement plus régulier tout au long de l'année.

Comment la production des centrales hydroélectriques va-t-elle se modifier ?

Jusque dans un avenir proche (2035), seuls de petits changements sont attendus. Au sud et à l'est du Valais, une diminution de la production est probable. Mais les incertitudes à cet égard s'élèvent à ± 10 pour cent et sont donc relativement grandes. Dans les régions de plus basse altitude des Préalpes centrales et orientales, une augmentation de la production de l'ordre de 0 à +9 pour cent est attendue.

Dans l'avenir lointain (2085), les tendances seront négatives dans les régions de haute altitude du sud et de l'est du Valais. Il faut compter avec des pertes de production de 4 à 8 pour cent, mais même dans les cas extrêmes, les calculs n'indiquent guère de changements ou de pertes atteignant 20 pour cent.

Peut-on estimer les effets généraux des changements climatiques sur la force hydraulique pour l'ensemble du parc de centrales hydroélectriques ?

Les résultats obtenus pour des centrales données ne peuvent pas être généralisés.

Introduction

Le cycle de l'eau est étroitement lié au climat, lequel est soumis à diverses influences naturelles, et dans une mesure croissante d'origine anthropique. Dans l'arc alpin, le cycle de l'eau réagit de façon particulièrement sensible au réchauffement climatique : des changements dans la durée du manteau neigeux et l'extension à long terme des glaciers ont un impact immédiat sur les ressources en eau disponibles.

En Suisse, environ 56 pour cent de l'énergie électrique est produite par la force hydraulique. Des modifications induites dans le cycle de l'eau par les changements climatiques doivent donc autant que possible être prises en compte dans la planification à moyen et long terme de la construction et de l'exploitation des installations hydroélectriques.

« Swisselectric research » et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) souhaitent disposer à l'avenir de données quantitatives fiables. Après une étude préliminaire réalisée avec succès, ces deux organismes ont lancé en 2008 un projet de recherche sur cette problématique. La plupart des centrales hydroélectriques de Suisse se trouvent en Valais, c'est pourquoi le Service de l'énergie et des forces hydrauliques du canton du Valais ainsi que les Forces Motrices Valaisannes (FMV SA) ont mis sur pied

un projet complémentaire ayant pour thèmes principaux les glaciers, la neige et le charriage. Le projet de recherche a également examiné les effets du changement climatique pour l'exploitation des centrales et la production d'électricité au moyen d'études de cas portant sur différents types de centrales. Les études ont été effectuées dans une grande variété de bassins versants (figure a). Six groupes de recherche ont participé à la réalisation des projets sous la coordination du Réseau de l'eau dans les régions de montagne et sous la direction de l'Institut de géographie de l'Université de Berne et de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage. Le présent rapport de synthèse renseigne de façon condensée sur les principaux résultats de ces recherches. Les méthodes appliquées et les résultats détaillés sont réunis dans douze rapports techniques disponibles sous forme électronique (vois l'index bibliographique).

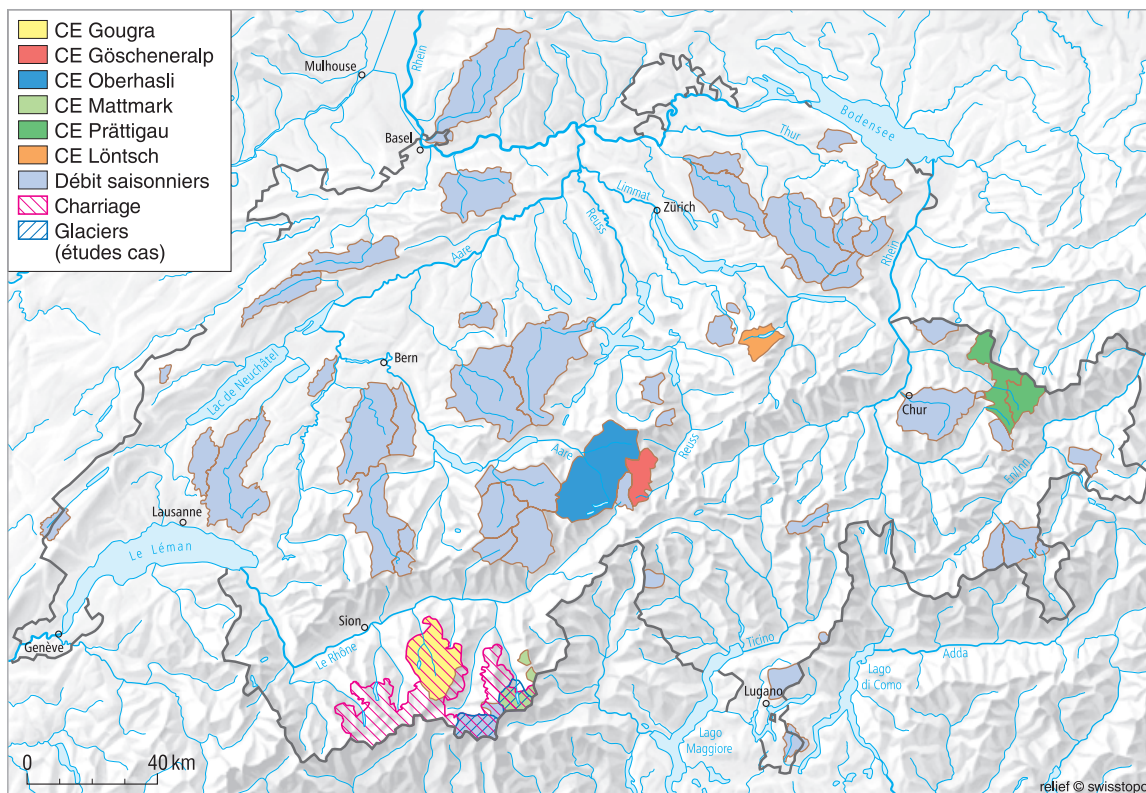


Figure a : Dans le cadre du projet, les effets du changement climatique sur les débits saisonniers, le charriage, l'englacement et pour l'exploitation des centrales et la production d'électricité ont été examinés.

Bases de l'étude

Les résultats de la modélisation climatique – un projet qui consistait à modéliser les changements de température et de précipitations en Suisse – constituent la base de tous les travaux de la présente étude (figure b). Cette modélisation s'appuie sur de longues séries d'observations météorologiques de MétéoSuisse ainsi que sur les résultats les plus récents du projet européen de recherche ENSEMBLES. Partant de ces données, les modèles simulant les processus glaciologiques, le cycle de l'eau et le transport solide par charriage ont été appliqués. Le modèle hydrologique calcule les effets des changements de température et de précipitation sur l'écoulement et le régime hydrologique ainsi que sur des événements extrêmes (hautes et basses eaux). Le modèle glaciologique calcule – également sur la base des changements de précipitation et de température – les futures surfaces, épaisseurs et volumes des glaciers. Le modèle permet en outre d'identifier les endroits où la fonte des glaciers pourrait former de nouveaux lacs. Ces résultats sur les modifications des débits et sur l'englacement entrent ensuite dans la modélisation du transport de matériaux solides (modèle de charriage). Dans le cadre des analyses de charriage, l'apport de matériaux sédimentaires dans les installations hydroélectriques (bassins d'accumulation, conduites, turbines) est calculé. Enfin, un dernier modèle se fonde sur les résultats précédents (hydrologie, englacement, charriage) pour évaluer les conséquences qui en résultent pour l'exploitation des centrales et la production d'énergie. Les descriptions techniques des installations hydroélectriques et les principes s'appliquant à leur exploitation ainsi que des informations sur la structure des prix sont également utilisées dans ces modèles. Ces bases et hypothèses restent en général inchangées dans les simulations du futur.

Toutes les analyses sont effectuées pour deux fenêtres temporelles futures : l'avenir proche englobe la période de 2021 à 2050 (abrégé dans ce rapport période 2035), l'avenir plus lointain embrasse l'intervalle de 2070 à 2099

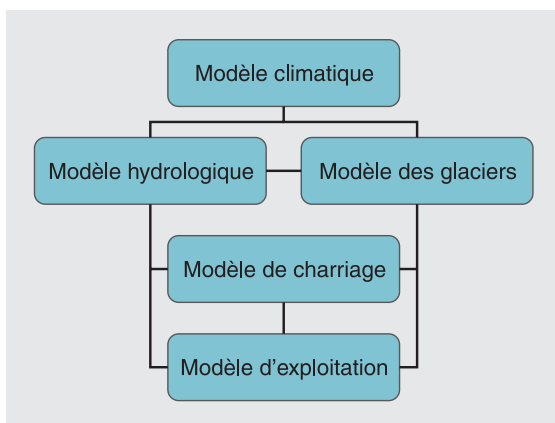


Figure b : Représentation schématisée de la chaîne de modèles.

(abrégé période 2085). Etant donné que les concessions des centrales hydroélectriques ont une durée pouvant atteindre 80 ans, une modélisation sur le long terme est très souhaitable. Les valeurs mesurées entre 1980 et 2009 constituent les valeurs de référence pour pratiquement toutes les parties de l'étude. Les simulations des modèles climatiques globaux sont effectuées à peu d'exceptions près avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC). C'est un scénario d'émission moyen réaliste dans l'optique actuelle et largement utilisé dans le monde (figure c).

Incertitudes

Les résultats des présentes analyses comportent de nombreuses incertitudes: les scénarios d'émission sont dépendants de paramètres difficiles à prévoir (évolution démographique, développement des technologies, de l'économie et, de la politique). En outre, les résultats de la modélisation du climat, de l'hydrologie, des glaciers et du charriage comportent aussi des incertitudes: d'une part, l'intégralité des processus ne peut pas être prise en compte, d'autre part, les données à disposition ne sont souvent pas complètes. Pour donner une idée un peu plus précise des incertitudes, différentes chaînes de modèles ont été utilisées, à chaque fois pour décrire l'évolution du climat, de l'hydrologie et des glaciers. Les résultats montrent que l'ordre de grandeur et la tendance d'évolution des températures, des glaciers et du manteau neigeux concordent bien entre les modèles. En revanche, pour les précipitations et les débits, les modèles montrent des tendances différentes.

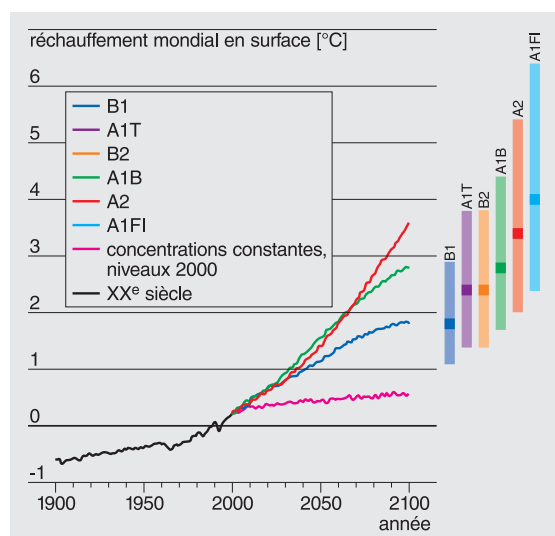


Figure c : Des six scénarios du rapport du GIEC, les présentes analyses ont eu recours au scénario A1B (courbe verte). Celui-ci présuppose une forte croissance de l'économie mondiale, une démographie en hausse et un approvisionnement énergétique composé pour moitié d'énergies renouvelables et pour moitié d'agents fossiles [1]. Traits de différentes couleurs à droite : plage de valeurs possibles pour chaque scénario. Zones d'ombre sur les traits : meilleure estimation.

Chapitre 1: Le climat

L'essentiel en bref :

- C'est en été et en hiver que l'augmentation des températures due au changement climatique est la plus forte.
- L'augmentation des températures se produit sur l'année entière et est plus grande que la variabilité naturelle.
- L'augmentation des températures est particulièrement forte dans l'arc alpin.
- La durée et la fréquence des périodes de forte chaleur augmenteront.
- Les changements de précipitation selon le scénario 2035 se situent le plus souvent dans les limites des variabilités observées jusqu'ici.
- Dans un avenir lointain, les quantités de précipitation estivales diminueront.
- Les précipitations annuelles augmenteront sur le versant nord des Alpes, tandis qu'elles diminueront au sud de la Suisse.
- La fréquence et l'intensité des fortes précipitations augmenteront probablement (données incertaines).

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur le rapport technique *Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz* [A].

Changements observés jusqu'ici

Dans le monde entier, le climat est enregistré depuis environ 1850 dans d'innombrables stations. De longues séries de mesure de la température de l'air et des précipitations permettent de comparer une année particulière avec la moyenne à long terme. Les analyses des séries de mesures de longue durée font apparaître une augmentation sensible de la température globale : entre 1956 et 2005, la température a augmenté presque deux fois plus par décennie que durant la période de 1906 à 2005. La première décennie du 21^e siècle se présente comme la plus chaude depuis le début des mesures. Le réchauffement des océans, la fonte des surfaces de neige et de glace ainsi que l'élévation du niveau de la mer sont étroitement liés à cette augmentation de la température [1].

Ce réchauffement s'observe aussi en Suisse : durant les trente dernières années, les températures ont augmenté de 0.35°C par décennie (figure 1.1). L'augmentation par décennie est ainsi 1.6 fois plus grande que la hausse moyenne dans l'hémisphère Nord [2]. On constate en outre un changement du niveau des précipitations : les précipitations annuelles moyennes ont augmenté d'environ 8 pour cent pendant le 20^e siècle – et même de 20 à 30 pour cent au nord de la Suisse (figure 1.2).

Avec la hausse des températures, le taux d'évaporation augmentent aussi : de ce fait, les débits restent constants en dépit de l'augmentation des précipitations annuelles [3].

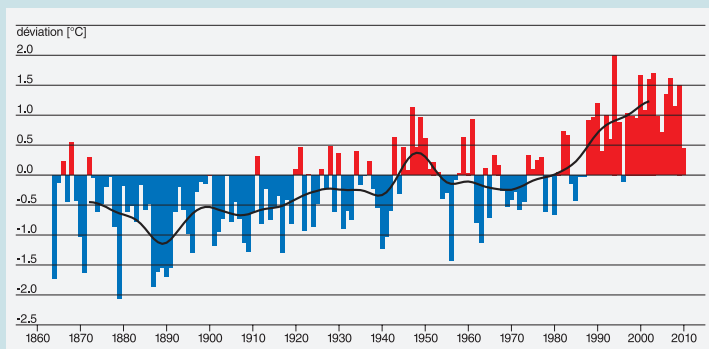


Figure 1.1 : Ecarts de la température moyenne par rapport à la moyenne des années 1961 à 1990 au nord de la Suisse. En bleu : années au-dessous de la moyenne. En rouge : années au-dessus de la moyenne. Ligne noire : moyenne pondérée sur 20 ans [4].

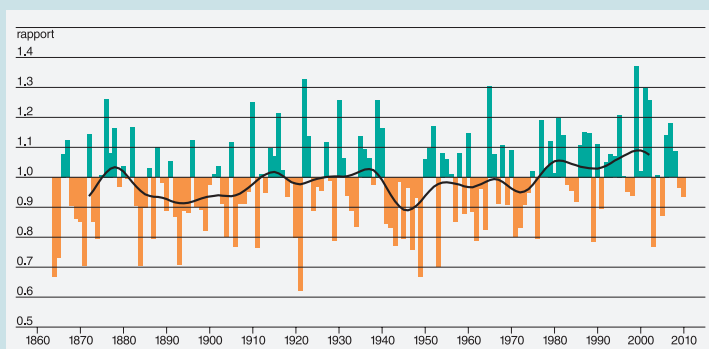


Figure 1.2 : Précipitations annuelles moyennes entre 1864 et 2010 au nord de la Suisse (moyenne pondérée sur 20 ans) relatif à la moyenne pour la période 1961-1990. En vert : années au-dessus de la moyenne. En orange : années au-dessous de la moyenne. Ligne noire : moyenne pondérée sur 20 ans [4].

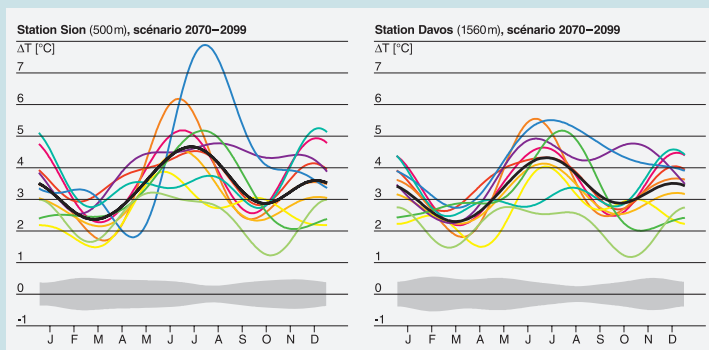


Figure 1.3 : Variation annuelle du changement de température des dix chaînes de modèles climatiques pour la période 2070 à 2099 aux stations de Sion (500 m d'alt.) et de Davos (1560 m d'alt.) relatif à la période de référence 1980 à 2009. Ligne noire : moyenne de l'ensemble. Bande grise : ± 1 écart-type de la variabilité naturelle [A].

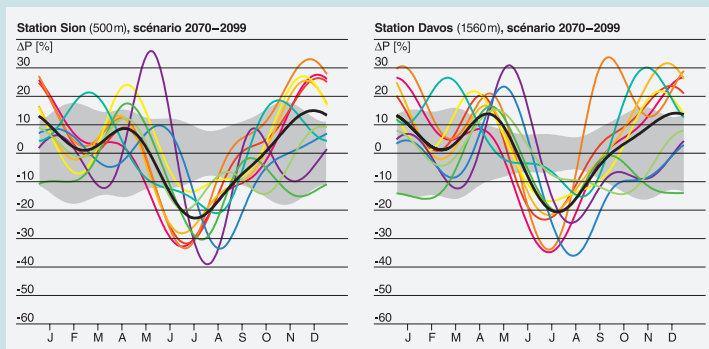


Figure 1.4 : Variation annuelle du changement de précipitation, des dix chaînes de modèles climatiques pour la période 2070 à 2099 aux stations de Sion (500 m d'alt.) et de Davos (1560 m d'alt.) par rapport à la période de référence 1980 à 2009. Ligne noire : moyenne de l'ensemble. Bande grise : ± 1 écart-type de la variabilité naturelle [A].

Scénarios pour la Suisse jusqu'en 2099

Variabilité annuelle

Température : Les modélisations montrent que les températures augmenteront particulièrement en été et en hiver. Dans l'avenir proche (2021 à 2050), la hausse par rapport à la période 1980 à 2009 sera d'environ $+1.5^{\circ}\text{C}$; pour la période 2070 à 2099, elle atteindra entre $+3.0$ et $+4.5^{\circ}\text{C}$. En outre, la figure 1.3 fait ressortir de façon exemplaire, en se référant aux stations de Sion et de Davos, que dans l'avenir lointain les températures augmenteront durant toute l'année. Cette hausse est nettement supérieure à la variabilité naturelle mesurée dans le passé. Les scénarios des différentes chaînes de modèles climatiques se distinguent très nettement les uns des autres avant tout en été et en hiver (2021 à 2050), respectivement en été et en automne (2070 à 2099). Les changements de température modélisés comportent donc des incertitudes pendant ces saisons. La comparaison des deux sites de Sion et Davos montre que les changements de température se dérouleront de façon similaire dans les deux régions. Toutefois, en raison de l'influence sud-européenne plus marquée, les températures d'été à Sion présentent une plus forte augmentation qu'à Davos.

Précipitations : Etant donné que les changements de précipitation se situent dans les limites de la variabilité naturelle tant dans le proche avenir que dans le futur lointain, il n'est pas possible de se prononcer clairement à leur sujet. Une diminution marquée des quantités de précipitation, se situant au delà des fluctuations naturelles, n'est visible que pour les mois d'été de la période 2070 à 2099 (figure 1.4). Les stations de Sion et de Davos présentent des profils très semblables.

Répartition géographique des changements

Pour une représentation des résultats spatialement différenciée, une résolution temporelle élevée n'est pas judicieuse – contrairement aux développements saisonniers. Aussi, les résultats qui suivent sont présentés temporellement comme valeurs saisonnières moyennes.

Température : Les changements de température sont relativement homogènes sur l'ensemble du territoire suisse – un réchauffement plus marqué n'est attendu que dans l'arc alpin en été (figure 1.5).

Précipitations : Les changements de précipitation annuelle sont présentés à la figure 1.6 pour les deux fenêtres temporelles considérées dans cette étude. La répartition géographique est relativement hétérogène surtout dans l'avenir lointain : alors que les quantités de précipitations annuelles augmentent en plaine et sur la frange nord des Alpes, une légère diminution des précipitations annuelles est perceptible dans les régions alpines et méridionales de la Suisse ainsi que dans le

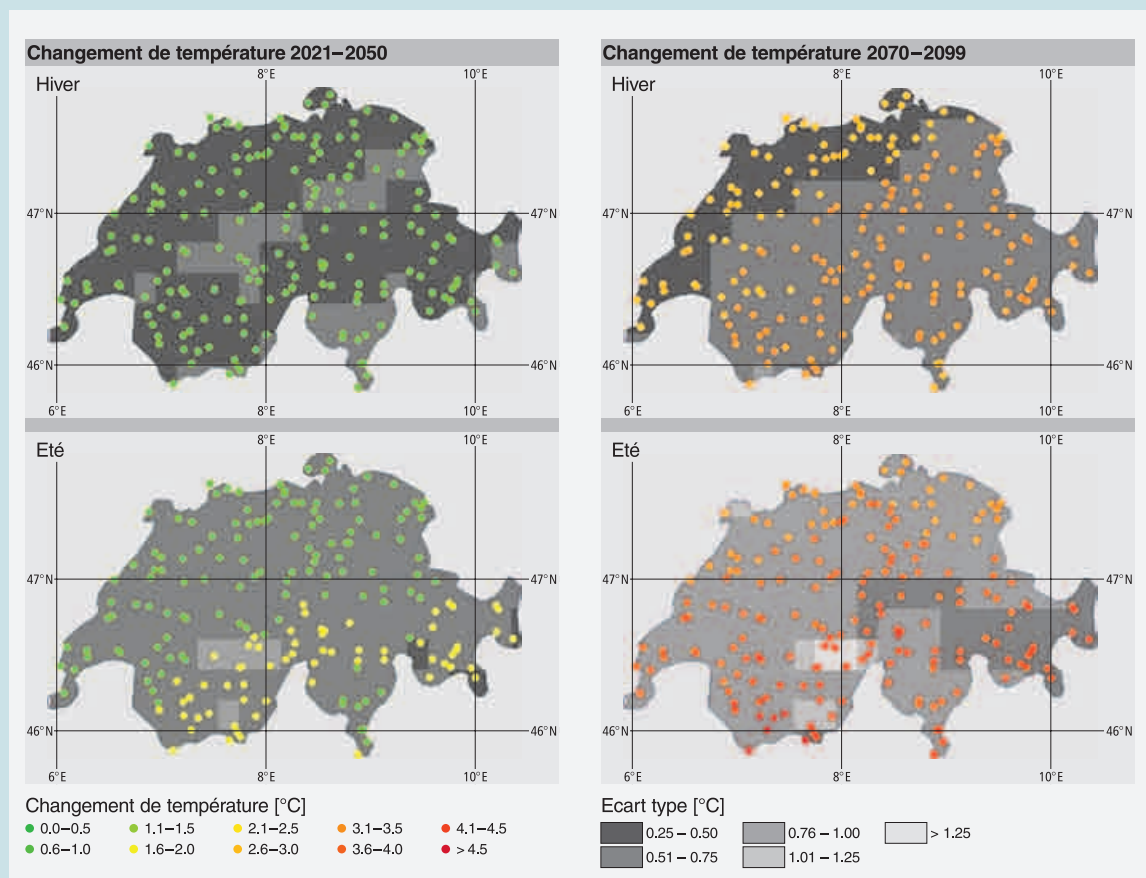


Figure 1.5 : Répartition géographique des changements de température en été et en hiver de la moyenne de l'Ensemble de 2021 à 2050 (à gauche) et de 2070 à 2099 (à droite) par rapport à la période de référence 1980-2009. Echelle de couleurs : changement absolu de la température. Nuances de gris : écart-type du changement de température saisonnière des dix chaînes de modèles climatiques. Plus la surface est sombre, est faible [A] est l'incertitude du modèle.

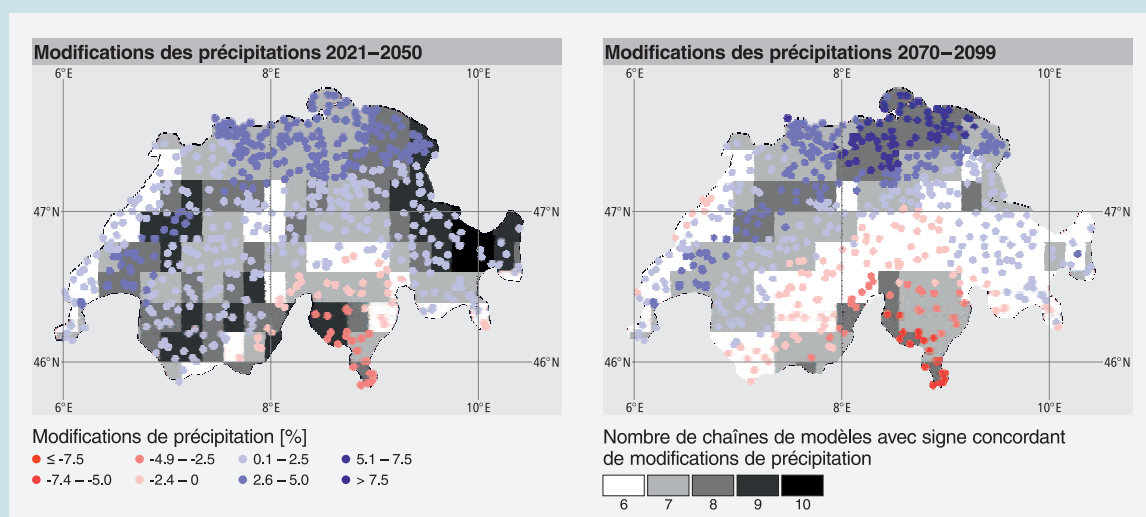


Figure 1.6 : Changements annuels relatifs des précipitations pour les périodes 2021 – 2050 et 2070 – 2099 par rapport à la période 1980 – 2009. Les nuances de gris indiquent le nombre de chaînes de modèles climatiques qui concordent quant au signe (+/-) du changement de précipitation. Plus la surface est sombre, meilleure est la concordance et plus faible l'incertitude du modèle [A].

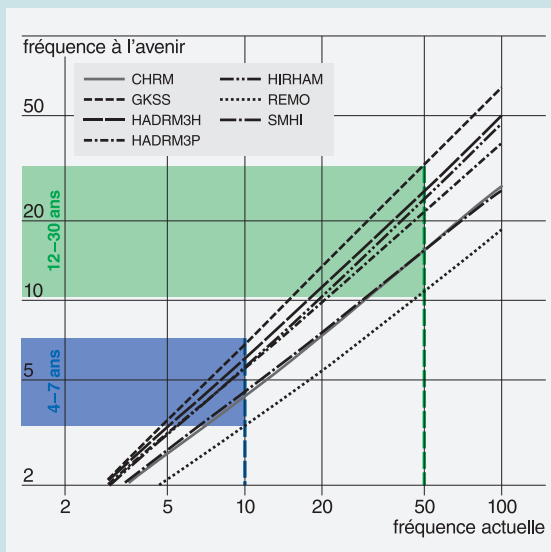


Figure 1.7 : Temps de retour d'événements extrêmes (fortes précipitations durant 24h) au printemps au nord des Alpes. Les rectangles bleus et verts représentent la plage d'incertitude des prévisions. Un événement qui se produit aujourd'hui en moyenne tous les dix ans pourrait survenir à l'avenir tous les quatre à sept ans [5]. Les lignes diagonales représentent les différents modèles.

Jura. Il est intéressant de noter que les quantités de précipitations les plus importantes (jusqu'à 3000 mm/an) sont enregistrées actuellement dans les régions où les précipitations diminueront sensiblement à l'avenir.

A l'opposé, il tombera davantage de pluie ou de neige dans de nombreuses régions considérées jusqu'ici comme plutôt sèches (900-1400 mm/an). Le Valais, déjà sec aujourd'hui, fait exception : il se trouve dans une zone de transition, les changements y sont de ce fait peu importants. En tout, on assistera à une réduction des variabilités régionales.

Evénements extrêmes

Du fait de l'augmentation de la température et de l'humidité de l'air plus élevée qui lui est associée, nombre d'experts admettent que les fortes précipitations seront plus fréquentes et plus intenses (voir figure 1.7). Des expériences avec des modèles de circulation atmosphérique générale aboutissent à la même conclusion [5]. Le graphique montre en outre la grande incertitude des prévisions d'événements extrêmes. Il est possible qu'en raison de l'augmentation des précipitations hivernales et de la hausse des températures, davantage de crues se produiront pendant les mois d'hiver sur le Plateau et dans le Jura [2].

Les vagues de chaleur et les périodes de sécheresse qui leur sont associées ont aussi augmenté pendant les décennies passées. Cette tendance va très probablement se maintenir ou s'accroître : d'ici 2100, un été sur deux pourrait être aussi chaud que l'été caniculaire de 2003 [2]. D'ici la fin du 21^e siècle, il faut compter avec une augmentation des vagues de chaleur tant en Suisse occidentale et au Tessin que dans le nord-est de la Suisse [2].

Chapitre 2 : La neige et les glaciers

L'essentiel en bref :

- Au-dessus de 1200 mètres d'altitude, la durée de l'enneigement saisonnier diminue d'environ 25 jours par degré de réchauffement.
- Les valeurs maximales des équivalents en eau du manteau neigeux diminueront à haute altitude d'environ 50 à 70 pour cent d'ici 2100.
- Les hivers dont la hauteur de neige est aujourd'hui considérée comme faible deviendra le cas normal d'ici 2085.
- D'ici 2085, la neige fondra entièrement en été jusqu'à 3500 mètres d'altitude.
- Les glaciers suisses fondront en grande partie d'ici 2100.
- La fonte des glaciers conduira à la formation de nouveaux lacs. Ils représenteront d'une part des chances pour l'exploitation de la force hydraulique et d'autre part des risques en matière de dangers naturels.

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur les rapports techniques consacrés aux glaciers [C, D].

Le manteau neigeux et les glaciers sont les facteurs hydrologiques majeurs déterminant le régime d'écoulement saisonnier dans les zones de haute altitude. La température est déterminante tant pour le type de précipitation (neige ou pluie) que pour l'ampleur de la fonte des glaciers et de la neige : le réchauffement climatique exerce donc une influence directe sur ces deux facteurs. Suivant les conditions météorologiques de l'hiver précédent, le manteau neigeux stocke annuellement de 4 à 20 milliards de mètres cubes d'eau - ceci au moment de son extension maximale, en mars ou avril. Une comparaison impressionnante : l'ensemble des bassins d'accumulation suisse ont une capacité d'environ quatre milliards de mètres cubes. Le manteau neigeux fond en général en grande partie jusqu'à la fin de l'été. A haute altitude, une partie se transforme en névés. Ce sont ces derniers qui ont alimenté jusqu'ici les glaciers.

Les glaciers suisses renferment aujourd'hui une réserve de quelque 60 milliards de mètres cubes d'eau, qui s'est constituée principalement pendant les siècles passés. Ce volume est à peu près égal à celui des précipitations annuelles en Suisse.

Evolution du manteau neigeux

La limite des chutes de neige correspond à peu près à la limite du zéro degré de la température de l'air. Si la température s'élève, la limite des chutes de neige s'élève également. Des analyses ont montré que la limite hivernale des chutes de neige monte d'environ 200 mètres pour un réchauffement de un degré. Jusqu'ici, la limite des chutes de neige en hiver se situait en moyenne vers 900 mètres d'altitude.

Depuis le début des années 1980, la durée de l'enneigement a diminué, surtout en-dessous de 1800 m, de 20 à 40 pour cent par rapport à la moyenne à long terme [6]. Une modélisation [B] portant sur seize bassins versants (des hautes Alpes jusqu'en plaine) a montré qu'à partir de 1200 mètres d'altitude, la durée de l'enneigement se raccourcira d'environ 25 jours d'ici 2035 (figure 2.2). Cependant, les incertitudes des modèles sont assez grandes, surtout entre 1200 et 2000 mètres d'altitude. Les investigations dans le bassin versant du lac de Göscheneralp [K] montrent d'une part que d'ici 2085 la durée de l'enneigement se raccourcira de cinq à huit semaines à toutes les altitudes et d'autre part, on s'attend à ce que toute la région soit libre de neige pendant l'été jusqu'à une altitude de 3500 mètres (figure 2.3). Les glaciers sur place ne seront plus alimentés en neige.

Les recherches au sujet de l'évolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux confirment ces conclusions et parviennent à des résultats similaires dans toutes les régions et avec tous les modèles climatiques. Le moment de l'année où la réserve de neige atteint son maximum survient deux à quatre semaines plus tôt. La réduction du maximum, de 20 à 50 pour cent jusqu'en 2035, et de 50 à 70 pour cent jusqu'en 2085, est considérable. La variabilité entre hivers riches et pauvres en neige restera importante jusqu'en 2035, mais diminuera notablement jusqu'en 2085. Dans le bassin versant du lac d'accumulation de Mattmark, les hivers qualifiés aujourd'hui de pauvres en neige deviendront le cas normal d'ici 2085 (figure 2.1). La neige ne subsistera ici qu'à haute altitude en été. La contribution de la fonte des neiges à l'écoulement diminuera jusqu'en 2035 en moyenne d'environ 130 ± 40 millimètres, jusqu'en 2085 de quelque 300 ± 60 millimètres par an. Dans les bassins versants situés à haute altitude, la surface sur laquelle les précipitations tombent sous forme de pluie deviendra ainsi toujours plus grande, si bien que toujours plus d'eau s'écoulera directement dans le système hydrologique.

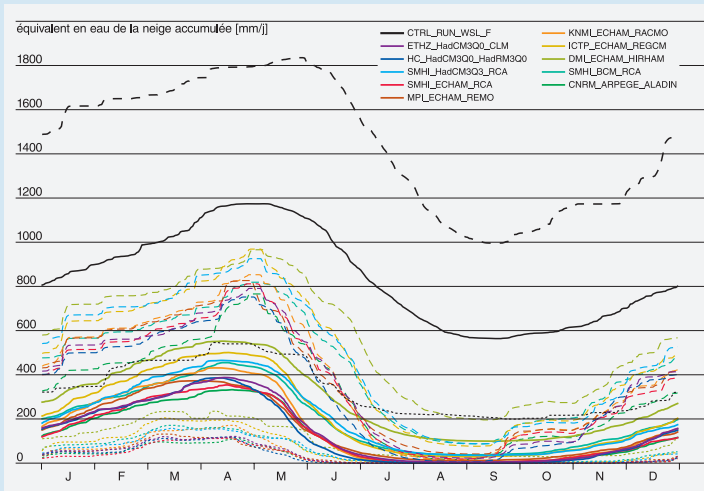


Figure 2.1 : Bassins versants des forces motrices de Mattmark SA : moyennes calculées des équivalents en eau du manteau neigeux [mm] pour la période de référence de 1980 à 2009 (courbes noires) et pour la période 2085 (courbes en couleurs). Les courbes en couleurs montrent les résultats des différentes modélisations du climat. La figure présente les quantiles 2.5 (en pointillés), 50 (lignes continues) et 97.5% (en traitillés) [H].

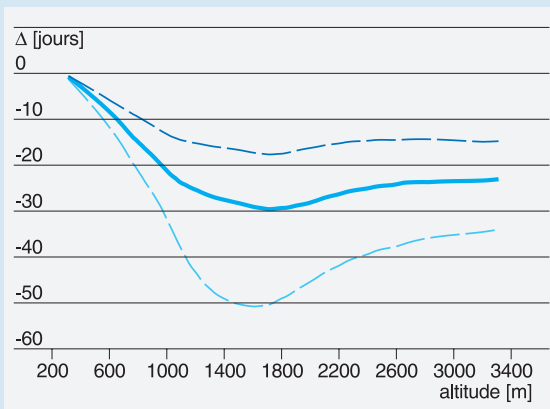


Figure 2.2 : Changement de la durée moyenne de l'enneigement d'au moins 20 cm d'épaisseur en fonction de l'altitude de 1980-2009 jusqu'à la période 2035. Quantiles 5, 50 et 95% [B].

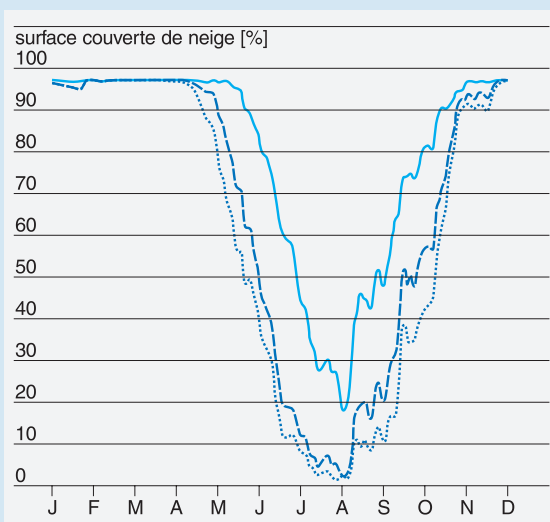


Figure 2.3 : Pourcentage de la surface couverte de neige dans le bassin versant du lac de Göscheneralp au cours de l'année. La période de référence de 1981 à 2010 (ligne continue) est comparée aux scénarios A2 (en traitillés) et B2 (en pointillés) pour 2085 du GIEC [K].

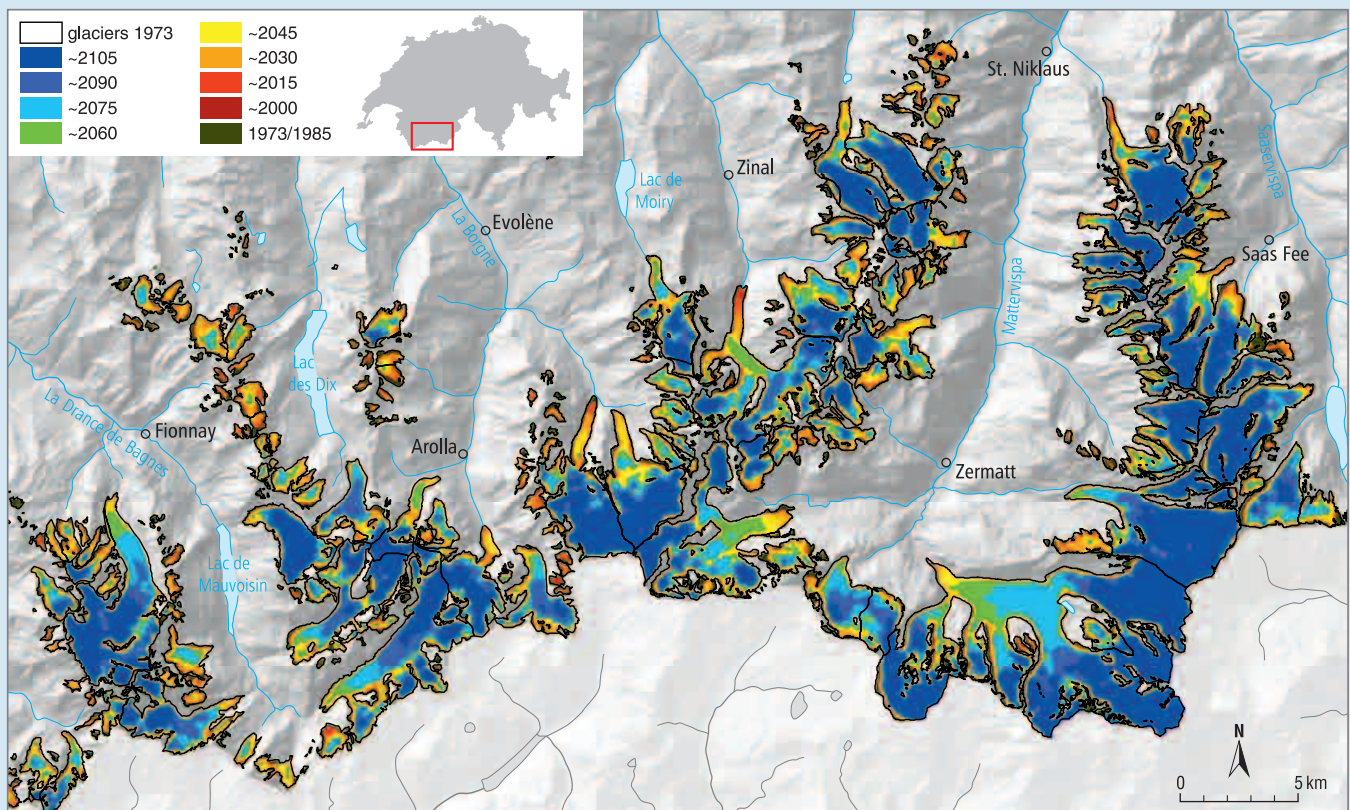


Figure 2.4 : Evolution des surfaces des glaciers jusqu'à l'année indiquée (voir légende) pour le sud du Valais. Calcul effectué à l'aide de la diminution estimée de l'épaisseur [C].

Evolution des glaciers

Au cours de l'hiver, une couche de neige se dépose sur le glacier. En été, cette neige fond entièrement dans la zone inférieure du glacier, et en partie au moins dans la zone supérieure. En outre, une partie de la glace de la zone inférieure du glacier fond aussi. Si cette fonte est compensée par l'accumulation de neige dans la zone supérieure, la masse totale du glacier reste inchangée pendant l'année considérée : on parle d'un bilan de masse équilibré. Pendant les années humides et froides, comme par exemple 1912 à 1920 et 1974 à 1981 [7], le bilan de masse est positif : les glaciers accumulent beaucoup de glace, seule une petite partie fond. En revanche, le bilan est négatif pendant les années chaudes et les glaciers voient alors leurs réserves diminuer. Tel est le cas depuis 1985. Les glaciers alimentent ainsi les cours d'eau de manière additionnelle.

Des données satellitaires et des informations topographiques ont permis d'estimer la géométrie de la base des glaciers et de cette manière l'épaisseur de ces derniers en Suisse [C]. De plus, le lit de quelques grands glaciers a été déterminé à l'aide de mesures radar [D, 9]. Partant de ces données et à l'aide de scénarios clima-

tiques (cf. chapitre 1), on a effectué des études détaillées de la fonte future des masses de glace (figure 2.4) [C, D] et procédé à des extrapolations pour toutes les surfaces et tous les volumes des glaciers suisses (figure 2.5). Il en ressort clairement que les glaciers reculeront très fortement. En 2100, leurs surfaces et volumes ne représenteront plus que 15 pour cent environ du niveau maximum de 1850 (figure 2.6). Les incertitudes sont toutefois importantes et peuvent atteindre jusqu'à 30 pour cent.

Des calculs détaillés ont été effectués pour le glacier du Gorner et les glaciers du bassin versant de Mattmark au sujet des changements de surface et de volume [D]. La figure 2.6 montre de façon exemplaire l'évolution de la surface, de l'épaisseur et du volume du glacier du Gorner : d'ici la fin du 21^e siècle, il ne restera que 37 pour cent des surfaces glaciaires actuelles et 21 pour cent des volumes; l'épaisseur de glace diminuera donc fortement. L'évolution future de l'englacement dans les bassins versants considérés dans l'étude est résumée dans le tableau 2.1.

Lorsque, dans la seconde moitié du 21^e siècle, les glaciers auront partiellement ou totalement disparu, de

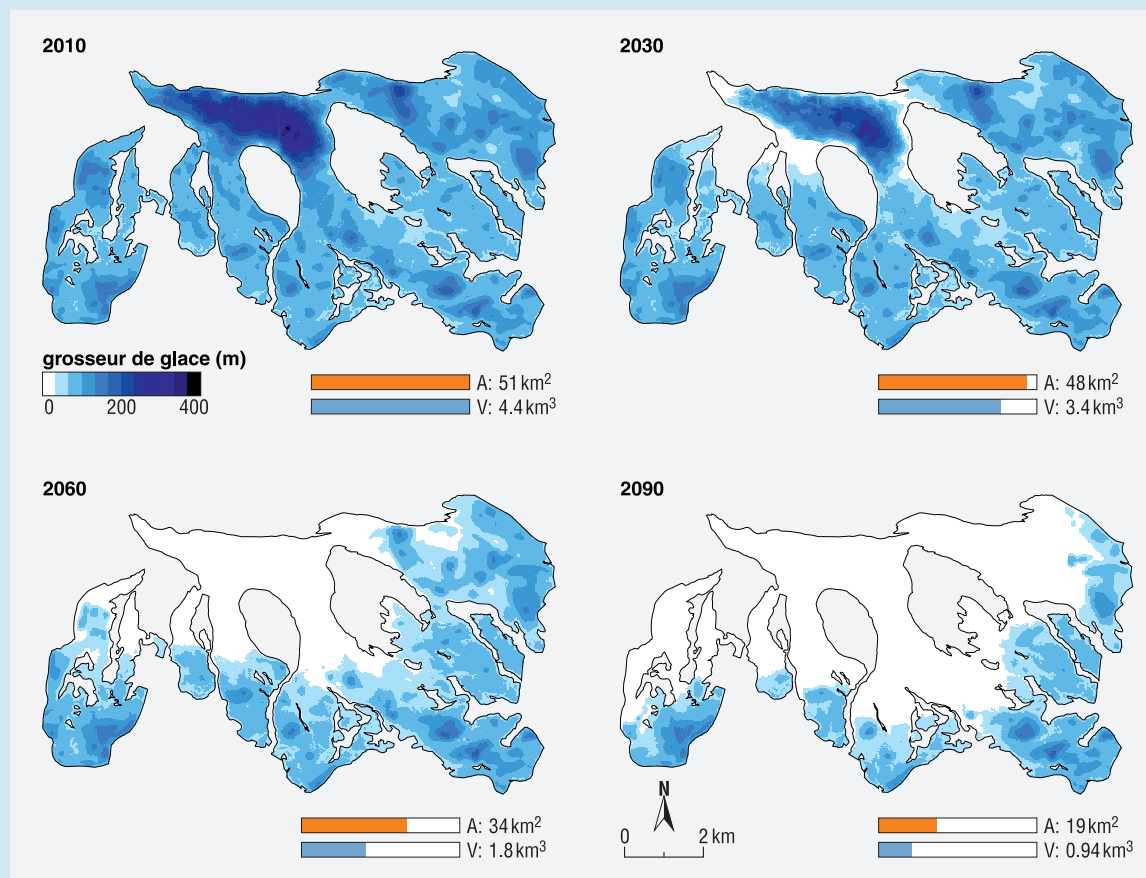


Figure 2.5 : Evolution de la surface A, du volume V et des épaisseurs de glace dans le bassin versant de l'actuel glacier du Gorner. Les surfaces blanches indiquent les zones dans lesquelles plus de la moitié de 100 simulations prévoient une disparition du glacier [D].

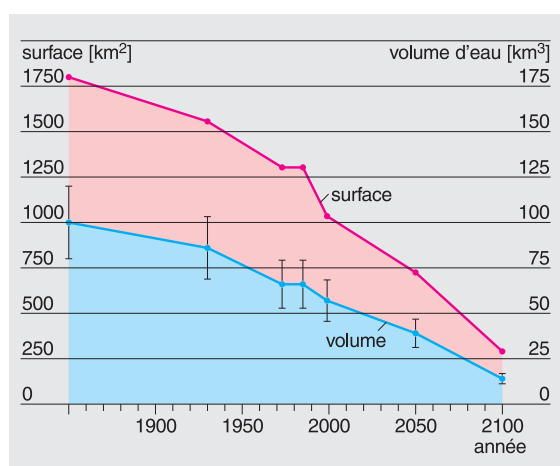


Figure 2.6 : Evolution des surfaces et volumes des glaciers dans les Alpes suisses (avec barres d'incertitude pour la variation des volumes) [C, 8, 9].

nouveaux lacs pourraient se former dans les surcreusements des lits des glaciers (figure 2.7). Il est possible qu'environ 500 nouveaux lacs voient le jour, totalisant une surface de quelque 50 kilomètres carrés et un volume d'à peu près deux kilomètres cubes [C]. Ce stock d'eau supplémentaire représenterait environ la moitié

Tableau 2.1 : Evolution des surfaces des glaciers dans les bassins versants des sociétés hydroélectriques considérées dans l'étude [C, D, H, I, J, K].

Centrale hydroélectrique	Taille du bassin versant [km²]	Surface glaciaire		
		1985 [%]	2035 [%]	2085 [%]
Mattmark	86	35	19	9
Gougra (val d'Anniviers)	252	19	15	10
Gornera	81	68	58	30
Oberhasli	450	23	15	8
Göscheneralp	96	25	14	6
Prättigau	283	3	3	—
Löntsch (Klöntal)	83	3	2	—

Tableau 2.2 : Evolution des volumes des glaciers de bassins versants choisis [D].

Région	Taille du bassin versant [km²]	Volume glaciaire [km³]			
		2010	2030	2060	2090
Mattmark	65.7	1	0.7	0.3	0.06
Gornera	80.9	4.4	3.4	1.8	0.9

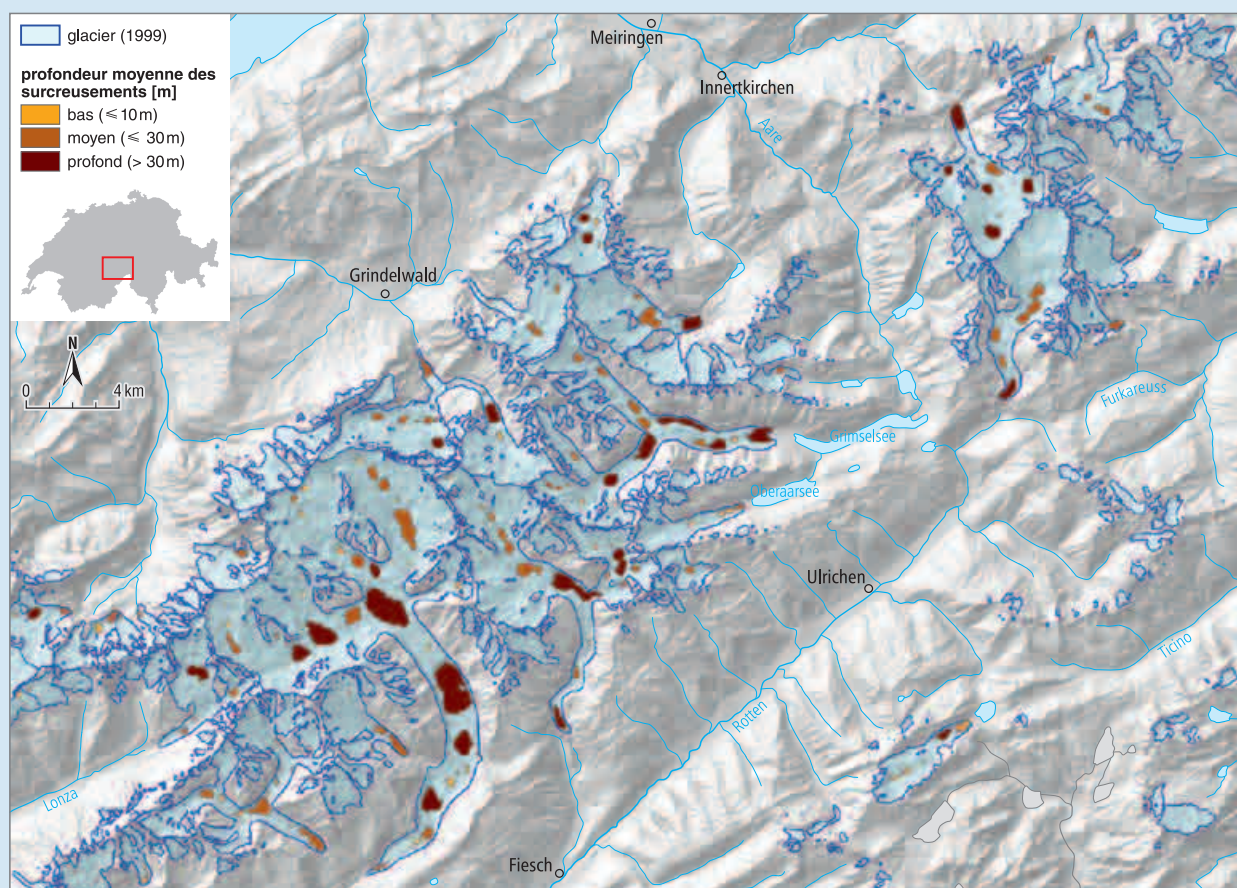


Figure 2.7 : Zones de lacs potentiels dans la région d'Aletsch et de la Furka avec indication de la profondeur des lacs [C].

du volume total actuel des bassins d'accumulation de Suisse. Les plus grands de ces lacs, d'un volume de plus de 50 millions de mètres cubes, sont attendus avant tout en Valais : au-dessous du grand glacier d'Aletsch, du glacier du Gorner, du glacier d'Otemma et du glacier de Corbassière. Localement (par exemple au glacier d'Aletsch), il est possible que les glaciers reculent encore plus rapidement au contact de l'eau.

Ces lacs présenteront peut-être un intérêt pour l'exploitation de la force hydraulique, car ils stockent beaucoup d'eau. Toutefois, ils recèlent aussi un risque : il est fort possible que les flancs des montagnes se déstabilisent après la fonte des glaciers et s'écroulent dans les lacs sous forme d'éboulements ou de glissements de terrain. Les crues soudaines qui en résulteraient pourraient se déverser dans la vallée et y causer des ravages. Mais ces nouveaux lacs ont un autre effet, positif celui-ci : ils retiennent de façon sûre le charriage ultérieur à leur formation. Toutes ces questions sont examinées actuellement dans le cadre d'un Programme national de recherche, le PNR61.

Chapitre 3: Débits et régimes d'écoulement

L'essentiel en bref :

- Les débits annuels moyens provenant de régions fortement englacées augmentent de manière transitoire. Vers 2100, ils diminueront dans les bassins versants situés au nord des Alpes à peu près jusqu'à leurs niveaux de 1960 à 1991. Au sud du Valais et sur le versant sud des Alpes, ils baisseront au-dessous du niveau de 1960 à 1991, en raison de l'affaiblissement des précipitations.
- Les débits maximums saisonniers provenant de régions aujourd'hui englacées se déplacent de l'été vers le printemps. De ce fait, les régimes d'écoulement deviennent plus réguliers, aussi sur les cours inférieurs.
- Il faut s'attendre à des débits nettement plus faibles à la fin de l'été et en automne – en particulier après des étés secs.
- Pendant les années où les débits sont faibles, les cours d'eau transporteront encore moins d'eau à l'avenir.
- L'évaporation s'accroît légèrement de façon générale, mais reste faible comparée aux précipitations annuelles.

Ce chapitre se fonde sur les rapports techniques [B] et [F] à [K].

Prise en compte du passé

Des informations détaillées sur les ressources en eau sont essentielles à une utilisation optimale de la force hydraulique. Pour planifier les installations et l'exploitation de ces dernières, les exploitants de centrales hydroélectriques ont besoin de connaître les tendances à moyen et long terme de la disponibilité en eau. Des analyses des données du passé sont nécessaires pour comprendre les processus complexes et leurs relations et constituent la base des travaux prospectifs [10].

Développements dans le bassin versant du Rhin

La série de mesure du débit du Rhin près de Bâle remonte à 1808 et constitue la plus longue série d'observations hydrologiques d'Europe centrale. Le bassin versant de ce fleuve s'étend sur une surface de presque 36'000 kilomètres carrés (67 pour cent de la surface de la Suisse) et couvre tout le nord des Alpes suisses.

C'est pourquoi ces données sont idéales pour analyser les développements hydrologiques en Suisse.

Les mesures depuis 1808 ne montrent pas de grands changements en ce qui concerne les débits annuels (figure 3.1). Cependant, la répartition des débits au cours de l'année s'est nettement modifiée : depuis le début du 20^e siècle, les débits moyens estivaux sont en baisse et les débits hivernaux en hausse (figure 3.2). Ce déplacement saisonnier tient d'une part au fait que les précipitations hivernales tombent toujours plus fréquemment sous forme de pluie en raison de l'augmentation des températures. Les précipitations hivernales

aboutissent ainsi directement dans le système d'écoulement. En outre, la production d'eau de fonte pendant les mois d'été est moins importante. D'autre part, les bassins d'accumulation alpins collectent en été l'eau utilisée l'hiver suivant pour produire de l'électricité. Il s'ensuit un accroissement supplémentaire du débit en hiver. La variabilité au cours de l'année diminue donc de façon significative, le régime d'écoulement devient plus régulier. Pendant les mois d'été et d'automne, les précipitations ont diminué, ce qui a donné lieu à des débits plus faibles pendant ces saisons [10,11].

Modifications du régime d'écoulement

Le régime d'écoulement décrit le comportement saisonnier des débits moyens d'un cours d'eau au fil de l'année. Pour calculer ce régime, on détermine pour chaque mois de l'année le coefficient de Pardé, c'est-à-dire le quotient du débit mensuel moyen par le débit annuel moyen [12]. Ce coefficient représente la part de l'écoulement d'un mois par rapport au débit annuel. Les coefficients de Pardé de différents cours d'eau peuvent être comparés directement. Le régime d'écoulement fournit ainsi d'importantes informations pour l'exploitation des cours d'eau, que ce soit pour la production d'électricité, l'approvisionnement en eau, l'irrigation ou la navigation fluviale [12].

En Suisse, on distingue trois types de base de régime d'écoulement: le régime alpin, le régime préalpin et jurassien, et le régime sudalpin. La figure 3.3 montre à quel point la répartition des écoulements peut différer d'un régime à un autre.

Modifications de régime dans le passé

Des analyses du comportement de l'écoulement de cinquante-six bassins versants choisis montrent que les régimes se sont modifiés depuis le début des mesures : dans les régions fortement englacées les débits printaniers, estivaux et hivernaux, ainsi que les débits annuels ont augmenté. Ceci s'explique par l'augmentation des températures, qui a pour effet que la fonte de la neige et des glaciers a lieu plus tôt dans l'année, et aussi que davantage d'eau de fonte est produite. Les régimes d'écoulement nivaux et pluviaux ne présentent guère de changements, les débits annuels sont restés relativement constants jusqu'à aujourd'hui. Les régimes jurassiens présentent un déplacement sensible des débits de pointe d'avril à mars. Ceci conduit à reclasser le nivo-pluvial jurassien dans le pluvial jurassien. Pour les régimes du Tessin, aucune conclusion claire ne peut être tirée des séries de mesures trop courtes [B].

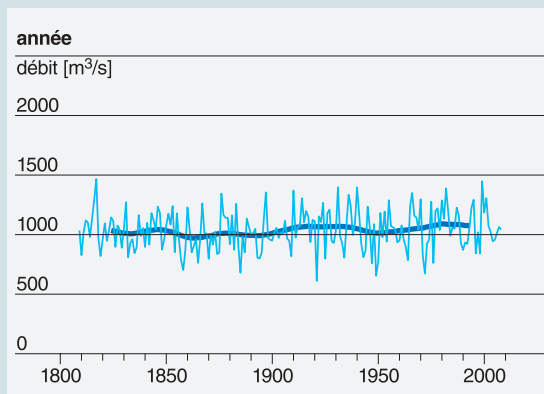


Figure 3.1 : Débits annuels moyens [en m^3/s] du Rhin près de Bâle de 1808 à 2007 [10].

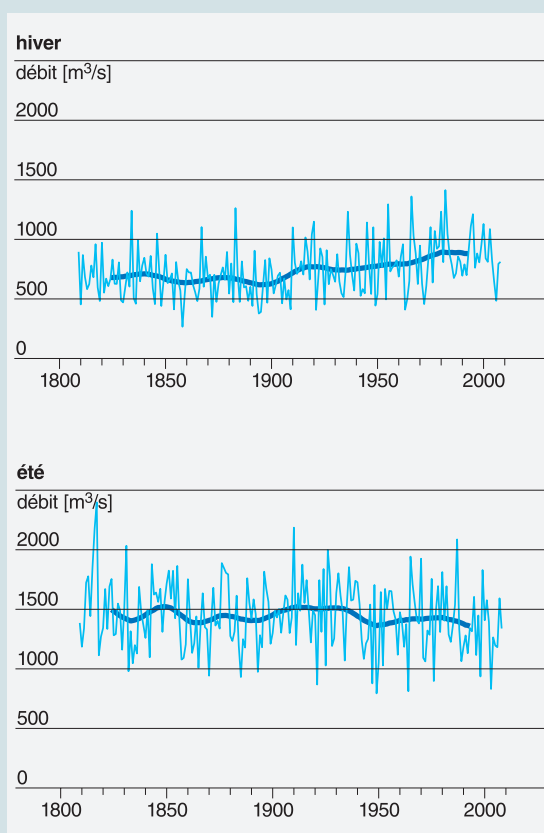


Figure 3.2 : Débits moyens en m^3/s , en hiver et en été, du Rhin près de Bâle de 1808 à 2007 [10].

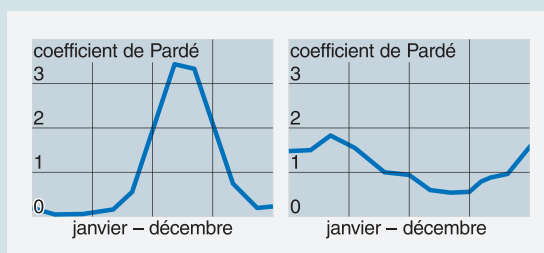


Figure 3.3 : Exemples de courbes de coefficients mensuels pour différents régimes d'écoulement: à gauche, régime alpin, à droite: régime jurassien [13]. L'axe horizontal représente le cours de l'année, les coefficients de Pardé sont reportés sur l'axe vertical.

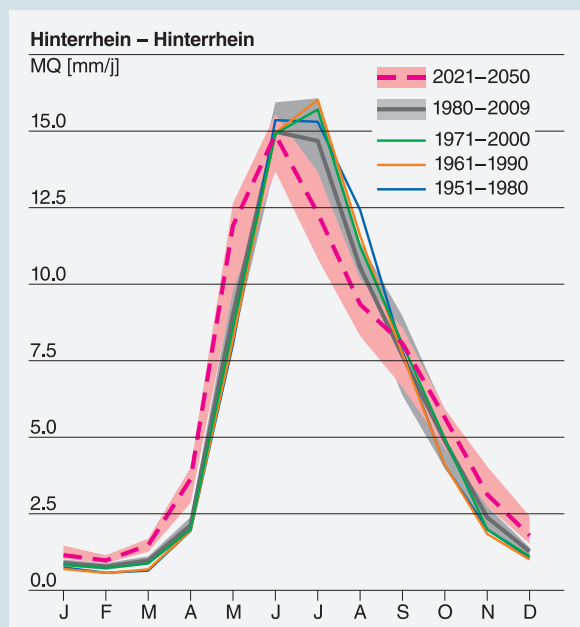


Figure 3.4 : Régimes d'écoulement décennaux moyens du Rhin postérieur [B].

Regard vers l'avenir

Modifications des débits

Les ressources annuelles en eau sont partout fortement influencées par l'augmentation des températures, l'accroissement de l'évaporation et les changements du régime des précipitations. A ceci s'ajoutent, dans les régions englacées, des changements de quantité d'eau de fonte. Des modélisations pour les régions considérées dans l'étude montrent que dans tous les bassins versants pris en compte, **l'évaporation** augmente de 3 à 5 pour cent pendant la période 2035, et même de 4 à 9 pour cent pendant la période 2085. En chiffres absolus, ce ne sont là respectivement qu'environ 15 et 27 millimètres par an. Ces chiffres sont insignifiants en comparaison des changements de quantité de précipitations. A haute altitude, l'estimation de l'évaporation est relativement incertaine.

Dans les bassins versants de haute altitude, les modifications dans les réservoirs d'eau souterraine sont insignifiants: les réservoirs sont de faible épaisseur et n'ont qu'une faible capacité de stockage.

Modifications des débits dans les bassins versants partiellement recouverts de glaciers

Des mesures effectuées au glacier du Gorner (figure 3.5) permettent de voir en détail comment les débits dans les bassins versants partiellement englacés se sont modifiés depuis 1900 et comment ils évolueront à l'avenir. Du fait de l'élévation future de la limite des chutes de neige, moins de neige sera déposée sur et à côté des glaciers. La part de la pluie dans le débit croîtra. La hausse des températures estivales fera que la fonte du glacier s'intensifiera. La quantité d'eau de fonte augmentera de manière transitoire.

Dans un avenir lointain, la surface recouverte de glaciers diminuera sensiblement, il y aura de nouveau moins d'eau de fonte. Dans l'hypothèse que la quantité de précipitation reste constante, la quantité d'eau qui s'écoulera au cours de l'année sera à peu près la même qu'à l'époque où le bilan de masse des glaciers était encore équilibré. Ceci même si les glaciers ont complètement fondu.

Toutefois, selon les modélisations, les précipitations diminueront un peu vers la fin du 21^e siècle. En outre, l'évaporation devrait augmenter légèrement en raison des températures plus élevées. C'est pourquoi les débits dans les bassins versants qui sont aujourd'hui peu ou modérément englacés atteindront en 2100 des niveaux plus bas qu'au début du 20^e siècle. La répartition saisonnière des débits se modifiera substantiellement, comme le montre l'exemple de la Gornera (figure 3.6). Avec des températures plus chaudes et des surfaces de glaciers encore importantes, le débit estival augmentera de manière transitoire (jusqu'en 2050 environ). Vers 2085, lorsque le glacier sera nettement plus petit, le débit estival de pointe diminuera. La fonte des neiges commencera et finira plus tôt dans l'année, son pic saisonnier se déplacera vers le début de l'été. Le débit diminuera sensiblement à la fin de l'été et en automne, notamment pendant les années sèches. Les débits seront un peu plus grands en hiver. Plus un bassin versant est englacé, plus ces changements saisonniers sont prononcés.

En moyenne annuelle à long terme, les débits des régions considérées dans l'étude changent de différentes manières par rapport à la période de référence de 1980 à 2009. Dans les régions englacées du sud du Valais, une diminution de 6 à 9 pour cent est attendue pour 2035, et de 10 à 12 pour cent pour 2085 [H], [J]. Des diminutions de 3 (2035) et 7 (2085) pour cent en moyenne sont admises pour les régions des forces motrices d'Oberhasli [I]. Au lac de Göschenalp, l'on n'attend aucun changement ou prévoit alors une augmentation de 6 à 23 pour cent pour les deux périodes selon le modèle hydrologique utilisé. Le modèle anticipe une augmentation transitoire de 13 pour cent (période 2035) pour la région du Rhône à Gletsch [B]. Cette aug-

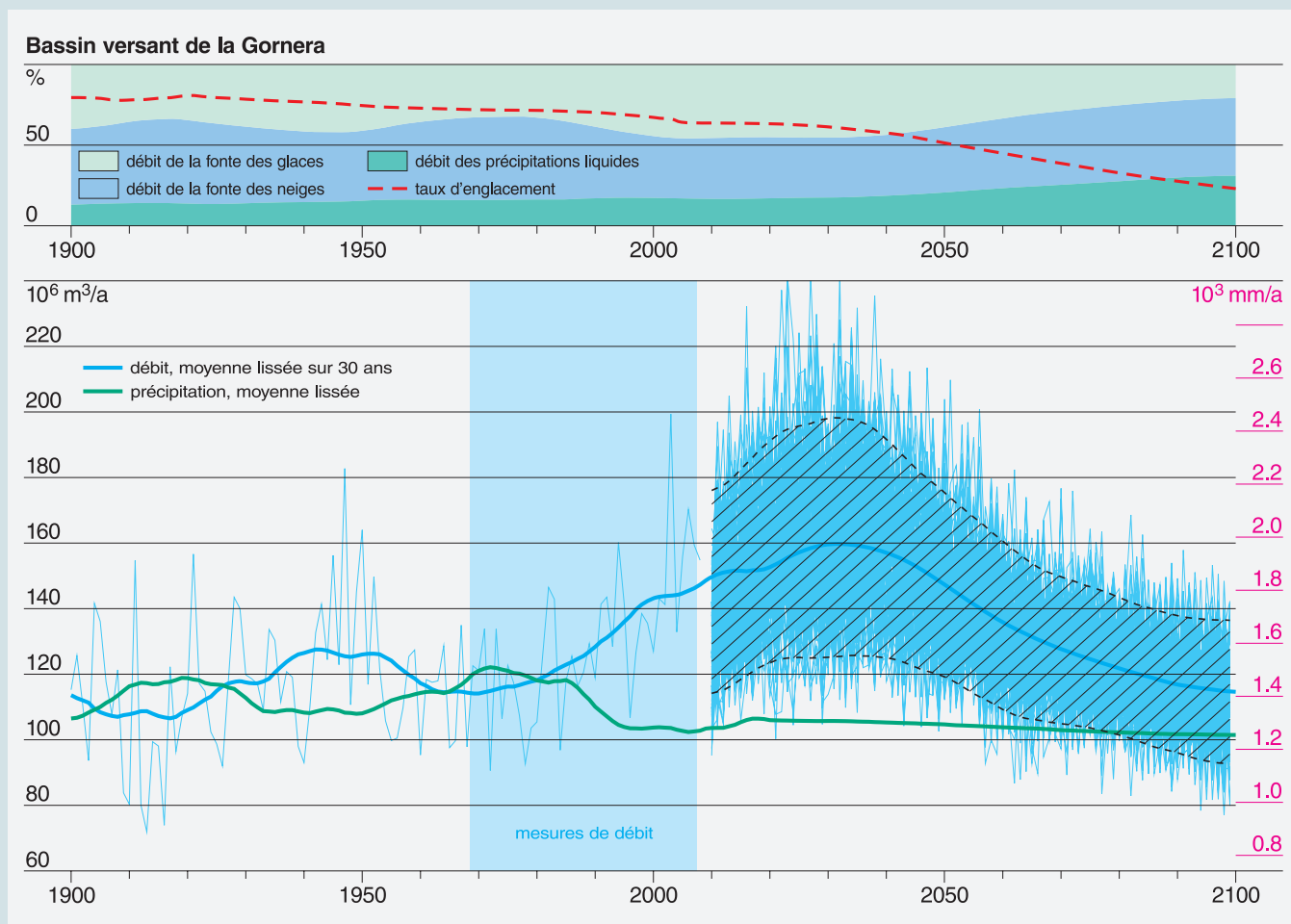


Figure 3.5 : Partie inférieure de la figure : débit annuel à la station de mesure de Gornera (Grande Dixence). La surface hachurée indique le domaine d'incertitude résultant des scénarios climatiques [D]. Partie supérieure de la figure : le débits est subdivisé en parts alimentées par la fonte de la neige (en bleu clair), par la fonte de la glace (vert clair) et directement par la pluie (en vert foncé). La ligne rouge indique le taux d'englacement du bassin versant. Le débit augmentera à l'avenir en raison de l'intensification de la fonte de la glace ; plus tard, il sera formé en premier lieu par la fonte de la neige.

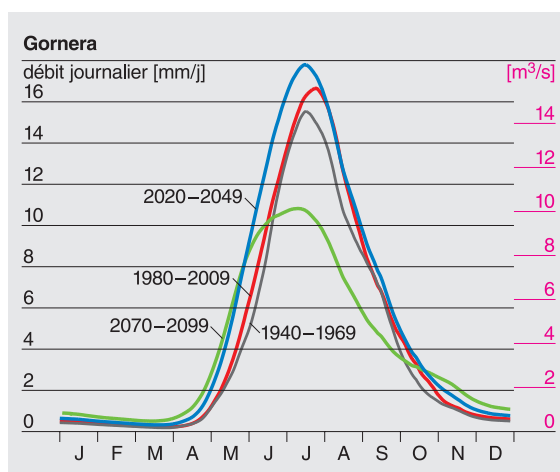


Figure 3.6 : Changement de la répartition saisonnière moyenne des débits dans l'exemple de la Gornera [D].

mentation est corroborée par les investigations de [14]. Les débits annuels des régions de moins haute altitude situées au nord des Alpes se modifient comme suit: les résultats des calculs se dispersent entre une diminution de 1.5 et une augmentation de 4 pour cent [B]. Au sud, où les précipitations subissent une diminution, les calculs concluent à une baisse de 2 à 4 pour cent [B]. Tous ces petits changements sont peu importants en comparaison de la variabilité observée et ils sont statistiquement non significatifs.

Une étude antérieure [15], qui recourt à des scénarios climatiques plus anciens, a calculé pour onze bassins versants alpins une diminution des débits de 5 à 15 pour cent (7 pour cent en moyenne) jusqu'à 2035 et de 12 à 30 pour cent (16 pour cent en moyenne) jusqu'à la période 2085. Les changements calculés dans la présente étude sont donc plus modestes.

Types de régimes d'écoulement		Rhone – Gletsch	Kraftwerk Göscheneralp	Simme – Oberried	Kraftwerk Mattmark	Kraftwerk Gougra	Hinterrhein – Hinterrhein	Landquart – Klosters	Kraftwerk Oberhasli	Dischmabach – Davos	Mönchbach – Trittwald	Stützbach – Davos	Plessur – Chur	Lötsch – Staumauer	Taschinasbach – Grösch	Minster – Euthal	Simme – Oberwil	Sitter – Appenzell	Sense – Thörishaus	Glatt – Herisau	Broye – Payerne	Töss – Neftenbach	Ergolz – Liestal	Birse – Moutier	Riale di Calneggia – Caveragno	Cassarate – Pregassona
a-glaciaire		H K	K																							
b-glaciaire		S1		H K	K																					
a-glacio-nival				S1		K	H																			
b-glacio-nival			S1		S1		K	H K	K	H																
nivo-glaciaire						S1	S1		S1	K	K	K														
nival alpin			S2		S2				S2	S1	S1	S1	H K	K	H											
nival de transition						S2							S1		K S1	H	H K S1	H K S1								
nivo-pluvial préalpin																K S1			H K S1							
pluvial supérieur																				H						
pluvial inférieur																					H	H K				
nivo-pluvial jurassien																							K	H		
pluvial jurassien																							H			
nival méridional																									H K	
nivo-pluvial méridional																									S1	
pluvio-nival méridional																										H S1
pluvial méridional																										

Figure 3.7 : Vue d'ensemble des changements temporels de régime d'écoulement des bassins versants considérés dans l'étude [B] [F] [G] [H] [I] [J] [K]. Les bassins versants comportant des changements de régime sont mis en évidence (cases bleues).

Modification des régimes d'écoulement

Contrairement aux changements des débits annuels, les modifications de la répartition saisonnière des régimes d'écoulement sont prononcées et le plus souvent statistiquement significatives. La figure 3.7 donne une vue d'ensemble à ce sujet. D'importantes transformations ont lieu dans la plupart des régions glaciaires et nivales (régions de plus 1500 mètres d'altitude en moyenne) : depuis 1970, le régime d'écoulement s'est déplacé de une ou deux positions sur l'échelle des régimes ou le fera dans l'avenir proche ou lointain. Les régions du Jura et du Tessin influencées par la fonte des neiges réagissent de la même manière. Aucun changement de régime n'a été observé dans les régions du Plateau dominées par les précipitations.

Dans les régions situées à plus haute altitude, ces changements signifient un déplacement des débits de pointe de trois à six semaines vers le printemps. Les débits hivernaux augmenteront, le pic estival diminuera et des

débits nettement plus faibles seront observés à la fin de l'été et en automne. Considérés sur une année, les écoulements seront un peu plus réguliers. La période de basses eaux en hiver subsistera dans les régions situées à plus haute altitude [B, F].

Chapitre 4: Le charriage



L'essentiel en bref :

- Les quantités de sédiments existantes dépassent largement les capacités de transport, notamment dans les torrents glaciaires.
- A l'avenir, les plus grandes quantités de matériaux seront charriées tendanciellement un peu plus tôt dans l'année – on observe un déplacement de l'été vers le printemps.
- Les quantités de sédiment charriées diminuent dans environ la moitié des bassins versants considérés (38), ceci en raison de débits en baisse.
- Les conditions locales sont déterminantes pour tirer des conclusions concrètes.
- L'évolution future des fortes précipitations est incertaine. Il n'est donc guère possible de prévoir comment le transport de matériaux solides se modifiera sous l'influence de ces événements extrêmes.

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur le rapport technique *Auswirkungen der Klimaänderung auf die Geschiebefracht* [E].

Le transport de matériaux solides provenant des bassins versants d'aménagements hydroélectriques peut conduire à l'alluvionnement de lacs d'accumulation et à une diminution correspondante de leur capacité de stockage, causer l'usure de turbines et endommager des prises d'eau. Ceci entraîne des coûts élevés d'exploitation et d'entretien. Pour ces raisons, le WSL a examiné de près dans la présente étude la situation dans les bassins versants de quatre sociétés hydroélectriques valaisannes : Grande Dixence SA, Gougra SA, Mattmark AG et Mauvoisin SA. Par ces analyses, on veut pouvoir estimer l'évolution du transport solide par charriage dans un avenir proche et lointain.

Pour obtenir des résultats pertinents, il faut de longues séries de mesures, mais aussi des observations sur le terrain : les exploitants des centrales ont mis à disposition de nombreuses informations ayant trait au débit, aux charges sédimentaires et au climat des différents bassins versants. Des mesures très complètes ont été effectuées sur le terrain pour obtenir des informations supplémentaires sur la géométrie des lits des cours d'eau, la granulométrie et la géomorphologie.

Le régime de charriage

La quantité de matériaux qui peut être mobilisée (détachée du sol) et transportée par un cours d'eau dépend du charriage potentiel et de la capacité de transport du cours d'eau. Le charriage potentiel est déterminé par la présence de matériaux transportables, le taux d'englacement du bassin versant, l'extension du pergélisol et le

Charriage relatif de 2021–2050 comparé à la période 1980–2009

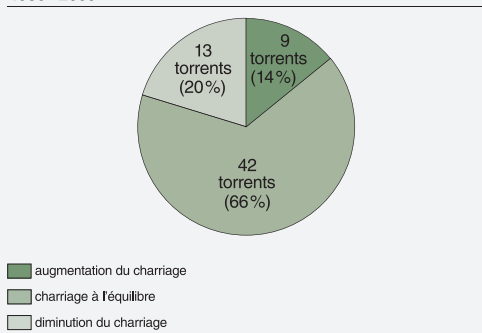


Figure 4.1 : Changements du transport solide par charriage dans 64 torrents pendant la période 2021 – 2050 en comparaison des observations pendant la période de référence 1980 – 2009. Les chiffres indiquent le nombre de torrents. Davantage de transport solide par charriage correspond + de >120 % des quantités charriées de la période de référence, moins de transport – de <80 % de la période de référence. Un transport égal signifie que les quantités charriées sont entre 80 % et 120 % de ceux de la période de référence [E].

Charriage relatif de 2070–2099 comparé à la période 1980–2009

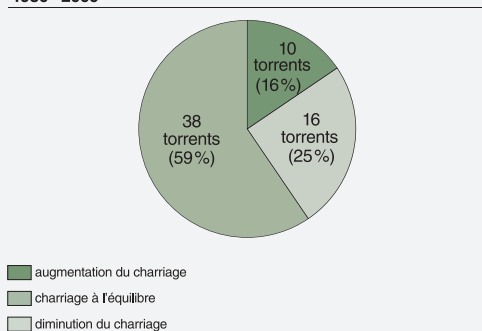


Figure 4.2 : Changements du transport solide par charriage dans 64 torrents pendant la période 2070 – 2099 en comparaison des observations pendant la période de référence 1980 – 2009. Les chiffres indiquent le nombre de torrents. Davantage de transport solide par charriage correspond à + de 120 % des quantités charriées de la période de référence, moins de transport à - de 80 % de la période de référence. Un transport égal signifie que les quantités charriées sont entre 80 % et 120 % de ceux de la période de référence [E].

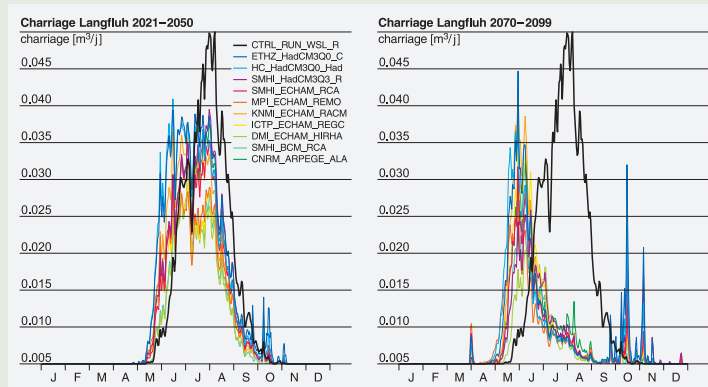


Figure 4.3 : Répartition saisonnière du transport solide par charriage des périodes 2021 – 2050 (à gauche) et 2070 – 2099 (à droite), en comparaison des observations de la période de référence 1980 – 2009 (en noir) pour le bassin versant de Langfluh (Grande Dixence) [E]. Dix scénarios ont été utilisés pour chaque période.

couvert végétal. La capacité de transport d'un chenal dépend d'une part de la plus faible pente le long du cours d'eau, car c'est là que les forces tractrices au fond du lit du cours d'eau sont les plus faibles. En aval de cet endroit, seul les matériaux solides correspondant à la capacité de transport du segment le plus plat du cours d'eau sont charriés. D'autre part, le débit détermine aussi la capacité de transport. Etant donné que le climat influence fortement ces facteurs, ceux-ci se modifieront sous l'action du réchauffement global et des changements concomitants de température et de précipitation. Les résultats des chapitres précédents sur le climat et les glaciers constituent de ce fait la base des analyses du charriage :

- L'intensité des **précipitations** a une forte influence sur la quantité de matériaux charriables : plus la quantité de précipitation est grande, plus la quantité de matériaux qui peut être mobilisée et transportée est importante. C'est pourquoi les quantités de matériaux charriés sont particulièrement élevées lors d'épisodes de fortes précipitations. Toutefois, pour que des matériaux puissent être charriés, un débit critique est nécessaire, qui représente la limite inférieure pour le transport solide. Aucun transport de sédiment n'a lieu au-dessous de ce débit.
- En se retirant, les **glaciers** dégagent des surfaces constituées en partie de matériaux meubles, sujets à l'érosion et au charriage. Les conditions pour le transport de sédiments après le retrait des glaciers sont toutefois très diverses.

Changements concernant les précipitations, l'écoulement et l'englacement

Les scénarios climatiques calculés pour la station de Zermatt (chapitre 1) servent de référence pour les modélisations des écoulements et des glaciers et pour le calcul, fondé sur ces dernières, des scénarios de charriage :

Précipitations : Pour les régions situées autour des bassins versants des quatre sociétés hydroélectriques considérées, les modélisations indiquent des diminutions sensibles des précipitations en été. Pendant les autres saisons, les quantités de précipitation augmenteront légèrement, ceci toutefois dans les limites de la variabilité naturelle. Les cumuls annuels de précipitation diminueront en moyenne d'environ 3 pour cent.

Écoulement : Pendant des années « normales », les débits annuels totaux diminueront par rapport à la période de référence. En outre, les modélisations prévoient que les semaines de débits élevés avanceront vers début juin. Pendant les mois d'hiver, les débits augmenteront en raison des températures en hausse et des changements concomitants de la forme des précipitations (pluie au lieu de neige). Ainsi, les débits deviendront plus réguliers au cours des saisons.

Glaciers : Les modélisations des glaciers indiquent une diminution sensible de l'englacement à l'avenir (tableau 2.1).

Conséquences pour le régime de charriage

Le transport solide par charriage a été examiné pour soixante-cinq torrents : trente-six torrents captés par la Grande Dixence, dix par la Gougra, neuf par Mattmark et dix par Mauvoisin. Les figures 4.1 et 4.2 n'incluent que les torrents dans lesquels un transport solide par charriage a lieu indépendamment d'épisodes de fortes précipitations.

La diminution des débits moyens due au changement climatique entraînera dans à peu près la moitié des torrents considérés une réduction du volume solide transporté par charriage, particulièrement pendant la période de 2070 à 2099 (figures 4.1 et 4.2). De plus, un changement se manifeste dans la répartition saisonnière du transport solide : alors que les matériaux sont aujourd'hui charriés pour l'essentiel en juillet et en août, le pic de charriage aura lieu à l'avenir, avec les changements de régime d'écoulement, vers le début de l'été (figure 4.3). Pour les bassins versants où le pic de charriage se produit actuellement au printemps, il se déplacera vers l'hiver. Il faut s'attendre au transport de grandes quantités de sédiments lors d'épisodes de fortes précipitations. Les données sur les changements de ces dernières étant encore incertaines, il est difficile de modéliser comment lesdites quantités évolueront à l'avenir.

Disponibilité en sédiments dans l'exemple la vallée de Tourtemagne

Des connaissances spécifiques aux régions considérées sont indispensables pour déterminer quel seront à l'avenir la disponibilité potentielle en sédiments et le charriage. L'exemple de la vallée de Tourtemagne postérieure (une vallée latérale sur le côté sud de la vallée du Rhône), montre dans quelle mesure le bilan des matériaux charriés est déterminé par des données locales telles que la pente du terrain, le couvert végétal, les vallées affluentes, le genre des matériaux dégagés par la fonte des glaciers, les éléments de retenue naturels ou construits, etc.

A l'extrémité supérieure, de la vallée de Tourtemagne se trouvent les deux langues des glaciers de Turtmann et de Brunegg, d'une longueur totale de, respectivement 5.8 et 4.6 kilomètres. Les masses de glace ont formé autour d'elles un corps sédimentaire de matériaux morainiques meubles. D'autre part, une vallée, l'Innern Wängertälli, débouchant latéralement dans la vallée principale, contient des matériaux potentiellement érodables sous forme de dépôts morainiques.

Au total, 32 ± 13 millions de mètres cubes de matériaux sédimentaires potentiellement érodables se trouvent dans la région de la vallée de Tourtemagne postérieure. Leur transport jusqu'au bassin d'accumulation de Tourtemagne, qui borde le site au nord, dépend de nombreuses caractéristiques régionales et est limité par des particularités géographiques locales :

- Les vallées latérales de Wängertälli et de Pipijtälli ne contiennent que très peu de matériaux sédimentaires. Ces vallées sont en outre séparées de la vallée principale par un verrou rocheux qui fait obstacle au transport de matériaux.
 - Les vallées de Frili-, Büomatt- et Brändjittälli, raccordées par des conduites d'adduction au bassin d'accumulation, sont équipées de dessableurs qui retiennent les sédiments fins.
 - Si les glaciers continuent de fondre, ils se retireront d'abord sur un sol rocheux sans sédiments. Ensuite, ils se déplaceront sur une terrasse plane qui ne contribuera qu'à un très faible charriage.
 - Les roches moutonnées situées au-dessus du bassin de décantation modèrent le charriage. Comme la Turtmäna érode toujours plus de matériaux de roche moutonnée et entame le corps sédimentaire qui se trouve à l'arrière, il faut compter avec un transport de sédiments plus important. Cependant, la pente est si faible (3.7 degrés) et l'effet stabilisateur de la végétation tel, qu'aucun matériaux sédimentaires supplémentaires ne viendront s'ajouter.
 - Les moraines latérales antérieures des deux grands glaciers ont une faible épaisseur et sont recouvertes de végétation qui exerce un effet stabilisateur sur les matériaux meubles.
- D'autres sites ont des propriétés qui **favorisent** le charriage :
- Les zones escarpées et dépourvues de végétation des moraines latérales postérieures des glaciers de Turtmann et de Brunegg ne sont guère protégées contre les processus d'érosion. En outre, l'augmentation des températures déstabilise le pergélisol.
 - Le cône de déjection de l'Innern Wängertälli est également déstabilisé par le dégel du pergélisol et de ce fait sujet au charriage.

En ces deux endroits, il faudra donc compter à l'avenir avec une augmentation du transport solide de matériaux meubles. Le volume potentiellement charriable s'élève ici à 27 millions de mètres cubes.

Chapitre 5: L'exploitation de la force hydraulique



L'essentiel en bref :

- La production à long terme baissera probablement dans les centrales à accumulation valaisannes situées à haute altitude.
- Les apports saisonniers en eau se modifieront fortement dans les régions peuplées enneigées ou englacées : il y aura davantage d'eau en hiver, moins en été. Ceci conduira souvent à de plus grands débits de captage et donc à une augmentation de la production – en dépit de débits annuels plus faibles.
- Les centrales au fil de l'eau profiteront des modifications de débit, du fait de régimes plus réguliers à l'avenir.
- Les changements se situeront souvent dans les limites des variations actuelles (valeurs usuelles).
- Les résultats pour les exploitations hydroélectriques individuelles ne peuvent pas être généralisés.

Les rapports des six études de cas, à savoir sur les forces motrices de Löntsch [F], du Prättigau [G], de Mattmark [H], d'Oberhasli [I] et de Gougra [J] et sur le bassin d'accumulation de Göschenalp [K], constituent la base de ce chapitre.

Le débit de captage – base de la production hydroélectrique

Le *débit de captage* est la grandeur hydrologique déterminante pour les exploitants d'aménagements hydroélectriques. Il dépend du dimensionnement du captage considéré, des débits journaliers du cours d'eau et du débit résiduel minimal à respecter (figure 5.1). Le débit de captage, et donc aussi la production d'électricité, dépendent en outre de l'écoulement saisonnier. Un régime d'écoulement régulier conduit à un débit de captage proche du débit de dimensionnement (figure 5.1). A haute altitude, du fait des changements climatiques, les débits de pointe se sont déplacés vers le printemps, si bien que l'on observe des débits plus faibles en été et plus élevés en hiver. Cet effet se renforcera encore à l'avenir. En outre, à long terme, les débits annuels auront plutôt tendance à diminuer dans les régions englacées (cf. chapitre 3).

A l'exception d'éventuelle dotation en eau, les débits d'hiver plus élevés peuvent être entièrement dérivés. Les débits de captage augmenteront donc en hiver. En été, il sera possible à l'avenir, dans la plupart des cas, de capter encore la même quantité d'eau (figure 5.2). Aussi le débit de captage augmentera-t-il ces prochaines décennies en dépit de débits annuels plus faibles. Des aménagements hydroélectriques tels que par exemple les centrales au fil de l'eau, qui ne peuvent pas stocker d'eau, mais la turbinent immédiatement, produiront davantage de courant qu'avant. Cet effet n'intervient pas dans des centrales à accumulation pour

lesquelles ce sont avant tout les débits annuels totaux qui sont décisifs pour la production d'électricité.

Développement passé des débits de captage

Pour obtenir davantage d'informations sur les débits de captage potentiels, des analyses ont été effectuées dans 51 cours d'eau de petite et moyens taille répartis dans toute la Suisse. Ces investigations ont mis en évidence que les volumes annuels n'ont guère changé pendant les cinquante années passées. Du fait des changements saisonniers intervenus, l'eau captée a été stockée de façon plus régulière tout au long de l'année [16] : les changements climatiques et en partie des précipitations plus abondantes en hiver ont donné une plus grande régularité aux débits au travers des saisons. De plus, la fonte accélérée des glaciers a pour effet que davantage d'eau est à disposition actuellement dans les Alpes – mais ceci seulement provisoirement. Ces changements de débit de captage se reflètent dans la production d'électricité : la production d'hydroélectricité s'est accrue en Suisse depuis 1960 (figure 5.3), même une fois l'augmentation de la capacité de production prise en compte.

Evolution future de la production d'électricité – études de cas

La quantité d'eau à disposition, la production possible d'électricité et le chiffre d'affaires obtenu ne sont pas toujours reliés entre eux de façon linéaire – le type de centrale et les caractéristiques propres aux différents aménagements hydroélectriques sont déterminants. C'est pourquoi les résultats ne peuvent pas s'appliquer à d'autres aménagements. Dans plusieurs études de cas, les effets du changement climatique sur la production d'électricité ont été estimés suivant la procédure esquissée à la figure b de l'introduction.

L'aménagement hydroélectrique des **Kraftwerke Oberhasli AG** (KWO), qui comprend neuf centrales hydroélectriques, huit bassins d'accumulation (195 millions de mètres cubes) et une centrale de pompage-turbinage, est un aménagement d'une grande complexité et aux vastes ramifications. Partant d'une légère baisse future des précipitations et surtout de la poursuite du recul des glaciers, les recherches concluent pour les onze bassins versants, situés en partie en haute montagne, à une diminution des débits ainsi qu'à un déplacement prononcé de leur maximum saisonnier de trois à six semaines vers le printemps [1]. Selon les modélisations, les apports d'eau dans les différents bassins versants diminuent de 0 à 7.5 pour cent (2.8 pour cent en moyenne) jusqu'à la période 2035, et de 1.0 à 14.0 pour cent (6.5 pour cent en moyenne) jusque dans l'avenir lointain. Ces changements moyens se situent dans les limites des variabilités observées aujourd'hui ; toutefois, les années sèches se placent nettement au-dessous des minima actuels. Dans le cas des KWO, les changements de

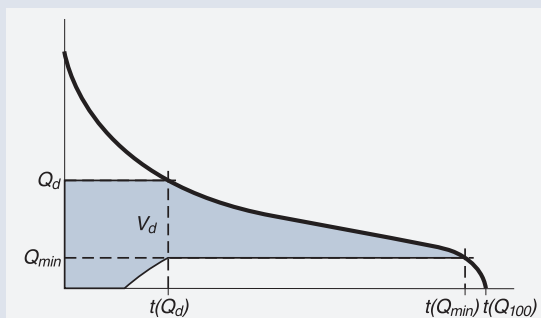


Figure 5.1 : Courbe de débit-fréquence relative moyenne (courbe de durée). $Q_{\max}$: débit annuel maximal ; Q_d : débit de dimensionnement du captage ; $Q_{\min}$: dotation en eau pour assurer le débit résiduel minimal ; V_d : volume de dimensionnement du captage [16].

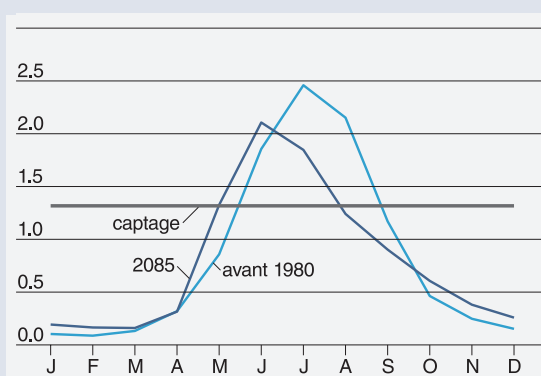


Figure 5.2 : Représentation schématique des débits mensuels moyens : autrefois (avant 1980) : régime b-glaciaire ; scénario 2085 : régime b-glacio-nival. Dimensionnement du captage = quantile 25 pour cent des débits journaliers. Le débit annuel a baissé de 5 pour cent, le débit de captage a néanmoins augmenté de 9 pour cent.

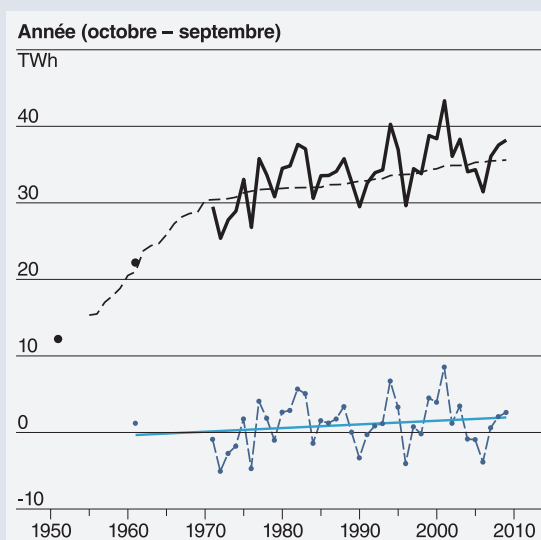


Figure 5.3 : Production d'électricité en TWh des centrales hydroélectriques suisses entre 1950 et 2009. La ligne noire épaisse représente la production annuelle effective. La ligne noire en traitillés représente la production potentielle moyenne (capacité de production). La ligne bleue traitillée avec des points montre le changement de production observé détrendé comparé à la capacité de production en hausse. La ligne bleue continue indique la tendance de ce changement [16].

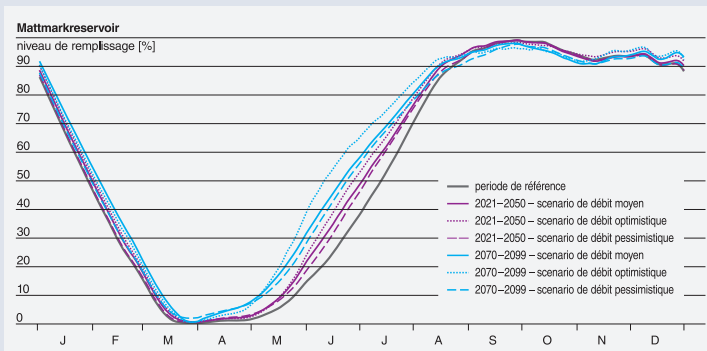


Figure 5.4 : Modélisation de l'utilisation de la capacité de stockage du bassin d'accumulation de Mattmark et du bassin de compensation de Zerbeiggern pour un scénario moyen (ligne continue), un scénario optimiste (ligne en pointillé) et un scénario pessimiste (ligne en traitillé) pour la période 2021-2050 en violet et 2070-2099 en bleu [H].

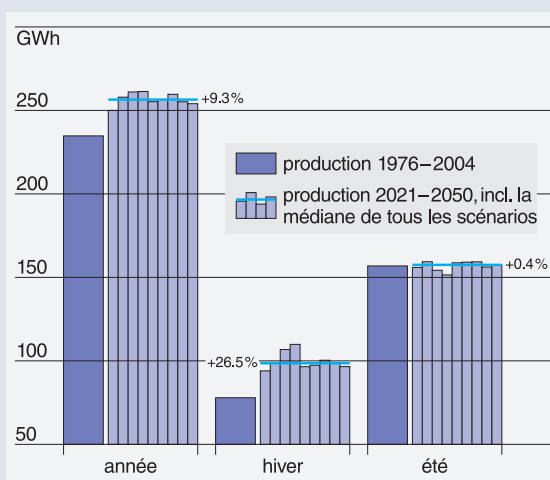


Figure 5.5 : Production d'énergie de l'ensemble du système KW Prättigau de 1976 à 2004 (en gris foncé) relatif à la période 2021-2050 (neuf scénarios climatiques, en bleu clair). Hiver : octobre à avril (sept mois) ; été : mai à septembre (cinq mois) [G].

régime d'écoulement ne conduisent pas à un modèle d'exploitation fondamentalement différent. La période d'accumulation deviendra cependant plus courte dans les nouvelles conditions hydrologiques, tandis que la période d'étiage sera plus longue. Dans l'état présent de développement des KWO, le chiffre d'affaires reculerait de 3 à 6 pour cent pendant la période 2035 du fait de ces changements, et de 17 pour cent dans l'avenir lointain. La réalisation du programme d'investissement KWOPlus (augmentation de la puissance, plus grande capacité de pompage-turbinage et volume de stockage plus élevé) permettrait de réduire sensiblement les pertes. Le chiffre d'affaires ne reculerait alors plus que de 2 à 5 pour cent jusqu'à la période 2035 et de 1 à 12 pour cent jusque dans l'avenir lointain. C'est du moins ce qu'indiquent les modélisations.

L'aménagement hydroélectrique de **Mattmark** comprend un bassin d'accumulation d'une capacité totale de 100 millions de mètres cubes et les deux centrales de Zerbeiggern et de Stalden. En outre, une station de pompage est installée à Zerbeiggern. Des précipita-

tions moins abondantes sont attendues à l'avenir surtout en été dans le bassin versant des forces motrices de Mattmark [H]. De plus, les surfaces des glaciers diminuent si rapidement que les apports d'eau de fonte commenceront à baisser déjà vers 2020 [D, H]. En tout, il faudra compter avec une réduction des débits annuels moyens de 6 pour cent (± 5.0 pour cent) jusqu'à la période 2035, et de 12 pour cent (± 6.0 pour cent) jusqu'à celle de 2085. Le maximum saisonnier des débits se déplacera de cinq à huit semaines vers le printemps. Des modélisations à l'aide d'un modèle d'exploitation qui calcule le rendement sous les contraintes actuelles du marché de l'électricité ne font apparaître que de faibles différences pour un scénario climatique moyen [H]. Si l'on utilise un scénario optimiste, on peut compter avec une augmentation de la production et du rendement d'environ 7 pour cent provisoirement, et d'à peu près 3 pour cent jusqu'en 2085. Mais si l'on calcule avec un scénario climatique pessimiste, la production recule alors de 14 (période 2035) et 22 pour cent (période 2085), et le chiffre d'affaire de 9 (période 2035) et 13 pour cent (période 2085). Jusqu'à la période 2085, une légère augmentation de la production est attendue en hiver et une diminution prononcée est attendue en été. Tous ces facteurs influencent l'évolution du taux de remplissage du réservoir (figure 5.4).

L'aménagement de **Gougria SA** est composé de quatre centrales hydroélectriques et de deux bassins d'accumulation qui peuvent contenir au total 78 millions de mètres cubes d'eau. La baisse des précipitations, surtout en été, et la diminution des quantités d'eau de fonte des glaciers conduisent à une réduction des débits d'environ 9 pour cent. Le maximum saisonnier des débits se déplace d'environ six semaines vers le printemps [J]. Ces changements n'exigent cependant pas d'adaptations structurelles des installations existantes. Les consignes d'exploitation doivent toutefois être adaptées : c'est ainsi par exemple que le pic des apports plus précoce conduira à une modification des périodes de révision [J]. La production et la rentabilité de l'ouvrage se réduira parallèlement à la diminution progressive des apports et des débits de pointe.

L'ensemble de centrales hydroélectriques **KW Prättigau** comprend neuf prises d'eau, trois paliers de production successifs et des petits bassins d'accumulation saisonniers (11 millions de mètres cubes). Cet ensemble de centrales correspond en grande partie à une centrale au fil de l'eau. Les régimes glacio-niveaux des sept bassins versants se modifieront sensiblement à l'avenir : il faudra compter avec des débits plus élevés de septembre à mai et plus faibles de juin à août [G]. Les apports en eau se modifieront différemment d'un bassin versant à un autre, néanmoins il faut compter jusqu'en 2035 en moyenne avec une modification des apports de -6.0 à $+8.0$ pour cent par rapport à la période de 1976 à 2005. Ceci correspondrait à une augmenta-

tion de la production hivernale de 20 à 40 pour cent – avec une production estivale pratiquement inchangée. Considéré sur l’année entière, ceci représenterait une augmentation moyenne de 9.3 pour cent (figure 5.6). Une analyse des courbes de durée a montré qu’un agrandissement du captage principal à Klosters ne serait pas rentable, puisqu’à l’avenir la capacité de ce captage ne sera dépassée en été que durant quelques jours supplémentaires. Cette étude de cas démontre clairement l’effet d’une meilleure exploitation de la capacité de captage en hiver (figure 5.6).

La centrale à accumulation de **Löntschi** (lac du Klöntal) comprend un lac d’accumulation dans un bassin versant naturel (40 millions de mètres cubes) ainsi qu’une centrale. La répartition saisonnière de l’écoulement changera ici aussi : davantage d’eau s’écoulera dans le lac d’accumulation en automne, hiver et printemps, et moins en été [F]. En comparaison à la période de 1998 à 2009, on peut compter avec une augmentation des apports en eau de -0.3 à +6.1 pour cent (+2.2 pour cent en moyenne) jusqu’à la période 2035. Ces changements se situent toutefois dans la fourchette de dispersion des mesures effectuées jusqu’ici. Moyennant une adaptation du profil mensuel de production (sans changement de la tarification), on peut compter avec une modification de la production de -0.4 à +6.1 pour cent (figure 5.7) et avec une augmentation du chiffre d’affaires de 1.0 à 6.5 pour cent. Une analyse de sensibilité a montré en outre que la production augmente de façon constante lors d’un apport en d’eau plus important. Le chiffre d’affaires croît aussi d’abord linéairement. Il ne se stabilise qu’à partir d’une augmentation d’environ 50 pour cent des apports en eau.

La centrale à accumulation de **Göschenen** comporte plusieurs prises d’eau et galeries d’adduction ainsi que le lac de Göscheneralp comme réservoir supplémentaire (70 millions de mètres cubes). Les débits de pointe saisonniers se déplaceront d’environ trois semaines d’ici la période 2035, et de six semaines dans l’avenir lointain, vers le printemps. En conséquence, le régime glaciaire actuel changera en direction du nival alpin [K]. Les apports d’eau moyens se modifieront, suivant le modèle climatique utilisé et en fonction du modèle hydrologique, entre -0.6 et +23.0 pour cent jusqu’à la période 2035, et entre -1.9 et +22.0 jusqu’à la période 2085. Au vu de ces grandes incertitudes et en raison de l’évolution inconnue des prix, il n’est pas possible de calculer les chiffres d’affaires de façon fiable [K]. La production croît proportionnellement aux apports d’eau.

En résumé, on peut retenir des études de cas décrites ci-dessus que les différences tenant à l’altitude et au degré d’englacement ainsi qu’à l’évolution des précipitations influenceront la production de façon déterminante vers la fin du 21e siècle.

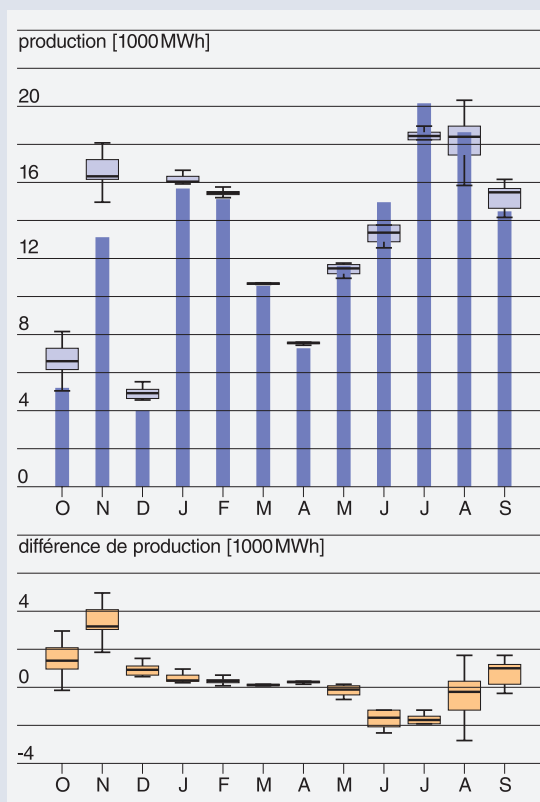


Figure 5.6 : Centrale de Löntschi. En haut : production de 1998 à 2009 et projections pour la période de 2021 à 2050 (diagrammes en boîte). Le graphique inférieur indique les différences entre les valeurs pour 1998 à 2009 et celles pour 2021 à 2050 [F].

Les hypothèses au sujet des précipitations restent incertaines. Aussi n’est-il pas possible de faire des prévisions très précises à propos des modifications des débits et de la production. Jusque dans l’avenir proche (2035), seuls de petits changements sont attendus. Ils sont plutôt légèrement négatifs au sud et à l’est du Valais, mais il faut compter ici avec des incertitudes de ± 10 pour cent. Par contre, dans les régions situées à plus basse altitude (Préalpes centrales et orientales), les changements s’inscrivent entre 0 et 9 pour cent dans le domaine positif. Dans l’avenir lointain (2085), les tendances pour les régions de haute altitude du sud et de l’est du Valais sont négatives. Il faut compter avec des pertes moyennes de production de 4 à 8 pour cent, mais même dans des cas extrêmes, les changements ou pertes calculés n’atteignent guère les 20 pour cent. Les présentes études de cas ne permettent pas d’évaluer de façon simple les attentes en matière de production pour l’ensemble de la Suisse. A cet égard, des extrapolations détaillées sont en cours actuellement.

Comparaison avec d'autres résultats

Une comparaison avec des résultats d'études similaires, dans lesquelles l'influence du changement climatique a été analysée en recourant au couplage de modèles, fait apparaître les suivantes différences : [17] a estimé pour la centrale à accumulation de Mauvoisin une diminution de la production d'environ 3 pour cent, ceci pour la période de 2070 à 2099 par rapport aux années de 1961 à 1990. Le bassin versant des forces motrices de Mauvoisin est fortement englacé (>40 pour cent) et donc très touché par la disparition des glaciers. [18] a estimé pour la période de 2031 à 2060 que la production de la centrale à accumulation de la Grande Dixence augmenterait d'environ 26 pour cent (par rapport à la période de référence de 1961 à 1990). Les auteurs ont considéré, à part les modifications des apports d'eau dus au changement climatique, également les changements de la demande en électricité.

En s'appuyant sur une étude réalisée dans onze bassins versants des Alpes [15], l'Office fédéral de l'énergie a évalué les effets du changement climatique sur les débits de l'ensemble de la Suisse comme suit : étant donné que les débits diminueront d'environ 7 pour cent, il faut compter avec une baisse de la production hydroélectrique de même ampleur [19].

A ce sujet, [F, G] retiennent « qu'une extrapolation à l'ensemble de la Suisse des projections des débits selon [15] est problématique, car les bassins versants des centrales hydroélectriques suisses ne présentent pas tous un caractère alpin ou de haute montagne. D'autre part, la quantité d'eau naturellement disponible ne correspond pas forcément à la quantité utilisable ou captable par la force hydraulique. Il s'ensuit que les résultats existants ne peuvent pas être généralisés ni appliqués à l'ensemble de la Suisse. » Toutefois, les hypothèses publiées dans [19] ne peuvent actuellement pas encore être appréciées de façon définitive.

Bibliographie

Rapports techniques

Le présent rapport de synthèse se fonde sur les rapports techniques des personnes et institutions associées au projet :

- [A] Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz : T. Bosshard, S. Kotlarski, T. Ewen, Ch. Schär
- [B] Swiss discharge regimes in a changing climate : P. Hänggi, T. Bosshard, R. Weingartner
- [C] Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher F. Paul, A. Linsbauer, W. Haeberli
- [D] Veränderungen der Gletscher und ihrer Abflüsse – Fallstudien Gorner und Mattmark : A. Bauder, D. Farinotti
- [E] Auswirkung der Klimaänderung auf die Geschiebefracht – Sektorielle Studie Wallis, Modul D : M. Raymond Pralong, J. M. Turowski, A. Beer, D. Rickenmann, V. Métraux, T. Glassey
- [F] Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion des Wasserkraftwerks Löntsch 2021–2050 : P. Hänggi, T. Bosshard, S. Angehrn, E. Helland, D. Rietmann, B. Schädler, R. Schneider, R. Weingartner
- [G] Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion der Wasserkraftwerke im Prättigau 2021–2050 : P. Hänggi, T. Bosshard, D. Job, B. Schädler, R. Weingartner
- [H] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Mattmark AG : M. Raymond Pralong, M. Stähli, M. Zappa, Ch. Dupraz, Ch. Mueller
- [I] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Oberhasli AG : M. Stähli, M. Zappa, A. Ludwig, M. Ossia, A. Fankhauser
- [J] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Kraftwerke Gougri AG : M. Raymond Pralong, M. Stähli, M. Zappa, F. Widmer
- [K] Klimaänderung und Wasserkraft – Fallstudie Stausee Göscheneralp : M. Stähli, M. Zappa, T. Jonas, F. Bobierska
- [L] Literaturstudie zum Einfluss der Klimaänderung auf die zukünftige Wasserkraftnutzung: N. Boogen, D. Spreng.

Les rapports techniques peuvent être consultés sur le site web
<http://www.hydrologie.unibe.ch/projekte/ccwasserkraft.html>

Autres publications utilisées

- [1] IPCC (Hrsg.), 2008 : Klimaänderung 2007. Synthesebericht.
- [2] Bosshard, T., Fischer, A., Kress, A., Kull, C., Liniger, M. A., Lustenberger, A. und Scherrer, S., 2001 : Swiss Climate Change Scenarios CH2011.
- [3] OCC (Hrsg.), 2007 : Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.
- [4] MétéoSuisse (2011) : Le climat aujourd'hui – Tendances en Suisse. Dans : http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui/tendances_en_suisse.html.
- [5] Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J. und Vidale, P. L., 2006 : Future change of precipitation extremes in Europe : Intercomparison of scenarios from regional climate models. In: Journal of Geophysical Research 111.
- [6] Latenser, M., Schneebeli, M., 2003 : Long-term snow climate trends of the Swiss Alps 1931–1999. International Journal of Climatology 23:733–750.
- [7] Huss, M., Bauder, A., Funk, M. und Hock, R., 2008 : Determination of the seasonal mass balance of four Alpine glaciers since 1865. In : Journal of Geophysical Research 133.
- [8] Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. und Benz, C., 2000 : Die Gletscher der Schweizer Alpen. Vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich. Schlussbericht NFP31.
- [9] Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A. und Funk, M., 2009 : An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. In: Global and Planetary Change 68:225–231.
- [10] Hänggi, P., Weingartner, R., 2009 : Zur Veränderung der hydrologischen Rahmenbedingungen für die Wasserkraftnutzung im Rheineinzugsgebiet bis Basel 1808–2007. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 39:53–62.
- [11] Hänggi, P., Weingartner, R., 2011 : Inner-annual variability of runoff and climate within the Upper Rhine River basin, 1808–2007. In : Hydrological Sciences Journal 56 (1):34–50.
- [12] Aschwanden, H., Weingartner, R., 1985 : Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde, Nr. 65, Bern.
- [13] Weingartner, R., Aschwanden, H., 1992 : Abflussregimes als Grundlagen zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In : Weingartner, R. und Spreafico, M. (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.2. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [14] Huss, M., Jouvet, G., Farinotti, D. und Bauder, A., 2010 : Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. In: Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 7:345–387.
- [15] Horton, P., Schaeffli, B., Hingray, B., Mezghani, A. und Musy, A., 2005 : Prediction of climate change impacts on Alpine discharge regimes under A2 and B2 SRES emission scenarios for two future time periods (2020–2049, 2070–2099), Technical report.
- [16] Hänggi, P. und Weingartner, R., 2011 : Variations in discharge volumes for hydropower generation in Switzerland (submitted).
- [17] Schaffli, B., Hingray, B. und Musy, A., 2007 : Climate change and hydropower production in the Swiss Alps : quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. In : Hydrol. Earth Syst. Sc. 11:1191–1205.
- [18] Westaway, R., 2000 : Modelling the potential effects of climate change on the Grande Dixence hydro-electricity scheme, Switzerland. In : Journal of the chartered Institution of Water and Environmental Management 14(3):179–185.
- [19] Bundesamt für Energie BFE, 2007 : Die Energieperspektiven 2035 – Band 1. Synthese, Bern.

Impressum

Editeur

Commission d'hydrologie CHy
Société suisse d'hydrologie et de limnologie SSSL

Direction du projet

Rolf Weingartner, Institut de géographie de l'université Berne
Massimiliano Zappa, Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Coordination du projet

Mélanie Raymond Pralong, Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Christoph Plattner, Réseau de l'eau dans les régions de montagne NWB
Diana Soldo, Réseau de l'eau dans les régions de montagne NWB
Michael Lehning, Réseau de l'eau dans les régions de montagne NWB

Mandants

Swisslectric Research, Berne
Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne
Canton du Valais, Service de l'énergie et des forces hydrauliques SEH, Sion
Forces Motrices Valaisannes FMV SA, Sion

Comité de pilotage de l'étude principale

Philippe Méan, Alpiq
Christian Holzner, Office fédéral de l'énergie OFEN
Michel Piot, Office fédéral de l'énergie OFEN
Pankraz Freitag, Réseau de l'eau dans les régions de montagne NWB
Michael Paulus, swisslectric research

Groupe d'experts de l'étude principale

Jörg Aeberhard, Alpiq
Roger Pfammatter, Association suisse pour l'aménagement des eaux ASAE
Walter Hauenstein, Association suisse pour l'aménagement des eaux ASAE
Jörg Huwyler, Axpo
Andreas Stettler, Berner Kraftwerke BKW FMB Energie AG
Jakob Rhyner, Institut pour l'étude de la neige et des avalanches WSL - SLF

Comité de pilotage de l'étude sectorielle Valais

Jean Pralong, Forces Motrices Valaisannes FMV
Paul Michellod, Forces Motrices Valaisannes FMV
Philippe Amacker, Forces Motrices Valaisannes FMV
Frédéric Zuber, Service de l'énergie et des forces hydrauliques SEH du canton du Valais
Moritz Steiner, Service de l'énergie et des forces hydrauliques SEH du canton du Valais

Institutions participantes

AF-Colenco AG, Wasserbau und Umwelt
Axpo AG
Berner Kraftwerke BKW FMB Energie AG, Berne
Centre for Energy, Policy and Economics CEPE der ETH Zürich
Energie Ouest Suisse EOS
Institut de géographie de l'université Berne
Institut de géographie de l'université de Zurich
Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Institut pour atmosphère et le climat de l'EPF Zürich
Institut pour l'étude de la neige et des avalanches WSL - SLF
Kraftwerke Oberhasli AG KWO
Réseau de l'eau dans les régions de montagne NWB
Laboratoire d'hydraulique, hydrologie et glaciologie VAW, EPF Zurich

Soutien de

Forces motrices de la Gougria SA / Alpiq
Forces motrices de Mauvoisin SA / Axpo
Grande Dixence SA / Alpiq
Kraftwerke Göschenen AG / CKW
Kraftwerke Löntsch AG / Axpo
Kraftwerke Mattmark AG / Axpo
Prättigauer Kraftwerke / Repower

Auteurs

Donat Job (AF-Colenco AG)
Sonja Angehrn, Eivind Helland, Daniel Rietmann, Robert Schneider (Axpo)
Christian Dupraz, Christian Mueller (BKW)
Nina Boogen, Daniel Spreng (CEPE)
Florian Widmer (EOS)
Pascal Hänggi, Rolf Weingartner (GIUB)
Wilfried Haeblerli, Andreas Linsbauer, Frank Paul (GIUZ)
Thomas Bosshard, Tracy Ewen, Sven Kotlarski, Christoph Schär (IAC)
Andreas Fankhauser (KWO)
Florian Bobierska, Tobias Jonas (WSL - SLF)
Andreas Bauder, Daniel Farinotti, Stephanie Usselman (VAW)
Alexander Beer, Thierry Glassey, Andreas Ludwig, Valentin Métraux, Mina Ossia, Mélanie Raymond Pralong, Dieter Rickenmann, Manfred Stähli, Jens M. Turowski, Massimiliano Zappa (WSL)

Rédaction du rapport de synthèse

Barbara Lustenberger, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB
Bruno Schädler, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Graphiques

Alexander Hermann, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Relecture

Bianca Guggenheim, Zürich

Correction

Felix Hauser, Geographisches Institut der Universität Bern GIUB

Traduction

Jean-Jacques Daetwyler, Sciencepress

Layout / conception

Simone Kummer, Centre for Development and Environment der Universität Bern CDE

Impression

Publikation Digital AG

Crédits photos

Photo de couverture : Image: KWO
Chapitre 1 : Image : KWO / Photo : R. Bösch
Chapitre 2 : Image : BAFU / Photo : B. Sigrist
Chapitre 3 : Image : BAFU / Photo : B. Sigrist
Chapitre 4 : Image : OFEV
Chapitre 5 : Image : Officine Idroelettrica di Blenio SA

Commande

Commission d'hydrologie CHy de l'Académie suisse des sciences naturelles SCNAT, c/o Geographisches Institut, Universität Bern
Hallerstrasse 12, 3012 Berne
<http://chy.scnatweb.ch>

Quotation : Société suisse d'hydrologie et de limnologie (SSHL) et Commission d'hydrologie (CHy) (éd.), 2011 : Les effets du changement climatique sur l'utilisation de la force hydraulique – Rapport de Synthèse. Matériaux pour l'Hydrologie de la Suisse, N° 38, 28 p., Bern.

ISSN 1421-1130

© SGHL und CHy

