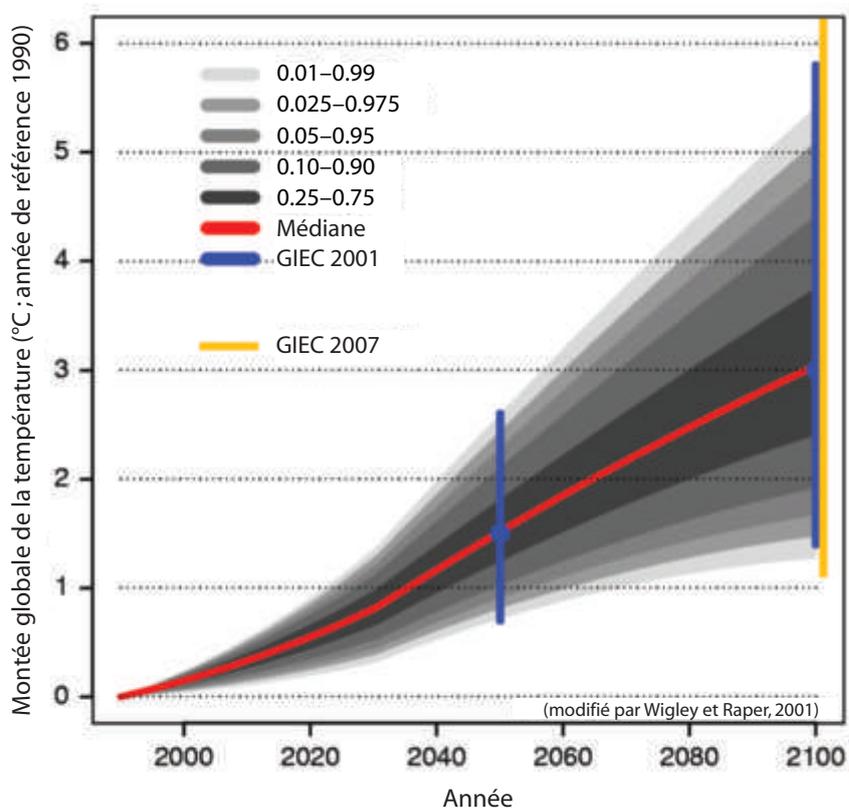


Données fondamentales

Auteurs

Christoph Frei	MétéoSuisse, Zurich
Pierluigi Calanca	Agroscope FAL Reckenholz
Christoph Schär	Institut für Atmosphäre und Klimawissenschaft (IAC), EPF de Zurich
Heinz Wanner	Geographisches Institut, Université de Berne
Bruno Schädler	Hydrologie, Office fédéral de l'environnement
Wilfried Häberli	Geographisches Institut, Université de Zurich
Christof Appenzeller	MétéoSuisse, Zurich
Urs Neu	ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles
Esther Thalmann	ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles
Christoph Ritz	ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles
Roland Hohmann	OcCC, Berne



1. L'avenir climatique de la Suisse

Changements observés au 20e siècle

Au 20e siècle, la température globale moyenne a augmenté d'environ 0.6 °C.¹ En Suisse – comme en d'autres régions continentales – le réchauffement a été plus fort qu'en moyenne globale. Au 20e siècle, la température a augmenté d'environ 1.6 °C en Suisse occidentale, 1.3 °C en Suisse alémanique et 1.0 °C au Sud des Alpes. Sur le flanc nord des Alpes, la fréquence des mois anormalement chauds (température de plus de 2 °C au-dessus de la moyenne à long terme) a déjà augmenté d'environ 70%.² Le régime des précipitations s'est également modifié. Les précipitations annuelles ont augmenté en gros de 120 mm (8%) au 20e siècle. Dans l'espace alpin septentrional et occidental, les précipitations d'hiver moyennes ont subi une hausse de 20–30%.³ Les fortes précipitations journalières et de 2–5 jours ont également augmenté en automne et en hiver dans de vastes parties du Plateau et de la bordure nord des Alpes.⁴ Etant donné que l'évapotranspiration a augmenté de 105 mm (23%) avec le réchauffement, l'écoulement n'a pratiquement pas changé en moyenne annuelle. Simultanément, les réserves d'eau stockées dans les glaciers ont décliné d'à peu près 50 kilomètres cubes en cent ans. Cette diminution du volume des glaciers a contribué à l'écoulement à raison de 12 mm/a (1.2%) en moyenne.

Scénarios de températures et de précipitations

Les changements climatiques s'accroîtront à l'avenir. Suivant l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre, il faudra compter avec une augmentation de la température globale par rapport à 1990 de 0.8°–2.4 °C jusqu'en 2050 et de 1.4°–5.8 °C d'ici la fin du 21e siècle, au cas où aucunes mesures radicales de réduction ne seraient prises.^{1,5} Le cycle de l'eau aussi changera (cf. paragraphe 4). Toutefois, les changements climatiques ne se manifesteront pas de façon égale dans toutes les régions. Le climat va-t-il se modifier en Suisse à l'avenir? Les changements régionaux sont nettement plus difficiles à évaluer, vu que l'environnement respectif (relief, distance de la mer, structures locales des vents et leurs fluctuations etc.) a une grande influence. La présente étude s'appuie sur un scénario régional de températures et de précipitations calculé pour la Suisse.⁶ Il est basé sur les calculs effectués au moyen de diverses combinaisons de modèles climatiques globaux et régionaux du projet PRUDENCE⁷ de l'UE (voir encadré). Ceux-ci permettent d'évaluer les incertitudes ayant trait à la compréhension physique du système climatique. Une seconde étape a pris en compte le lien de dépendance des résultats à l'égard de l'évolution future des émissions, sans inclure d'éventuelles

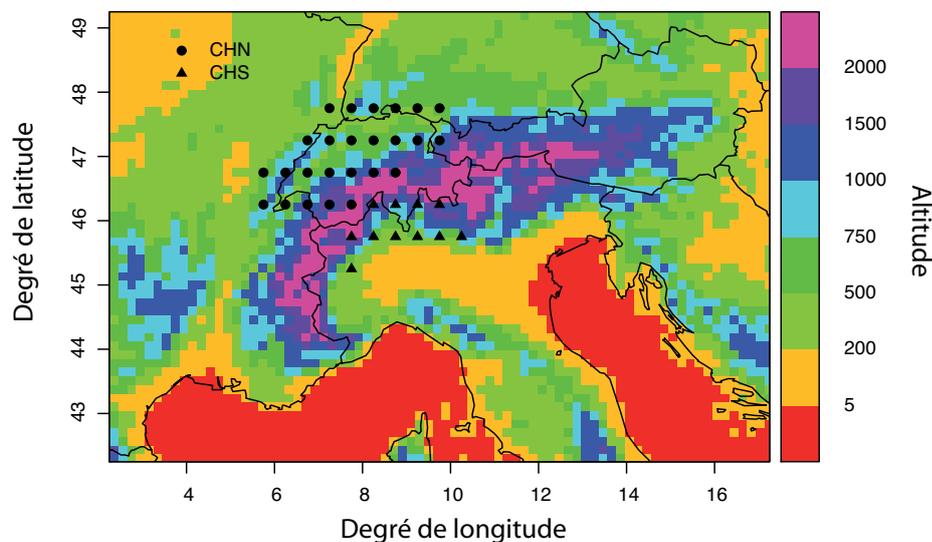


Figure 1: Grilles de points du modèle utilisé dans l'analyse, pour la Suisse septentrionale (CHN) et méridionale (CHS). La topographie des Alpes (m d'altitude) est rendue par des couleurs (résolution de 15 km).

mesures politiques visant à abaisser les émissions de gaz à effet de serre (p.ex. Protocole de Kyoto et actions subséquentes). Des mesures, même radicales, de réduction des émissions n'auront pas encore d'effets très marqués avant 2050, mais influenceront fortement sur l'évolution pendant

la seconde moitié du 21^e siècle. Les fondements de ces données et les analyses statistiques sont décrits en détail par Frei (2004).⁶ Pour la présente étude, les valeurs moyennes relatives aux versants nord et sud des Alpes (Fig. 1) ont été calculées pour 2030, 2050 et 2070.

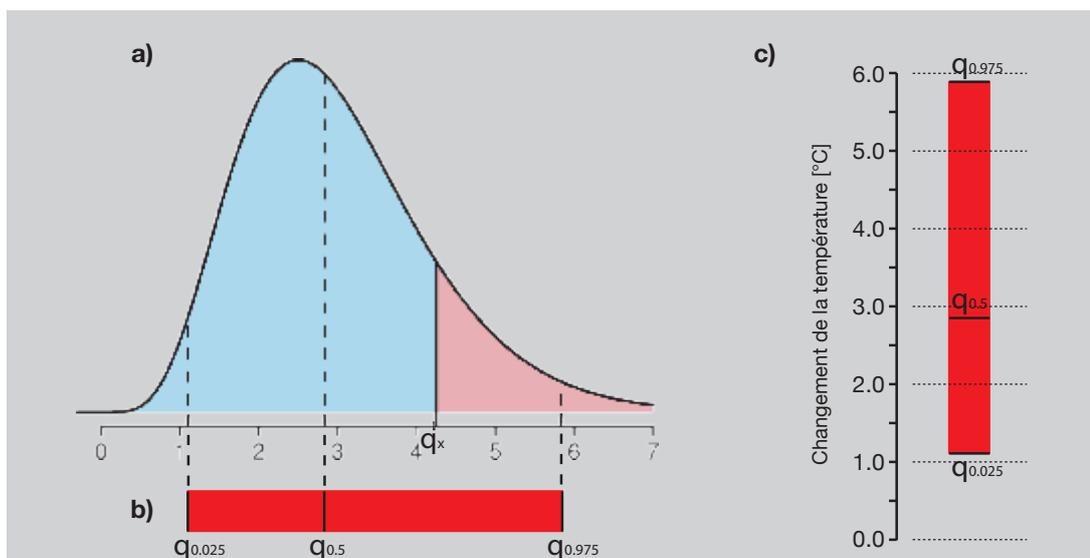


Figure 2: Distribution schématique de probabilité pour les changements de température (a). Cette distribution est caractérisée par la médiane ($q_{0.5}$) et l'intervalle de confiance de 95% (de $q_{0.025}$ à $q_{0.975}$) (b). Dans le rapport, les scénarios de probabilité sont caractérisés par ces grandeurs caractéristiques (c).

Bases du calcul et de la représentation des résultats

Les modélisations du projet PRUDENCE⁶ de l'UE ont servi de base. Les incertitudes relatives à la compréhension physique (incertitudes du modèle) ont été déduites de la dispersion des résultats de seize combinaisons différentes de modèles pour l'Europe. Deux scénarios moyens d'émissions du GIEC (SRES A2 et B2⁷), quatre modèles climatiques globaux et huit modèles climatiques régionaux ont été combinés de différentes manières. Partant des valeurs des températures de la période 2071–2100, un procédé statistique a représenté à la même échelle celles de 2030, 2050 et 2070.⁶ L'influence de l'évolution des émissions a été évaluée en partant de l'hypothèse que la dispersion des résultats au niveau régional est comparable à celle qui ressort au niveau global des principaux scénarios d'émission du GIEC. Les incertitudes qui en découlent en matière de changements peuvent être représentées comme distribution de probabilité (figure 2a). La valeur q_x se lit quantile $x\%$ et désigne la valeur du changement ayant une probabilité de $x\%$ de ne pas être dépassée.

La médiane (le quantile 50%, $q_{0.5}$) partage la distribution en deux surfaces égales et désigne l'évaluation moyenne du changement. L'intervalle de confiance de 95% entre les quantiles 2.5% et 97.5% ($q_{0.025}$ à $q_{0.975}$) désigne le domaine des valeurs dans lequel le changement futur se situera avec une probabilité de 95% selon les calculs ci-dessus.

La distribution calculée peut donc être représentée de façon simplifiée par les quantiles 2.5%, 50% et 97.5% (figure 2b). Dans le rapport, les distributions pour les différentes saisons sont montrées l'une à côté de l'autre sous la forme de barres verticales (figure 2c).

Disposant de nouveaux résultats de modélisations, fournis par un projet de recherche de l'UE actuellement en cours (ENSEMBLES), il devrait être possible dans un proche avenir d'améliorer encore les calculs. De futures nouvelles données pourront rétrécir les intervalles d'incertitude aussi bien que les élargir. Ce second cas pourrait se présenter par exemple si des processus négligés jusqu'ici faisaient apparaître de nouvelles sources d'incertitudes.

Les scénarios CH2050

Les graphiques des figures 3 et 4 traduisent les changements calculés des précipitations et des températures sur les versants nord et sud des Alpes en 2030, 2050 et 2070. Ils montrent l'évolution future attendue et mettent en évidence que la Suisse sera exposée en 2050 à des changements climatiques toujours plus rapides et plus forts. Des mesures rigoureuses de réduction des émissions peuvent exercer une influence déterminante sur cette évolution avant tout pendant la seconde moitié du 21^e siècle. De telles mesures ne sont pas prises en compte dans l'évolution représentée ici. Vu l'inertie du système climatique, il faudra mettre le cap

dans cette direction déjà ces prochaines années et décennies.

Les résultats pour 2050 sont résumés dans le tableau 1. Ils constituent la base du présent rapport. Jusqu'en 2050, le réchauffement sera pratiquement le même sur les versants nord et sud des Alpes. Selon une estimation moyenne (la médiane, voir l'encadré), la hausse des températures sera de 1.8 °C en hiver et de 2.7 °C en été en Suisse septentrionale et de 1.8 °C en hiver et de 2.8 °C en été en Suisse méridionale. Pour les saisons de transition, le réchauffement est comparable à celui de l'hiver (printemps: 1.8 °C sur les versants nord et sud des Alpes; automne: 2.1 °C sur le versant nord et 2.2 °C sur le versant sud des Alpes).

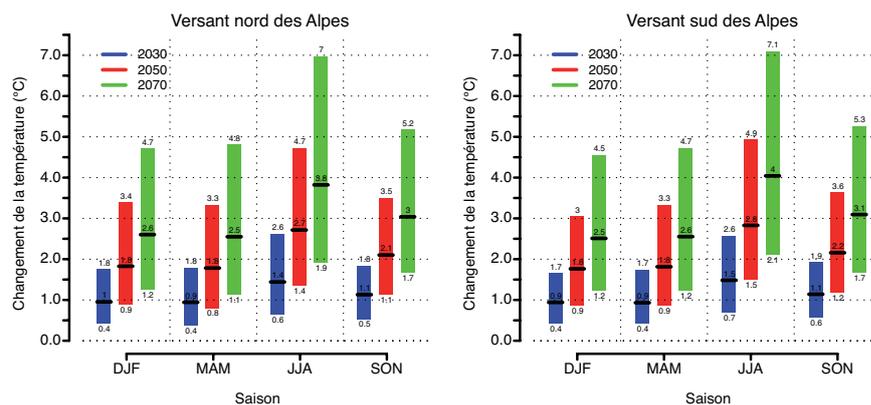


Figure 3: Changement de la température moyenne en hiver (DJF: décembre à février), au printemps (MAM: mars à mai), en été (JJA: juin à août) et en automne (SON: septembre à novembre) sur les versants nord et sud des Alpes en 2050 par rapport à 1990. Les lignes horizontales indiquent chaque fois l'estimation moyenne (médiane). Le réchauffement se situera avec une probabilité de 95% à l'intérieur des barres de couleur (intervalle de confiance de 95%, cf. encadré).

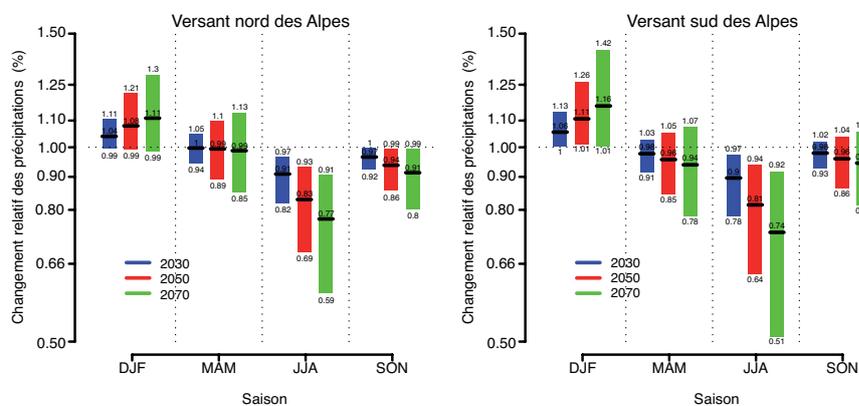


Figure 4: Changement relatif des précipitations saisonnières moyennes sur les versants nord et sud des Alpes en 2050 par rapport à 1990 (échelle logarithmique; définition des saisons, voir fig. 3). Une valeur de 0.50 désigne une diminution de moitié, une valeur de 1.25 une augmentation de 25% par rapport aux conditions actuelles. Les lignes horizontales indiquent chaque fois l'estimation moyenne (médiane). Le réchauffement se situera avec une probabilité de 95% à l'intérieur des barres de couleur (intervalle de confiance de 95%, cf. encadré).

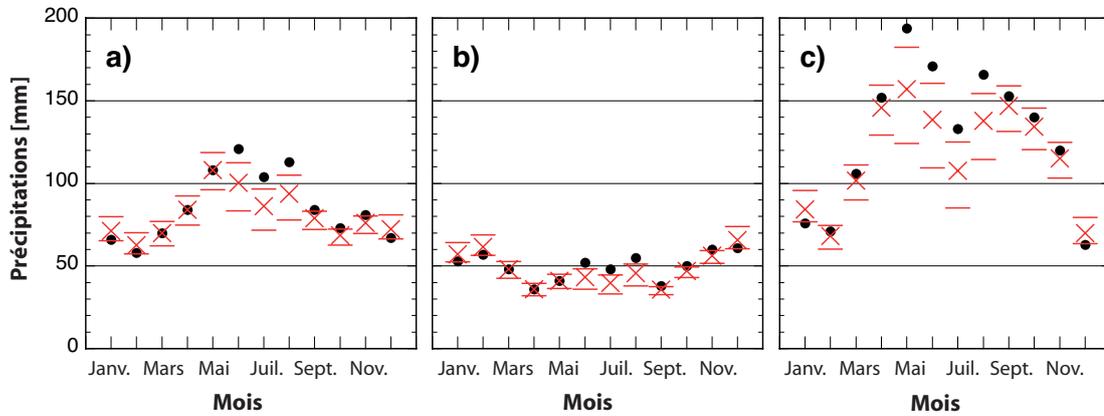


Figure 5: Pluviométrie mensuelle à a) Berne Liebefeld, b) Sion et c) Lugano aujourd'hui (points noirs) et en 2050 (en rouge; médiane et intervalle de confiance de 95%)

Tableau 1: Changement des températures (°C, en haut) et des précipitations (en bas) en 2050 par rapport à 1990 (chiffres en bleu: médiane; chiffres en rouge: intervalle de confiance). Le scénario pour 2050 sert de base au présent rapport.

Région	Saison	Probabilités		
		0.025	0.5	0.975
Suisse septentrionale	déc/jan/fév	0.9	1.8	3.4
	mars/avr/mai	0.8	1.8	3.3
	juin/juil/août	1.4	2.7	4.7
	sept/oct/nov	1.1	2.1	3.5
Suisse méridionale	déc/jan/fév	0.9	1.8	3.1
	mars/avr/mai	0.9	1.8	3.3
	juin/juil/août	1.5	2.8	4.9
	sept/oct/nov	1.2	2.2	3.7

Région	Saison	Probabilités		
		0.025	0.5	0.975
Suisse septentrionale	déc/jan/fév	-1%	+8%	+21%
	mars/avr/mai	-11%	0%	+10%
	juin/juil/août	-31%	-17%	-7%
	sept/oct/nov	-14%	-6%	-1%
Suisse méridionale	déc/jan/fév	+1%	+11%	+26%
	mars/avr/mai	-15%	-4%	+5%
	juin/juil/août	-36%	-19%	-6%
	sept/oct/nov	-14%	-4%	+4%

La situation en matière de précipitations est aussi très semblable sur les deux versants des Alpes. Pour toutes les saisons, les changements se distinguent seulement de quelques centièmes d'une région à l'autre (fig. 4). Jusqu'au milieu du 21e siècle, il faudra s'attendre sur le versant nord des Alpes à une augmentation d'environ 8% en hiver (11% sur le versant sud) et à une diminution de 17% en gros en été (19% sur le versant sud). Au printemps et en automne, des augmentations ou diminutions des précipitations sont toutes deux possibles. L'incertitude est particulièrement grande pour l'été.

Les changements absolus des précipitations à Berne Liebefeld, Sion et Lugano sont représentés sur la fig. 5. Au total, le volume annuel des précipitations diminue légèrement (-50 mm à Berne Liebefeld, -20 mm à Sion, -150 mm à Lugano).

Positionnement des changements

Où situer ces changements climatiques? Le climat à Berne en 2050 sera-t-il pareil au climat actuel à Rome? Pour répondre à ce genre de questions, les scénarios climatiques ont été comparés avec les conditions actuelles dans différentes stations de

MétéoSuisse. Le fait que les températures et précipitations dépendent très fortement de la topographie, de la situation géographique et d'autres particularités locales rend la comparaison difficile. Pour les précipitations, la comparaison des stations ne donne pas une idée cohérente et a donc peu de sens.

En revanche, il existe en Suisse et dans les pays voisins des lieux où les conditions de température sont aujourd'hui ce qu'elles deviendront en 2050 en des endroits bien définis du fait du réchauffement. D'ici 2050, les températures à Zurich se rapprocheront des conditions régnant actuellement à Sion si le réchauffement est faible, à Magadino s'il est moyen et à Turin s'il est fort (fig. 6). La situation en matière de température en 2050 à Bâle correspondra à la situation actuelle de Grono si le réchauffement est faible, à celle de Lugano s'il est moyen et à celle de Vérone s'il est fort.

A propos de telles comparaisons, il faut considérer toutefois que la problématique des changements climatiques réside moins dans un nouvel état du climat que dans le processus de changement et d'adaptation à ces derniers.

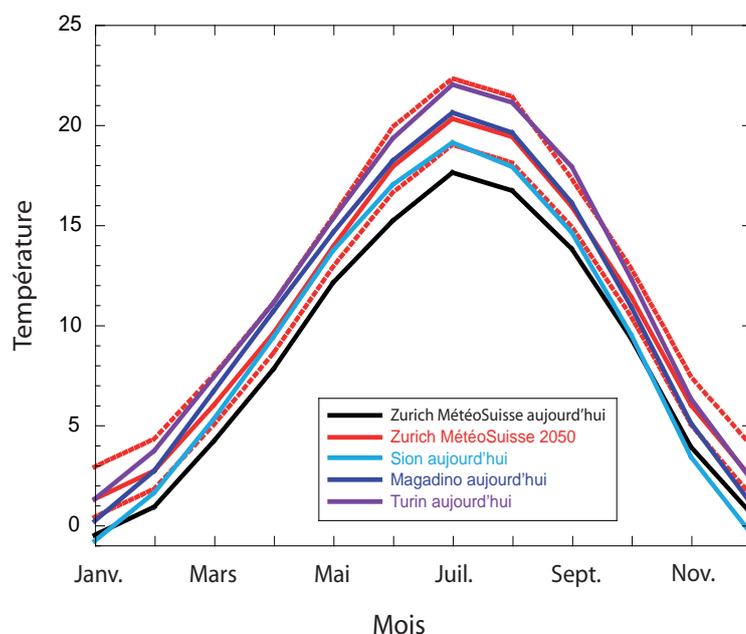


Figure 6: Comparaison des courbes de température de Zurich MétéoSuisse aujourd'hui et en 2050 avec les températures actuelles de Sion, Magadino et Turin, selon les scénarios pour un réchauffement faible, moyen et fort.

2. Événements extrêmes

Dans de nombreux cas, il est important d'évaluer les changements relatifs aux événements extrêmes, p.ex. de redimensionner les ouvrages de protection contre les crues. Le scénario climatique à la base de l'étude ne fait de prévisions qu'au sujet des moyennes saisonnières des températures et des précipitations, mais ne fournit pas de données sur les extrêmes. Mais les changements en matière d'événements extrêmes sont examinés dans de nombreuses études. On en trouve un résumé dans le rapport de l'OcCC intitulé „Événements extrêmes et changements climatiques“.⁸

Sur la base des connaissances physiques des processus météorologiques et du système climatique, il faut s'attendre à ce que certains événements extrêmes augmentent et que d'autres diminuent. Ces changements seront vraisemblablement différents selon la région. Les modèles climatiques actuels ne rendent compte qu'approximativement des processus à petite échelle lors d'événements extrêmes. Les scénarios sur l'évolution de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes sont donc encore peu sûrs. Fournir des données statistiques sur les tendances actuelles en matière d'extrêmes se révèle également difficile vu la rareté de ces événements et n'est possible que pour quelques catégories d'entre eux (voir plus bas).⁹ Dans les résumés suivants, un changement n'est discuté que sur la base d'observations statistiquement significatives et/ou d'indices plausibles d'un développement dans une direction donnée.

Extrêmes de température

L'évolution la plus claire est celle des extrêmes de température. Une hausse de la température moyenne en été entraînera des périodes de forte chaleur caractérisées par des températures plus élevées qu'aujourd'hui (figure 7).² La variabilité des températures moyennes d'été augmentera aussi selon les modèles climatiques, ce qui conduira à davantage de telles périodes.^{2,10} Les modèles climatiques indiquent que les températures maximales absolues augmenteront davantage que les maxima journaliers moyens. Selon le scénario utilisé ici, des conditions telles que celles de l'été caniculaire 2003 seront encore très rares en 2050 si le réchauffement est faible; elles surviendront

toutes les quelques décennies si le réchauffement est moyen et toutes les quelques années s'il est fort (voir aussi le chapitre suivant). La fréquence des étés extrêmement chauds augmenterait encore plus rapidement si de surcroît la variabilité du climat estival devait s'accroître, ce que la plupart des scénarios climatiques suggèrent.

En contrepartie, la fréquence des périodes froides et le nombre de jours de gel diminueront. En hiver, la variabilité journalière de la température sera généralement plus faible, parce que les températures minimales subiront une hausse plus forte que les températures moyennes. Cet effet sera particulièrement marqué dans les régions où le manteau neigeux diminuera à la suite du réchauffement. On ne sait pas au juste quelles seront les modifications du risque de gel tardif, survenant donc après le début de la période de végétation, car celle-ci se décalera aussi avec le réchauffement.

Extrêmes de précipitations

En ce qui concerne les extrêmes de précipitations, de nouvelles analyses indiquent un accroissement des précipitations extrêmes de un à cinq jours pendant le semestre d'hiver en Europe centrale.¹¹ Les modèles PRUDENCE montrent que les fortes précipitations, telles qu'elles se produisent aujourd'hui seulement tous les huit à vingt ans, surviendront en moyenne tous les cinq ans d'ici la fin du siècle. La situation en été est moins claire. Les modèles simulent une diminution prononcée des précipitations moyennes, mais la plupart d'entre eux indiquent néanmoins un accroissement de la valeur extrême quinquennale.

Crues, glissements de pentes et laves torrentielles

Une augmentation de l'intensité et des extrêmes de précipitations recèle un potentiel de crues, glissements de pentes et laves torrentielles plus fréquents. Mais les impacts effectifs sur ces dangers naturels sont aussi déterminés par d'autres processus, eux-mêmes touchés par les changements climatiques (humidité du sol, fonte de la neige, régime d'écoulement). C'est pourquoi il est difficile de prévoir comment ces dangers naturels se modifieront (cf. le chapitre sur l'économie des eaux).

Sécheresse

Des périodes de sécheresse extrême seront plus longues et plus fréquentes en été, conformément à la diminution des précipitations moyennes et du nombre de jours de pluie. La combinaison de précipitations moins abondantes et de l'évapotranspiration plus intense pourra conduire régionalement à une diminution de la teneur du sol en eau. En outre, les réserves de neige s'amenuisant dans les Alpes, les cours d'eau, alimentés aujourd'hui en été par l'eau de fonte, s'assècheront plus fréquemment et

l'accumulation saisonnière d'eau dans les Alpes diminuera.

Tempêtes

En ce qui concerne l'évolution des tempêtes, il faut compter plutôt, en Europe centrale, avec une diminution de leur fréquence, en même temps qu'avec une augmentation du nombre de très fortes tempêtes (p.ex. de la catégorie de „Vivian“ ou de „Lothar“). En principe, les trajectoires des zones de basse pression et des tempêtes se décaleront en direction des pôles.

3. Evaluations sommaires d'autres grandeurs climatiques

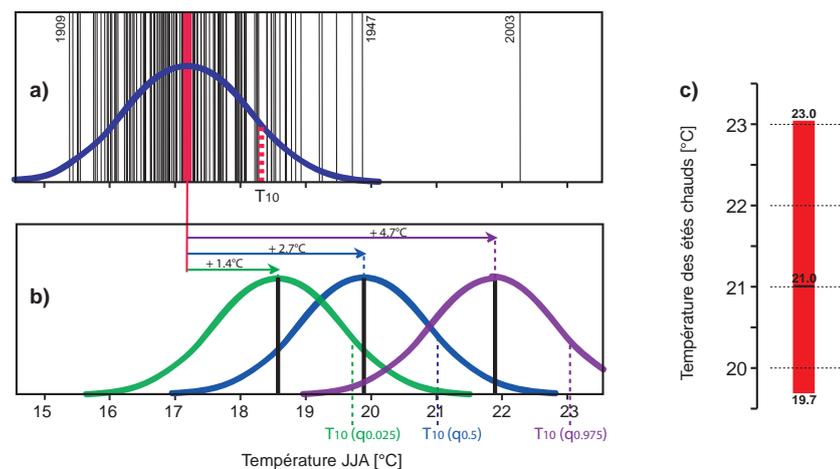


Figure 7: a) Distribution des températures d'été de 1864 à 2003 et b) en 2050. c) La température de l'été le plus chaud d'une décennie augmente aussi avec les changements climatiques.

Partant du présent scénario climatique, il est possible d'évaluer sommairement les changements d'autres grandeurs climatiques. Voici quelques exemples.

Etés caniculaires

Le scénario climatique indique que le réchauffement sera particulièrement marqué en été. Qu'est-ce que cela signifie pour la température d'étés très chauds?

La figure 7a présente les températures moyennes d'été de 1864 à 2003 dans les vallées du versant nord des Alpes. La distribution de probabilité y relative (courbe bleue) correspond à une moyenne $T_M = 17.2^\circ\text{C}$ (ligne rouge). Un été torride, tel qu'il se produit en moyenne une fois tous les dix ans, est plus chaud que $T_{10} = 18.3^\circ\text{C}$.

Avec le réchauffement, la distribution de probabilité des températures moyennes d'été se décale jusqu'en 2050 (figure 7b) et la température de l'été le plus chaud d'une décennie augmente. En 2050, un été sur dix sera plus chaud que 21°C dans le cas le plus probable, que 19.7°C dans l'hypothèse d'un très faible réchauffement et que 23°C dans le cas d'un très fort réchauffement.

Cette évaluation repose sur l'hypothèse simplificatrice que les changements climatiques n'ont pas d'influence sur la forme de la distribution (variabilité année par année) des températures d'été. Si la variabilité devait augmenter du fait des changements climatiques, comme la plupart des modèles du climat le suggèrent^{9,10}, la fréquence des étés extrêmement chauds s'accroîtra nettement plus vite et plus fort.

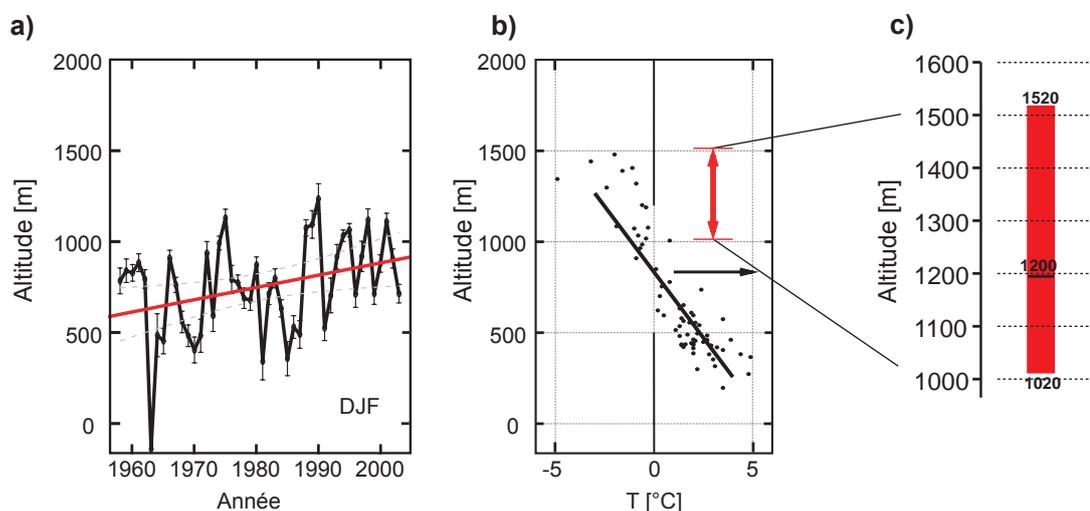


Figure 8: a) Evolution temporelle de l'altitude moyenne de l'isotherme de 0 °C pendant les mois d'hiver (DJF) de 1958 à 2003. Le calcul est basé sur 67 mesures homogénéisées de la température du sol. La ligne rouge indique une tendance linéaire, la ligne traitillée l'incertitude correspondante (intervalle de confiance de 95%). b) Distribution verticale des températures moyennes d'hiver mesurées dans des stations de MétéoSuisse de 1959 à 1997. L'actuelle isotherme de 0 °C se situe aux environs de 840 m d'altitude. c) D'ici 2050, l'isotherme de 0 °C montera d'env. 360 m pour atteindre l'altitude de 1300 m (fourchette entre 1020 et 1520 m d'altitude).

Isotherme de zéro degré en hiver

L'élévation de la température entraîne celle de l'isotherme de zéro degré en hiver. Celle-ci correspond à peu près à la limite des chutes de neige. La figure 8a montre l'évolution de l'isotherme de zéro degré pendant les mois d'hiver de 1958 à 2003. Pendant cette période, elle a passé d'environ 600 m pendant les années 1960 à quelque 900 m pendant les années 1990 (à peu près 200 m par degré de réchauffement).¹²

La distribution verticale des températures moyennes d'hiver jusqu'à 1500 m d'alt. est présentée à la figure 8b (points noirs). La droite de régression (ligne noire) indique le refroidissement moyen avec l'altitude en hiver. Elle coupe la ligne de 0 °C vers 840 m d'alt., ce qui correspond à l'altitude moyenne de l'isotherme de zéro degré pendant la période d'observation. Si l'élévation observée (fig. 8a) se poursuit à l'avenir, l'isotherme du zéro degré montera jusqu'en 2050 d'environ 360 m dans le cas d'un réchauffement moyen (+1.8 °C en hiver), 180 m dans celui d'un faible réchauffement (+0.9 °C) et 680 m en cas de fort réchauffement (+3.4 °C) (figure 8c).

Recul des glaciers

La transformation la plus frappante dans les Alpes, consécutive aux changements climatiques, sera le recul des glaciers. La fig. 9 présente des modélisa-

tions de l'amenuisement des glaciers en comparaison de la période de référence 1971–1990.¹³ Ces calculs ont été effectués pour un réchauffement entre +1 et +5 °C en été et une modification des précipitations annuelles entre -20% et +30%.

Selon le scénario climatique utilisé ici, la superficie des glaciers des Alpes diminuera de trois quarts environ d'ici 2050 par rapport à la période de référence dans l'hypothèse d'un réchauffement moyen (fig. 9b). La perte de surface sera d'à peu près 50% si le réchauffement est modeste, et d'environ 90% s'il est fort. Les pertes relatives seront moindres pour les grands glaciers et plus importantes pour les petits que le changement moyen évalué. Nombre de petits glaciers vont probablement disparaître.

Recul du pergélisol

Le réchauffement du sous-sol gelé en permanence en haute montagne est un processus lent qui a des effets à long terme. Pour le réchauffement décrit dans le présent scénario, le dégel d'éboulis riches en glace, situés entre 2000 et 3000 m d'alt. sur des pentes à l'ombre, aura lieu plus en profondeur, mais ne sera total que par endroits. Le réchauffement de parois de rocher gelées, qui a atteint une épaisseur d'une cinquantaine de mètres du fait de l'augmentation de la température au 20e siècle, pénétrera plus en profondeur et conduira

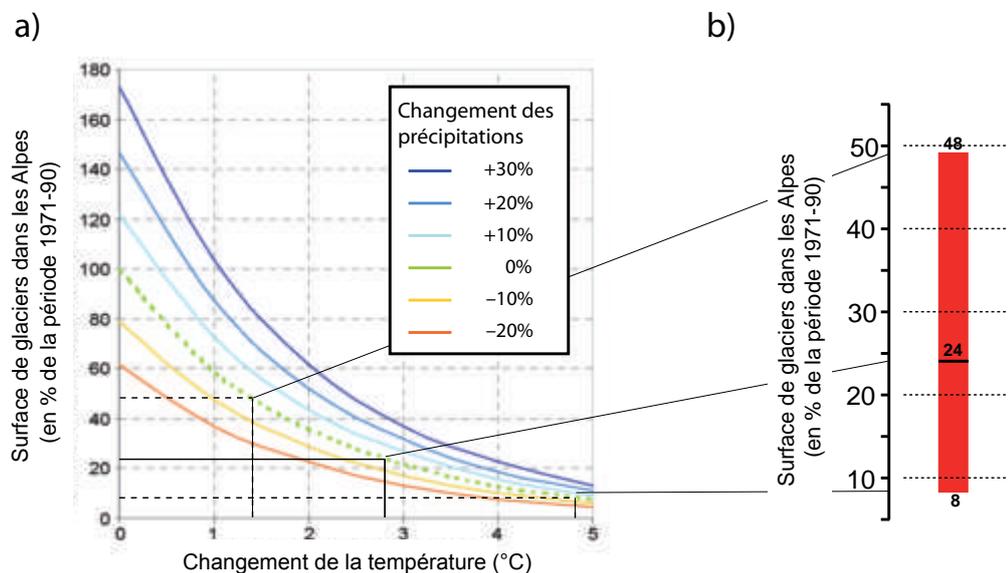


Figure 9: a) Changement du degré de glaciation des Alpes pour une augmentation de la température d'été de +1 à +5 °C et un changement des précipitations annuelles entre -20% et +30%. b) Selon le scénario, le degré de glaciation diminuera des trois quarts environ d'ici 2050.

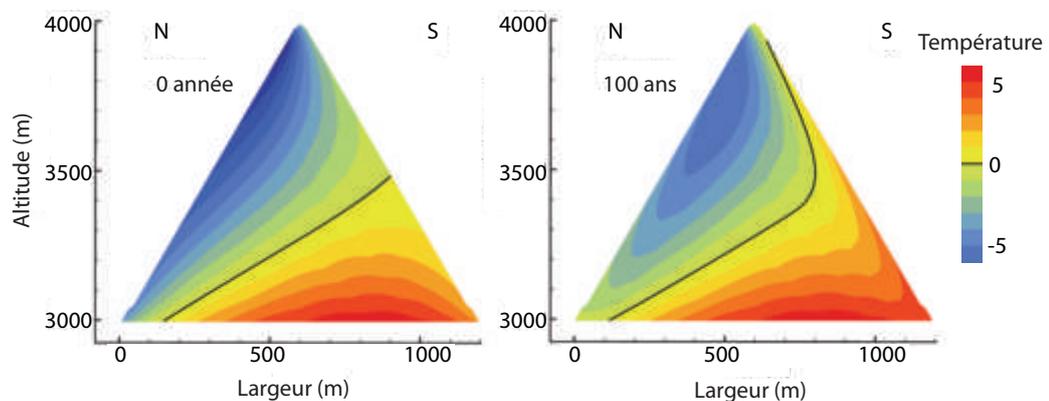


Figure 10: Réchauffement du pergélisol dans une montagne idéalisée (modélisation, diffusion thermique pure).¹⁴ Le pergélisol subsiste longtemps dans le sous-sol et peut être présent en des endroits dont la surface n'est plus soumise à des conditions climatiques correspondantes. Au sommet et le long des arêtes, la chaleur pénètre de plusieurs côtés. Vu que la chaleur se propage très lentement dans le sous-sol, ce processus durera des siècles.

à des déséquilibres thermiques prononcés. De tels effets sont particulièrement marqués sur les sommets et les arêtes, étant donné que le réchauffement peut y accéder de différents côtés.

Eboulements

Depuis le milieu des années 1980, cinq grands éboulements de plus de 1 million de m³ se

sont produits dans les Alpes: Valteline 1987, Randa 1991, Mont-Blanc versant Brenva 1997, Thurwiserspitze/Ortler 2004, Eiger 2006. Les trajectoires des éboulements se sont prolongées en partie bien au-dessous de la limite des forêts (Valteline, Randa, Mont-Blanc) et ont touché, sauf dans le cas de l'Eiger, des régions touristiques équipées (routes, pistes de ski, chemins

pédestres). La relation avec les glaciers et le pergélisol est démontrée dans trois de ces cas (Mont-Blanc, Ortler, Eiger); dans les deux autres, elle est probable (Valtelline) ou possible mais incertaine (Randa).

La stabilité de parois de rocher en haute montagne (avant tout au-dessus de la limite des forêts) dépend en premier lieu de leur constitution géologique, de l'inclinaison de leur surface, des événements antérieurs et des conditions glaciologiques (étayage par un glacier, systèmes de fractures remplies de glace dans le pergélisol). Chaque éboulement a sa combinaison spécifique de facteurs. Mais ce sont les conditions glaci-

ologiques qui se transforment le plus vite en ce moment et sont par conséquent des facteurs essentiels. Des conditions critiques résultent en particulier de la disparition de glaciers de vallées (perte d'étayage) et du réchauffement du pergélisol (existence de mélanges de roche, glace et eau entre 0 et -1 °C env.). Le recul croissant des glaciers, la progression du réchauffement de pentes pergélisolées qui étaient froides jusqu'ici et des perturbations thermiques atteignant de plus grandes profondeurs dans des parois gelées devraient accroître tant la fréquence des éboulements que la probabilité d'événements de grande ampleur.

4. Impacts des changements climatiques sur le cycle de l'eau

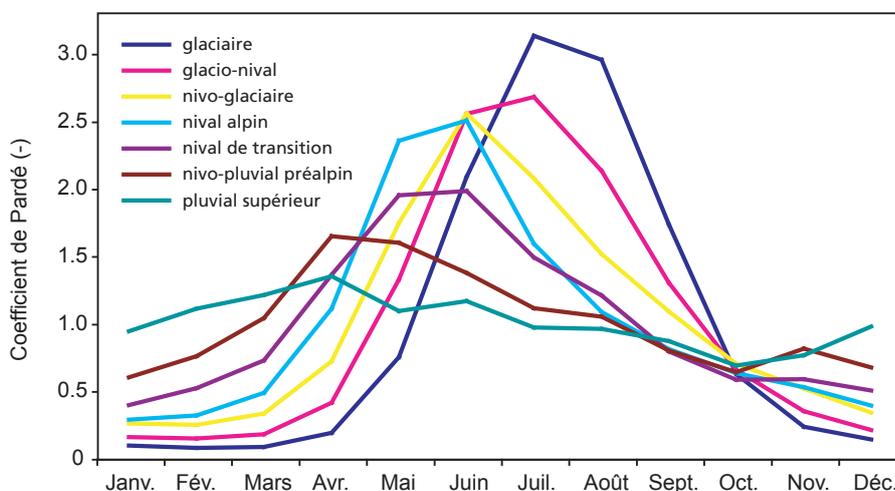


Figure 11: Régimes d'écoulement moyens de bassins versants suisses de différentes altitudes. Leur spectre s'étend du régime qui dépend principalement de la pluie (pluvial supérieur, altitude moyenne de 800 m) jusqu'au régime qui est avant tout déterminé par les glaciers (glaciaire, 2700 m d'alt.). La différence d'altitude entre les différents régimes est d'environ 300 m. Le coefficient de Pardé est le rapport du régime mensuel moyen sur le régime annuel moyen. (glaciaire: déterminé par les glaciers; nival: déterminé par la neige; pluvial: déterminé par les précipitations).

Les systèmes hydrologiques – ruisseaux, rivières, petits et grands lacs, eau souterraine dans des pores, des fissures ainsi que des aquifères, et bien sûr aussi les grands réservoirs d'eau alpins tels que la neige, les névés et les glaciers – font partie du cycle de l'eau. Celui-ci relie l'atmosphère, le sol, la végétation et les systèmes hydrologiques par le biais de l'évapotranspiration et des précipitations. Il est déterminé par – et inversement influe sur – le climat et la météo. L'être humain

intervient dans ce cycle régulateur extrêmement complexe: il retient de l'eau dans des bassins d'accumulations et des réservoirs ou la dévie vers d'autres bassins versants, irrigue des aires agricoles sur de vastes surfaces, assèche des zones humides et abaisse ou rehausse le niveau des aquifères.

Les écoulements vont indirectement de pair avec les précipitations. Si l'évapotranspiration est relativement constante, ils suivent les variations

des précipitations durant des années. Mais une faible part seulement des précipitations s'écoule directement; la majeure partie est stockée par exemple dans le manteau neigeux et les glaciers, dans le sol, dans les aquifères et dans des lacs naturels et artificiels. A court terme, l'eau libérée par ces réservoirs influence l'écoulement.

Partant du degré de glaciation et de l'importance du manteau neigeux, différents types d'écoulement peuvent être définis qui présentent des caractéristiques saisonnières différentes. La figure 11 présente un choix de ces types d'écoulement. Les cours d'eau alimentés principalement par la fonte des glaciers et de la neige (type glaciaire) connaissent les plus fortes fluctuations de débit. Leur débit mensuel moyen peut facilement varier d'un facteur 30 entre l'hiver et l'été. Les fluctuations de débit les plus faibles sont celles des cours d'eau qui dépendent essentiellement de la pluie (type pluvial supérieur).

Selon le scénario climatique utilisé ici, il faut compter d'ici 2050 avec les changements suivants du cycle de l'eau:

- En raison du réchauffement, moins de précipitations tomberont sous forme de neige aux altitudes basses et moyennes. Un réchauffement moyen fera monter d'environ 360 m la limite des neiges qui sépare les zones recouvertes de neige des domaines situés à plus basse altitude (cf. paragraphe 3).
- Sur le Plateau, la fréquence et l'ampleur des crues augmenteront en hiver dans les bassins versants de faible et moyenne étendue. Des raisons à cela seront une part croissante de précipitations sous forme de pluie au lieu de neige aux faibles et moyennes altitudes et une hausse des fortes précipitations (cf. paragraphe 2).
- La superficie de glaciers diminuera en gros des trois quarts dans les Alpes d'ici 2050 dans le cas d'un réchauffement moyen (paragraphe 3, figure 9). Cette estimation sommaire est en accord avec des études antérieures¹⁵, selon lesquelles un réchauffement de 2,7 °C en été ferait monter de 400 m la ligne d'équilibre des glaciers.
- L'évapotranspiration continuera en général d'augmenter du fait du réchauffement. Le sol devenant plus sec, l'évapotranspiration pourrait se limiter dans l'espace et dans le temps et diminuer.
- Du fait de la diminution du volume des précipitations et de l'augmentation de l'évapotranspiration, le volume d'écoulement annuel baissera, surtout dans le Sud, mais aussi dans le Nord. Ceci en dépit de l'excédent temporaire d'eau provenant de la fonte des glaciers. En été, l'humidité du sol pourra être réduite durant de longues périodes (en particulier pendant l'arrière-été et l'automne dans le Sud, mais aussi dans le Nord). Les périodes de sécheresse affecteront davantage les cours d'eau petits et moyens du Plateau et du sud du Tessin. De surcroît, les périodes de sécheresse pourraient être plus nombreuses pendant l'arrière-été aussi dans les régions où les glaciers auront disparu.
- Les aquifères se reconstitueront plus difficilement en été et en automne dans les régions dépourvues de glaciers.
- A une certaine altitude, suite aux changements affectant le cycle de croissance et décroissance du manteau neigeux, à l'élévation de la limite des neiges et à la fonte des glaciers, les régimes d'écoulement (fig. 11) se décaleront vers le bas d'environ un degré sur l'échelle des régimes.

Bibliographie et notes

- 1 IPCC (Hg.). *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- 2 C. Schär, P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, and C. Appenzeller. The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. In: *Nature*, 427, 2004, 332–336.
- 3 J. Schmidli, C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and C. Schär. Mesoscale precipitation in the Alps during the 20th century. In: *Int. J. Climatol.* 22, 2001, 1049–1074.
- 4 J. Schmidli, C. Frei. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. In: *Int. J. Climatol.*, 25, 2005, 753–771.
- 5 T. M. L. Wigley, S. C. B. Raper. Interpretation of high projections for global-mean warming. In: *Science*, 293, 2001, 451–454.
- 6 C. Frei. *Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion*. 2004. (www.occc.ch/Products/CH2050/CH2050-Scenarien.pdf).
- 7 J. H. Christensen, T. Carter, and F. Giorgi. PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. In: *EOS*, 82, 147, 2002.
- 8 OcCC (Hg.). *Extremereignisse und Klimaänderung*. Bern, 2003.
- 9 C. Frei, C. Schär. Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. In: *J. Clim.*, 14, 2001, 1568–1584.
- 10 S. I. Seneviratne, D. Luethi, M. Litschi, and C. Schär. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. In: *Nature*, 443, 2006, 205–209.
- 11 C. Frei, R. Schöll, J. Schmidli, S. Fukutome, and P.L. Vidale. Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models. In: *J. Geophys. Res.*, 111, 2006, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- 12 S. C. Scherrer, C. Appenzeller. Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow. In: *Climate Research*, 32, 2006, 187–199.
- 13 M. Zemp, W. Haeberli, M. Hoelzle, and F. Paul. Alpine glaciers to disappear within decades? In: *Geophys. Res. Lett.*, 33, 2006, L13504, doi:10.1029/2006GL026319.
- 14 J. Noetzli, S. Gruber, T. Kohl, N. Salzmann, and W. Haeberli (2007). Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research* (submitted).
- 15 M. Maisch, A. Wipf, B. Denneler, J. Battaglia und C. Benz. *Die Gletscher der Schweizer Alpen – Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, Gletscherschwund-Szenarien*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 1999.

