

1.5. Méthodologie des scénarios climatiques régionaux

Christoph Schär, Heini Wernli et Christoph Frei

Des modèles climatiques globaux permettent de décrire le climat moyen en incluant des processus déterminants se déroulant dans l'atmosphère, les océans, la banquise et sur la terre ferme. Cependant, les effets des changements climatiques globaux se manifestent au niveau régional et local. L'augmentation moyenne globale de la température est certes un excellent indicateur du réchauffement global, mais un mauvais critère pour estimer les conséquences des changements climatiques. Le recours à des scénarios climatiques régionaux s'impose, qui fournissent des données concrètes sur la fréquence d'événements extrêmes au niveau régional.

Les événements extrêmes dans l'espace alpin sont l'aboutissement d'une longue série de processus climatiques. C'est pourquoi, il est difficile d'estimer les effets potentiels des changements climatiques sur la fréquence des événements extrêmes. Des questions critiques sont: Comment la circulation atmosphérique réagit-elle au réchauffement climatique et comment les trajectoires des zones dépressionnaires se modifient-elles? Comment la fréquence des situations météorologiques à grande échelle change-t-elle et quelle influence cela a-t-il sur les événements extrêmes? Comment l'augmentation de l'humidité de l'air, qui va de pair avec le réchauffement, influe-t-elle sur le régime des précipitations et sur la fréquence des dépressions génératrices de tempêtes? Comment agit-elle sur la répartition géographique et saisonnière des fortes précipitations et des sécheresses? Quelles conséquences

la montée de la limite des chutes de neige a-t-elle sur la formation des écoulements et sur la fréquence des hautes et basses eaux? Tous ces facteurs, qui ont des dimensions spatiales entièrement différentes, doivent être pris en compte par les scénarios climatiques régionaux.

Modèles climatiques globaux

La climatologie recourt aujourd'hui à une large palette de modèles.¹ Selon les problèmes, ceux-ci prennent en compte différentes composantes du système climatique (atmosphère, océans, banquise, terre ferme) et différentes régions (Terre entière, continents, régions). Tous ces modèles ont en commun d'opérer dans une grille à trois dimensions, dans laquelle les courants atmosphériques et océaniques sont représentés par des équations de physique servant à calculer leur évolution future.

Les premiers modèles globaux furent développés dans les années 1960 pour les prévisions météorologiques, les ordinateurs ayant alors atteint une puissance suffisante. Au début, ils ne faisaient que simuler la circulation atmosphérique. Pour décrire le climat, ils furent progressivement complétés (prise en compte des océans, glaciers et banquise, terre ferme et biosphère) et sans cesse améliorés.

Ces modèles globaux permettent de jouer différents scénarios de l'évolu-

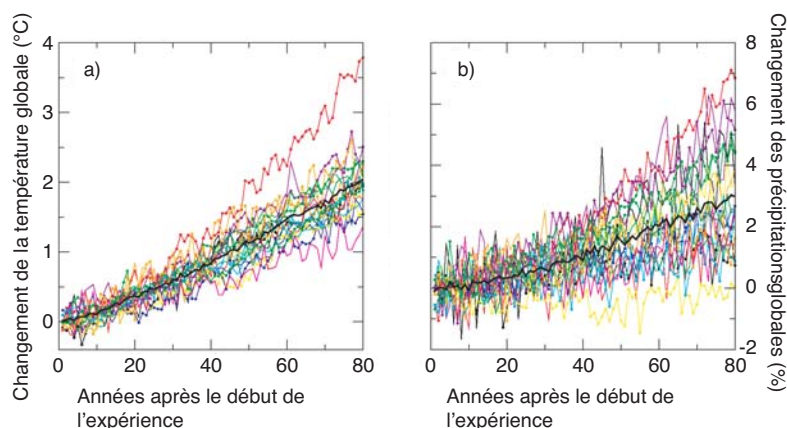


Figure 9: Comparaison de modèles climatiques globaux couplés, pour un scénario supposant une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre de 1% par an.¹ Les résultats sont représentés comme changements par rapport à la moyenne 1961-1990 de (a) la température globale à la surface de la Terre et (b) des précipitations globales.

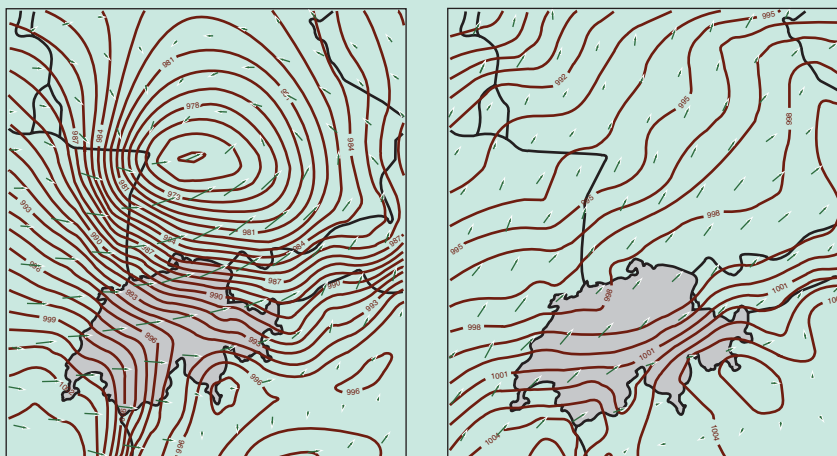


Figure 10: Expérience de sensibilité pour la tempête Lothar.² La figure représente la pression (lignes rouges, distantes de 1 hPa) et le vent (flèches vertes) à proximité du sol pour (à gauche) une simulation incluant tous les processus de précipitation et (à droite) une expérience de sensibilité sans condensation de vapeur d'eau. La comparaison montre que des processus de précipitation furent déterminants dans la formation de la dépression.

Lothar – une étude du processus

Les connaissances sur les processus décisifs et les chaînes de réaction qui conduisent à des événements extrêmes sont encore souvent lacunaires. Des progrès sont réalisés au moyen d'études détaillées de processus météorologiques spécifiques, d'expériences de sensibilité recourant à des simulations sur ordinateur, d'essais sur le terrain et de l'analyse des tendances et variations d'importants éléments du climat. La figure 10 illustre un exemple d'expérience de sensibilité recourant à un modèle météorologique. De telles expériences permettent l'étude ciblée de chaînes d'action: dans le cas présenté, il s'agissait d'examiner comment la condensation de vapeur d'eau dans l'atmosphère a influé sur la tempête Lothar. A cet effet, une «simulation de contrôle» (figure 10, à gauche) décrit le phénomène étudié aussi exactement que possible. L'expérience consiste ensuite à modifier artificiellement les processus simulés: dans l'exemple présenté, la condensation de vapeur d'eau a été inhibée. La comparaison de cette expérience (figure 10, à droite) avec la simulation de contrôle démontre toute l'importance de la condensation et des précipitations lors de cette tempête: la profonde dépression qui a permis à la tempête d'éclater ne s'est pas creusée dans la simulation sans condensation. Cela confirme que des processus de précipitation dans l'atmosphère peuvent avoir une influence potentiellement importante sur la fréquence des tempêtes, mais ne dit rien pour autant en termes de «scénario» sur cette fréquence (en effet, celle-ci est influencée encore par de nombreux autres facteurs).

Heini Wernli

tion future de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols dans l'atmosphère et d'estimer ainsi l'effet de ces substances sur l'évolution à long terme du climat global. Pour l'heure, les résultats de ces modélisations sont encore entachés d'incertitudes. Ce qu'illustre la figure 9, qui compare différents modèles climatiques couplés, pour un scénario supposant une augmentation de 1% d'équivalent de CO₂ par an. Les modèles s'accordent assez bien sur la température globale à proximité du sol. Mais la dispersion est encore considérable pour les précipitations globales moyennes. Les effets régionaux (p. ex. à l'éche-

lon d'un continent) et les conséquences en terme d'événements extrêmes (p. ex. la fréquence des inondations et des sécheresses) présentent encore de grandes incertitudes.

Etant donné le temps de calcul considérable que requièrent des modèles toujours plus complexes, les scénarios globaux pour les prochaines décennies ne peuvent être calculés que dans une grille relativement grossière, ceci même en faisant appel aux ordinateurs les plus puissants. La plus haute résolution numérique spatiale pour les modèles couplés atmosphère-océan n'est aujourd'hui encore que d'environ 300 km.

Des chaînes de modèles pour évaluer les effets régionaux

Le problème du climat a des causes globales, mais ses effets peuvent différer fortement d'une région à l'autre. La moyenne globale n'est donc pas adaptée pour estimer un danger potentiel régional. Dans l'exemple des précipitations, on s'attend à des changements globaux de quelques pour cent seulement (voir figure 9b), mais à des modifications saisonnières et régionales en partie plus de dix fois supérieures. Pour certaines régions (p. ex. l'espace méditerranéen) les modèles globaux prévoient une diminution des précipitations (au lieu d'une augmentation), qui pourrait modifier la fréquence des sécheresses en.

Une condition importante pour évaluer les impacts régionaux d'activités humaines est de pouvoir effectuer des calculs détaillés. Cela peut être obtenu en recourant à des modèles atmosphériques de haute résolution, à des modèles climatiques régionaux ou à des modèles climatiques globaux de résolution variable.^{3,4,5,6} Il est souvent fait appel à des chaînes de modèles, qui prennent en considération plusieurs phénomènes d'extensions différentes. La figure 11 donne un exemple de cette méthode appelée «régionalisation numérique»: une chaîne de modèles permet de décrire le cycle de l'eau à l'échelon régional en affinant par le calcul des changements climatiques à grande échelle. La chaîne présentée

comprend en tout cinq modèles: deux pour le climat global, deux pour le climat régional et un pour les écoulements régionaux. Ce dernier décrit l'hydrologie dans le bassin versant du Rhin et devrait renseigner sur des changements possibles de la fréquence des grandes inondations.

La qualité d'une chaîne de modèles dépend de celle de chacun de ses maillons constitutifs. Un modèle à échelle fine ne peut pas corriger les erreurs à grande échelle des modèles dans lesquels il est emboîté, mais seulement affiner la structure spatiale que ces derniers donnent du climat sur le continent. Un tel affinement spatial est essentiel pour décrire des événements extrêmes souvent finement texturés et fortement influencés par la topographie.^{8,9} Comparés aux modèles globaux couplés, les modèles régionaux, grâce à leur résolution plus élevée, rendent mieux compte d'événements critiques tels que tempêtes et fortes précipitations. La régionalisation numérique a été appliquée à différentes catégories d'événements extrêmes, notamment aux fortes précipitations¹⁰ et aux ouragans¹¹. La compréhension des processus, nécessaire à la modélisation, est améliorée et vérifiée en permanence par des essais sur le terrain, des études de cas, des travaux théoriques et des expériences en laboratoire (voir encadré *Lothar – une étude du processus*).

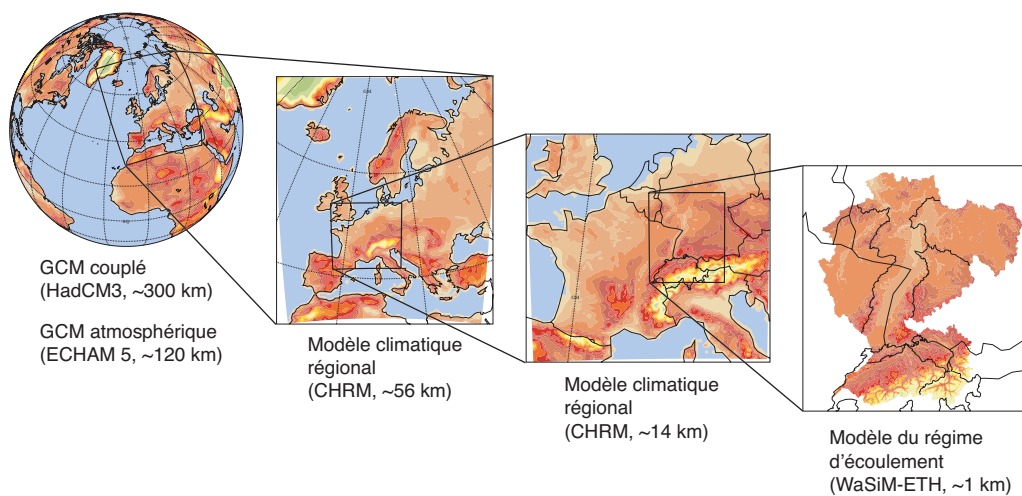


Figure 11: Chaîne de modèles pour la simulation d'effets climatiques régionaux.⁷ La chaîne est composée de différents modèles de résolution horizontale croissante. A noter l'amélioration de la présentation topographique que cette méthode permet d'atteindre.

Régionalisation statistique

L'affinement spatial de futurs scénarios du climat au moyen de modèles climatiques régionaux ou à résolution élevée nécessite une très grande capacité de calcul. C'est pourquoi la climatologie utilise, en plus des modèles numériques, encore d'autres méthodes, dites de «régionalisation statistique». Elles sont fondées sur un modèle quantitatif du rapport entre des grandeurs climatiques régionales (p. ex. les précipitations à Davos) et des propriétés à grande échelle de l'atmosphère (p. ex. la répartition de la pression atmosphérique au-dessus de l'Europe et de l'Atlantique Nord). Ce rapport est établi de façon empirique, à partir d'observations du climat dans le passé, et appliqué ensuite aux résultats de modèles climatiques globaux décrivant un état futur du climat. La formulation mathématique de ces modèles est basée sur des concepts statistiques ou sur une combinaison d'éléments statistiques et numériques.^{12,13}

Pour établir des scénarios climatiques régionaux, la formulation mathématique la plus simple des méthodes statistiques nécessite un volume de calcul comparativement modeste. Ces procédés sont utilisés surtout pour évaluer les incertitudes des scénarios (p. ex. en les appliquant à un grand nombre de modèles climatiques globaux différents⁹) ou pour effectuer une régionalisation à très petite échelle (p. ex. en les appliquant aux résultats de modèles climatiques régionaux).

Une telle formulation statistique ne peut fonctionner que si les rapports empiriques mentionnés ci-dessus ne changent pas dans le climat futur. Les techniques de régionalisation statistique et numérique du climat se complètent. La comparaison des deux méthodes permet d'obtenir des informations importantes sur leur fiabilité et sur la plausibilité de scénarios climatiques régionaux. A part le calcul de grandeurs climatiques moyennes, la régionalisation d'événements extrêmes a donné lieu ces dernières années au développement de différents procédés statistiques.^{14,15,16}

- 1 Cubasch U., G. A. Mehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.
- 2 Wernli H., S. Dirren, M. Liniger, and M. Zillig, Dynamical aspects of the life-cycle of the winter storm 'Lothar' (24–26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 405–429, 2002.
- 3 Wild M., L. Dümenil, and J. P. Schulz, Regional climate simulation with a high resolution GCM: surface hydrology, *Climate Dyn.*, 12, 755–774, 1996.
- 4 Lüthi D., A. Cress, H. C. Davies, C. Frei, and C. Schär, Interannual variability and regional climate simulations, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 185–209, 1996.
- 5 Déqué M., P. Marquet, and R. G. Jones, Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model, *Climate Dyn.*, 14, 173–189, 1998.
- 6 Giorgi F., B. Hewitson et al., Regional climate information – evaluation and projections. Chapter 10 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 583–638, 2001.
- 7 Kleinn J., Climate change and runoff statistics in the Rhine Basin: a process study with a coupled climate-runoff model. Ph.D. Thesis No. 14663, ETH Zurich, 114 p., 2002.
- 8 Schär C., T. D. Davies, C. Frei, H. Wanner, M. Widmann, M. Wild, and H. C. Davies, Current Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT Press, Boston, 21–72, 1998.
- 9 Wanner H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz, *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*, vdf, Zurich, 283 p., 2000.
- 10 Jones R. G., J. M. Murphy, M. Noguer, and A. B. Keen, Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. Part II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 265–292, 1997.
- 11 Bengtsson L., M. Botzet, and M. Esch, Will greenhouse gas induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes. *Tellus*, 48A, 57–73, 1996.
- 12 Gyalistras D., C. Schär, H. C. Davies, and H. Wanner, 1998: Future Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT press, Boston 171-224.
- 13 Heimann D. and V. Sept, Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region. *Theor. Appl. Climatol.*, 66, 1-12, 2000.
- 14 Plaut G. and E. Simonnet, Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Res.*, 17, 303–324, 2001.
- 15 Plaut G., E. Schuepbach, and M. Doctor, Heavy precipitation events over a few Alpine subregions and the links with large-scale circulation 1971–1995. *Climate Res.*, 17, 285–302, 2001.
- 16 Wilby R. L., H. Hassan, and K. Hanaki, Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol.*, 205, 1–19, 1998.

Le cycle hydrologique global s'intensifie-t-il?

Le cycle de l'eau est activé par les flux de rayonnement (solaire) de courte et (atmosphérique et terrestre) de grande longueur d'onde parvenant à la surface de la Terre. L'apport d'énergie qui en résulte est appelé bilan radiatif net. Dans l'état actuel du climat, il est absorbé par le réchauffement de l'atmosphère (env. 20 %) et l'évaporation de l'eau (env. 80%). Les échanges hydriques jouent donc un rôle plus important que les échanges thermiques dans l'équilibre énergétique à la surface de la Terre. Ils conduisent, par le biais de processus de condensation, à un réchauffement de la troposphère inférieure et moyenne.

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a pour première conséquence d'accroître l'énergie radiative incidente. Celle-ci servant principalement à l'évaporation, elle devrait entraîner, à part un réchauffement global, une augmentation globale de l'humidité de l'air: on parle d'«intensification du cycle de l'eau»¹, phénomène qui aurait des effets importants sur la météorologie, la répartition des précipitations et les événements extrêmes.

Les principales grandeurs caractérisant le cycle de l'eau dans l'atmosphère sont l'évaporation et les précipitations. L'atmosphère ne contenant que de faibles quantités d'eau sous forme de vapeur, de gouttelettes et de cristaux de glace (la teneur en eau de l'atmosphère correspond en moyenne globale à une colonne d'eau de 26 mm), l'évaporation est, en moyenne annuelle globale, égale aux précipitations. Une intensification du cycle hydrologique global exercerait donc un effet de la même ampleur sur l'évaporation et sur les précipitations.

Observations du cycle de l'eau des cent dernières années

Les séries d'observations à long terme des précipitations et de l'évaporation se limitent presque exclusivement à des mesures sur la terre ferme au moyen de pluviomètres et de bacs d'évaporation. Les océans, qui couvrent 71% de la surface de la Terre, sont sous-représentés.

Les observations récoltées depuis plus de cent ans par des milliers de pluviomètres sur tous les continents indiquent une légère augmentation des précipitations globales moyennes sur les terres émergées, de 1% depuis le début du siècle dernier.^{2,3} Cette augmentation est plus marquée aux latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord (entre 40° et 80°N), où les précipitations ont augmenté de 8% sur les continents.⁴ Cette augmentation touche en particulier l'espace alpin.⁵ On a observé d'autre part une diminution des précipitations dans les zones subtropicales.

Les observations à long terme de l'évaporation, à la différence de celles des précipitations, se limitent essentiellement aux stations de l'ex-Union soviétique et d'Amérique du Nord. Cependant, les bacs d'évaporation ne permettent pas de déterminer l'évaporation réelle, mais seulement l'évaporation hypothétique au-dessus d'une surface saturée d'eau.⁶ L'évaporation réelle dépend fortement de données locales (teneur du sol en eau, végétation), aussi est-il douteux que les bacs d'évaporation soient bien adaptés pour mesurer l'évaporation globale. Ces dernières décennies, ils ont indiqué en majorité (mais pas exclusivement) une diminution des sommes d'évaporation.⁷ Cette contradiction entre l'augmentation globale des précipitations et la diminution des sommes d'évaporation est dénommée «paradoxe de l'évaporation». Il existe plusieurs tentatives d'interprétation de ce paradoxe – par exemple comme artefact de mesure^{8,9} ou comme conséquence de l'augmentation de la nébulosité ou de la concentration en aérosols^{10,11}.

Résultats de modèles du climat

La grande majorité des modèles climatiques couplés globaux prévoit une intensification du cycle de l'eau, en accord avec les processus physiques discutés ci-dessus. La plupart des scénarios présentés dans le plus récent rapport du GIEC indiquent une augmentation des précipitations moyennes globales comme conséquence de celle des gaz à effet de serre.¹² Tous les modèles indiquent pour toutes les catégories de scénario un accroissement des précipitations sous les tropiques et aux latitudes moyennes et hautes; ils signalent plutôt une diminution dans les zones subtropicales. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'un cycle hydrologique plus actif, et les particularités régionales de l'augmentation des précipitations sont en accord avec les tendances du siècle dernier. Mais la forte dispersion entre les modèles démontre que d'importants processus du cycle hydrologique sont encore insuffisamment compris et sont représentés de façon lacunaire dans les modèles du climat.⁶ Etant donné que l'évaporation met en jeu davantage d'énergie que le réchauffement, une augmentation des gaz à effet de serre devrait conduire – du moins à long terme – à une intensification du cycle de l'eau. Des observations et modélisations du climat actuel abondent dans ce sens. Les différentes sources font apparaître entre elles des divergences en partie significatives, mais elles indiquent néanmoins clairement une corrélation entre le bilan radiatif net à la surface de la Terre et l'évaporation moyenne globale.

Christoph Schär et Atsumu Ohmura

- 1 Flohn H., A. Kapala, H. R. Knoche, and H. Mächel, Recent changes of the tropical water and energy budget and of midlatitude circulations. *Climate Dyn.*, 4, 237–252, 1990.
- 2 Folland C. K., T. R. Karl et al., Observed climate variability and change. Chapter 2 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 99–181, 2001.
- 3 Dai A., I. Y. Fung, and A. D. Del Genio, Surface observed global land precipitation variations during 1900–88, *J. Climate*, 10, 2943–2962, 1997.
- 4 New M., M. Todd, M. Hulme, and P. Jones, Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.*, 21, 1899–1922, 2001.
- 5 Schmidli J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and C. Schär, Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 22, 1049–1074, 2001.
- 6 Ohmura A. and M. Wild, Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 298, 1345–1346, 2002.
- 7 Peterson T. C., V. S. Golubev, and P. Y. Groisman, Evaporation losing its strength. *Nature*, 377, 687–688, 1995.
- 8 Brutsaert W. and M. B. Parlange, Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396, 30, 1998.
- 9 Golubev V., J. H. Lawrimore, P. Groisman, N. A. Speranskaya, S. A. Zhuravin, M. J. Menne, T. C. Peterson, and R. W. Malone, Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophys. Res. Letters*, 28, 2665–2668, 2001.
- 10 Roderick M. L. and G. D. Farquhar, The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410–1411, 2002.
- 11 Liepert B. G., Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophys. Res. Letters*, 29, Art. No. 1421, 2002.
- 12 Cubasch U., G. A. Meehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.