

Canicule de l'été 2003

Rapport de synthèse

sc | nat 

ProClim–
Forum for Climate and Global Change
Platform of the Swiss Academy of Sciences

Partenaires:

OcCC

Organe consultatif sur les changements climatiques
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung

sc | nat 

GEOforumCH
Forum Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences

sc | nat 

ACP
Atmospheric Chemistry and Physics
A Commission of the Swiss Academy of Sciences

Editeur et distribution:

ProClim-
Forum for Climate and Global Change
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Schwarztorstrasse 9 | CH-3007 Berne
T (+41 31) 328 23 23 | F (+41 31) 328 23 20
proclim@scnat.ch | www.proclim.ch

Photos de couverture:

Grande image: Christoph Schär (voir figure 4, page 10)
Petite figure à gauche: Jürg Luterbacher et al. (voir figure 3, page 9)
Petite figure à droite: Mark Liniger, MétéoSuisse, Zurich (voir figure 1, page 7)

Impression: Druckzentrum Vögeli AG, Langnau i.E.
Tirage: 2000 Ex. allemand, 500 Ex. français

Publié à Berne en novembre 2005

Numéro ISBN: 978-3-907630-16-7

Canicule de l'été 2003

Rapport de synthèse

Basé sur les exposés et contributions
du forum du 7 juillet 2005 sur la canicule de l'été 2003
ainsi que sur d'autres travaux scientifiques et rapports à ce sujet

Impressum

Direction du projet

Urs Neu ProClim-, Berne
Esther Thalmann ProClim-, Berne

Rédaction

Esther Thalmann ProClim-, Berne

Avec la collaboration de

Christof Appenzeller MétéoSuisse, Zurich
Stephan Bader MétéoSuisse, Zurich
Charlotte Braun-Fahrländer Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Université de Bâle
Conradin A. Burga Geographisches Institut, Université de Zurich
Claudio Defila MétéoSuisse, Zurich
Matthias Dobbertin Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf
Roland Engesser Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf
Jürg Fuhrer Agroscope FAL Reckenholz, Zurich
Markus Furger Institut Paul Scherrer, Villigen
Madeleine S. Günthardt-Goerg Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf
Wilfried Haeberli Geographisches Institut, Université de Zurich
Erika Hiltbrunner Botanisches Institut, Université de Bâle
Caroline Kan Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne-Ittigen
Adrian Jakob Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne-Ittigen
Thomas Jankowski EAWAG, Dübendorf
Hans-Rudolf Keusen Geotest AG, Zollikofen
Ronald Kozel Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne-Ittigen
Mark Liniger MétéoSuisse, Zurich
Jürg Luterbacher Geographisches Institut, Université de Berne
Markus Nauser Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne
Urs Neu ProClim-, Berne
Rolf Philipona MétéoSuisse, Payerne
André S. Prévôt Institut Paul Scherrer, Villigen
Martine Rebetez Institut fédéral de recherches WSL, Antenne romande, Lausanne
Andreas Rigling Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf
Christoph Schär Institut für Atmosphäre und Klima, EPF Zurich
Marc Schürch Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne-Ittigen
Cornelia Schwier Institut für Atmosphäre und Klima, EPF Zurich
Pierre Vollenweider Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf
Daniel Vonder Mühl Ressort Forschung, Université de Bâle

Layout

Esther Thalmann ProClim-, Berne

Traduction française

Jean-Jacques Dätwyler Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Berne

Ce rapport a été accepté par ProClim-, l'OcCC, GeoForum et ACP le 31 août 2005.

Table de matières

Introduction	4
1. L'été caniculaire 2003 mis en contexte	5
2. Cours d'eau et approvisionnement en eau	8
3. Glacier et permafrost	11
4. Qualité de l'air	14
5. Effets sur la santé	16
6. Végétation	18
7. Agriculture	20
8. Production d'électricité	21
9. Regard vers l'avenir	22
10. Résumé et recommandations	23
Références bibliographiques	26

Introduction

L'été record 2003 fut probablement le plus chaud en Europe depuis au moins cinq cents ans. En Suisse et dans de grandes parties d'Europe centrale, les températures se sont situées 3 à 5 °C au-dessus de la moyenne à long terme. A quoi s'est ajoutée une sécheresse exceptionnelle qui s'est manifestée cette année-là en maints endroits de février à novembre.

Les modèles du climat montrent que dans quelques années déjà, de tels étés pourraient survenir nettement plus fréquemment et même régulièrement en Europe centrale. Il est probable que déjà vers la fin de ce siècle un été sur deux sera aussi chaud ou même encore plus torride que l'été 2003. Ce rapport jette un regard sur les conséquences de cette canicule, pour que nous soyons mieux armés à l'avenir lors de situations météorologiques extrêmes comparables.

Le présent rapport de synthèse fait un tour d'horizon des principaux effets en Suisse, en mettant l'accent sur les conséquences négatives. Il repose sur les travaux scientifiques dont nous disposons actuellement à ce sujet, il n'a donc pas la prétention d'être complet. Les scientifiques continueront de s'occuper du phénomène que fut la canicule de l'été 2003. Ce rapport entend donner un premier aperçu des points essentiels et éveiller l'intérêt à l'égard des travaux scientifiques qui poussent les recherches plus loin.

La première section situe l'été 2003 dans son contexte. La reconstitution de l'histoire du climat montre à quel point cet été fut vraiment extrême. Des modèles du climat permettent en outre de déterminer quel est, et quel sera à l'avenir, le degré de probabilité d'un tel été. La question se pose du lien avec les changements climatiques et de l'influence humaine.

Les sections deux et trois présentent les effets sur le cycle de l'eau. Elles abordent la question de la qualité et des quantités d'eau dans les rivières, les lacs et les nappes d'eau souterraine, ainsi que les conséquences pour les effectifs de poissons et l'approvisionnement en eau. Les glaciers, dont le recul a atteint en 2003 un record, constituent un important facteur en matière d'approvisionnement en eau à moyen et long terme.

La quatrième section est consacrée à la qualité de l'air. Des niveaux d'ozone extrêmement élevés ont un impact considérable sur la santé humaine. Les conséquences de la chaleur et de l'air pollué pour l'être humain sont discutées dans la cinquième section. Même si nous ne disposons pas pour la

Suisse d'analyse définitive des causes de décès, il ne fait aucun doute que le nombre de morts dues à la chaleur est alarmant – près d'un millier en Suisse et un multiple de ce nombre en Europe.

L'inaccoutumance aux fortes chaleurs n'est pas propre à l'être humain – des changements se produisent aussi dans la végétation. Ils sont abordés brièvement dans la sixième section. La septième section entre plus en détail sur la production agricole: que la chaleur et la sécheresse aient entraîné des pertes de récoltes est évident. La Confédération et les cantons ont pris de nombreuses mesures pour parer aux coups durs ou en atténuer les effets.

La huitième section résume les effets sur la production d'électricité. Il n'y a pas, à l'heure actuelle, d'évaluations ayant trait à l'influence de la canicule sur d'autres branches de l'économie, comme le tourisme par exemple. Mais il faut s'attendre là aussi à des impacts, comme le montre une étude anglaise [1] qui a examiné l'influence de conditions météorologiques extrêmes sur l'économie – entre autre les secteurs du tourisme et de l'énergie.

Les deux dernières sections traitent des perspectives d'avenir et des conséquences possibles sur la base des expériences de l'été caniculaire 2003. Des mesures aux niveaux public et individuel peuvent contribuer à modérer les conséquences négatives de futurs vagues de chaleur.

1. L'été caniculaire 2003 mis en contexte

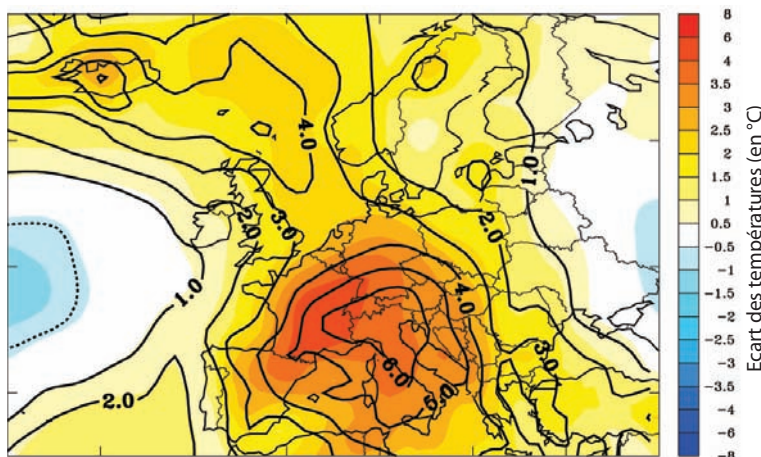


Figure 1: Ecart des températures estivales moyennes (juin, juillet, août) par rapport à la moyenne de 1961–1990 (en °C) en Europe. Les lignes indiquent l'anomalie comme nombre de déviations standards du même intervalle de temps de 1961–1990.

Source: Mark Liniger, MétéoSuisse

Plus chaud et plus sec que la moyenne

La canicule de l'été 2003 fut dans de grandes parties de l'Europe un événement extrême qui dépasse toutes les données connues (figure 1). Même en considérant les incertitudes relatives aux informations sur le climat des siècles passés, l'été 2003 fut très probablement dans toute l'Europe le plus chaud depuis au moins cinq cents ans [2,3]. Une nouvelle reconstitution des températures d'été dans les hautes Alpes montre que 2003 fut probablement même l'été le plus chaud du dernier millénaire [4]. En Suisse, les températures de l'été météorologique (moyenne des mois de juin, juillet et août) se sont situées 4.0 à 5.5 °C au-dessus des températures estivales moyennes de 1864–2003. Les étés les plus chauds dans les séries de mesures furent dépassés de 2 à 3 °C [5,6] (figure 2). Dans l'ensemble de l'Europe, les mois de juin, juillet et août pris isolément furent aussi les plus chauds depuis au moins 1659 [2]; si ces températures mensuelles moyennes furent à tel point extrêmes, cela tient aussi au fait que la canicule est tombée sur les mois de juin et d'août [5,6]. La nuit, les températures qui se sont écartées le plus des valeurs normales furent celles mesurées aux altitudes les plus basses. L'après-midi, les plus hautes températures ont été atteintes en des lieux où l'ensoleillement est le plus long [7].

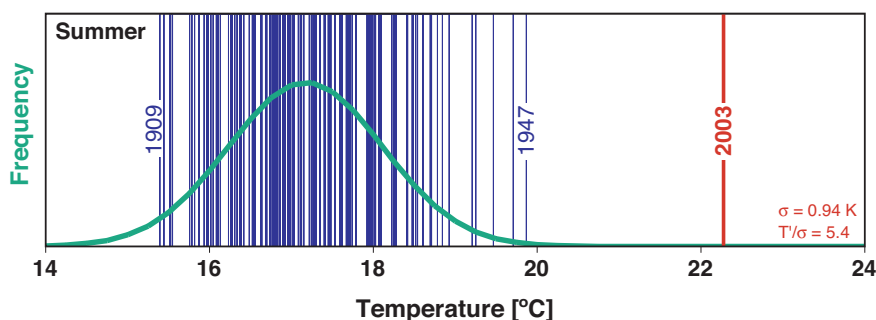
En climatologie, on distingue entre périodes de chaleur de longue durée et vagues de chaleurs. L'été 2003 constitue une période de chaleur. Une vague de chaleur désigne une séquence continue de plusieurs jours pendant lesquels un seuil donné (p.ex. 28 °C) est dépassé, comme cela fut le cas par exemple pendant les deux premières semaines d'août. Dans de grandes parties de

l'Europe, l'été 2003 a posé de nouveaux critères en matière de périodes et vagues de chaleur.

L'été 2003 n'a pas été seulement exceptionnellement chaud, il fut aussi très sec. Dans le contexte des cinq cents dernières années, l'été 2003 a été le plus sec dans les Alpes et au-delà [8]. La France, l'Italie, l'Allemagne, la Suisse, l'Autriche, la Slovaquie, la Belgique et la République tchèque ont été les plus touchées. Toutefois, cette sécheresse n'a pas été seulement un phénomène estival. Elle a commencé déjà en février, et les précipitations se sont faites presque toujours aussi rares pendant les mois suivants [5,6]. En Suisse, les quantités de pluie ont été inférieures à la moyenne à long terme dès le mois de février; en juin, elles n'ont atteint que la moitié de cette moyenne. L'évaporation fut de ce fait moins abondante, ce qui a encore renforcé le réchauffement de l'air [9]. Ce n'est qu'en octobre que de vastes régions de la Suisse ont reçu des précipitations nettement supérieures à la moyenne [5,6]. Au Tessin et dans les vallées du sud des Grisons, des quantités de pluie supérieures à la moyenne ne sont tombées qu'en novembre et décembre. En 2003, la durée d'ensoleillement a été supérieure à la moyenne non seulement en été, mais aussi chaque mois dans presque toutes les stations météorologiques suisses [10].

Du point de vue météorologique, la forte chaleur et la sécheresse de mai à octobre 2003 s'expliquent par la fréquence élevée de zones de haute pression subtropicales au-dessus de l'Europe centrale; elles ont déterminé le temps sur le continent presque en permanence. Les perturbations atlantiques ont été déviées plus loin vers le nord et n'ont atteint que sporadiquement

Figure 2: Distribution des températures mesurées en été en Suisse de 1864–2003. La courbe verte montre la distribution de Gauss correspondante. Les valeurs indiquées au coin inférieur à droite représentent la déviation standard (σ) et l'écart pour 2003 normalisé par la déviation standard de 1864–2000 (T/σ).



Source: Schär et al., 2004 [12]

la région des Alpes. En juin, c'est surtout la durée de la canicule, plus que les températures, qui fut exceptionnelle. La canicule de juin s'est prolongée tout le mois. Juillet fut plus modéré du point de vue des températures, mais néanmoins très chaud. Il fut comparable en maints endroits à l'été de 1983, le plus chaud que l'on avait connu jusqu'alors. Le dernier tiers de juillet a apporté un temps variable, avec de fréquentes averses et orages. Il a été suivi – du 1er au 13 août 2003 – par la vague de chaleur la plus extrême que la Suisse a connue depuis le début des mesures systématiques. Un anticyclone bloquant, situé au-dessus de l'Europe du Nord, détournait les perturbations atlantiques loin vers le nord. Et le mouvement d'air descendant associé à cette haute pression desséchait en permanence les masses d'air au-dessus de l'Europe centrale. Alors que les périodes de chaleur sont associées généralement à des vents du sud-ouest, en 2003 un courant d'est a fait souffler continuellement une légère bise [5,6].

L'été caniculaire ne fut pas seul à être exceptionnel en 2003. Des conditions presque toujours extrêmes se sont substituées à l'influence régulatrice de l'Atlantique proche et ont déterminé l'évolution du temps en Suisse. Elles ont entraîné un type de temps caractéristique des régions climatiques continentales, c'est-à-dire des régions sur lesquelles la mer n'exerce pas d'influence régulatrice. C'est ainsi que le printemps et l'automne ont passé par des changements rapides de basses vers de hautes températures et inversement. Les fortes chaleurs et la sécheresse en été

sont aussi caractéristiques d'un climat continental.

Au total, 2003 a été trop chaud et trop sec: en moyenne de toute la Suisse, 2003 vient en second, après 1994, dans l'inventaire des années les plus chaudes depuis 1864 [5]. La précipitation annuelle n'a atteint le plus souvent que 70 à 85% des quantités annuelles normales. Ce qui fait de 2003 l'une des dix années les plus sèches depuis 1900 dans de vastes parties du pays [11].

L'influence du rayonnement

Pendant les mois de juin, juillet et août de l'été 2003, étant donné la persistance de l'anticyclone des Açores, la couverture nuageuse dans l'espace alpin fut de 18% inférieure à la moyenne des dix années précédentes. La conséquence en fut une insolation globale moyenne de 265 watts par m². Cette valeur est de 11% supérieure à celles des étés précédents. Les températures de pointe de l'été 2003 tiennent donc à l'important apport de rayonnement solaire de courte longueur d'onde (ainsi qu'à des processus de rétroaction) sous un ciel plus dégagé qu'en moyenne. Par contre, l'augmentation à long terme de la température n'est pas causée par une augmentation de l'insolation, mais par le transport d'air chaud en direction de l'Europe et par le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde. L'augmentation globale du rayonnement de grande longueur d'onde est très probablement due à l'accroissement des gaz à effet de serre anthropiques dont l'action est encore renforcée par un fort effet de rétroaction faisant intervenir la vapeur d'eau.

Où situer l'été 2003 sur l'échelle des extrêmes?

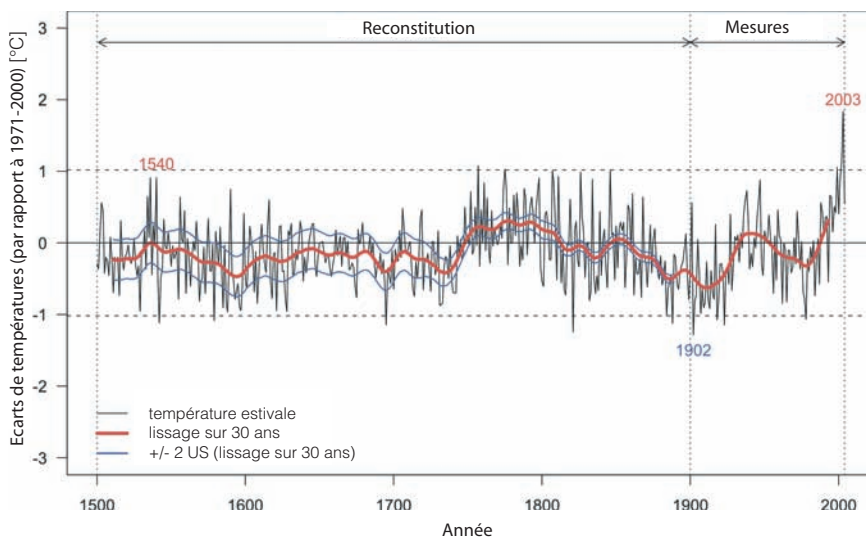
Des séries de mesures instrumentales existent en Suisse depuis la seconde moitié du 19^e siècle [12]. La combinaison de mesures effectuées depuis 1900 avec des données climatiques naturelles (cernes annuels des arbres) et historiques a permis par la suite d'effectuer des reconstitutions de la température en Europe et dans l'espace alpin remontant jusqu'à 1500 [2,13].

La représentation des températures estivales reconstruites (1500–1900) et mesurées (1901–2004) montre que les températures estivales de l'ensemble de l'Europe entre 1500 et 1750 étaient plus

basses que celles de la période de 1971–2000. Une phase plus chaude aux environs de 1800 a été suivie d'un refroidissement jusqu'au début du 20^e siècle. Le réchauffement pendant le 20^e siècle s'est déroulé en deux phases, la première s'étendant environ de 1910–1940 et la seconde à partir des années 70 [2,13].

L'été 2003 fut dans toute l'Europe de 2 °C plus chaud que la moyenne de 1971–2000 et a battu ainsi tous les records (figure 3). Même en prenant en compte les incertitudes des reconstitutions de la température, l'été 2003 fut très probablement le plus chaud depuis au moins cinq cents ans.

Figure 3: Ecart par rapport à la période de 1971–2000 des températures estivales moyennes en Europe de 1500–2004 (en °C). Les données de 1901–2004 se fondent sur des mesures instrumentales, celles de 1500–1900 sont des reconstitutions statistiques. La courbe rouge représente des valeurs lissées, la courbe bleue indique les incertitudes de la reconstitution. L'été le plus froid en Europe est marqué en bleu, le plus chaud en rouge. Le célèbre été torride de 1540 est également marqué comme exemple.



Source: Luterbacher et al. 2004, actualisé [2,3]

2. Cours d'eau et approvisionnement en eau

Cours d'eau de surface

Hauteurs d'eau et débits

L'influence de la chaleur et de la sécheresse sur les hauteurs d'eau diffère selon le bassin considéré. Dans les cours d'eau sous l'influence des glaciers, l'accroissement de la fonte des glaciers augmente les hauteurs d'eau par rapport aux années moyennes. Pour tous les autres cours d'eau, la sécheresse est le facteur déterminant pour la hauteur d'eau. Dans les bassins comprenant d'importantes nappes phréatiques et/ou de grands lacs, ou encore des réserves de neige, la baisse des hauteurs d'eau due au manque de pluie peut être retardée ou n'est guère constatable. Les effets d'une phase sèche sur un cours d'eau dépendent aussi fortement des antécédents. Si des précipitations antérieures ont bien rempli les nappes d'eau souterraines, les hauteurs d'eau n'atteignent des valeurs exceptionnellement basses qu'après de longues phases de sécheresse.

En 2003, les stations de mesure des débits ont enregistré effectivement des moyennes annuelles supérieures à la norme dans le cas des cours d'eau alimentés par des glaciers, ce qui s'explique par la fonte accélérée de ces derniers pendant les périodes caniculaires de juin et août. Dans les régions sans glaciers, les débits annuels ont été au contraire nettement inférieurs à la norme. L'influence de la fonte des neiges aux altitudes moyennes (1000 à 2000 m) a rapidement diminué, car la couverture de neige y était inférieure à la moyenne et avait déjà perdu de la substance pendant les phases de temps doux de mars et avril. La sécheresse qui a persisté jusqu'en automne – mis à part quelques violents orages en juillet et août – a eu pour conséquence une importante diminution des débits dans la plupart des régions. Ce n'est qu'en octobre que des précipitations abondantes ont conduit à une normalisation de la situation sur le versant nord des Alpes. Le versant sud des Alpes a été encore plus fortement touché par la sécheresse: on y a observé des débits extrêmement faibles en partie déjà dès le mois de mars, et il a fallu attendre novembre pour voir tomber de nouveau des précipitations abondantes [6].

Les lacs ont été influencés de la même manière que les cours d'eau par les conditions météorologiques de 2003, mais leur masse a un effet modérateur. Plus le lac est grand, plus cet effet est important. A part les lacs de Walenstadt et de Constance, tous les grands lacs suisses sont régulés, ce qui contribue aussi à stabiliser les hau-

teurs d'eau. Néanmoins, quelques niveaux exceptionnellement bas ont été observés même dans ces lacs. Le lac Majeur, le lac de Constance et des lacs de faible capacité sans affluents alimentés par des glaciers furent les plus fortement touchés par l'été caniculaire. Au lac Majeur, on a mesuré de juin à août des hauteurs d'eau extrêmement basses. Au lac de Constance, le niveau de l'eau est descendu, en août et septembre, au-dessous des moyennes les plus basses enregistrées jusqu'alors depuis 1866, ce qui a eu des conséquences négatives pour la navigation sur le lac Inférieur et le Rhin supérieur [6].

Températures des lacs et teneur en oxygène

La canicule et la sécheresse n'ont pas seulement influé sur les hauteurs d'eau des lacs, mais aussi sur leurs profils de température et leur teneur en oxygène. Des mesures comparatives dans le lac de Zurich et le Greifensee ont montré que suivant sa taille et sa teneur en substances nutritives et en oxygène, un lac réagit différemment à des températures élevées. Le lac de Zurich, profond et de taille moyenne, a également une teneur moyenne en substances nutritives; le Greifensee, beaucoup plus petit et peu profond, est en revanche riche en de telles substances. L'eau profonde des lacs riches en substances nutritives, à l'opposé de lacs où ces dernières sont moins abondantes, contient très peu ou même pas du tout d'oxygène.

Dans le lac de Zurich, la teneur en oxygène a fortement diminué entre juin et septembre à toutes les profondeurs. Cette diminution fut plus grande qu'à aucun autre moment depuis le début des mesures en 1936. Même pendant la période d'eutrophisation (richesse en substances nutritives) maximale, pendant les années 70 et au début des années 80, la diminution de l'oxygène n'avait pas été de cette ampleur. Par contre, on n'a pas constaté de grande différence par rapport aux autres étés dans le Greifensee, riche en substances nutritives, car dans un tel lac, l'eau profonde est régulièrement sans oxygène pendant l'été.

Les mesures confirment les résultats de modélisations correspondantes en limnologie physique. Elles constituent un indice important selon lequel les changements climatiques menacent les efforts, couronnés de succès, visant à corriger l'eutrophisation anthropique [14].

Températures des cours d'eau et qualité de l'eau

La forte insolation et les hautes températures de l'air ont réchauffé les cours d'eau pendant l'été,

en partie intensément, notamment dans le Jura et le Plateau. L'augmentation des concentrations en substances chimiques et de l'activité bactérienne en raison de la chaleur et de la sécheresse n'a pas causé de problèmes décelables. L'exploitation des stations d'épuration des eaux usées a été influencée plutôt positivement que négativement par ces conditions météorologiques exceptionnelles. Rien n'a indiqué non plus que les eaux, vu leur température élevée survenant en même temps que de faibles niveaux et débits, aient posé des problèmes d'hygiène particuliers pour s'y baigner [6].



Figure 4: Töss, le 28 août 2003, Photo C. Schär

Conséquences pour les effectifs de poissons

La chaleur et la sécheresse sont à deux égards une épreuve pour les poissons. Premièrement, ils souffrent de la baisse des hauteurs d'eau, qui peut finir dans les cas extrêmes par l'assèchement de rivières (figure 4). Deuxièmement, l'augmentation des températures du milieu aquatique peut mettre en danger la vie des espèces d'eau froide, p.ex. les truites, féras et ombres, si elles ne trouvent pas à se réfugier dans des eaux plus fraîches. Des maladies qui dépendent de la température peuvent également conduire à une plus forte mortalité [6]. Pour les cours d'eau sans glaciers, ou dont le bassin n'est occupé qu'en faible partie par la glace, l'été 2003 a eu pour conséquence des niveaux extrêmement bas en même temps qu'une forte hausse des températures de l'eau. Si les régions des Alpes et des Préalpes n'ont connu que localement des problèmes de débits d'eau, la situation sur le Plateau et dans le Jura fut en revanche plus critique. La sécheresse a causé de gros problèmes en particulier dans les cantons de Vaud, Bâle-Campagne et Zurich. Au total, 352 cours d'eau piscicoles furent partiellement ou totalement assé-

chés. Des pêches forcées ont été effectuées dans au moins 265 cours d'eau pour sauver les poissons de l'asphyxie ou de la mort par la chaleur [6].

Hécatombe d'ombres dans le Rhin

L'augmentation des températures de l'eau a eu des effets dramatiques dans l'Untersee (le bassin inférieur du lac de Constance) et le segment du Rhin situé en aval. Quelque 52000 ombres et des centaines d'autres poissons ont péri, victimes de l'eau trop chaude. Le 12 août 2003, on a mesuré presque 26 °C au milieu du fleuve près de Stein am Rhein. On ne connaît qu'un seul cas comparable à cette hécatombe record de poissons: il est survenu en 1540. L'effectif des ombres pêchables qui ont survécu a été estimé à 3% de la population moyenne. Après cette catastrophe, les cantons de Schaffhouse et de Thurgovie ont immédiatement interdit la pêche des ombres du Rhin. Cette interdiction a été prolongée ensuite jusqu'à fin avril 2005 [6].

Prélèvements d'eau pour l'irrigation

Les cultures menacées par la sécheresse furent en partie irriguées. Des prélèvements d'eau dans de petits cours d'eau ont conduit, en raison des faibles débits, à des conflits d'intérêts entre les agriculteurs et la protection des eaux. Nombre de cantons ont décrété des restrictions ou interdictions en matière de prélèvements d'eau. Dans l'ensemble, on peut admettre que la réglementation sur les débits résiduels minimums selon la loi sur la protection des eaux a été respectée et que des ruisseaux complètement asséchés par les prélèvements furent l'exception [6].

Les eaux souterraines

Les réserves d'eau souterraine étaient exceptionnellement élevées au début de 2003, en raison des précipitations intenses de l'hiver 2002/03. Elles ont alimenté les aquifères pendant la sécheresse de 2003. Celle-ci a eu des effets très variables selon le type d'aquifère, la région et l'altitude du bassin. Dans les petites vallées du Jura, du Plateau et des Préalpes, les réserves d'eau souterraine sont restées en majorité supérieures au minimum à long terme, toutefois des niveaux très bas ont été atteints localement. Dans les plaines alluviales des vallées des petites rivières du sud du Tessin, ces réserves ont diminué continuellement de janvier à fin octobre et sont descendues au-dessous des minima à long terme (figure 5). Dans les val-

lées des grandes rivières alpines, les réserves d'eau souterraine sont en général plus importantes en été qu'en hiver, si bien que la forte fonte des neiges et des glaciers provoquée par la canicule les a d'abord empêchées de baisser. Ce n'est qu'à fin août qu'elles ont diminué substantiellement dans ces régions.

Quant aux petites sources, alimentées par des nappes d'eau souterraine proches de la surface et associées à un bassin de faible étendue situé dans des formations meubles et karstiques, la sécheresse a conduit à une très forte diminution de leur débit. Cela a touché notamment le Jura, le Plateau, les Préalpes et le versant sud des Alpes. Les sources karstiques associées à un grand bassin ont réagi moins fortement à la sécheresse [6].

Approvisionnement en eau

La consommation d'eau potable diminue en Suisse depuis vingt ans et s'élève aujourd'hui à environ 160 litres par personne et par jour. Etant donné la richesse du pays en eau, l'approvisionnement en eau potable ne nécessite que 2% de la précipitation annuelle. Si l'on considère la quantité totale consommée par les ménages, l'industrie et l'agriculture (irrigation), cela représente environ 5% de la précipitation annuelle. Même en cas de sécheresse et de forte chaleur, assurer l'approvisionnement en eau est donc avant tout une question d'organisation et non pas un problème tenant à des ressources naturelles limitées [6].

En Suisse, 80% de l'eau potable proviennent de gisements d'eau souterraine (les sources et les installations de pompage fournissent chacune 40%). Le reste est capté dans les lacs. Dans l'ensemble, l'été 2003 a confirmé l'expérience selon laquelle même pendant de longues périodes sèches, les grands systèmes urbains de distribution d'eau

ne rencontrent guère de problèmes d'approvisionnement; il en va de même des réseaux régionaux. Cette sécurité d'approvisionnement tient avant tout au fait que les captages dans des lacs, des réserves d'eau souterraine et des sources se complètent, ce qui permet par exemple de compenser une diminution du débit des sources par une augmentation des prélèvements dans les lacs [6].

Ce furent plutôt les petits systèmes d'approvisionnement qui ont eu des problèmes – ceux qui ne sont pas mis en réseaux et dépendent de sources. Dans les régions qu'ils alimentent, p.ex. dans les cantons de Vaud, du Jura, de Bâle-Campagne, de Soleure et d'Argovie, la population a été appelée à économiser l'eau. Le Tessin, où le manque de pluie a persisté de l'hiver jusque tard en automne, a été particulièrement touché. Des communes ont dû trouver des ressources en eau supplémentaires pour de nombreux petits fournisseurs qui ne sont pas mis en réseaux. Dès le mois de juin, l'eau est devenue toujours plus rare. La situation ne s'est améliorée qu'avec les pluies abondantes tombées en novembre. Quelque cinquante communes ont été touchées dans le Tessin [6].

La qualité de l'eau n'a pas posé de problèmes liés au climat, car l'eau étant consommée en plus grande quantité pendant les périodes de chaleur, elle séjourne moins longtemps dans les conduites, ce qui réduit la prolifération des germes qu'elle pourrait éventuellement contenir. Dans les captages, l'absence de fortes précipitations peut même conduire à une diminution des impuretés dans l'eau de source. Inversement, des précipitations violentes sur un sol desséché peuvent favoriser le transfert de polluants et de bactéries fécales dans les petits captages. Des problèmes de qualité lors du captage de l'eau ne sont toutefois survenus que sporadiquement et par endroits [6].

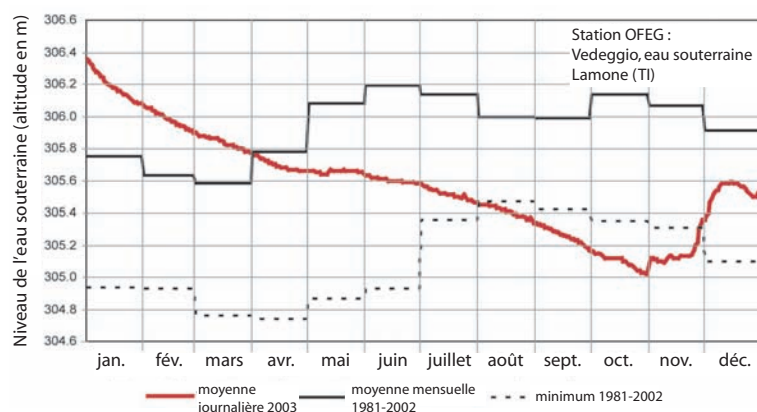


Figure 5: Comparaison entre la moyenne mensuelle 1981–2002 (noir), la valeur minimale pendant la même période (ligne noire discontinue) et la moyenne quotidienne 2003 (rouge) du niveau de l'eau souterraine à Lamone, dans le Val d'Agno, Tessin (station de l'Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG). En octobre 2003, ce niveau était nettement plus bas que le minimum à long terme.

Source: Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG

3. Glaciers et permafrost

Effets sur les glaciers des Alpes

Les glaciers jouent un rôle important dans le régime hydrologique de la Suisse: ils stockent des quantités d'eau considérables et représentent d'importants réservoirs d'eau en été. Il est connu, de par la reconstitution des phases de progression et de recul des glaciers alpins, que ces derniers ont passé par une phase de grande extension du milieu du 16e jusqu'au milieu de 19e siècle. Une phase de forte fonte a pris le relais. Au 20e siècle, le bilan de masse des glaciers alpins, c'est-à-dire l'amplitude de leur croissance ou décroissance, est globalement négatif [6].

L'interaction du rayonnement, de la température et des précipitations en fonction de la saison est l'aspect déterminant pour le bilan de masse des glaciers. Les chutes de neige en hiver, mais aussi en été, sont un facteur important. S'il y a de la neige sur un glacier au début de l'été, il se passe sensiblement plus de temps jusqu'à ce que la glace soit exposée aux rayons du soleil, car la couche de neige fraîche a une réflectivité beaucoup plus grande que l'ancienne neige ou que des parties sombres du glacier ou recouvertes d'éboulis. Un deuxième facteur important est donné par les conditions météorologiques de mai à septembre. Plus le temps est chaud, sec et ensoleillé, plus grande est la perte de masse des glaciers [6].

2003 fut, en raison de la sécheresse persistante, du grand excès de chaleur en altitude pendant l'été et de l'absence d'apports d'air froid, une année extrêmement défavorable aux glaciers. Après un hiver moyen du point de vue neige, le processus de fonte a été favorisé par une disparition précoce de la neige sur les glaciers. La limite au-dessous de laquelle la fonte des glaces domine est montée par moment à des altitudes jamais

observées jusqu'alors, de plus de 3500 m. Il s'en suivit un grossissement du débit des ruisseaux glaciaires, et les bassins d'accumulation en aval des sites fortement englacés se sont rapidement remplis [6]. Les prises de vue par satellite ont mis en évidence la formation rapide de nouveaux lacs et un assombrissement frappant de la surface des glaciers et des névés. On observa aussi en plusieurs endroits l'effondrement de structures de glace ainsi que la disparition totale de la neige sur de petits glaciers, dômes de glace et parois de roche englacées [15].

La fonte record des glaciers ne s'est pas limitée à la Suisse, mais a été observée aussi en Autriche. La quantité moyenne de la fonte est estimée correspondre à une colonne d'eau d'env. 2.5 m [15]. C'est un record absolu pour les Alpes, qui dépasse de plus de 50% la perte, jusqu'alors la plus grande, de 1998 (1.6 m) [15] (figure 6). La perte totale de volume des glaciers des Alpes en 2003 est estimée atteindre 5 à 10% du volume des glaciers en 2002 [6]. La diminution d'épaisseur des glaciers a été si forte que la longueur de ces derniers ne peut plus s'adapter à l'apport horizontal de glace. C'est pourquoi l'affaissement et l'effondrement des langues de glaciers, au lieu d'un lent recul, est un processus toujours plus fréquent [6].

Impacts sur les zones de permafrost

La vague de chaleur n'a pas seulement fait fondre les glaciers, mais a eu aussi des conséquences pour le permafrost. Environ 4 à 6% de la superficie de la Suisse sont des zones de permafrost, c'est-à-dire des régions où le sol est gelé en permanence. En été, le permafrost se cache sous une couche dégelée d'un demi à plusieurs mètres d'épaisseur et échappe par conséquent à l'obser-

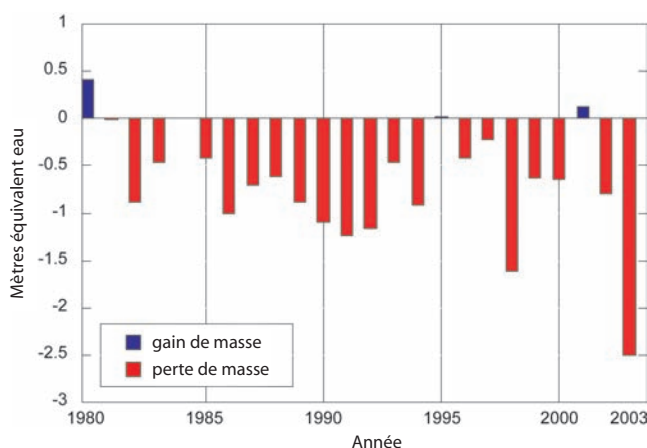
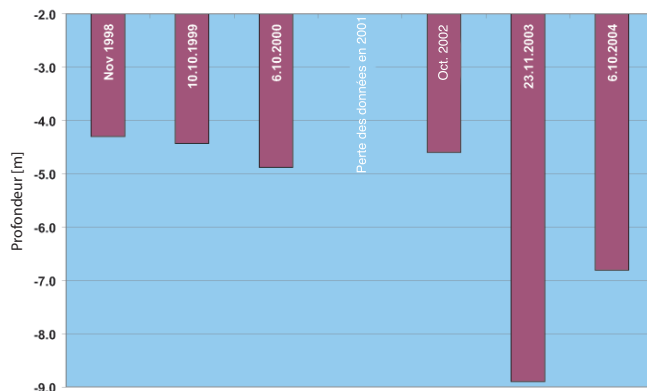


Figure 6: Perte de masse des glaciers alpins depuis 1980. Les moyennes ont été calculées à l'aide des bilans de masse annuels des glaciers suivants: St Sorlin (F), Sarennes (F), Silvretta (CH), Gries (CH), Sonnblickkees (A), Vernagtferner (A), Kesselwandferner (A), Hintereisferner (A), Caresèr (I).

Figure 7: Epaisseur maximale de la couche dégelée en été et moment correspondant au Schilthorn depuis 1998. Le permafrost dans la roche ne contient pratiquement pas de glace. C'est pourquoi la plus grande partie de l'énergie thermique donne lieu à une hausse de la température. Il s'ensuivit, en 2003, un doublement de l'épaisseur de la couche dégelée.



Source: Vonder Mühl et al. 2005

vation directe. Mais quand le sous-sol gelé fond, cela a des conséquences tangibles.

Pendant l'été caniculaire 2003, en particulier de juin à août, de nombreux éboulements ont été observés dans tout l'espace alpin, surtout à haute altitude et sur les pentes exposées au nord. Ni des précipitations violentes, ni d'autres phénomènes influençant passagèrement la stabilité des pentes n'entrent en ligne de compte comme cause ayant pu déclencher cette augmentation de la fréquence des éboulements et des chutes de pierres. Reste, comme explication plausible, la dégradation du permafrost en haute montagne en raison des températures élevées. La fréquence exceptionnelle des éboulements pendant l'été 2003 est interprétée comme indiquant que la déstabilisation est une

réaction presque immédiate à la chaleur extrême [16,17]. Les hautes températures n'ont pas été le seul facteur déterminant pour la déstabilisation des zones de permafrost. L'insolation et la chaleur ont pu exercer leur effet avant tout là où une couche de neige protectrice faisait défaut. En été, la neige a fonction de couche isolante pour le permafrost sous-jacent et réfléchit en outre le rayonnement incident beaucoup plus qu'un sol non recouvert [18]. En hiver par contre, une couche de neige précoce et continue empêche, du fait de son effet isolant, le sol de se refroidir. En effet, seuls les sols non recouverts permettent à la chaleur du sous-sol de se dégager librement. Cela signifie qu'un hiver pauvre en neige, indépendamment du fait qu'il soit trop chaud ou trop froid du point de vue climatologique, a un effet réfrigérant sur le permafrost.

Des mesures ont montré que l'apport de chaleur en montagne pendant l'été caniculaire fut nettement plus important qu'une année normale. Ceci tient moins au niveau des températures absolues qu'à la longueur de la période de chaleur. A la paroi nord de l'Eiger, la température de l'air s'est maintenue pendant plus de 700 heures au-dessus de 10 °C, en 2002 cela avait été environ 120 heures [17]. Pour la première fois, des traces d'eau de fonte ont été observées en 2003 sur le flanc nord du Sphinx, au Jungfraujoch (3570 m d'alt.) [17]. Du fait de l'action prolongée de la chaleur, la couche dégelée a atteint en moyenne une profondeur dépassant d'environ 10 à 50 cm celle de l'année précédente [16]. Dans d'autres régions, comme par exemple au Schilthorn, le sous-sol a dégelé même jusqu'à une profondeur dépassant de plusieurs

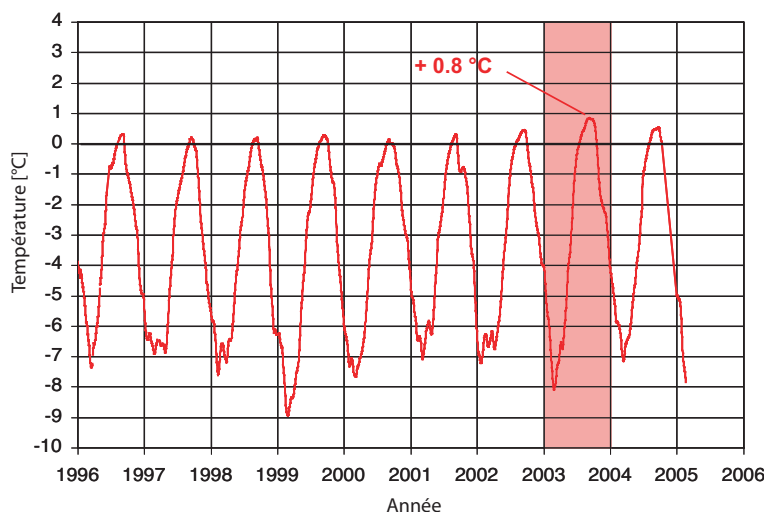


Figure 8: Températures de la roche sur le flanc nord du Sphinx (3570 m d'alt.) de 1996–2005, mesurées à 4 m au-dessus de la surface.

Source: H.R. Keusen [17]

mètres celle d'années antérieures [15]. L'épaisseur de la couche dégelée en été dépend de la teneur en glace du permafrost. Au Schilthorn, le permafrost dans la roche ne contient pratiquement pas de glace, si bien que l'énergie thermique donne lieu en majeure partie à une hausse de la température. Cela explique qu'au Schilthorn, la couche dégelée ait atteint en 2003 une profondeur presque double de celle des années antérieures (figure 7). Il est remarquable qu'en 2004 aussi, le sous-sol ait dégelé beaucoup plus profondément qu'avant l'été caniculaire. Cela indique que la couche dégelée de 2003 a peut-être subi une modification structurale, par exemple par un dégel suivi d'une déshydratation.

Sur les pentes nord, la couche dégelée en été dépend avant tout de la température de l'air, alors que sur les pentes sud, c'est le rayonnement de courte longueur d'onde qui joue un rôle important. Il s'ensuit que les pentes exposées au sud sont sujettes à une plus grande variabilité au cours de l'année et que la couche dégelée a atteint de grandes profondeurs déjà avant 2003 [16]. Les flancs nord situés dans une zone de basse température sont aussi prédestinés aux instabilités du fait qu'ils contiennent beaucoup d'eau ou de glace. L'eau de fonte se trouvant dans des fissures peut y exercer une pression qui déforme la roche [17]. L'influence de la chaleur a donc été particulièrement grande sur les pentes exposées au nord, ce qui explique l'augmentation de la fréquence des chutes de pierre et des éboulements qui s'y sont produits [16,17] (figure 8).

Quand bien même le dégel des zones de permafrost dans les Alpes se déroule de façon moins spectaculaire que la disparition des glaciers, il peut être lourd de conséquences. Il est à craindre que des modifications thermiques se produisant à des profondeurs toujours plus grandes auront pour effet d'augmenter le danger de gros éboulements – une menace possible pour les régions de montagne habitées. De même, différentes infrastructures ancrées dans le sol durci par le permafrost sont exposées à un risque accru. Si le sous-sol dégèle, de nombreux chemins de fer de montagnes, remonte-pente et ouvrages anti-avalanches nécessiteront des mesures pour éviter des dommages dus à des phénomènes d'affaissement et à des sols rampants [18].

4. Qualité de l'air

Smog estival

Le smog estival se compose d'une multitude de substances nocives: à part l'ozone comme constituant principal, il contient aussi de la poussière fine, des oxydes d'azote et d'autres polluants. L'ozone est un gaz irritant agressif qui a de nombreux effets négatifs pour l'être humain, les plantes de cultures et la végétation naturelle.

Chez l'être humain, il peut être la cause d'irritations des muqueuses, de réactions inflammatoires des voies respiratoires, de limitations de la fonction pulmonaire et de décès prématurés. Toutefois, la sensibilité à son égard varie d'une personne à l'autre. Les enfants, les personnes souffrant de problèmes respiratoires et les personnes âgées sont en général les plus touchés. L'OMS estime qu'environ 10 à 15% de la population est particulièrement sensible à l'ozone. L'effet de ce gaz augmente avec sa concentration et le temps d'exposition. Il s'accroît aussi lors d'efforts physiques, vu que le volume respiratoire est alors plus grand [19].

Dans l'agriculture, on estime que les pertes de récolte dues aux fortes concentrations d'ozone se situent entre 5 et 15%, selon le type de culture, la région et l'année. Plus de quatre-vingts espèces végétales naturelles présentent des symptômes dus au stress, qui se manifestent par des modifications de la physiologie des feuilles ou des aiguilles.

Qualité de l'air durant l'été 2003

La situation météorologique exceptionnelle de l'été 2003 a influé sur la qualité de l'air. Au prin-

temps et en été, la température de l'après-midi est, à côté du rayonnement, l'un des plus importants facteurs influençant la production d'ozone. Il n'est donc pas étonnant qu'en comparaison des années antérieures, les concentrations de ce gaz aient été exceptionnellement fortes pendant l'été caniculaire [20] (figure 9). La forte insolation et des températures en conséquence ont favorisé la formation de l'ozone. Ce dernier a atteint des concentrations élevées, mais les pointes absolues n'ont pas été supérieures à celles des années antérieures. En moyenne, les valeurs maximales ont dépassé toutefois de quelque 30 microgrammes/m³ (presque 30%) la moyenne des étés 1992-2002. Les concentrations les plus fortes furent mesurées dans certains sites du versant sud des Alpes.

Les êtres humains et la végétation furent exposés tout l'été à de fortes concentrations d'ozone. Pendant presque trois mois, le niveau de ce gaz a dépassé régulièrement la valeur limite d'immission. Sur l'ensemble de l'année, la valeur limite d'immission horaire fut dépassée en gros deux fois plus souvent que les années antérieures [19]. L'écart des valeurs moyennes a correspondu à l'écart des températures, en d'autres termes, les fortes concentrations d'ozone s'expliquent par les hautes températures. Si des canicules comparables devaient survenir plus fréquemment à moyen terme, cela aurait aussi une influence sur la qualité de l'air: si les précurseurs de l'ozone (avant tout les hydrocarbures (COV) et les oxydes d'azote) ne diminuent pas substantiellement, les concentrations d'ozone augmenteront fortement [20].

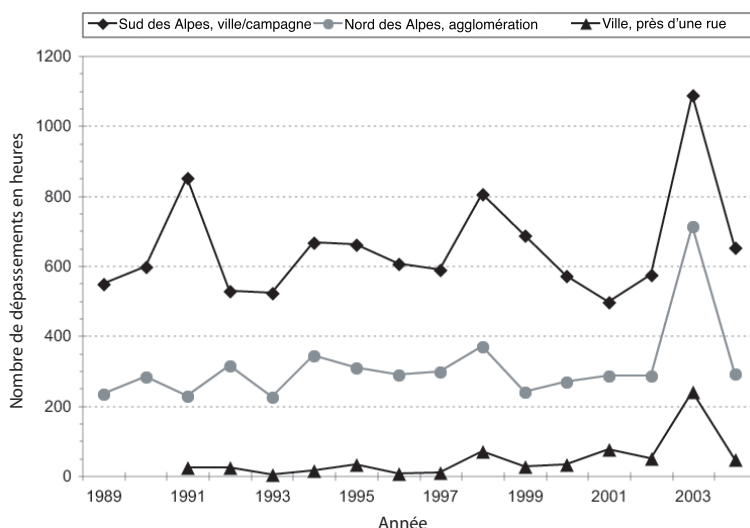


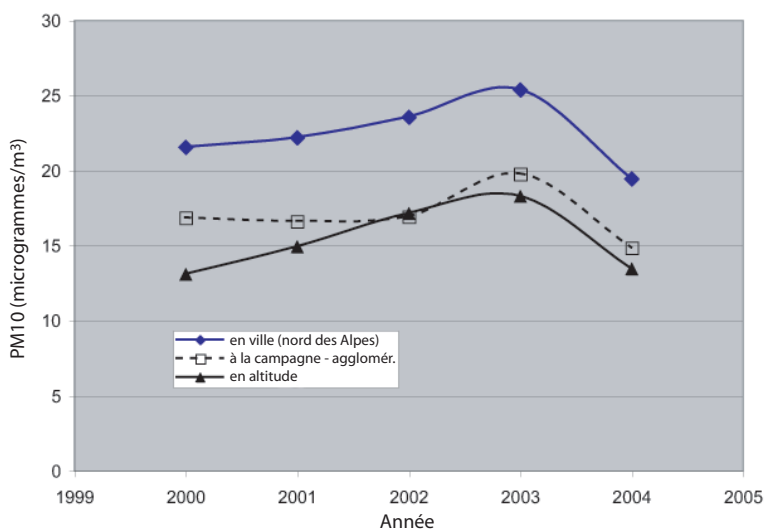
Figure 9: Nombre de dépassements de la valeur limite de la moyenne horaire de 120 microgrammes/m³ en différents types de sites du réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL) de 1989-2003.

Source: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)

L'été 2003 a connu, à part de fortes concentrations d'ozone, également de hautes concentrations de poussière fine (figure 10). Ces particules dites PM10, dont le diamètre est égal ou inférieur à 10 micromètres, pénètrent dans les poumons et les bronches et peuvent entraîner des réactions inflammatoires et des maladies des voies respiratoires. La poussière fine peut être d'une part émise directement par les véhicules et l'industrie,

mais aussi – comme l'ozone – être produite par un processus photochimique. Les précurseurs en sont les oxydes d'azote et les hydrocarbures, de même que le dioxyde de soufre et l'ammoniac. Pendant l'été 2003, ses concentrations ont dépassé de 2 à 4 microgrammes/m³ celles des années 2000–2002 et de 2004. A la campagne aussi, elles se sont situées, pendant l'été 2003, aux environs de la valeur limite annuelle de 20 microgrammes/m³.

Figure 10: Concentrations moyennes de poussière fine (PM10) en différents types de sites du réseau NABEL (2000–2004).



Source: André S. Prévôt, Institut Paul Scherrer

5. Effets sur la santé

Pas loin de mille décès supplémentaires en Suisse, tel est le bilan tragique de l'été caniculaire de 2003. En France, pays qui fut fortement touché par la vague de chaleur, leur nombre est estimé à quinze mille rien que pour la période du 1er au 20 août. Des décès dus à la chaleur ont été rapportés aussi en Italie, Espagne, Pays-Bas, Allemagne et Angleterre [21]. Au total en Europe, on estime que la canicule a fait jusqu'à 35 000 morts [22,23].

En Suisse, ce sont en particulier les personnes âgées et la population des villes et des agglomérations du nord et de l'ouest du pays qui furent touchées. La mortalité fut particulièrement élevée à Bâle, Genève et Lausanne [21]. Le nombre de décès y a été entre 13 et 24% supérieur à la moyenne [24]. La mortalité plus forte dans les villes s'explique par l'effet d'île de chaleur: là où la densité d'agglomérations, d'urbanisation et de bâtiments est plus forte, il faut s'attendre à des températures plus élevées, car le refroidissement nocturne est plus faible que dans les régions rurales [25]. A Bâle et Genève surtout, les températures ont dépassé certains jours 35 °C et ne sont pas descendues au-dessous de 20 °C pendant la nuit. La combinaison de températures diurnes élevées et d'un refroidissement nocturne réduit semble être une raison de la mortalité particulièrement forte dans ces villes [24].

Il est probable qu'une partie des décès dus à la chaleur aient frappé des personnes dont l'état de santé était critique et qui seraient bientôt mortes aussi sans vague de chaleur [21]. Ces cas ne permettent toutefois pas à eux seuls d'expliquer l'augmentation massive de la mortalité. Si cet

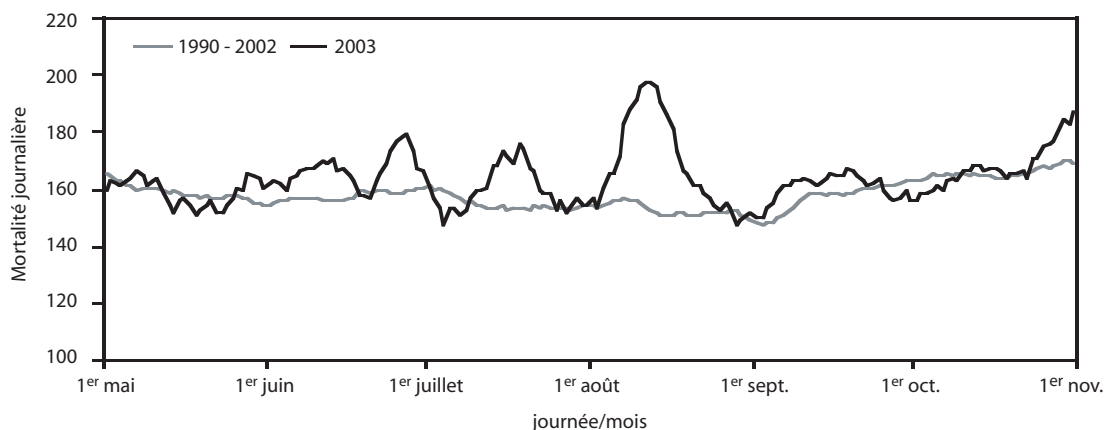
„effet de moisson“ – le décès prématuré de personnes déjà très malades – était déterminant, la mortalité devrait diminuer après la canicule nettement au-dessous de la moyenne à long terme. Or après fin août, le nombre de décès est resté élevé. Donc parmi les personnes qui ont perdu la vie, nombreuses sont celles qui, sans la canicule, ne seraient pas morte de toute façon au cours des semaines suivantes [24] (figure 11).

Il n'est toutefois pas possible de répondre de façon définitive à la question de savoir quelles sont les véritables raisons de cette forte mortalité. Les causes de décès ne sont publiées que deux ans après par l'Office fédéral de la statistique et n'ont donc pas pu être incluses dans les études effectuées jusqu'ici. Des effets directs et indirects entrent en ligne de compte comme ayant pu déclencher des décès ou maladies dus à la chaleur [25].

Des effets directs de la canicule sont par exemple des problèmes circulatoires, des coups de chaleur, la déshydratation et l'hyperthermie [25]. Les plus fréquemment touchées sont les personnes âgées, qui ont une moins bonne régulation thermique. Elles transpirent moins et ressentent moins la soif. De plus, leur cœur et système circulatoire atteint plus vite ses limites. Les conséquences dangereuses possibles sont la déshydratation – le dessèchement du corps –, une température du corps trop haute, l'abaissement, la perte de connaissance, des crampes dues à la chaleur et le coup de chaleur [26].

Un des effets indirects est l'action de polluants atmosphériques, notamment des fortes concentrations d'ozone et de la poussière fine. Suivant

Figure 11: Nombre de décès par jour entre le 1er mai et le 1er novembre; l'année 2003 et en comparaison la moyenne des années de 1990–2002.



une première estimation, environ 130–300 décès supplémentaires et un nombre semblable d'admission à l'hôpital sont attribuables au smog estival de 2003 [19]. Des études effectuées aux Pays-Bas et en Grande-Bretagne ont donné des résultats similaires [27,28].

Une autre conséquence indirecte de la chaleur consiste en des maladies ayant un lien avec la qualité de l'eau et les denrées alimentaires [25]. Les deux agents pathogènes bactériens les plus fréquents comme cause de maladies diarrhéiques et Suisse – *Campylobacter* et *Salmonella* – présentent une évolution saisonnière caractéristique avec des maxima en été. Une analyse récente de séries temporelles comprenant des données de dix pays européens (y compris la Suisse) montre qu'il existe une relation linéaire entre les infections par les salmonelles et la température ambiante. Au-dessus d'un seuil de 6 °C, une relation linéaire entre la température et le nombre de cas annoncés de salmonelloses est décelable en Suisse.

Enfin, la sécheresse et les températures élevées ont influencé la libération du pollen par les plantes allergènes. L'influence la plus marquée a été observée pour le pollen des graminées: la saison a commencé deux semaines plus tôt qu'en moyenne et fut très intense en mai et au début de juin. Toutefois, la sécheresse a mis fin à la floraison des graminées 7 à 33 jours plus tôt que normal. Les herbes supportant la sécheresse ont produit pendant l'été des quantités exceptionnellement élevées de pollen. Ce fut le cas par exemple des espèces allergènes que sont le plantain et le chénopode [29,30].

6. Végétation

La canicule de l'été 2003, combinée à la sécheresse et à de fortes concentrations d'ozone, n'a pas éprouvé seulement les êtres humains: la végétation aussi en a en partie souffert. A court terme, les conditions exceptionnelles ont agi avant tout sur la croissance des plantes et sur leurs phases de développement (phénophases). Si de tels étés venaient à se multiplier, ils pourraient entraîner à long terme une modification des aires de répartition des espèces végétales et changer la composition des écosystèmes.

Impacts sur la végétation

Suivant l'altitude et selon leur résistance à la chaleur et à la sécheresse, les plantes ont réagi différemment à l'été caniculaire de 2003. Dans les sites alpins et à haute altitude, les plantes ont en partie profité probablement des températures élevées et du prolongement de la période sans neige. A la Furka (2430 m), on a mesuré en juillet, dans le sol à 10 cm de profondeur, des maxima de température de 19.1 °C. Cette valeur est en gros 5 °C au-dessus des maxima mesurés à même profondeur pendant les années 1998–2002. A ceci s'est ajouté une grande sécheresse: les précipitations estivales (juillet à septembre) de 2003 n'ont atteint que 137 mm, soit en gros 40% des précipitations de l'année précédente. La teneur du sol en eau fut inférieure à 10 pour cent volume pendant sept jours en juillet et onze jours en août. Dans de telles conditions, l'eau n'est plus disponible pour les plantes. En conséquence, de nombreuses plantes de montagne ont présenté des signes de flétrissement – un phénomène qui n'avait guère été observé jusqu'alors [31].

Aux basses altitudes par contre, les températures élevées et le manque d'eau ont entraîné en majorité une plus faible croissance des plantes

[32]. Un examen des hêtres sur une grande superficie a mis en évidence, dans tous les sites, des symptômes dus à l'ozone et à la sécheresse [33] (figure 12). Dans plusieurs cas, la sécheresse a provoqué une perte précoce des feuilles. En 2004, l'enquête Sanasilva, représentative en la matière, a révélé la plus forte régression du feuillage observé en Suisse depuis 1985 [34], mis à part celui des conifères en 2000, qui a atteint un niveau un peu plus bas [34]. Une hausse de la mortalité des arbres a été constatée dans 70% des arrondissements forestiers [35]. Des phénomènes de dépérissement, comme conséquence directe de la sécheresse de l'été 2003, ont été observés jusqu'à aujourd'hui dans une bien moindre mesure qu'on aurait pu s'y attendre sur la base des descriptions des effets des sécheresses des années 1940 [35].

L'année de sécheresse 2003 a eu des conséquences visibles en Valais, où la précipitation annuelle a été par endroit nettement inférieure à 400 mm [36]. Déjà dans le passé, les pins situés à basse altitude sont morts en plus grand nombre après des étés chauds et secs. A la suite de l'été caniculaire, ce processus s'est manifesté en conséquence. Jusqu'à 25% des pins ont péri par endroits dans la région de Viège depuis 2003 [36], alors que les chênes pubescents et les alisiers blancs sont mieux adaptés au temps sec et peuvent survivre à des périodes de sécheresse extrême. Des étés secs et torrides plus fréquents accéléreront le changement des espèces d'arbres à basse altitude en Valais.

Les changements dans la répartition des jours de gel ont aussi influencé le développement des plantes: en altitude, le nombre des jours de gel fut inférieur à la moyenne, tandis qu'à plus basse altitude, le gel a été plus fréquent du fait qu'il y a eu davantage de situations météorologiques de haute pression et donc de nuits claires [32].

L'observation de la végétation dans les interstices des pavés a montré que de nouvelles espèces aimant la chaleur et tolérant la sécheresse et que davantage de plantes ligneuses ont germé pendant l'été caniculaire 2003. Des plantes peu répandues jusqu'alors et des mauvaises herbes se propageant rapidement ont proliféré. Quelques-unes des espèces nouvelles venues ont survécu à l'hiver suivant, mais pas à celui de 2004/05. En cas de réchauffement durable, la propagation massive de mauvaises herbes qui prennent la place et la nourriture d'autres plantes pourrait gagner en importance [37].

Figure 12: Symptômes dus à la sécheresse (à gauche) et à l'ozone (à droite) sur des feuilles de hêtre. Les feuilles s'enroulent peu à peu sous l'effet du stress croissant causé par la sécheresse. Le stress provoqué par l'ozone entraîne une décoloration caractéristique des parties des feuilles exposées au soleil dans la couronne.



Source: Vollenweider et al. [33].

Développement des plantes (phénologie)

Les phases de développement des plantes ont fortement réagi à l'été caniculaire 2003: de nombreux „records phénologiques“ ont été observés. Les plantes ont connu un développement très précoce par rapport à une année moyenne. Ce fut le cas notamment en été et en automne, comme l'a montré l'évaluation des séries de mesures (de longueurs différentes – les mesures les plus anciennes remontent à 1951). Par exemple, les marronniers et les sureaux noirs ont fleuri dix à quinze jours plus tôt qu'en moyenne, les tilleuls à petites feuilles même vingt jours.

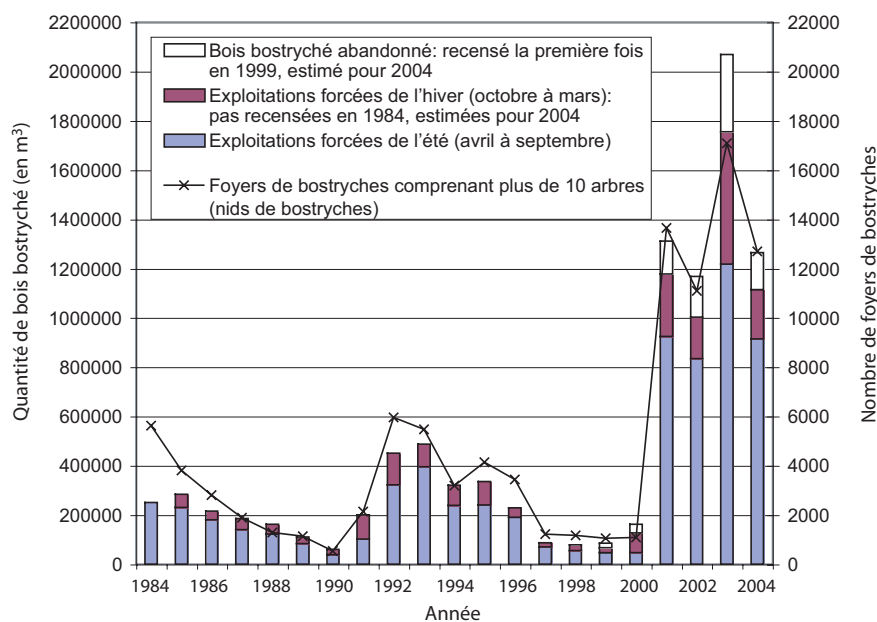
Des décolorations et chutes de feuilles précoces ont été enregistrées aussi en automne [38]. Sur le Plateau suisse, les hêtres ont pris leurs couleurs d'automne, voire même perdu des feuilles, en partie déjà à fin juillet et début août, soit deux mois plus tôt que d'ordinaire [39]. Les dates du début de ces manifestations furent cependant moins extrêmes qu'à l'arrière-printemps et qu'en été. La chute des feuilles notamment ne réagit pas en premier lieu aux conditions météorologiques passées, mais dépend surtout du temps qu'il fait actuellement, donc par exemple de l'arrivée du gel, de vents de tempête ou de chutes de neige [38]. Parmi les plantes alpines aussi, les premiers phénomènes de flétrissement ont été observés déjà en août, bien plus tôt que d'ordinaire [31].

Année record pour les bostryches

Alors que les plantes tendent à s'affaiblir sous l'action de la chaleur et de la sécheresse, ces conditions climatiques sont souvent favorables aux parasites et maladies des plantes. Elles leur permettent non seulement de proliférer et se répandre davantage, mais d'avoir aussi un plus grand impact sur des plantes déjà affaiblies et plus vulnérables [38].

En 2003, le bostryche typographe a infesté environ deux millions de mètres cubes de pins [40]. Ce volume correspond presque aux deux tiers de l'utilisation annuelle de bois de résineux en Suisse [41]. 17 000 nouveaux foyers de bostryches ont été recensés – un nombre jamais atteint antérieurement. Les conditions favorables au couvain ont permis au coléoptère de former jusqu'à trois générations [40]. Egalement d'autres espèces de bostryches se sont manifestées en force [41]. La tempête „Lothar“, en 1999, est considérée avoir donné le coup d'envoi de l'infestation massive par les bostryches. Après avoir atteint, comme attendu, un premier point culminant en 2001, leur nombre a de nouveau diminué sur le Plateau. L'été caniculaire a provoqué un revirement de cette tendance à la baisse et permis aux bostryches de battre un nouveau record. La situation s'est un peu détendue en 2004: l'infestation est comparable à celle des années 2001 et 2002 [35] (figure 13).

Figure 13: Quantité de bois bostryché et nombre de foyers de bostryches en Suisse de 1984–2003.



Source: Forstschutz-Überblick 2004 [35]

7. Agriculture

La météo joue un rôle central en matière de rendements agricoles: à cet égard, l'été 2003 a eu, selon la région, des effets considérables – négatifs, mais aussi positifs. Le temps sec et chaud au printemps a été en général favorable aux cultures maraîchères et pour les récoltes de baies; mais pendant les mois d'été, les hautes températures combinées au manque de pluie ont causé des problèmes à l'agriculture. Le nord, le nord-ouest et l'ouest de la Suisse ont subi plusieurs périodes sèches d'une durée d'au moins quinze jours avec tout au plus 5 mm de pluie. Les réserves d'eau dans le sol étant faibles déjà en février, le sol s'est fissuré en été (figure 14). En outre, comme il y avait peu d'eau à disposition pour l'évaporation, l'air s'est encore réchauffé davantage.

Figure 14: A cause de la sécheresse persistante de l'été 2003, le sol a manqué d'eau et s'est fissuré.



Photo: Michael Zimmermann, Agroscope FAL Reckenholz

Les conséquences dans les vergers et les champs, ainsi que pour les rendements fourragers, furent variables. Les rendements furent nettement inférieurs à la moyenne pour les céréales, les plantes fourragères et les pommes de terre [42]. En comparaison des années précédentes (1991–1999), les rendements considérés pour l'ensemble de la Suisse ont diminué d'environ un cinquième pour le blé, l'orge et les plantes fourragères, et d'à peu près 10% pour les pommes de terre [42]. A l'exception de quelques cantons, les rendements du maïs-grain furent plus élevés qu'entre 1991 et 1999, ceux du maïs d'ensilage furent en revanche nettement plus faibles. Les cultures fruitières ont subi une forte diminution du rendement avant tout pour les pommes [9]. Dans le nord-ouest et le nord jusqu'au canton de Schaffhouse, la récolte a été de

presque 20% inférieure à la moyenne [9]. La récolte de poires fut par contre supérieure à la moyenne de 1990–2000 dans de nombreux cantons.

Les pertes les plus importantes ont touché l'ouest et le nord de la Suisse, alors que d'autres régions ont bénéficié d'anomalies positives des rendements. L'Union suisse des paysans évalue les pertes totales à plus de 500 millions de francs [9]. Dans l'ensemble de l'Europe – les régions les plus touchées furent l'Europe méridionale, centrale et orientale – le dommage économique de la mauvaise récolte est estimé à 12,3 milliards de dollars [43].

En Suisse, la Confédération et les cantons ont pris une série de mesures au cours de 2003, que l'on peut qualifier rétroactivement d'efficaces. Le plus urgent était d'atténuer la pénurie dans l'approvisionnement du bétail. Les droits de douane sur le foin et les fourrages ont été abaissés ou suspendus. Le Conseil fédéral a décidé de compenser, lors des paiements directs de 2004, une partie des pertes subies. Dans les régions de montagne, des prairies ont pu être fauchées dix jours d'avance et du fourrage acheté a pu être utilisé sur les alpages. Dans les cas de rigueur, une aide a été consentie aux exploitations; lors de problèmes de liquidités, des prêts ont été accordés au titre de l'aide aux exploitations selon une procédure simplifiée. Les contingents laitiers ont pu être en partie transférés de la région de montagne à la région de plaine et des contingents non épuisés être reportés sur l'année laitière suivante. L'armée a effectué des transports d'eau et de foin vers les alpages [9].

8. Production d'électricité

La sécheresse et la chaleur ont eu des répercussions variables sur la production d'électricité. L'été 2003 a été particulièrement favorable aux installations solaires, mais défavorable par contre aux centrales éoliennes. Les centrales nucléaires ont été concernées en ce sens qu'elles ont dû réduire en partie leur puissance pour respecter les maxima de température de l'eau de refroidissement rejetée dans les cours d'eau. En outre, la capacité de refroidissement des centrales a été affectée, ce qui a entraîné des petites pertes de puissance en milieu de journée et l'après-midi.

En Suisse, les centrales hydrauliques produisent presque 60% de l'énergie électrique. Suivant le type de centrale, l'été caniculaire a eu des effets positifs ou négatifs sur la production de courant. Les centrales au fil de l'eau – avant tout les centrales sur les cours d'eau de plaine – ont subi des

pertes de production en raison des faibles débits. Par contre, les centrales à accumulation ont profité des excédents d'eau de fonte des glaciers. Au total, la production d'électricité hydraulique de 2003 ne fut que d'environ 0.8% inférieure à la moyenne des dix dernières années.

La consommation du pays a atteint un nouveau sommet en 2003 (figure 15). La consommation accrue pendant les mois d'été tient probablement à ce que davantage d'électricité a été utilisée pour produire du froid. Par ailleurs, la consommation d'énergie de chauffage a augmenté en février, octobre et décembre en raison du temps froid. La forte consommation du pays d'une part, et une production en légère baisse d'autre part, font figurer 2003 en deuxième position des plus faibles excédents d'exportation d'électricité des dix dernières années [6].

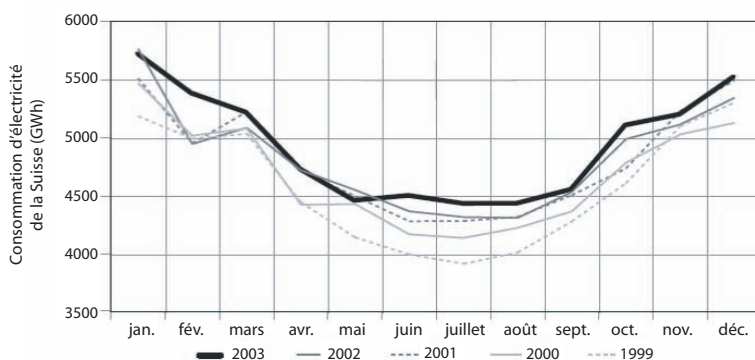


Figure 15: Consommation d'électricité de la Suisse en 2003, comparée à celle des années précédentes.

Source: Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Cahier 369 [6]

9. Regard vers l'avenir

Comme d'autres événements météorologiques extrêmes par le passé, l'été 2003 et ses conséquences ont placé les changements climatiques actuels au centre de l'actualité. Les politiciens, les médias et les scientifiques cherchent des réponses aux questions suivantes:

1. Dans quelle mesure existe-t-il un lien entre les changements climatiques actuels et l'été caniculaire? L'être humain est-il en partie la cause de cet été extrême?
2. Faut-il s'attendre à l'avenir à davantage de tels étés très chauds?
3. Partant des expériences faites pendant l'été caniculaire, dans quels secteurs des mesures s'imposent-elles pour atténuer à l'avenir les effets de vagues de chaleur?

Il ressort aujourd'hui d'études statistiques que même en tenant compte du réchauffement actuel, l'été 2003 sur le Plateau suisse fut un événement vraiment très rare. Si l'on part de l'idée que seule la moyenne de température se modifie avec les changements climatiques, la probabilité d'une telle période de chaleur est très faible (<0.0001). C'est pourquoi une hypothèse plausible explique les températures extrêmes de 2003 par un changement de la variabilité: le réchauffement climatique implique non seulement le déplacement de cette moyenne vers des températures plus chaudes, mais aussi une augmentation de ses variations [12] (figure 16). Les observations des températures des derniers quarante-cinq ans montrent effectivement une légère augmentation de la variabilité estivale. Cette aug-

mentation est en accord avec des modélisations du climat, mais elle n'est pas statistiquement significative [44].

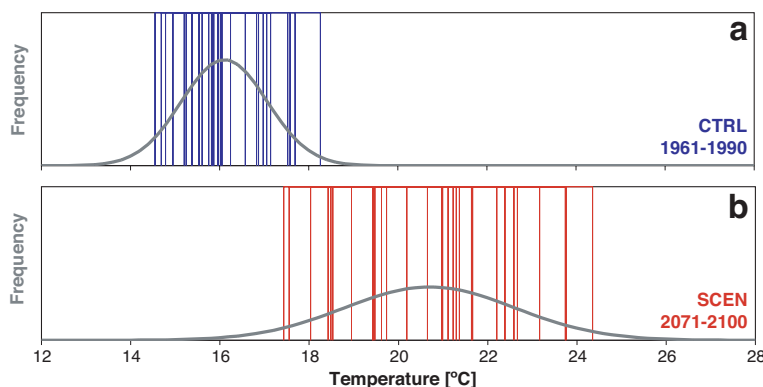
Des modélisations du climat futur, qui partent de la supposition que les émissions de gaz à effet de serre continueront d'augmenter, prévoient pour la période de 2071–2100 un climat d'été comparable à la canicule de 2003. Tandis que les températures montent, la quantité totale de précipitations diminue. De plus, de nombreux modèles, néanmoins pas tous, prévoient simultanément une augmentation des épisodes de précipitations violentes. Une comparaison des scénarios avec l'été 2003 aboutit à un résultat surprenant: à la fin du siècle, cet été caniculaire serait un été moyen, c'est-à-dire qu'à peu près un été sur deux serait au moins aussi chaud et sec [12,45]. Selon cette analyse, la probabilité d'étés encore plus torrides devient nettement plus grande.

Les climatologues sont aujourd'hui largement unanimes sur le fait que les changements climatiques tiennent au moins en partie à l'influence humaine, et en premier lieu à l'effet de serre anthropique. L'attribution des causes des événements extrêmes est beaucoup plus difficile. Les changements climatiques anthropiques ne déclenchent pas d'événements isolés et n'en sont jamais la seule cause. Par contre, ils peuvent en accroître la fréquence ou le risque. Dans quelle mesure l'être humain a-t-il augmenté en ce sens le risque d'un été caniculaire? Une étude à ce sujet estime que jusqu'ici, l'influence humaine a au moins doublé ce risque. Cette étude est la première tentative de quantifier l'influence humaine sur un événement climatique extrême [46].

Les réflexions sur l'avenir, tant au sujet des conséquences qu'à celui des mesures requises, doivent prendre en compte que les conditions cadres économiques et sociales changeront aussi. Les progrès technologiques, ou p.ex. une hausse des prix de l'énergie, peuvent avoir une grande influence sur les mesures requises. La faculté d'adaptation et d'apprentissage des individus et de la société jouera également un rôle. Il est toutefois très difficile de faire des pronostics au sujet de ces changements.

La question se pose aussi de savoir quels seraient les effets de deux étés torrides et secs successifs. On peut admettre que les impacts sur la végétation seraient particulièrement renforcés.

Figure 16: En bleu, les résultats de la modélisation pour la période de 1961–1990, en rouge, ceux pour 2071–2100.



Source: Schär et al. 2004 [12]

10. Résumé et recommandations

Les effets de l'été caniculaire

En 2003, la Suisse a fait l'expérience des conséquences de vagues de chaleur extrêmes. Il est inconcevable pour certains que la chaleur puisse devenir tout à coup un tourment ou même mettre la vie en danger. Il est inimaginable aussi que le Rhin se réchauffe au point que des dizaines de milliers de poissons périssent à cause des hautes températures de l'eau. Les glaciers ont réagi par une fonte record, le dégel du permafrost a provoqué une accumulation d'éboulements. Dans quels secteurs a-t-on constaté des impacts – sanitaires, écologiques ou financiers?

La canicule de l'été 2003 a été particulièrement lourde de conséquences pour la *santé*. Les nombreux décès causés par les hautes températures ont trouvé un large écho dans les médias et ont profondément affecté la population. Dans l'ensemble de l'Europe, des dizaines de milliers de personnes sont mortes – rien qu'en Suisse, on estime qu'il y eut presque mille décès de plus que d'ordinaire. Une partie des décès additionnels sont attribués à la persistance de fortes concentrations d'ozone et de poussière fine. La mauvaise qualité de l'air fut en outre à l'origine d'irritations des muqueuses, de réactions inflammatoires et de limitations de la fonction pulmonaire dans les groupes de personnes les plus sensibles.

L'été 2003 a eu un fort impact sur le système *hydrologique* en raison de la sécheresse extrême et de la chaleur torride. De bas niveaux des eaux superficielles et souterraines et des hautes températures de l'eau figurent parmi les principales conséquences. Ces changements ont entraîné des conditions qui ont mis en danger la vie de nombreuses populations de poissons. Ils ont eu des répercussions aussi sur l'être humain, en ce sens que l'eau a manqué dans de petits captages ne faisant pas partie d'un réseau d'approvisionnement en eau. D'autre part, les prélèvements d'eau par l'agriculture ont donné lieu à des conflits d'intérêts avec les services de protection des eaux.

Les *glaciers* ont réagi à l'été 2003 par une fonte record: leur perte de volume dans les Alpes est estimée à 5 à 10%. La forte diminution des glaciers du fait de la chaleur et de la sécheresse a été encore favorisée par la disparition précoce de la couverture de neige sur les glaciers. La fonte massive

a donné lieu à des débits élevés des cours d'eau alimentés par des glaciers.

Sur les flancs de roche pauvres en glace, le rayonnement et la chaleur qui ont régné pendant l'été 2003 ont dégelé le *permafrost* sur une épaisseur beaucoup plus grande que les années précédentes. Par la suite, un nombre exceptionnel d'éboulements se sont produits. Le fait qu'en 2004 aussi, le sous-sol ait dégelé bien plus profondément que les années précédant l'été caniculaire, signale un changement structurel de la couche de permafrost affectée par le dégel dans les régions considérées.

Pour *l'agriculture suisse*, 2003 a eu des conséquences variables et en partie contradictoires. Alors qu'au printemps la météo optimale a gratifié les cultures maraîchères de récoltes record et que les bonnes conditions en automne ont favorisé la vigne, la sécheresse en été a conduit en revanche à des pertes de récolte et à une pénurie de fourrage. Pour atténuer les difficultés d'approvisionnement, notamment en matière de fourrage, la Confédération et les cantons ont pris une série de mesures. Dans l'ensemble toutefois, 2003 n'a pas eu d'impacts négatifs à long terme sur l'agriculture suisse.

Le développement de la *végétation* naturelle a été beaucoup plus précoce que lors d'une année moyenne, ceci en particulier en été et en automne. De nombreuses plantes ont souffert de la sécheresse, ce qui a porté atteinte à leur croissance. La sécheresse persistante a entraîné en outre une forte recrudescence de l'infestation par les bostryches, qui avait connu une première vague après la tempête Lothar de 1999. Au Valais, on observe depuis quelque temps une forte augmentation du dépérissement des pins à basse altitude.

Recommandations pour des mesures

La Suisse, au même titre que toute l'Europe centrale, a été prise par surprise par l'été 2003. Des mesures n'ont été mises en œuvre qu'en réaction à la situation immédiate. Il est donc évident que des impacts négatifs n'ont pu être évités ou atténués qu'en partie. Pour être mieux prêt à l'avenir à faire face à de tels événements, il faut tirer parti des expériences de l'été 2003, afin d'identifier les secteurs critiques et de réagir aujourd'hui déjà de façon adéquate.

Mesures au niveau du secteur public

Mesures déjà lancées ou réalisées

- L'Office fédéral de la santé publique (OFSP) a déjà réagi aux impacts graves sur la santé et pris les premières mesures à cet égard. L'objectif primaire est l'information de la population sur le danger potentiel des vagues de chaleur. Un site Internet donne accès à des informations à ce sujet (www.canicule.ch). Le personnel soignant et le corps médical sont également rendus davantage attentifs aux dangers de la chaleur pour la santé, qui menacent avant tout les personnes âgées vivant seules, sans assistance sanitaire suivie.
- Une alarme canicule a été instituée comme instrument permettant d'alerter la population à l'approche de fortes chaleurs. MétéoSuisse informe les autorités cantonales par des „heat flash“ lorsque les températures dépassent un certain seuil pendant trois jours (et nuits) successifs.

Recommandations pour d'autres mesures

- **Exploitation plus durable de l'eau**
Jusqu'ici, pour une grande partie de la population suisse, avoir de l'eau allait de soi. La sécheresse de l'été 2003 a clairement montré que l'exploitation de l'eau doit faire l'objet de plus d'attention. Les multiples utilisations de l'eau par la population, l'agriculture, le secteur énergétique etc. exigent une exploitation de l'eau qui vise le long terme et la durabilité et qui puisse fonctionner aussi en cas de crise. Cela présuppose un monitoring de l'ensemble des ressources en eau.
- **Développement des réseaux de distribution d'eau**
Les petits captages doivent être progressivement intégrés dans des réseaux, afin que l'approvisionnement en eau soit assuré aussi lors de longues périodes de sécheresse.
- **Développement de systèmes d'irrigation**
Il est prévisible, en raison des changements climatiques, que des zones non irriguées jusqu'ici soient tributaires à l'avenir de systèmes d'irrigation. La Confédération et les cantons ont pour tâche d'examiner l'opportunité et les conditions d'utilisation de systèmes d'irrigation et de communiquer le savoir-faire y relatif.
- **Surveillance et sécurisation des zones de permafrost**
La déstabilisation du terrain dans les zones de permafrost exige une évaluation précise du potentiel de danger relatif aux laves torrentielles, éboulements et chutes de pierres dans les régions où des dommages peuvent se produire (agglomérations/infrastructures). A l'avenir, des événements plus conséquents sont possibles. A l'arrivée de vagues de chaleur, il faudra observer au besoin les zones de permafrost et en cas de danger, prendre des mesures de protection (p.ex. fermeture de chemins pédestres).
- **Protection de l'atmosphère**
La promotion, à l'échelon national et international, de mesures en matière d'hygiène de l'air est de première importance. A court terme, une réduction de la pollution atmosphérique par l'ozone, l'oxyde d'azote et la poussière fine entraîne une diminution des effets négatifs sur la santé. Les vagues de chaleur vont généralement de pair avec une altération de la qualité de l'air. A moyen et long terme, l'attention devra se porter sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, afin de ralentir aussi vite que possible le réchauffement global.
- **Plantation d'espèces d'arbres adaptées au climat**
La répartition naturelle des espèces d'arbres des forêts se déplacera sous l'effet des changements climatiques. Pour assurer une stabilité à long terme des effectifs, l'économie forestière devrait encourager des espèces d'arbres adaptées au site en même temps qu'à la sécheresse et à la chaleur. Dans les sites sujets à la sécheresse, comme par exemple les régions du Valais situées à basse altitude, il faudrait au moins réviser partiellement les objectifs de production.

Recommandation pour des mesures au niveau individuel

- **Adaptation du mode de vie**

Différentes mesures peuvent aider à supporter les vagues de chaleur, par exemple boire suffisamment, réduire son activité physique ou séjourner dans des locaux frais (pour plus de détails consulter la fiche d'information „Grande chaleur: rester au frais“ de l'OFSP, disponible sous www.canicule.ch).

- **Assistance aux personnes en danger**

Les personnes âgées vivant seules sont particulièrement menacées en cas de vagues de chaleur. Elles ne sont pas aptes à prendre des mesures pour se protéger contre la chaleur ou n'en ressentent pas la nécessité. L'assistance aux personnes âgées et nécessitant des soins est donc de première importance en cas de vagues de chaleur.

- **Economiser l'eau**

L'eau est une ressource précieuse qui même en Suisse n'est pas illimitée. Des mesures simples permettent d'économiser l'eau dans les ménages, par exemple l'installation d'appareils et équipements économes en eau et un comportement adéquat. Des économies de ce précieux liquide sont possibles aussi hors de la maison, p.ex. lors de l'arrosage du jardin ou du lavage de la voiture.

- **Economiser l'énergie**

Etant donné que les changements climatiques sont, en partie du moins, anthropiques, une utilisation plus judicieuse des énergies fossiles s'impose. Les mesures d'économie non seulement se justifient pour réduire les émissions

de gaz à effet de serre qui ont impact sur le climat, mais ont aussi à court terme des effets positifs sur la qualité de l'air. Les transports sont une source déterminante de polluants atmosphériques. Leur forte croissance compense en partie les succès des mesures techniques.

- **Augmentation de l'efficacité énergétique dans la construction d'habitations**

Dans la construction de maisons en propriété, un besoin croissant se fait sentir de construire en se souciant de l'avenir: cela exige non seulement de prendre en compte le climat à l'échéance de trente ou quarante ans, mais impose aussi certaines exigences en terme d'efficacité énergétique. Une construction adaptée aux circonstances et isolée en conséquence permet de réaliser des économies de chauffage et de rendre superflue l'installation de la climatisation.

Conclusion

Selon l'état actuel du savoir, il faut s'attendre à ce que les changements climatiques entraînent à moyen terme une augmentation des vagues de chaleur. Des mesures spécifiques – entre autre une exploitation plus réfléchie de l'eau, la réduction de la pollution atmosphérique et des mesures de prévention dans le secteur de la santé – peuvent atténuer les effets négatifs de périodes de chaleur. Il est donc important de mettre en œuvre ces mesures et de les compléter en fonction des nouvelles données issues de la recherche. Mais cela ne dispense pas de la tâche à long terme consistant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le climat est bel et bien en train de changer – il s'agit de ralentir cette évolution aussi vite que possible.

Références bibliographiques

- [1] Subak S., Palutikof J.P., Agnew M.D., Watson S.J., Bentham C.G., Cannell M.G.R., Hulme M., McNally S., Thornes J.E., Waughray D. and Woods J.C., 2000: The impact of the anomalous weather of 1995 on the U.K. economy. *Climatic Change* 44: 1–26.
- [2] Luterbacher J. und MitarbeiterInnen, 2005: Wie aussergewöhnlich war der Hitzesommer 2003 im Vergleich zu den letzten Jahrhunderten? Abstract zum Hitzesommer 2003.
- [3] Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M. and Wanner H., 2004: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499–1503.
- [4] Büntgen U., Frank D.C., Nievergelt D. and Esper J.: Alpine summer temperature variations, AD 755–2004. Zur Publikation eingereicht.
- [5] Bader S., 2004: Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003. Arbeitsbericht Nr. 200, MeteoSchweiz.
- [6] BUWAL, BWG, MeteoSchweiz, 2004: Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.
- [7] Rebetez M., 2004: Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps, *Climate Research* 27:45–50.
- [8] Casty C., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. and Böhm R., 2005: Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *Int. J. Climat.*, 25, 1855–1880, DOI: 10.1002/joc1216.
- [9] Keller F. and Fuhrer J., 2004: Die Landwirtschaft und der Hitzesommer 2003. *AGRARForschung* 11(9): 403–410.
- [10] Rebetez M., Mayer H., Dupont O., Schindler D., Gartner K., Kropp J. & Menzel A., 2005. Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest Sciences*, submitted.
- [11] MeteoSchweiz, 2004: Jahreswitterungsbericht 2003. MeteoSchweiz, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie.
- [12] Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Haeberli C., Liniger M.A. and Appenzeller C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427:332–336.
- [13] Xoplaki E., Luterbacher J., Paeth H., Dietrich D., Steiner N., Grosjean M. and Wanner H., 2005: European spring and autumn temperature variability and change of extremes over the last half millennium, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15713 (DOI:10.1029/2005GL023424).
- [14] Jankowski T., Livingstone D.M., Bührer H., Forster R. and Niederhauser P., 2005: Consequences of the 2003 European heatwave for lakes: implications for a warmer world. Submitted to *Geophysical Research Letters*.
- [15] Haeberli W., Paul F., Gruber St., Frauenfelder R., Hoelzle M., Käab A., Machguth H., Noetzli J., Rothenbühler C., Vonder Mühl D. and Zemp M., 2005: Effects of the extreme summer 2003 on glaciers and permafrost in the Alps. *Geograph. Inst., Universität Zürich*.

- [16] Gruber S., Hoelzle M. and Haeberli W., 2004: Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L13504
- [17] Keusen H.R., 2005: Felstemperaturen und Felsstürze im Hochgebirge. Geotest AG, Bern.
- [18] Rist A. and Phillips M., 2004: Permafrost – Taut die Schweiz auf? Newsletter Naturgefahren 01 / Juli 2004.
- [19] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL, 2004: Sommersmog. Stellungnahme der Eidg. Kommission für Lufthygiene. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- [20] Ordóñez C., Mathys H., Furger M., Henne S., Hüglin C, Staehelin J. and Prévôt A.S.H., 2005: Changes of daily surface ozone maxima in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1187–1203.
- [21] Grize L., Huss A., Thommen O., Schindler C. and Braun-Fahrlander C., 2005: Heat wave and mortality in Switzerland. *Swiss Med Wkly* 2005; 135:200–205.
- [22] United Nations Environment Programme (UNEP), 2004. Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. 2nd issue of Early Warning on Emerging Environmental Threats. United Nations Environment Programme.
- [23] Kovats S., Wolf T. and Menne B., 2004. Heatwave of August 2003 in Europe: provisional estimates of the impact on mortality. *Eurosurveillance Weekly* 2004; 8(11): 11/03/2004.
- [24] Thommen Dombois O., 2005: Direkte und indirekte Auswirkungen der Klimaänderung auf die Gesundheit. Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel.
- [25] Thommen Dombois O. & Braun-Fahrlander C., 2004: Gesundheitliche Auswirkungen der Klimaänderung mit Relevanz für die Schweiz. Literaturstudie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Bundesamtes für Gesundheit (BAG).
- [26] Zeltner T., 2005. Referat anlässlich der Medienkonf. v. 24.5.2005: Heisse Tage – Kühle Köpfe.
- [27] Fischer P.H., Brunekreef B. and Lebet, E., 2004: Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands, *Atmos. Environ.*, 38, 1083–1085.
- [28] Stedman J.R., 2004: The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave, *Atmos. Environ.*, 38, 1087–1090.
- [29] Gehrig R., 2005: The influence of the hot and dry summer 2003 on the pollen season in Switzerland. *Aerobiologia*, submitted.
- [30] Gehrig R., Clot B. and Köhler B. 2004: The influence of the hot and dry summer 2003 on the pollen season in Switzerland: Does it show a future scenario of climate change? XI International Palynological Congress, Polen (Asoc. Palinol. Leng. Esp.) Vol. 14, 93–94.
- [31] Hiltbrunner E. & Körner C., 2005: Alpine Pflanzen im Hitzesommer 2003. Univ. Basel.
- [32] Jolly W.M., Dobbertin M., Zimmermann N.E. and Reichstein M., 2005: Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the European Alps. Draft Version.

- [33] Vollenweider P., Laverrière M., Schneiter G., Rihm B., Menard T., Schaub M. and Günthardt-Goerg M.S., 2005: Diagnosis of drought and ozone effects on the foliage of mature *Fagus sylvatica* L. trees during the summer of 2003. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- [34] BUWAL, WSL, 2005: Waldbericht 2005. Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- [35] Meier F., Engesser R., Forster B. und Odermatt O., 2005: Forstschutz-Überblick 2004. Herausgeber: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- [36] Dobbertin M., Rigling A. and Graf Pannatier E., 2005: Der Einfluss von Trockenheit, i.spez. des Hitzesommers 2003, auf die grossflächigen Absterbeprozesse in den Walliser Waldföhrenwäldern. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- [37] Burga Conradin A., 2005: Unkraut-Monitoring 2001–2005: der Hitzesommer 2003. Geograph. Inst., Universität Zürich.
- [38] Defila C., 2004: Der Sommer und Herbst 2003 aus phänologischer Sicht. Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen 155 (2004) 5: 142–145.
- [39] Zingg A., Cherubini P., Rigling A. and Bürgi A., 2005: Wachstumsreaktionen von Buche, Fichte und Tanne auf Sommertrocknis: Analyse alter Daten zur Waldentwicklung. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- [40] Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2004: Pressemitteilung vom 22. März 2004: 2003: So viele Borkenkäfer wie noch nie.
- [41] Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2005: Waldschutz Aktuell – 1/2005.
- [42] Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), 2003: Agrarbericht 2003 des Bundesamtes für Landwirtschaft.
- [43] SwissRe, 2004: Natur- und Man-made-Katastrophen im Jahr 2003: Zahlreiche Todesopfer, vergleichsweise moderate Versicherungsschäden. Sigma 1(1), 10.
- [44] Scherrer S.C., Appenzeller C., Liniger M.A. and Schär C., 2005: European temperature distribution changes in observations and climate change scenarios, Geophys. Res. Lett., 32, L19705, doi:10.1029/2005GL024108.
- [45] Beniston M., 2004: The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. Geophys. Res. Letters, 31, L02202
- [46] Stott P.A., Stone A.D. and Allen M.R., 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. Nature, 432, 610 – 614 doi:10.1038/nature03089.

