

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 97 (2005)
Heft: 11-12

Artikel: Impacts potentiels d'un changement climatique sur les régimes hydrologiques alpins
Autor: Schaeffli, Bettina / Horton, Pascal / Hingray, Benoît
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941782>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Impacts potentiels d'un changement climatique sur les régimes hydrologiques alpins

Bettina Schaeffli, Pascal Horton, Benoît Hingray, Abdelkader Mezghani, André Musy

Résumé

Un potentiel changement climatique pourrait avoir des impacts significatifs sur le régime hydrologique des bassins versants alpins et sur les secteurs d'activités qui en dépendent directement. Le présent article résume les principaux résultats d'une étude qui a été conduite au laboratoire Hydrologie et Aménagements de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne sur mandat de l'Office Fédéral de l'Energie (Horton et al., 2005) dans le but de quantifier ces impacts potentiels pour une gamme de scénarios climatiques plausibles. L'étude a porté sur 11 bassins versants représentatifs des régimes alpins suisses qui montrent actuellement un taux de glaciation entre 0 et 50%. L'impact d'un éventuel changement climatique est simulé à l'aide de 19 scénarios climatiques issus de modèles climatiques. Ces scénarios alimentent un modèle hydrologique et un modèle d'évolution de la surface glaciaire qui permettent de simuler les débits journaliers pour une période future (2070–2099) et de les comparer à une période de contrôle (1961–1990).

Tous les scénarios de changement climatique étudiés se caractérisent par un fort réchauffement et une diminution de la précipitation annuelle. Les débits simulés correspondant montrent que tous les scénarios climatiques conduisent à un avancement du début de la période de fonte de neige et à un shift des régimes hydrologiques. Le débit annuel moyen subit dans la plupart des cas une diminution significative due, d'une part, à la diminution de la pluie annuelle et d'autre part, à l'augmentation de l'évapotranspiration. Pour les bassins versants à couverture glaciaire, les modifications de régime et de débit sont largement conditionnées par l'augmentation de la température et les impacts qui en résultent sur les processus d'accumulation et de fonte de neige et de glace. Pour les bassins à plus basse altitude, le changement de la distribution saisonnière de la pluie influence davantage la modification du régime hydrologique.

Les changements de régime et de débits annuels simulés pourraient avoir un impact non négligeable sur la gestion de l'eau, notamment sur la production hydroélectrique mais également sur la gestion des crues. Quelques pistes de réflexion sont esquissées.

Zusammenfassung

Eine potenzielle Klimaänderung könnte das hydrologische Regime von alpinen Einzugsgebieten und davon abhängigen Aktivitäten erheblich beeinflussen. Dieser Artikel fasst die wichtigsten Ergebnisse einer Studie zu diesem Thema zusammen, die im Auftrag des Bundesamtes für Energie am Labor für Hydrologie und Raumplanung der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne durchgeführt worden ist (Horton et al., 2005). Ziel der Studie war es, mögliche Auswirkungen von mehreren plausiblen Klimaszenarien auf alpine Einzugsgebiete zu quantifizieren. Dazu wurden 11 Fallstudien analysiert; es handelt sich dabei um Einzugsgebiete, welche heute einen Vergletscherungsgrad von zwischen 0 und 50% aufweisen und welche die verschiedenen hydrologischen Regimes der Schweizer Alpen repräsentieren. Insgesamt wurden für diese Einzugsgebiete 19 Klimaszenarien für den Zeitraum 2070–2099 analysiert, die aus Simulationen von verschiedenen globalen und regionalen Klimamodellen stammen. Für jedes dieser Szenarien wurden anhand eines hydrologischen Modells und eines Gletscherflächen-Modells tägliche Abflüsse simuliert. Die Ergebnisse wurden dann den Werten einer Referenzsimulation für eine Kontrollperiode (1961–1990) gegenübergestellt.

Alle Klimaänderungs-Szenarien zeichnen sich durch eine starke Erwärmung und einen Rückgang des Jahresniederschlags aus. Die entsprechenden Abflüsse zeigen, dass alle Szenarien zu einer verfrühten Schneeschmelze und einer Verschiebung der hydrologischen Regimes führen. Der Jahresabfluss geht in den meisten Fällen stark zurück, einerseits wegen des Niederschlagsrückgangs, andererseits wegen einer Zunahme von Verdunstungsphänomenen. In vergletscherten Einzugsgebieten werden Regimeveränderungen vor allem durch die Temperaturerhöhung und die damit zusammenhängenden Veränderungen der Schneefall- und schmelz-Prozesse hervorgerufen. In tiefer gelegenen Einzugsgebieten hat die Veränderung der saisonalen Niederschlagsverteilung einen stärkeren Einfluss.

Die beschriebenen klimabedingten Veränderungen der alpinen Hydrologie könnten merkliche Auswirkungen auf die Wasserbe- wirtschaftung haben, vor allem im Bereich der Stromproduktion, aber auch für die Hochwasserproblematik. Einige mögliche Auswirkungen werden kurz angesprochen.

1. Contexte de recherche et cas d'études

Les Alpes sont un élément clé du régime hydrologique des rivières suisses et des grandes rivières européennes dont elles sont la source. Des bassins versants montagneux montrent généralement un débit annuel plus élevé que ceux situés à plus basse altitude dans une même région cli-

matique. D'une part, la précipitation y est renforcée par des effets orographiques et d'autre part, les taux d'évapotranspiration y sont faibles dû essentiellement aux températures relativement basses. Une autre caractéristique importante des régimes hydrologiques de montagne est un cycle annuel prononcé avec des débits d'étiage très faible en hiver. Ce cycle résulte du sto-

ckage temporaire de l'eau sous forme de neige et de glace qui conduit à des décalages importants entre le moment où l'eau tombe sur un bassin versant sous forme solide et le moment où elle est mobilisée à travers des processus de fonte. Sous l'effet d'un potentiel changement climatique, ces bassins versants sont donc susceptibles de voir leur régime hydrolo-

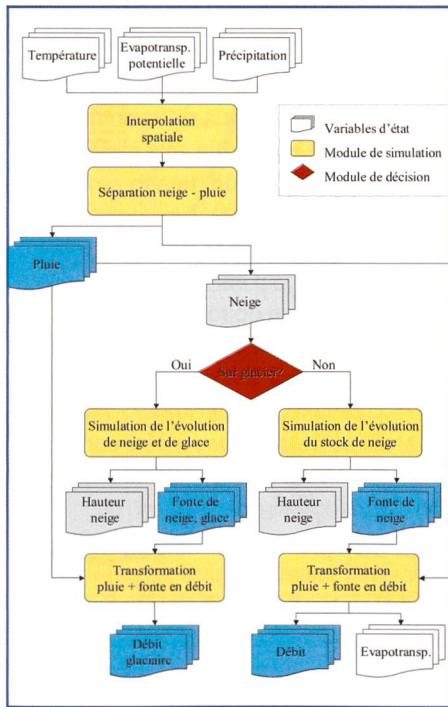


Figure 1. La structure du modèle hydrologique.

gique se modifier fortement, notamment sous l'action d'une augmentation de la température. La gestion des ressources en eau pourrait en être fortement touchée, par exemple dans le domaine de la production hydroélectrique ou de la protection contre les crues.

La quantification de ces impacts potentiels est dès lors devenue un domaine de recherche très important en hydrologie. La pertinence d'une telle analyse dépend avant tout de la plausibilité des scénarios climatiques utilisés, notamment de la précipitation et de la température future. A l'heure actuelle, de nombreux scénarios de changement climatique sont disponibles: ils sont obtenus à l'aide de modèles simulant le système climatique à différentes échelles, à l'échelle globale d'abord (on parle de modèles AOGCMs pour Atmosphere-Ocean General Circulation Models), puis à l'échelle régionale, à l'aide de modèles RCMs (Regional Climate Models) qui ont une résolution d'environ 50 km par 50 km. Ces modèles sont comparables à ceux utilisés pour la prévision météorologique mais l'horizon de simulation est typiquement de l'ordre de 100 ans. Ils sont alimentés par des scénarios d'émission de gaz à effet de serre permettant de générer des scénarios d'évolution possible du climat. Les grands instituts internationaux de recherche climatique ont chacun leurs propres modèles qui décrivent et simulent différemment le système climatique. Par conséquent, pour un même scénario d'émission de gaz à effet

de serre, les différents modèles prédisent différentes évolutions du climat.

Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre représentent la plus grande source d'incertitude pour les études de changement climatique. On ne peut cependant pas négliger l'incertitude liée à la simulation de l'évolution du climat correspondant. Dans le cadre de la présente étude, nous avons étudié 19 scénarios climatiques résultant de deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre simulés à l'aide de 12 différents modèles climatiques (voir tableau 1) dans le cadre d'un projet européen intitulé Prudence (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, Christensen et al., 2002).

L'impact potentiel de ces scénarios climatiques sur l'hydrologie en Suisse a été étudié à l'aide de 11 bassins versants alpins dont certains ont une forte couverture glaciaire. Pour chacun de ces bassins versant, l'impact climatique est analysé à l'aide d'une simulation du comportement du système pour une période de contrôle (1961–1990) et pour une période future montrant un climat modifié. Dans le cadre de la présente étude, deux périodes futures ont été analysées, 2020–2049 et 2070–2099. Seuls les résultats pour la deuxième période sont présentées ici; les résultats principaux pour la période 2020–2049 sont donnés dans (Piot, 2005, même issue).

Les 11 bassins étudiés représentent les différentes régions hydro-climatiques de la Suisse (voir figure 2 de Piot, 2005, même issue) et les principaux types

de régimes hydrologiques alpins définis par Aschwanden and Weingartner (1985) (tableau 2). Leur taux de couverture glaciaire varie entre 0 et 50% (tableau 2) et la taille des bassins est comprise entre 39 km² et 185 km². Les altitudes moyennes varient entre 1340 m s.m. pour la Minster et 2940 m s.m. pour la Drance de Bagnes. Tous les bassins versants – sauf celui de la Verzasca – ont un régime hydrologique montrant un seul pic mensuel entre mai et août dû à la fonte de neige et de glace. La différence entre les débits d'étiage en hiver et les hautes eaux estivales d'une part, le moment d'occurrence du pic de fonte d'autre part, dépendent fortement de l'altitude du bassin versant. Pour des bassins plus hauts, ce pic arrive plus tard et l'amplitude hiver/été est plus forte (illustré à la figure 3 pour la période de contrôle). La Verzasca par contre a un régime typique du sud des Alpes montrant un deuxième pic de débit en automne qui résulte des fortes pluies qui sont habituellement observées pendant cette période de l'année.

Pour chacun de ces bassins versants, un modèle hydrologique a été calibré à l'aide de séries temporelles observées de débits, de précipitations et de température. Ce modèle s'appelle GSM-SOCONT (figure 1) et a été développé au laboratoire Hydrologie et Aménagements de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Une description détaillée peut être trouvée dans (Schaefli, 2005). Pour les scénarios futurs, un modèle conceptuel d'évolution de la couverture glaciaire est utilisé pour mettre à jour l'étendue des glaciers (voir Schaefli, 2005). Les autres

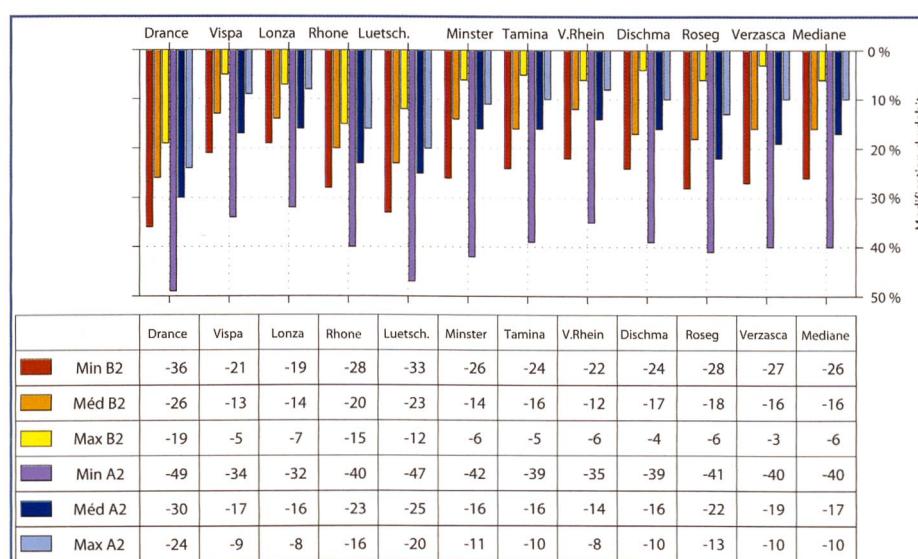


Figure 2. Modification des débits annuels simulés pour les scénarios d'émission A2 et B2 pour la période 2070–2099: les valeurs indiquées sont les minimums, maximums et médianes correspondant aux scénarios climatiques de Prudence (7 simulations climatiques pour B2 et 12 simulations pour A2).

éventuelles modifications de l'occupation du sol ne sont pas prises en compte. Un changement climatique pourrait par exemple modifier le couvert végétal, notamment la surface forestière. Dans une étude comparable, Zierl et Bugmann (2005) arrivent cependant à la conclusion que pour les cinq bassins versants alpins qu'ils ont étudiés, un tel changement de l'occupation du sol n'a qu'un faible effet sur le régime hydrologique.

2. Scénarios climatiques

Les deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre étudiés sont le scénario A2 et B2 définis par le Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Ils peuvent être qualifiés respectivement de «moyen-élevé» et de «moyen-bas». Pour les deux scénarios, la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont relativement lentes et s'orientent aux spécificités régionales ou locales. Selon le scénario A2, le monde en 2100 est très hétérogène et l'accroissement de la population est plus grand que pour B2. Ce dernier scénario d'émission décrit un monde où la protection de l'environnement et l'équité sociale influencent fortement le développement (IPCC, 2001).

Les modèles climatiques globaux utilisés dans le cadre du présent projet de recherche prédisent pour 2070-2099 un réchauffement global entre $+2,4^{\circ}\text{C}$ et $+2,8^{\circ}\text{C}$ pour le scénario B2 et entre $+3,0^{\circ}\text{C}$ et $+3,6^{\circ}\text{C}$ pour le scénario A2. Le réchauffement régional correspondant dépend du modèle régional ; il est d'environ $3,0^{\circ}\text{C}$ pour B2 et $4,0^{\circ}\text{C}$ pour A2 (tableau 3a). Ce réchauffement régional renforcé a déjà été observé dans les Alpes au cours du 20^{eme} siècle (voir par exemple Beniston et al., 1994). Le réchauffement n'est pas uniforme au cours de l'année ; le réchauffement prévu pour l'été est plus grand que pour les autres saisons. Pour le bassin versant du Rhône à Gletsch par exemple, le plus fort réchauffement prévu pour l'été est de $+8,1^{\circ}\text{C}$ alors que pour les autres saisons, un réchauffement maximal entre $+5,2^{\circ}\text{C}$ et $+6^{\circ}\text{C}$ est prévu.

Presque tous les modèles prédisent une diminution de la précipitation annuelle pour les deux scénarios (tableau 3a). La plupart des modèles régionaux prédisent pour tous les bassins versants une augmentation de la précipitation hivernale et une diminution de la précipitation estivale (tableau 3b et figure 2). Pour le printemps, les différents modèles donnent des prédictions contradictoires,

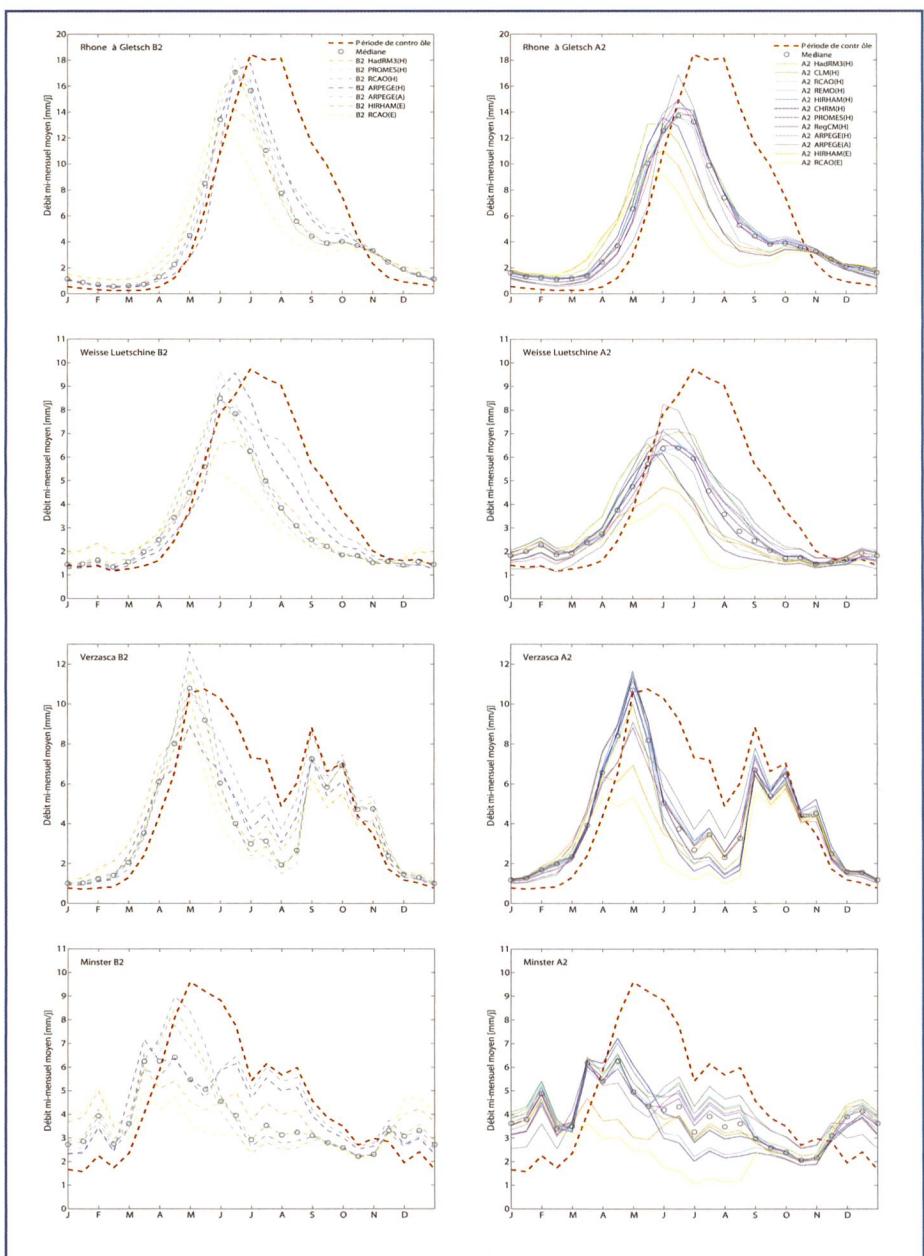


Figure 3. Modifications des régimes hydrologiques simulées avec les 19 scénarios climatiques de Prudence pour la période 2070-2099; à gauche: scénario d'émission B2 (7 simulations climatiques); à droite: scénario A2 (12 simulations climatiques); les lettres après les noms des AOGCMs indiquent les modèles régionaux utilisés (voir Horton et al., 2005).

simulant aussi bien des augmentations que des diminutions (pour les deux scénarios et tous les bassins versants). Pour l'automne, les modèles régionaux prédisent une diminution de la précipitation pour le scénario A2; pour le scénario B2, il n'y a pas de tendance claire.

3. Impacts sur les régimes hydrologiques

3.1 Retrait glaciaire

Sous l'effet des changements climatiques régionaux prédisits par les différents modèles climatiques pour les deux scénarios d'émission, le retrait simulé des glaciers est considérable (tableau 4): les glaciers

disparaîtraient presque entièrement. Pour le plus haut bassin versant étudié, celui de la Drance, 50% des simulations pour le scénario d'émission B2 conduisent à un taux de glaciation de seulement 2%. Pour A2 cette valeur se réduit à 1%. Ce résultat est dû à l'augmentation prononcée de la température: la période de chutes de neige est fortement raccourcie et la perte d'accumulation de neige n'est pas compensée par l'augmentation de la précipitation en hiver. Le fort réchauffement pendant l'été conduit à une fonte accrue et la neige accumulée pendant l'hiver fond entièrement jusqu'à des altitudes très élevées. Il en résulte une forte diminution de la surface d'accumulation des glaciers et

par conséquent de la surface glaciaire.

Cette diminution est probablement surestimée. En effet, le modèle d'évolution de la surface glaciaire simule de manière très simplifiée les processus glaciaires dynamiques. Il fait notamment l'hypothèse, que les glaciers sont dans un état stationnaire pour la période future alors qu'en réalité les glaciers ont un certain temps de réaction avant l'adaptation de leurs dimensions à une modification du climat (entre quelques années et décennies). Les surfaces glaciaires ont donc tendance à être sous-estimées dans nos simulations.

Vu l'importance des changements climatiques prédicts et le retrait glaciaire qui en résulte, nous pouvons cependant présumer que l'erreur commise est petite. L'étendue des changements climatiques prédicts peut être illustrée pour le bassin versant du Rhône à Gletsch où 50% des simulations climatiques prédisent une augmentation de la température moyenne annuelle de +3,9°C pour A2. Ceci correspond à une augmentation de l'isotherme 0°C de plus de 700 m. Cette augmentation ne peut pas directement se traduire en une réduction de la surface glaciaire mais nous montre l'importance du changement climatique: l'altitude moyenne du glacier du Rhône pendant la période de contrôle (1961–1990) se situe aux environs de 2950 m s.m. et le point le plus haut à 3610 m s.m., seulement 670 m plus haut. Notons aussi que Wallinga et Van de Wal (1998) – utilisant un modèle dynamique de glacier plus sophistiqué que le nôtre – arrivent également à la conclusion que le glacier du Rhône disparaîtrait jusqu'en 2100 sous l'action d'une augmentation de la température de 4,4°C (sans modification de la précipitation).

3.2 Débits annuels

Les débits annuels simulés diminuent fortement comparés à la période de contrôle, pour tous les bassins versants et tous les scénarios climatiques (figure 3). Pour le scénario d'émission B2, la diminution médiane se situe entre -26% pour le bassin versant de la Drance de Bagnes et -12% pour le Vorderrhein. Pour le scénario d'émission A2, la diminution médiane est plus forte, entre -30% (Drance de Bagnes) et -14% (Vorderrhein). Pour un même scénario d'émission, la diminution de débit simulé varie fortement en fonction du modèle climatique utilisé. Ceci résulte des différences importantes entre les prédictions de changements climatiques issues des différents modèles et

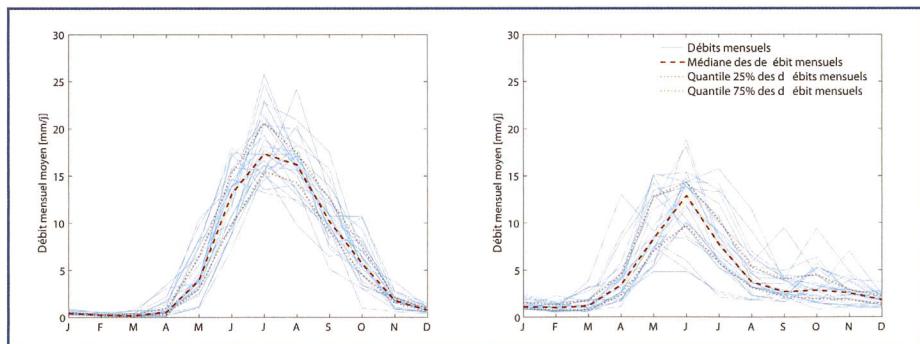


Figure 4. Variabilité interannuelle des débits mensuels du Rhône à Gletsch; à gauche: période de contrôle (1961–1990); à droite: période future (2070–2099) sous un scénario climatique résultant du scénario d'émission A2 (chaque ligne correspond à une année de la période de simulation de 30 années).

nous montre que des études quantitatives de changement climatique qui s'appuient uniquement sur très peu, voire un seul modèle climatique sont peu fiables.

La diminution du débit s'explique tout d'abord par la diminution de la précipitation annuelle. L'augmentation de l'évapotranspiration contribue également à la diminution du débit annuel (tableau 5). Cette augmentation résulte de la forte augmentation de la température, surtout en hiver où parallèlement la disponibilité en eau pour l'évapotranspiration augmente du fait de l'augmentation de la précipitation. La réduction des surfaces glaciaires contribue de deux manières à la diminution de débit. Une réduction importante de la surface glaciaire diminue le

débit produit par la fonte de glace. Il convient cependant de rendre attentif au fait que cet effet est relativement faible. Pour la période de contrôle – bien que la majorité des glaciers soient en phase de retrait – la production annuelle nette d'eau issue du déstockage de glace est faible.

Le retrait des glaciers influence par contre d'une autre manière très fortement le bilan d'eau: la réduction de la surface glaciaire induit une augmentation supplémentaire de l'évapotranspiration par le biais d'une augmentation de la surface évaporatoire. Pour des surfaces couvertes par du glacier, l'évaporation est alimentée par la glace et le firn (un état de transition entre la neige et la glace). Une fois ce stock d'eau disparu, l'évapotranspiration est

Institut	Pays	Modèle global	Modèle régional
Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse	France	ARPEGE	ARPEGE
Danish Meteorological Institute, Copenhague	Danemark		HIRHAM
Institute for Atmospheric and Climate Science, Zürich	Suisse		CHRM
Institute for Coastal Research, Geesthacht	Allemagne		CLM
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Royaume Uni	HadCM3	HadRM3H
International Centre for Theoretical Physics, Trieste	Italie		RegCM
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	Allemagne	ECHAM4	REMO
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping	Suède		RCAO
Universidad Complutense de Madrid, Toledo	Espagne		PROMES

Tableau 1. Source des scénarios climatiques obtenus du projet européen Prudence; noms des instituts de recherche et de leurs modèles climatiques.

	Surfice	Glacier	Altitude moy.	Gamme d'altitudes	Précipitation annuelle	Régime hydrologique
Bassin versant	km ²	%	m s.m.	m s.m.	mm	-
Drance de Bagnes	166.6	39.0	2940	1960 - 4310	1620	a-glaciaire
Saaser Vispa	65.2	33.2	2840	1710 - 4190	1627	b-glaciaire
Lonza	77.8	32.8	2600	1520 - 3900	2187	a-glaciaire
Rhône à Gletsch	38.9	50.0	2710	1760 - 3610	2262	a-glaciaire
Weisse Lütschine	164.0	16.4	2150	650 - 4170	1774	a-glacio-nival
Minster	59.2	-	1340	880 - 2290	2197	nival de transition
Tamina	147.0	1.4	1810	550 - 3220	1554	nival alpin
Vorderrhein	158.0	2.8	2150	750 - 3310	1748	nivo-glaciaire
Dischmabach	43.3	2.6	2360	1670 - 3130	1460	b-glacio-nival
Rosegbach	66.5	27.2	2710	1760 - 4010	1412	a-glaciaire
Verzasca	185.2	-	1650	480 - 2880	2175	nivo-pluvial méridional

Tableau 2. Caractéristiques et régimes hydrologiques des bassins versants retenus comme cas d'étude; les définitions de régimes correspondent à celles données par Aschwanden and Weingartner (1985) pour les Alpes suisses.

a)	Température (°C)						Précipitation (%)					
	scénario B2			scénario A2			scénario B2			scénario A2		
	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max
Bassin versant												
Drance de Bagnes	2.5	3.0	4.7	3.3	4.2	6.1	-11	-6	0	-21	-8	0
Saaser Vispa	2.5	3.0	4.6	3.3	4.0	6.1	-12	-6	0	-22	-8	-1
Lonza	2.5	3.0	4.6	3.3	4.0	6.1	-9	-5	1	-19	-6	2
Rhône à Gletsch	2.4	3.0	4.6	3.2	3.9	6.2	-10	-4	0	-20	-6	2
Weisse Lütschine	2.5	3.1	4.7	3.2	3.9	6.2	-13	-6	-1	-25	-7	-3
Minster	2.4	3.1	4.7	3.2	3.8	6.3	-13	-5	0	-25	-5	-2
Tamina	2.4	3.0	4.6	3.2	3.9	6.2	-13	-8	1	-24	-7	-1
Vorderrhein	2.4	3.0	4.6	3.2	3.9	6.1	-12	-5	0	-22	-6	0
Dischmabach	2.4	2.9	4.7	3.2	4.0	6.2	-13	-9	2	-24	-7	0
Rosegbach	2.4	3.0	4.6	3.2	4.0	6.1	-15	-8	2	-26	-11	-2
Verzasca	2.4	3.1	4.5	3.2	4.0	6.1	-16	-8	1	-26	-11	-2
Médiane	2.4	3.0	4.6	3.2	4.0	6.1	-13	-6	0	-24	-7	-1

b)	Décembre - Février						Juin - Août					
	scénario B2			scénario A2			scénario B2			scénario A2		
	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max
Bassin versant												
Drance de Bagnes	7	10	23	0	14	28	-46	-23	-3	-52	-27	-10
Saaser Vispa	3	12	23	-1	15	28	-43	-26	-2	-48	-27	-9
Lonza	3	12	23	-1	15	28	-43	-26	-2	-48	-27	-9
Rhône à Gletsch	-1	15	20	-6	16	28	-39	-32	-1	-51	-25	-9
Weisse Lütschine	1	15	18	-5	14	26	-39	-31	-2	-49	-27	-12
Minster	0	16	22	-4	14	24	-37	-28	0	-55	-22	-8
Tamina	2	15	20	-1	21	27	-39	-31	1	-50	-22	-6
Vorderrhein	0	15	21	-4	19	28	-40	-32	0	-52	-23	-7
Dischmabach	3	15	21	1	22	29	-37	-26	3	-45	-21	-3
Rosegbach	8	17	24	11	27	37	-42	-30	0	-50	-23	-5
Verzasca	3	13	29	6	24	30	-46	-34	-1	-54	-26	-6
Médiane	3	15	22	-1	16	28	-40	-30	-1	-50	-25	-8

Tableau 3. Changements climatiques régionaux prédicts par les modèles climatiques étudiés (3 modèles globaux combinés à 9 modèles régionaux); les valeurs indiquées sont les minimums, maximums et médianes pour les scénarios d'émission A2 et B2 pour la période 2070-2099; toutes les données sont issues du projet Prudence;

a) **Changements annuels de la température et de la précipitation moyenne.**

b) **Changements saisonniers de la précipitation hivernale et estivale.**

soustraite à la précipitation et représente donc une perte d'eau pour le système.

3.3 Modifications du régime hydrologique

Toutes les simulations pour la période future montre le même type de modifications des régimes hydrologiques: le débit estival est réduit substantiellement, le débit hivernal augmente, le pic dû à la fonte de neige apparaît plus tôt dans l'année et diminue pour la plupart des cas d'études (figure 3). Suite à la diminution des surfaces glaciaires, des régimes hydrologiques purement glaciaires disparaissent. Pour les bassins qui ont actuellement des régimes hydrologiques similaires, les changements prédicts sont très proches, indépendant de leur situation géographique. Les changements simulés pour le scénario d'émission A2 sont plus forts que pour B2.

Une identification des régimes hydrologiques futurs selon la classification proposée par Aschwanden et Weingartner (1985) a été tentée, mais la plupart des régimes futurs se distinguent fortement des régimes actuellement observés en Suisse. La différence principale est l'apparition d'un pic de débit secondaire en automne, un phénomène qui n'existe pas dans les régimes intra-Alpines, seulement au sud des Alpes.

La figure 3 montre les modifications de débits simulés pour le bassin versant du Rhône à Gletsch (régime a-glaciaire), de la Weisse Lütschine (régime a-glacio-nival), de la Verzasca (régime nivo-pluvial méridional) et la Minster (régime nival de transition). Pour les deux scénarios d'émission, le Rhône et la Weisse Lütschine montrent un régime futur fortement influencé par la fonte de

neige au printemps. Mais il est important de noter la grande variabilité des résultats issus des différents modèles climatiques. Suivant les scénarios, le pic de fonte de neige peut par exemple apparaître entre la fin mai et juillet. Pour la Verzasca, la variabilité des changements est moins prononcée. La fonte de neige est avancée d'environ un demi-mois pour toutes les simulations. Le pic de débit en automne ne subit pas de décalage mais sa hauteur change. Le régime hydrologique ne change pas significativement et peut toujours être qualifié de nivo-pluvial méridional. Pour la Minster, le pic de débit au printemps est également avancé. La saisonnalité des débits s'atténue et a même tendance à disparaître pour le scénario A2. Pour les deux scénarios d'émission, la variabilité des régimes futurs simulés est considérable. Il existe même deux simulations extrêmes pour lesquelles le régime de la Minster devient du type exclusivement pluvial.

Cette modification des régimes hydrologiques est également accompagnée d'une modification de la variabilité interannuelle des débits. Ce phénomène est illustré pour le bassin versant du Rhône à Gletsch dans la figure 4 qui montre la variabilité interannuelle des débits pour la période de contrôle et pour une simulation climatique future. Pour les bassins versants alpins étudiés, cette plus forte variabilité des débits d'une année à l'autre est notamment due à la modification importante des propriétés de stockage de l'eau sous forme de neige et de glace.

4. Conclusion: impacts potentiels sur la gestion de l'eau

Considérant les différents régimes hydrologiques et les prédictions de change-

ments climatiques issues des différents modèles climatiques, une tendance générale peut être identifiée pour les deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre: le changement climatique conduit à une diminution significative du débit annuel total et à un décalage du débit mensuel maximum vers des périodes plus tôt dans l'année. Ce décalage résulte de l'augmentation de la température et de la modification des processus de fonte qui en résulte. Il faut également s'attendre à une augmentation de la variabilité des débits d'une année à l'autre.

Une réduction du débit annuel total et une modification des régimes hydrologiques auraient un impact certain sur la gestion des ressources en eau. Un secteur économique qui serait directement touché est la production hydroélectrique (voir également Piot, même issue). Une diminution des débits annuels diminuerait le remplissage des barrages et ainsi le potentiel de production. De l'autre côté, une atténuation de la forte saisonnalité et une meilleure répartition au cours de l'année pourrait avoir un effet favorable sur la gestion de la production hydroélectrique par accumulation mais également au fil de l'eau (voir Vischer and Bader, 1999). Un autre impact potentiel est lié à l'augmentation de la variabilité interannuelle des débits tel qu'elle résulte des scénarios climatiques étudiés dans ce projet. Une variabilité accrue rendrait la gestion beaucoup moins prévisible. Actuellement, la gestion des grands ouvrages d'accumulation est facilitée par la grande régularité des débits provenant de bassins versants à forte couverture glaciaire.

Une modification des régimes hydrologiques pourrait également in-

	Taux de glaciation (% de la surface du bassin)					
	scénario B2			scénario A2		
Bassin versant	Min	Méd	Max	Min	Méd	Max
Drance de Bagnes	0.8	1.8	6.7	0.1	1.0	1.7
Saaser Vispa	0.6	3.7	7.1	0.0	1.4	3.4
Lonza	1.0	2.6	5.1	0.1	1.6	2.3
Rhône à Gletsch	0.0	0.3	6.7	0.0	0.0	0.0
Weisse Lütschine	0.5	2.2	6.2	0.1	0.9	2.6
Minster	-	-	-	-	-	-
Tamina	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Vorderrhein	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dischmabach	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rosegbach	0.0	1.4	2.3	0.0	0.3	1.3
Verzasca	-	-	-	-	-	-

Tableau 4. Taux de glaciation simulés pour les scénarios d'émission A2 et B2 pour la période 2070–2099: les valeurs indiquées sont les minimums, maximums et médianes correspondant aux scénarios climatiques de Prudence (7 simulations climatiques pour B2 et 12 simulations pour A2).

fluencer la problématique de la gestion des crues. La fréquence d'apparition et l'étendue des crues dépend certes largement d'une éventuelle modification des précipitations extrêmes (qui n'ont pas été analysées dans la présente étude). Mais une modification du régime hydrologique pourrait notamment conduire à l'apparition de crues et d'inondations plus tôt dans l'année. Rendons finalement attentif au fait que l'état actuel de la science ne permet pas de prédire à quel moment d'éventuelles modifications du régime hydrologique deviendront perceptibles. Dans le cadre de la présente étude, les simulations ont montré qu'un réchauffement régional de 1,2 °C et la réduction de précipitation de 2% associée conduirait déjà à une diminution du débit annuel de 7% en moyenne pour les bassins versant étudiés (voir Piot, même issue, et Horton et al., 2005). Pour les bassins versants à forte couverture glaciaires, la réduction des débits annuels tel que prédicté par nos simulations sera dans tous les cas précédés d'une phase d'augmentation des débits due au déstockage de la glace accumulée.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Office Fédéral de l'Energie. Nous remercions également l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie pour les données de débits et MétéoSuisse pour les données météorologiques. Nous tenons également à remercier les membres du projet Prudence pour la mise à disposition des scénarios climatiques.

Bibliographie

Aschwanden, H. and Weingartner, R., 1985. Die Abflussregimes der Schweiz. 65 p., Bern

Beniston, M., Rebetez, M., Giorgi, F. and Marinucci, M.R., 1994. An analysis of regional climate-change in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 49(3), 135-159.

Christensen, J.H., Carter, T.R. and Giorgi, F., 2002. Prudence employs new methods to assess European Climate Change. *EOS Transactions*, AGU, 83, 147

Horton, P., Schaeefli, B., Mezghani, A., Hingray, B. and 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), Office Fédéral de l'Energie, Bern. Disponible sur <http://www.energie-perspektiven.ch>

IPCC, 2001. Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse – Résumé à l'intention des décideurs: Evaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Disponible sur <http://www.ipcc.ch>

Piot, M., 2005. Auswirkungen einer möglichen Klimaerwärmung auf die Wasserkraftproduktion in der Periode 2020–2049. Eau énergie air, même issue

Schaeefli, B., 2005. Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources: Application to a glacier-fed hydropower production system in the Swiss Alps. Thèse de doctorat. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 209 pp. Disponible sur <http://library.epfl.ch/theses>

Vischer, D. and Bader, S., 1999. Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. Eau énergie air, 7/8, 149–152,

Wallinga, J. and Van de Wal, R.S.W., 1998. Sensitivity of Rhonegletscher, Switzerland, to climate change: experiments with a one-dimensional flow-line model. *Journal of Glaciology*, 44, 383–393.

Zierl, B. and Bugmann, H., 2005. Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research*, 41, W02028, doi: 10.1029/2004WR003447,

	Par rapport à la partie non-glaciaire (mm)				Par rapport au bassin versant (mm)		
	Contrôle	scénario B2	scénario A2	Control	scénario B2	scénario A2	
Bassin versant							
Dranse de Bagnes	296	377	416	181	359	412	
Saaser Vispa	243	305	328	163	290	321	
Lonza	269	338	371	181	328	363	
Rhône à Gletsch	294	373	414	147	365	414	
Weisse Lütschine	391	502	533	327	478	528	
Minster	507	610	646	507	610	646	
Tamina	274	341	376	270	340	376	
Vorderrhein	274	333	363	266	333	363	
Dischmabach	255	313	341	249	313	341	
Rosegbach	229	276	298	167	270	296	
Verzasca	380	462	494	380	462	494	
Augmentation médiane	-	69	102	-	103	139	

Tableau 5. Evapotranspiration simulée pour la période de contrôle et pour la période future pour les scénarios d'émission A2 et B2 (valeur médiane); partie gauche: valeurs spécifiques par rapport à la surface non-glaciaire du bassin versant (qui varie entre la période de contrôle et la période future!); partie droite: valeurs spécifiques par rapport à la superficie totale du bassin versant.

Liste d'abréviations:

AOGCM: Atmosphere-Ocean General Circulation Models

RCM: Régional Climate Model

IPCC: International Panel on Climate Change; groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) créé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 1988 (<http://www.ipcc.ch>)

Prudence: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects; projet de recherche européen (<http://prudence.dmi.dk/>)

GSM-SOCONT: Glacier and SnowMelt – SOiL CONtribution model; le modèle hydrologique utilisé dans cette étude (http://www.copernicus.org/Egu/hess/9/1_2/95.htm)