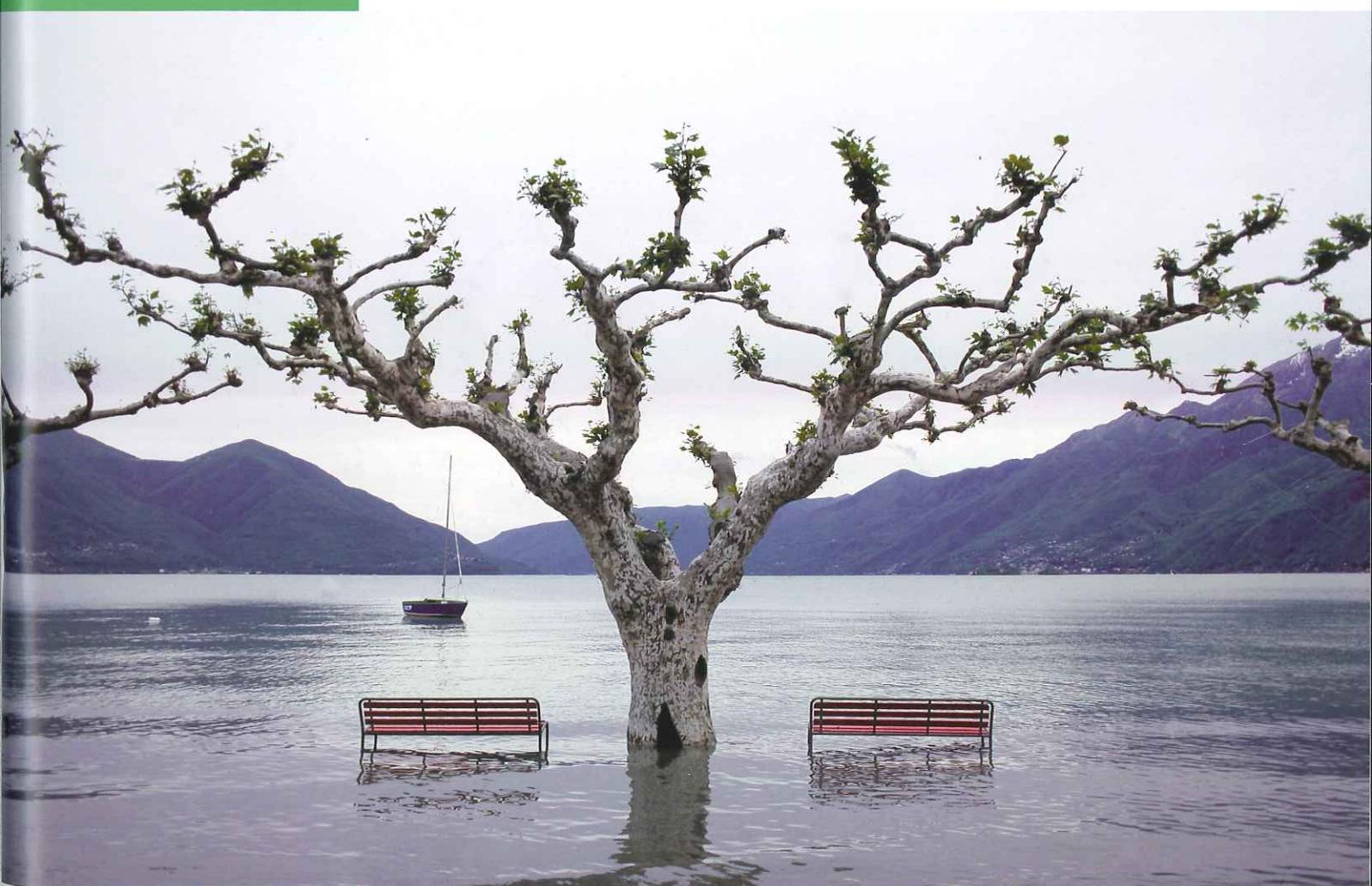


## Evénements extrêmes et changements climatiques



# OcCC

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

---

## **Événements extrêmes et changements climatiques**

**Editeur et distribution:**

OcCC, Bärenplatz 2, 3011 Berne  
tél.: (+41 31) 328 23 23  
fax: (+41 31) 328 23 20  
e-mail: [occc@sanw.unibe.ch](mailto:occc@sanw.unibe.ch)

Publié à Berne en Septembre 2003

Numéro ISBN: 3-907630-24-6

# Table des matières

<b>Editorial</b>	4
<b>Evénements extrêmes et changements climatiques: état du savoir et recommandations de l'OcCC</b>	7
<b>Eventi estremi e cambiamenti climatici: conoscenze e raccomandazioni dell'OcCC</b>	11
<b>Introduction</b>	15
<b>1<sup>e</sup> partie</b>	
<b>Les bases scientifiques</b>	17
1.1. Evénements extrêmes, dangers naturels et catastrophes naturelles: clarification des notions	18
1.2. Observation des changements climatiques et estimation des changements futurs	20
1.3. Evénements extrêmes en Suisse	23
1.3.1. Caractérisation des événements climatiques extrêmes	23
1.3.2. Un aperçu des cinq cents dernières années	25
1.4. La détection des tendances se heurte à des limites	29
1.5. Méthodologie des scénarios climatiques régionaux	32
1.6. Les événements extrêmes dans la perspective de l'être humain	38
1.6.1. Influencer sur les risques et sur les dommages	38
1.6.2. Evolution des dommages dus aux crues, glissements de terrain et avalanches	42
1.6.3. Evolution des dommages de l'assurance contre les éléments naturels	45
1.6.4. Les événements extrêmes dans la perspective du secteur des assurances	49
<b>2<sup>e</sup> partie</b>	
<b>L'état des connaissances</b>	53
2.1. Extrêmes de température	54
2.2. Le risque de gel	57
2.3. La sécheresse	60
2.4. Les incendies de forêts	63
2.5. Les fortes précipitations	67
2.6. La grêle	71
2.7. Les crues	75
2.8. Les mouvements de masse: glissements de terrain et éboulements	79
2.9. Les avalanches	83
2.10. Les tempêtes d'hiver	87
<b>Annexes</b>	91
A1. Impressum	92
A2. Crédits photographiques	93
A3. Membres de l'OcCC	94



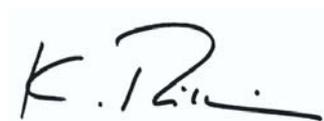
Depuis quelques années, des crues, des tempêtes extrêmes et de dangereuses avalanches viennent à tout moment nous effrayer. La météo perd-elle la tête?

En 2000, l'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) a abordé la question du lien entre l'accumulation de tels événements et les changements climatiques et s'est demandé ce qu'il convenait de faire. Gian-Reto Plattner, qui était alors président, a lancé l'idée d'une publication sur cette question qui intéresse de larges cercles de la population et nombre de journalistes et de décideurs. Décision prise – mission accomplie: la présente publication fait le tour des connaissances scientifiques et des événements météorologiques les plus importants ayant trait à cette question. Quelles conclusions tirer maintenant de ces connaissances et quelles mesures prendre?

En théorie des jeux, le théorème du minimax s'applique aux jeux de hasard pour optimiser un choix de stratégies élémentaires de façon à minimiser le gain maximal de l'adversaire. Dans notre cas, il ne s'agit pas d'un jeu, mais d'un combat contre les caprices présumés de la nature. Les enjeux sont donc considérables et l'aire de jeu englobe le monde entier. La règle du minimax exige de choisir la stratégie qui minimise le plus grand dommage possible. Les décisions politiques devraient se tenir à cette règle. A la différence de la théorie des jeux, ce sont ici des dommages à long terme qu'il s'agit de minorer.

Les scientifiques débattront et feront des recherches encore pendant des décennies sur les causes exactes des changements climatiques. Mais les décideuses et décideurs sont appelés à prendre maintenant des mesures préventives. En page 7 de ce rapport (page 11 en italien), l'OcCC énonce des recommandations sans équivoques. La construction d'ouvrages anti-avalanche, de galeries de protection contre les chutes de pierres, de bassins de rétention et de digues ne suffit pas. Bien sûr ces mesures directes sont nécessaires pour limiter les dommages. Mais il faut prendre en premier lieu les mesures qui, outre leur rôle dans la lutte contre les changements climatiques et dans la protection contre les événements extrêmes, ont des effets positifs aussi dans d'autres domaines. C'est ainsi seulement que la planète Terre sera encore habitable dans un lointain avenir. Tandis que des situations gagnant-gagnant seront créées déjà à court terme, résultant par exemple d'une moindre consommation de combustibles et carburants fossiles ou de la promotion des énergies renouvelables.

Le 9 juillet 2003, la Suisse a apposé sa signature sur le Protocole de Kyoto. C'est un acte politique important, qu'il faut maintenant concrétiser. Il faudra rappeler aux partis et aux représentants de l'économie leurs promesses. La situation est grave. Les belles paroles doivent être suivies d'actes. La présente publication rend compte des risques qui menacent.



Dr Kathy Riklin, conseillère nationale  
Présidente de l'OcCC



# Evénements extrêmes et changements climatiques: état du savoir et recommandations de l'OcCC

Les membres de l'OcCC

On entend par événements extrêmes des événements météorologiques et naturels rares, qui s'écartent fortement de la moyenne. Ils peuvent causer d'énormes dommages. On parle de catastrophe naturelle lorsque la population touchée ne peut pas maîtriser le sinistre par ses propres forces. Le présent rapport traite des catégories d'événements extrêmes les plus importantes pour la Suisse, à savoir les extrêmes de température, la sécheresse, le gel, les incendies de forêts, les fortes précipitations, la grêle, les crues, les mouvements de masses, les avalanches et les tempêtes d'hiver, et s'interroge sur leur lien avec les changements climatiques.

D'une part, les événements extrêmes et les catastrophes naturelles sont des éléments naturels du climat de montagne. Au cours des millénaires, des glissements de terrain et des inondations ont façonné le paysage et formé les structures caractéristiques de nos vallées et cours d'eau. Même notre infrastructure moderne actuelle ne nous assure qu'une protection incomplète contre les événements extrêmes. Notre civilisation doit souvent se borner à délimiter les zones dangereuses, à prendre à temps des mesures pour atténuer les effets négatifs et à venir rapidement en aide aux victimes.

D'autre part, les dommages que les intempéries ont causés ces dernières décennies en Europe centrale sont énormes. Selon des estimations de la Swiss Re, les dommages causés aux économies nationales par les tempêtes Lothar et Martin se montent à 31 milliards de francs suisses, ceux provoqués en Suisse, France et Italie par les inondations et glissements de terrain d'octobre 2000 à 9 milliards de francs et ceux causés en Europe par les inondations de juillet et août 2002 à 23 milliards de francs (niveau des prix de 2002). Ces chiffres démontrent l'importance considérable des événements extrêmes en Europe et dans l'espace alpin. Si les changements climatiques devaient entraîner des modifications du caractère et de la fréquence des événements extrêmes, ils pourraient se révéler lourds de conséquences.

## Etat du savoir

La relation entre climat, événements extrêmes et ampleur des dommages est très complexe et ne peut être étudiée que dans un vaste contexte interdisciplinaire. En l'état actuel du savoir, il est possible de tirer les conclusions générales suivantes:

- La température globale moyenne est montée de  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  au cours du siècle dernier. Ce réchauffement est attribuable dans une large mesure aux activités humaines. Pour le 21<sup>e</sup> siècle, les modèles climatiques prévoient une croissance accélérée de la température globale près du sol, située entre  $1.4^\circ\text{C}$  et  $5.8^\circ\text{C}$ . L'ensemble du cycle hydrologique est concerné par ces changements, aussi attend-on des changements prononcés du régime des précipitations.
- La probabilité et la distribution spatiale des événements extrêmes se modifieront graduellement avec les changements climatiques. L'ampleur et le caractère de ces modifications différeront selon le lieu et le type d'événement extrême. Il n'est pas encore possible d'évaluer cette évolution quantitativement.
- On observe actuellement une accumulation de catastrophes naturelles. Cette accumulation pourrait être due au hasard, provenir de variations naturelles à long terme du climat ou être la conséquence de changements climatiques provoqués par l'être humain. Pour des raisons fondamentales, il est difficile, voire impossible de démontrer ou d'exclure une tendance de la fréquence d'événements extrêmes rares sur une base statistique fiable. Il est possible que des changements à long terme ayant trait à des événements extrêmes ne soient détectables que lorsqu'ils auront atteint une ampleur considérable et fait de gros dégâts.
- Par contre, il est possible d'obtenir des données statistiques sur les tendances d'événements «intenses». On peut montrer par exemple que les fortes précipitations (qui ne causent en général pas de dommages) ont nettement augmenté depuis le début du siècle.

cle. La pluviométrie est également nettement en hausse depuis le début du siècle sur presque tout le territoire suisse. Bien que ces résultats ne puissent pas être transposés directement aux événements extrêmes, ils constituent néanmoins un indice des changements sensibles que le cycle hydrologique a subis ces derniers cent ans.

- La compréhension actuelle des processus permet d'admettre que la fréquence et l'intensité de certains événements extrêmes (vagues de chaleur, fortes précipitations et crues pendant le semestre d'hiver, sécheresse en été au sud des Alpes et dans les vallées intra-alpines, glissements de terrain) augmenteront sous l'influence des changements climatiques. Cette crainte est étayée aussi par des simulations au moyen de modèles du climat. En outre, la fréquence des jours de gel et des vagues de froid diminuera.
- A part les facteurs climatiques, des changements sociaux détermineront aussi l'évolution future des dangers découlant des événements extrêmes. La concentration croissante de bâtiments et d'infrastructures jusque dans des zones exposées a eu par le passé des répercussions notables sur les montants des dommages. Des changements futurs de l'utilisation du territoire pourraient atténuer ou renforcer les facteurs strictement climatiques.

### Recommandations de l'OcCC

De l'avis de l'OcCC, les politiques, l'Administration, l'économie et les scientifiques doivent intervenir au niveau des mesures de protection contre les événements extrêmes, à celui des mesures contre les changements climatiques dus aux activités humaines et à celui de la communication.

La planification et la mise en œuvre des mesures doivent tenir compte de l'évolution dynamique des menaces et se dérouler dans le sens du développement durable (écologique, économique, social). Il faut privilégier des mesures qui, outre leur effet contre les changements climatiques et de protection contre les événements extrêmes, ont aussi des retombées positives dans d'autres domaines (win-win) et laissent, une fois prises, une marge de manœuvre aussi grande que possible (flexibilité).

### (a) Mesures de protection contre les événements extrêmes

La nécessité d'agir pour se protéger des événements extrêmes est donnée aussi sans changements climatiques, en raison de la concentration croissante de biens toujours plus vulnérables et d'un besoin de sécurité allant en augmentant. Dans la prise de conscience des changements climatiques, les menaces, les objectifs de protection et les risques résiduels admis devraient être adaptés périodiquement aux conditions changeantes. Il faudrait aussi envisager des solutions aussi flexibles que possible. A moyen terme, des méthodes d'évaluation et de planification devront être développées, qui soient en mesure de quantifier le danger résultant d'un climat changeant.

Un renforcement des mesures s'impose pour se protéger contre des événements sur l'évolution desquels il est possible aujourd'hui déjà d'obtenir des données qualitatives:

- Fortes précipitations, crues et glissements de terrain: Le niveau actuel de compréhension des processus et les modélisations font attendre une augmentation de l'intensité des fortes précipitations et une accélération des débits des cours d'eau pendant le semestre d'hiver. Elles devraient être prises en considération dans l'évaluation des risques, la planification des mesures de protection (reforestations, ouvrages de protection, surfaces de rétention) et l'aménagement du territoire. Il faut tenir compte aussi des changements qui pourraient survenir jusqu'à l'horizon temporel de la mesure planifiée. Il en va de même pour évaluer des zones menacées par les glissements de terrain.
- Vagues de chaleur: Les changements climatiques pourraient entraîner des extrêmes de température plus élevés. Il faut s'attendre à une augmentation des décès liée à l'apparition de températures extrêmement hautes. Des mesures ayant trait aux bâtiments (p.ex. pare-soleil, isolation, écran de verdure) peuvent améliorer le confort et l'efficacité énergétique. Les extrêmes de température plus élevés stressent le milieu aquatique, la végétation et la faune.
- Permafrost: Le réchauffement provoquera un recul du permafrost. La stabilité des pentes diminuera dans les régions concernées. Les pentes et les bâtiments doivent y être surveillés.

- **Gel:** La fréquence des jours de gel diminuera probablement avec les changements climatiques. Comme les effets dépendent aussi bien de la température que de l'évolution de la végétation, on ne sait pas au juste vers quoi ils évolueront à l'avenir. De façon générale, le risque de dégâts de gel devrait diminuer si l'on maintient la date des semences ou de la plantation.

Il n'est pas possible pour l'heure de fournir des précisions sur l'évolution future des sécheresses, des incendies de forêt, du föehn, des tempêtes d'hiver, de la grêle et des avalanches. Il importe de suivre attentivement les progrès de la recherche dans ces domaines.

### **(b) Mesures contre les changements climatiques provoqués par l'être humain**

Des incertitudes notables subsistent quant aux interactions, au déroulement, à l'orientation et à l'ampleur des changements climatiques et des événements extrêmes. Les décisions en cas d'incertitude devraient s'appuyer sur la règle du minimum, selon laquelle il faut choisir la stratégie qui minimise le plus grand dommage possible.

Les efforts contre les causes des changements climatiques provoqués par l'être humain doivent être poursuivis et coordonnés à l'échelon national et international entre la recherche, l'Administration, l'économie et la politique. Du point de vue scientifique, une réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau d'avant 1950 est nécessaire à long terme. Le Protocole de Kyoto est un pas important en vue de coordonner les efforts internationaux. Les engagements de réduction pris par la Suisse doivent être remplis par la loi sur le CO<sub>2</sub>, la loi sur l'énergie et des mesures additionnelles<sup>1</sup>. Il devrait être ainsi possible de réduire d'ici 2010, comme prévu, les émissions de CO<sub>2</sub> de 10% par rapport à 1990. Vu les effets attendus des changements climatiques, la Suisse devrait s'engager en faveur d'objectifs efficaces de protection du climat, lors des négociations sur la procédure à adopter après la première période d'engagement du Protocole de Kyoto. La Suisse profitera aussi des mesures prises contre les changements climatiques.

En plus de la loi sur le CO<sub>2</sub> et de la loi sur l'énergie, d'autres mesures sont nécessaires en Suisse pour lutter contre les changements climatiques provoqués par l'être humain et favoriser

des styles de vie et une économie produisant peu d'émissions. Par exemple, des processus et relations plus transparents dans l'économie privée encourageraient le développement durable en général et les investissements compatibles avec le climat en particulier. Une législation fixant des conditions-cadres appropriées pourrait soutenir une évolution en ce sens. Des partenariats entre l'Etat et l'économie privée ou l'industrie devraient être constitués et encouragés pour assurer la mise en œuvre des mesures de protection du climat et des stratégies d'adaptation. Les technologies «propres» et notamment les énergies renouvelables devront assumer un rôle porteur à l'avenir.

### **(c) Communication**

Les mesures de lutte contre les changements climatiques provoqués par l'être humain et de protection contre les événements extrêmes doivent être planifiées à long terme, à un moment où il n'existe encore que des prévisions qualitatives sur le climat futur. La sensibilisation de la population, des politiques et des milieux économiques est donc très importante. Les médias et les personnalités dirigeantes jouent ici un rôle déterminant.

Dans les comptes-rendus sur les changements climatiques et les événements extrêmes, il faut être attentif au fait que les événements extrêmes ne sont pas des indicateurs fiables du climat. Les changements climatiques sont mieux mis en évidence par d'autres indicateurs (réchauffement, fonte des glaciers). L'association, dans l'esprit du public, entre événements extrêmes et changements climatiques comporte le danger que la problématique du climat soit dramatisée en des périodes où les événements extrêmes sont nombreux et sous-estimée en des temps où ils se font rares.

Une augmentation de la fréquence de certains événements extrêmes (p.ex. les fortes précipitations, les inondations) concorde avec les pronostics des modèles climatiques et notre compréhension des processus physiques. Mais des événements extrêmes isolés ne peuvent pas être attribués causalement aux changements climatiques.

### **(d) Recherche**

Il existe aujourd'hui déjà une base de savoir suffisante pour prendre des mesures de lutte contre les changements climatiques et de protection

contre les événements extrêmes. Mais la recherche accroîtra encore à l'avenir le niveau de connaissance et réduira les incertitudes.

L'approche des événements extrêmes requiert des analyses intégrant tous leurs aspects sous l'angle des sciences naturelles, sociales, techniques et économiques. Des réseaux de mesures fiables sont essentiels à la détection précoce et à l'analyse. Ils constituent l'épine dorsale des systèmes d'alarme et la base de données permettant de déceler des changements à long terme. L'analyse minutieuse des événements observés peut indiquer quels processus ont conduit à tel ou tel événement, si les conditions sont données pour d'autres événements semblables et si les changements climatiques en modifient la fréquence. Les modèles mathématiques et les simulations sur ordinateur gagnent en importance au niveau international pour les prévisions et alarmes à court terme. Ce sont aussi des instruments appropriés pour évaluer et quantifier les dangers sous un climat futur.

Des projets de recherche en Suisse et à l'étranger (NCCR-Climat, projets de recherche de l'UE etc.) ont aidé à mieux comprendre les changements climatiques et les événements extrêmes. Le lien entre le climat et ces événements n'est toutefois encore que partiellement compris. La recherche future doit s'orienter sur le plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)<sup>2,3,4,5</sup> et prendre

en considération les données locales et les structures de l'espace alpin. Elle doit avoir notamment pour but de discerner à temps les effets sur la société et l'économie et d'indiquer des contre-mesures possibles. Les connaissances les plus récentes doivent alimenter en permanence les processus dynamiques de planification et de décision. La Suisse doit continuer de participer activement aux programmes scientifiques internationaux et promouvoir le débat entre la science, la politique, l'économie et l'Administration.

- 1 Par exemple le programme SuisseEnergie, qui encourage les énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 5 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.

# Eventi estremi e cambiamenti climatici: conoscenze e raccomandazioni dell'OcCC

I membri dell'OcCC

Per eventi estremi si intendono gli eventi meteorologici e naturali rari che divergono fortemente dalla media. Tali eventi possono causare danni ingenti. Si parla di catastrofi naturali quando il ripristino della situazione implica sforzi superiori alle forze della popolazione colpita. Il presente rapporto analizza le categorie di eventi estremi più importanti per la Svizzera e la loro relazione con i cambiamenti climatici (temperature estreme, siccità, gelo, incendi di boschi, forti precipitazioni, grandine, inondazioni, movimenti di materiale, frane e tempeste invernali).

Da un canto, gli eventi estremi e le catastrofi naturali sono una componente naturale del clima alpino. Nel corso dei millenni gli smottamenti e le alluvioni hanno formato il paesaggio, scolpendo il profilo caratteristico delle valli e dei letti dei fiumi. Tuttavia, nemmeno le moderne infrastrutture ci proteggono a sufficienza dagli eventi estremi. La nostra civilizzazione si deve sovente limitare a definire le zone a rischio, ad attutire le ripercussioni negative con provvedimenti adottati tempestivamente e a soccorrere le vittime con aiuti immediati.

Dall'altro, le conseguenze degli eventi climatici che si sono abbattuti sull'Europa centrale negli ultimi decenni sono impressionanti. Secondo le stime di Swiss Re, le tempeste Lothar e Martin hanno causato danni per 31 miliardi di franchi, per 9 miliardi le inondazioni e le frane che nell'ottobre 2000 hanno colpito Svizzera, Francia e Italia e per 23 miliardi le alluvioni che nei mesi di luglio e agosto 2002 hanno interessato l'Europa (livello dei prezzi 2002). Tali cifre confermano il ruolo primario che gli eventi estremi assumono in Europa e nella regione alpina. Se i cambiamenti climatici generassero una mutazione del loro carattere e della loro frequenza, le conseguenze sarebbero altrettanto gravi.

## Conoscenze

La relazione tra clima, eventi estremi e portata dei danni è estremamente complessa. La sua analisi concerne un vasto campo di ricerca interdisciplinare. In base alle conoscenze attuali, si

possono formulare in via generale le conclusioni seguenti:

- la temperatura media globale nel secolo scorso è aumentata di  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . Questo riscaldamento è ampiamente ascrivibile alle attività umane. I modelli climatici prevedono per il XXI secolo un aumento accelerato delle temperature medie globali al suolo di  $1,4^{\circ}\text{C} - 5,8^{\circ}\text{C}$ . Tali cambiamenti concernono anche l'intero circolo dell'acqua e ci si attendono sensibili cambiamenti del regime delle precipitazioni;
- con i cambiamenti climatici, la probabilità e la distribuzione geografica degli eventi estremi registrano uno spostamento graduale. La portata e la natura dei cambiamenti variano in funzione del luogo e del genere dell'evento. Non è possibile fornire una stima quantitativa di detta evoluzione;
- attualmente si osserva un'intensificazione delle catastrofi naturali, che potrebbe essere casuale, imputabile a variazioni climatiche naturali a lungo termine oppure una conseguenza dei cambiamenti climatici antropici. Per ragioni di principio è difficile o addirittura impossibile comprovare o escludere con certezza statistica una tendenza nella frequenza degli eventi estremi rari. È ipotizzabile che i cambiamenti a lungo termine degli eventi climatici potranno essere comprovati solo quando avranno raggiunto una portata considerevole e causato danni ingenti;
- si possono per contro formulare considerazioni statisticamente consolidate sulle tendenze relative agli eventi "intensivi". Si evince, per esempio, che le forti precipitazioni (che di solito non causano danni) sono sensibilmente aumentate dall'inizio del secolo. Anche le quantità delle precipitazioni in inverno hanno registrato un aumento quasi in tutta la Svizzera dall'inizio del secolo. Benché non possano essere relazionati direttamente con gli eventi estremi, questi dati costituiscono un indizio per i

- cambiamenti palesi subentrati nel circolo dell'acqua negli ultimi cento anni;
- la conoscenza attuale dei processi induce a credere che la frequenza e la forza di alcuni eventi estremi (ondate di caldo, forti precipitazioni e inondazioni nel periodo invernale, siccità estiva a Sud delle Alpi e nelle valli alpine, scoscendimenti) aumenteranno con il cambiamento del clima. Il timore è avvalorato dai calcoli basati su modelli climatici. D'altro canto, diminuirà la frequenza delle giornate di gelo e delle ondate di freddo;
  - le mutazioni future dei pericoli generati dagli eventi estremi saranno determinate, oltre che da fattori puramente climatici, anche da cambiamenti sociali. La crescente concentrazione di edifici e infrastrutture anche nelle regioni esposte ha comprovatamente inciso in passato sui costi dei danni. I futuri cambiamenti dell'utilizzazione del territorio potrebbero indebolire o rafforzare i fattori puramente climatici.

### Raccomandazioni dell'OcCC

L'OcCC individua una necessità di intervenire sul piano politico, amministrativo e della ricerca sul fronte della comunicazione e dei provvedimenti di protezione contro gli eventi estremi e contro i cambiamenti climatici causati dall'uomo.

I provvedimenti vanno pianificati e applicati sulla base di un quadro dei pericoli in mutazione dinamica e nel senso della sostenibilità (ecologica, economica, sociale). Occorre privilegiare le misure che, oltre ad essere efficaci nella lotta ai cambiamenti climatici e ai fini della protezione dagli eventi estremi, si ripercuotono positivamente anche in altri settori (win-win) e concedono uno spazio di manovra possibilmente ampio anche dopo la loro realizzazione (flessibilità).

#### (a) *Provvedimenti di protezione contro gli eventi estremi*

La necessità di intervenire a sostegno della protezione dagli eventi estremi è dettata dalla crescente concentrazione dei valori, dalla sensibilità ai danni e dal maggior bisogno di protezione a prescindere dai cambiamenti climatici. Tenuto conto dei mutamenti del clima, i piani dei pericoli, gli obiettivi della protezione e i rischi resi-

dui vanno adeguati periodicamente alle condizioni in evoluzione e si dovrebbero cercare soluzioni che offrono la maggiore flessibilità possibile. A medio termine è opportuno mettere a punto nuovi metodi di misurazione e progettazione in grado di quantificare il pericolo insito in un clima mutante.

Bisogna intervenire maggiormente sul fronte della protezione dagli eventi per i quali attualmente esistono dati qualitativi sulla futura evoluzione.

- Forti precipitazioni, inondazioni e smottamenti: in base alle conoscenze attuali dei processi e ai modelli si prevede un aumento dell'intensità delle forti precipitazioni e una formazione accelerata del deflusso nel periodo invernale. Di questi fattori si dovrà tenere conto nell'ambito della valutazione dei rischi, della pianificazione delle misure di protezione (rimboschimenti, ripari, superfici di contenimento) e della pianificazione del territorio. Non si dovranno nemmeno trascurare i cambiamenti che potrebbero manifestarsi sull'arco della durata dei provvedimenti previsti. Lo stesso dicasi per la valutazione delle zone minacciate dagli scoscendimenti.
- Ondate di caldo: i cambiamenti climatici potrebbero indurre un innalzamento dei valori estremi di temperatura. Si prevede che il persistere di temperature estremamente elevate comporterà un aumento dei decessi. Provvedimenti edili, quali protezioni solari, isolamenti, zone verdi, possono migliorare il comfort e l'efficienza energetica. Estremi di temperatura più elevati significano ulteriore stress per le acque, la vegetazione e la fauna.
- Permafrost: il riscaldamento comporterà una riduzione del permafrost a scapito della stabilità dei versanti nelle regioni interessate. Si dovranno tenere sotto sorveglianza sia i versanti sia gli edifici.
- Gelo: probabilmente la frequenza delle giornate di gelo diminuirà per effetto dei cambiamenti climatici. Siccome le ripercussioni dipendono sia dalle temperature sia dallo sviluppo della vegetazione, è difficile prevederne l'evoluzione futura. In generale, se i periodi della semina non subiranno modifiche, il rischio di danni causati dal gelo diminuirà.

Attualmente non è possibile formulare previsioni certe sull'evoluzione di siccità, incendi di boschi, favonio, tempeste invernali, grandine e valanghe. In materia è importante osservare accuratamente i progressi della ricerca.

### **(b) Provvedimenti contro i cambiamenti climatici antropici**

Per quanto concerne i nessi, il decorso, l'orientamento e la portata dei cambiamenti climatici e degli eventi estremi regnano molte incertezze. Le decisioni in questi casi si fondano pertanto sulla cosiddetta regola del minimax, secondo cui bisogna scegliere le strategie per le quali il massimo danno possibile è il minore.

Le misure contro le cause dei cambiamenti climatici antropici vanno portate avanti con coerenza e coordinate a livello nazionale e internazionale tra ricerca, amministrazione, economia e politica. Dal punto di vista scientifico si impone una riduzione a lungo termine delle emissioni globali di gas a effetto serra al livello del 1950. Il protocollo di Kyoto è un passo importante verso il coordinamento delle misure internazionali. L'impegno alla riduzione assunto dalla Svizzera si concretizza nella legge sul CO<sub>2</sub>, la legge sull'energia e altri provvedimenti<sup>1</sup>. Questi strumenti prevedono entro il 2010 una riduzione del 10% rispetto al 1990 delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Di fronte alle possibili ripercussioni dei cambiamenti climatici, la Svizzera deve impegnarsi a favore di obiettivi efficaci per la protezione del clima nell'ambito dei negoziati sul *modus operandi* dopo il primo periodo d'impegno previsto dal protocollo di Kyoto, non da ultimo perché anch'essa beneficerà dei provvedimenti contro i cambiamenti climatici.

Oltre alla legge sul CO<sub>2</sub> e alla legge sull'energia, in Svizzera sono necessarie ulteriori misure contro i cambiamenti climatici antropici e per il ristabilimento di uno stile di vita e processi economici che producono meno emissioni. I processi e le relazioni nell'economia privata devono per esempio essere impostati con maggiore trasparenza, al fine di incentivare la sostenibilità in via generale e la compatibilità con il clima degli investimenti in particolare. Condizioni quadro legali adeguate possono in questo caso rivelarsi un valido sostegno. Bisogna creare e promuovere i partenariati tra Stato ed economia privata o industria, al fine di garantire l'applicazione dei provvedimenti a

tutela del clima e delle strategie d'adeguamento. Tecnologie "pulite" e soprattutto le energie rinnovabili giocheranno in futuro un ruolo fondamentale.

### **(c) Comunicazione**

Le misure contro i cambiamenti climatici antropici e per la protezione dagli eventi estremi devono essere pianificate a lungo termine al momento in cui si dispone di previsioni qualitative del clima futuro. Avvalendosi della preziosa collaborazione degli organi d'informazione e di personalità di spicco, è pertanto fondamentale indurre popolazione, cerchie politiche ed economiche a prenderne atto.

Nei rapporti sui cambiamenti climatici e gli eventi estremi va ricordato che questi ultimi non rappresentano indicatori climatici affidabili. I cambiamenti climatici si spiegano meglio con altri indicatori (riscaldamento, scioglimento dei ghiacciai alpini). Il fatto che l'opinione pubblica associ eventi estremi e cambiamenti climatici cela il pericolo che la problematica del clima venga drammatizzata in periodi in cui si registrano molti eventi estremi e banalizzata in quelli in cui se ne verificano pochi.

Un aumento della frequenza di determinati eventi estremi, quali forti precipitazioni e inondazioni, è consolidato dalle previsioni elaborate sulla base di modelli climatici e della conoscenza fisica dei processi. Singoli eventi estremi non possono tuttavia essere ascritti casualmente ai cambiamenti climatici.

### **(d) Ricerca**

Attualmente si dispone di una base di conoscenze sufficiente per adottare provvedimenti contro i cambiamenti climatici e a sostegno della protezione da eventi estremi. La ricerca amplierà tuttavia anche in futuro il proprio sapere, riducendo nel contempo le incertezze.

Per gestire gli eventi estremi servono analisi integrali dei nessi naturali, sociali, ingegneristici ed economici. Reti di misurazione affidabili rivestono un'importanza fondamentale ai fini dell'individuazione tempestiva e dell'analisi, costituiscono la spina dorsale dei sistemi d'allarme e la base per l'identificazione di cambiamenti a lungo termine. Analisi accurate degli eventi osservati possono indicare quali processi conducono all'evento, se esistono le condizioni per eventi analoghi e se i cambiamenti climatici

incidono sulla frequenza di eventi simili. In tale ambito i modelli matematici e le simulazioni al computer, strumenti particolarmente adatti alla valutazione e alla quantificazione dei pericoli insiti nel clima futuro, acquistano un'importanza sempre maggiore sul piano internazionale nell'ambito delle previsioni e dell'allerta a breve termine.

I progetti di ricerca in corso in Svizzera e all'estero (NCCR Climate, progetti di ricerca UE ecc.) hanno agevolato la comprensione dei cambiamenti climatici e degli eventi estremi, anche se il nesso tra clima ed eventi climatici è tuttora conosciuto solo in parte. In futuro la ricerca dovrà impennare la propria attività sull'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)<sup>2,3,4,5</sup> e tenere conto delle peculiarità locali e delle strutture della regione alpina. Si mira in particolare a riconoscere tempestivamente le ripercussioni per la società e l'economia e individuare possibili contromisure. Occorre integrare costantemente nei processi dinamici, pianificatori e decisionali le scoperte più recenti. La Svizzera deve continuare a partecipare attivamente ai programmi di ricerca internazionali e promuovere il dialogo tra scienza, politica, economia e amministrazione.

- 1 Per esempio il programma SvizzeraEnergia, volto a promuovere le energie rinnovabili e le misure dell'efficienza energetica.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 5 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.

Par climat, nous entendons communément le temps moyen, décrit par les moyennes des grandeurs météorologiques. Les événements extrêmes sont des épisodes au cours desquels le temps s'écarte fortement de sa moyenne à long terme, bien au-delà des fluctuations qu'il subit d'ordinaire dans le lieu et pendant la saison considérés. Ils font partie du climat d'une région et marquent de leur empreinte le paysage et les conditions de vie. Mais les événements extrêmes peuvent aussi ravager les cultures et endommager les équipements. Les connaissances sur leur fréquence et leur intensité sont donc de première importance pour la société. Elles sont utiles aux tâches de planification et à la mise en oeuvre de mesures de protection.

Il y a eu récemment en Suisse de nombreux événements extrêmes. La liste suivante en mentionne quelques-uns:

- En 2003, une vague de chaleur a valu à la Suisse le mois de juin le plus chaud depuis le début des mesures de températures en 1864. La moyenne à long terme de la température mensuelle a été dépassée d'environ 6°C.
- A mi-novembre 2002, des fortes précipitations dans les cantons des Grisons, d'Uri et du Tessin ont entraîné des coulées de boue dévastatrices. Les communes de Schlans et Rueun dans la Surselva furent particulièrement touchées.
- En octobre 2000, près de 500 mm de pluie est tombée en deux jours dans la région du Simplon. Le 14 octobre 2000, le mur de soutènement au-dessus de Gondo s'est rompu. L'ovaille qui s'ensuivit a détruit des parties du village et entraîné la mort de treize personnes.
- En décembre 1999, la tempête Lothar a traversé l'Europe occidentale, provoquant d'énormes dommages en France, en Allemagne et en Suisse. L'ouragan a fait treize morts en Suisse. Les dommages aux forêts représentent 12.7 millions de m<sup>3</sup> de bois.
- En juillet 1999, un vaste système de tempêtes, comprenant des cellules orageuses, s'est déplacé d'ouest en est sur le Plateau suisse et

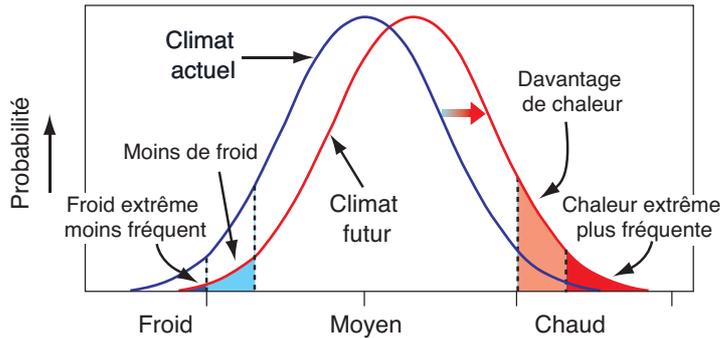
les Préalpes. Plus de 500 communes ont annoncé des dégâts de grêle à l'agriculture.

- Au début de 1999, plus de 300 cm de neige sont tombés au cours de trois brèves périodes successives de précipitations en Valais, au nord des Grisons et en Basse-Engadine. Conséquences: quelque 1200 avalanches ont causé des dommages dans les Alpes suisses.

Les événements extrêmes causant d'importants dommages sont des coups douloureux pour la population des régions concernées. Ils ont beaucoup d'écho dans les médias. Partant du fait de l'augmentation de la température globale, la question revient toujours de savoir s'il y a un lien entre les événements extrêmes et les changements climatiques. Les événements extrêmes sont-ils devenus plus fréquents en raison des changements climatiques?

Les changements climatiques et leurs effets sont décrits en détails dans le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC<sup>1,2,3,4</sup>). Pendant le 20<sup>e</sup> siècle, la température globale moyenne est montée d'env. 0.6°C et les précipitations ont sensiblement augmenté sur les continents aux latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord. Le réchauffement des 50 dernières années est attribuable en majeure partie aux activités humaines. On s'attend à ce que le réchauffement global s'accélère au 21<sup>e</sup> siècle et que le régime des précipitations se modifie sensiblement selon les régions.

Les changements climatiques influenceront aussi sur la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Selon certains indices, la fréquence des événements extrêmes pourrait réagir de façon particulièrement sensible aux changements climatiques. Ceci tient d'une part à des mécanismes physiques de rétroaction. D'autre part, certains effets statistiques font que les changements climatiques pourraient se manifester de façon plus prononcée dans la fréquence des extrêmes que dans les événements météorologiques «normaux» (la figure 1 illustre cette sensibilité statistique dans le cas des extrêmes de température). L'éventualité d'une telle sensibilité, qui s'ajoute à la vulnérabilité de la civilisation moderne exige que l'on évalue scientifique-



**Figure 1:** Influence possible des changements climatiques sur la fréquence d'événements extrêmes dans le cas des extrêmes de températures.<sup>1</sup> La courbe bleue est la distribution statistique des températures actuelles. Les températures sont souvent dans la moyenne; il fait rarement extrêmement froid (surface bleue sous la courbe) ou extrêmement chaud (surface rouge sous la courbe). Avec les changements climatiques, la distribution de la température pourrait se décaler vers les températures plus hautes (courbe rouge). Les effets de ce déplacement sur la fréquence des événements extrêmes sont particulièrement prononcés: il fait beaucoup plus souvent extrêmement chaud et beaucoup plus rarement extrêmement froid. Les changements relatifs sont peu perceptibles pour les températures se situant dans la moyenne.

ment les développements futurs possibles des événements extrêmes et que l'on estime leur portée pour l'être humain et l'environnement.

Le présent rapport résume l'état actuel du savoir sur le lien entre événements extrêmes en Suisse et changements climatiques globaux dans la perspective d'un groupe d'experts interdisciplinaire. Il considère toute la chaîne d'actions qui part des changements climatiques globaux, passe par les modifications des extrêmes météorologiques dans les Alpes et aboutit aux effets sur l'ampleur des dommages et aux conséquences économiques. Le rapport cherche à donner une vue nuancée, considérant la dimension scientifique, les effets possibles sur les espaces de vie, mais aussi des influences non climatiques sur les risques de dommages (p. ex. changements d'affectation des sols, valeurs des biens exposés). Le rapport s'adresse aux décideurs politiques, aux autorités, aux médias et au grand public.

Le rapport comprend deux parties. La première clarifie le sens des notions utilisées dans

le rapport, introduit à la méthode scientifique – autant que cela est nécessaire pour bien juger des choses – et décrit quelques bases scientifiques importantes. La seconde partie donne une vue d'ensemble de l'état actuel du savoir relatif aux catégories d'événements extrêmes les plus importants pour la Suisse (extrêmes de température, gel, sécheresse, incendies de forêts, fortes précipitations, grêle, crues, mouvements de masse, avalanches et tempêtes d'hiver). Autant que cela est possible et judicieux, chacun des chapitres de cette deuxième partie suit un même schéma pour décrire la sensibilité de la catégorie traitée, les changements passés et les perspectives d'avenir.

Vingt-quatre personnes ont collaboré à ce rapport. Le contenu de ce dernier a été expertisé par sept spécialistes. Enfin, les membres de l'OcCC ont discuté et approuvé le texte lors des séances du 27 février et du 28 mai 2003.

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.

**1<sup>e</sup> partie**

# **Les bases scientifiques**

# 1.1. Événements extrêmes, dangers naturels et catastrophes naturelles: clarification des notions

Roland Hohmann, Christian Pfister et Christoph Frei

**Les événements extrêmes sont des événements rares, qui s'écartent fortement d'une moyenne statistique. Ils ne sont pas forcément liés à des dommages. Une catastrophe naturelle provoque des dommages dont les personnes touchées ne peuvent pas maîtriser seules les conséquences. Elle n'est pas toujours causée par des événements extrêmes. Les dangers naturels sont des processus et situations naturels qui menacent la société et l'environnement.**

Ce rapport qualifie d'extrêmes des événements qui s'écartent fortement d'une valeur moyenne ou de la tendance habituelle et sont à ce titre exceptionnels. Cette définition est donc fondée sur des critères statistiques. Les événements extrêmes ont souvent des conséquences négatives pour l'être humain et l'environnement. Des exemples de tels événements en Suisse sont les tempêtes d'hiver Vivian (1990) et Lothar (1999), les crues extrêmes dans les cantons d'Uri (1987) et du Valais (Brigue, 1993; Gondo,

2000) et la vague de froid de 1963, dernière année où les grands lacs suisses ont gelé.

La rareté d'un événement extrême peut se mesurer en se référant à de longues séries de mesures. Elle s'exprime par le temps de retour ou période de récurrence. Un événement attendu, statistiquement parlant, une fois tous les dix ans a un temps de retour ou une période de récurrence de dix ans. Dans le présent rapport, aucune limite générale n'est fixée pour le temps de retour à partir duquel un événement est considéré comme extrême. En effet, une classification raisonnée doit tenir compte entre autres du type et de la fréquence des événements et de l'échelle spatiale considérée.

- Type et fréquence des événements: En Suisse, les tremblements de terre sont plus rares que les crues. Un séisme qui se produit en moyenne tous les trois cents ans n'est pas un événement extrême et ne cause pas de grands dommages. Par contre, une crue tricentennale est un événement extrême et les dommages attendus sont considérables.
- Echelle spatiale considérée: Un événement classé comme extrême à l'échelon local peut compter statistiquement comme normal à l'échelon suprarégional. Par exemple, la pointe de vent de Lothar fut un événement extrême pour la Suisse, avec un temps de retour situé entre vingt et cent ans. Alors que pour l'Europe, elle n'était qu'un événement de forte intensité, avec un temps de retour nettement inférieur à dix ans.

En science, les limites critiques sont définies différemment selon la question abordée. La société s'oriente sur les dommages matériels et immatériels. Une avalanche qui descend dans une vallée non habitée n'attire guère l'attention. Alors



qu'elle est perçue comme catastrophe si elle détruit des agglomérations et fait des victimes.

Un signe distinctif commun des catastrophes naturelles est la détresse de la population touchée. Celle-ci n'est pas en mesure maîtriser la situation par ses propres moyens, mais a besoin d'un soutien de l'extérieur. En Suisse, de telles catastrophes furent les inondations de 1987 ou l'hiver à avalanches de 1951.<sup>1</sup> Mais les catastrophes naturelles ne sont pas toutes produites par des événements extrêmes. Elles peuvent être causées aussi par des événements de grande étendue ou se succédant à intervalles rapprochés. C'est le cas par exemple lorsqu'un vaste secteur est touché par la grêle, ou que la fonte des neiges survient en même temps que de fortes précipitations, comme en mai 1999.

Dans le contexte de la société du risque<sup>2</sup>, qui apparaît dès les années 1970, la notion de catastrophe naturelle est mise en question en ce sens que la société est jugée coresponsable d'un tel événement. Les différences entre catastrophes naturelles et techniques se sont estompées dans la conscience du public. Les liens de causalité entre nature, société et technique sont compris comme des interactions.<sup>3</sup>

La notion de danger naturel s'est imposée depuis quelque temps en sciences naturelles.<sup>4</sup>

Elle englobe tous les processus et influences de la nature susceptibles de causer préjudice à l'être humain et/ou aux biens matériels (p. ex. les cyclones, séismes, avalanches, inondations, invasions de criquets etc.).<sup>5</sup> Les dangers naturels font peser la menace d'un malheur qui, dans certaines circonstances, peut être évité par la prévention. Alors qu'une catastrophe naturelle désigne un malheur qui est effectivement survenu.

- 1 Pfister C., *Le jour d'après – Surmonter les catastrophes naturelles: le cas de la Suisse entre 1500 et 2000*. Haupt Verlag, Berne, 263 S., 2002.
- 2 Beck U., *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Aubier, Paris, 2001. Trad. française (Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andre Moderne. Suhrkamp, Frankfurt/M., 1986).
- 3 Müller U., W. Zimmermann, P. Neuenschwander, A. Tobler, S. Wyss und R. Alder, *Katastrophen als Herausforderung für Verwaltung und Politik. Kontinuität und Diskontinuität*. Zurich, 1997.
- 4 Kienholz H., *Naturgefahren – Naturrisiken im Gebirge*, Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen, 145/1, 1-25, 1994.
- 5 BUWAL, *Begriffsdefinitionen zu den Themen Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit und Risiko*. OFEFP, Direction fédérale des forêts. Berne, 1998.

<b>Événement extrême:</b>	<b>événement exceptionnel en ce sens qu'il s'écarte fortement des valeurs moyennes ou des tendances habituelles. Son temps de retour est généralement nettement supérieur à dix ans.</b>
<b>Danger naturel:</b>	<b>la menace d'un malheur ayant une cause (processus, influence) naturelle.</b>
<b>Catastrophe naturelle:</b>	<b>événement naturel dont les personnes touchées ne peuvent pas maîtriser les conséquences sans aide extérieure.</b>

## 1.2. Observation des changements climatiques et estimation des changements futurs

Urs Neu

**Les changements de la température, des précipitations et de la fréquence des événements sont des facteurs importants des événements extrêmes. Selon le GIEC, la température globale moyenne au sol subira une hausse comprise entre 1.4°C et 5.8°C d'ici 2100 par rapport à 1990. Les précipitations augmenteront probablement en hiver aux latitudes nord moyennes à hautes. Des précipitations intenses se produiront probablement plus souvent.**

«Un nombre croissant d'observations nous donne aujourd'hui une image d'ensemble d'une planète qui se réchauffe et de plusieurs autres changements dans le système climatique». Tel est le constat du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son Troisième rapport d'évaluation (TAR)<sup>1</sup>, qui met en évidence que le réchauffement observé ces cinquante dernières années est dû principalement aux activités humaines.

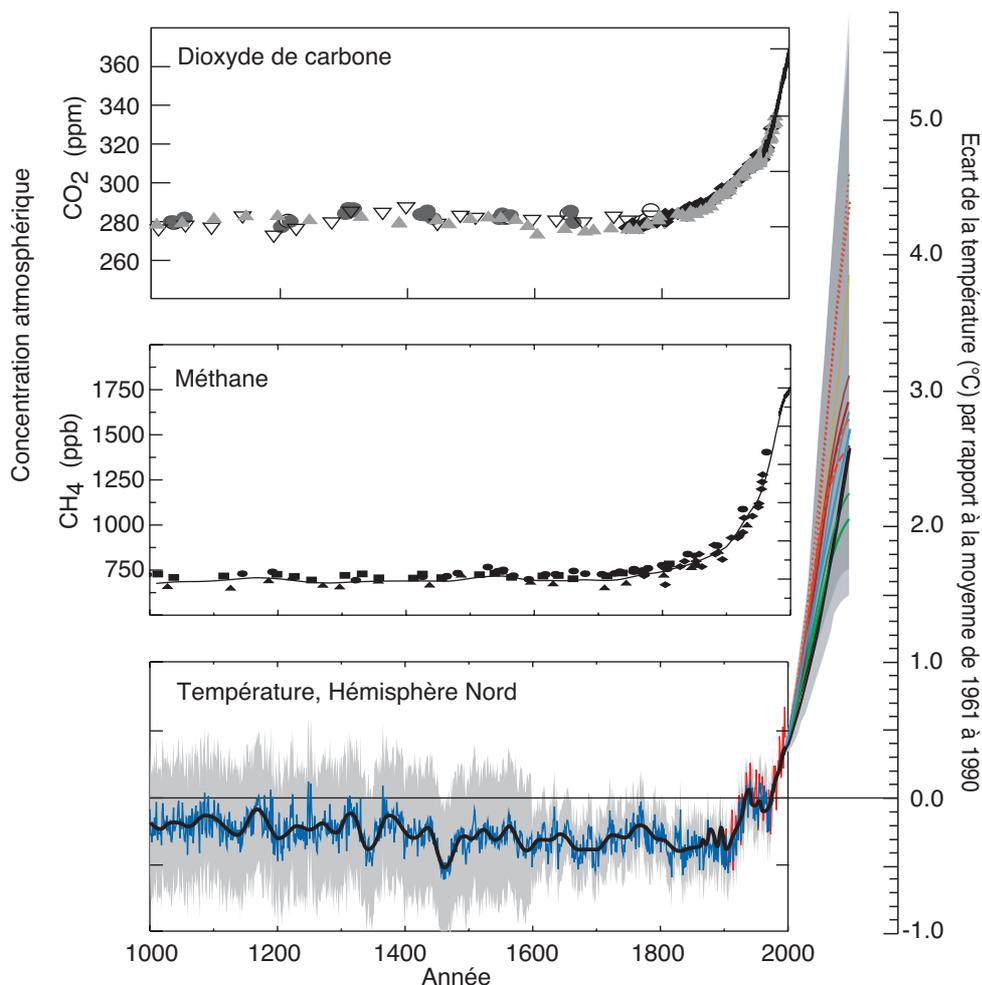
### Changements climatiques observés au 20<sup>e</sup> siècle

Les changements du climat global, observés au 20<sup>e</sup> siècle, sont décrits dans le rapport du groupe de travail I du TAR<sup>1</sup> (voir encadré, p. 22). Les changements affectant les températures, les précipitations et la fréquence des événements sont les facteurs les plus importants relatifs aux événements extrêmes. La température globale moyenne à la surface de la Terre a augmenté de  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Considérées à l'échelon global, les années 1990 furent très probablement la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude depuis le début des mesures en 1861. De 1950 à 1993, les minima quotidiens de la température sur les continents ont augmenté en moyenne de  $0.8^\circ\text{C}$ . La période sans gel s'est allongée en de nombreuses régions des latitudes moyennes et hautes. Depuis 1950, les températures sont plus rarement extrêmement basses et un peu plus souvent extrêmement hautes.

Au 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations ont augmenté de 0.5 à 1% par décennie sur la plupart des terres émergées des latitudes nord moyennes et hautes. La fréquence des fortes précipitations a crû probablement de 2 à 4% pendant la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle. Les changements de la teneur en eau de l'atmosphère ou de l'activité des orages et des tempêtes sont des raisons possibles de cette augmentation. La surface des terres émergées touchées par la sécheresse ou de graves inondations a légèrement augmenté au 20<sup>e</sup> siècle.

L'intensité et la fréquence des tempêtes tropicales et extratropicales ne présentent pas de tendances globales significatives au 20<sup>e</sup> siècle. Pour l'heure, aucune donnée concrète n'indique que l'activité des tempêtes se serait modifiée. Aucun changement systématique de la fréquen-





**Figure 2:** Les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane (des gaz à effet serre) ont fortement augmenté depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle et s'écartent sensiblement des niveaux préindustriels. Parallèlement, les températures au sol ont augmenté dans l'hémisphère Nord. Pour le 21<sup>e</sup> siècle, les modèles climatiques prévoient un accroissement de la température compris entre 1.4°C et 5.8°C (zone grise sur la figure). Ce réchauffement sera plus important que les variations de température observées pendant le dernier millénaire.<sup>1</sup>

ce des tornades, des périodes orageuses ou des chutes de grêle n'a été constaté dans les régions étudiées.

### Evolution du climat au 21<sup>e</sup> siècle

Des modèles physiques complexes permettent d'estimer l'évolution future du climat. On fait toujours plus confiance à ces calculs, car ils ont fait leurs preuves en reproduisant de nombreuses observations touchant aux fluctuations climatiques du passé. Ces modèles évaluent les développements futurs sur la base de scénarios d'émission<sup>5</sup> qui décrivent les émissions d'importants gaz à effet de serre et aérosols pour différentes évolutions démographiques, technologiques et économiques. Les développements climatiques futurs décrits dans le TAR reposent sur de nombreuses simulations et sur des études comparatives entre les différents modèles utilisés.

Pour la période de 1990 à 2100, ces calculs prévoient une hausse de la température globale moyenne au sol comprise entre 1.4 et 5.8°C. Le réchauffement sera nettement plus rapide qu'au 20<sup>e</sup> siècle (voir figure 2); en hiver, il sera supérieur à la moyenne sur les continents et aux hautes latitudes nord. En général, on s'attend à une évolution vers des maxima de température plus élevés, davantage de jours de canicule, des minima de température plus élevés, moins de jours de froid et de gel et des variations quotidiennes de la température moins prononcées sur la plupart des terres émergées.

La concentration moyenne de vapeur d'eau dans l'atmosphère évoluera aussi globalement à la hausse au 21<sup>e</sup> siècle. Les précipitations d'hiver augmenteront probablement dans l'hémisphère Nord, aux latitudes moyennes à hautes et dans l'hémisphère Sud dans l'Antarctique. En

### Les rapports du GIEC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) rassemble les données scientifiques et socioéconomiques disponibles ayant trait aux changements climatiques et aux moyens d'éviter ces changements ou encore de s'y adapter. Fondé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le GIEC a élaboré depuis 1990 une série de rapports qui servent souvent de référence aux décideurs politiques, aux scientifiques et à d'autres experts ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)).

Le Troisième rapport d'évaluation (TAR) comprend les rapports de trois groupes de travail du GIEC (groupe I: les éléments scientifiques<sup>1</sup>; groupe II: conséquences, adaptation et vulnérabilité<sup>2</sup>; groupe III: mesures d'atténuation<sup>3</sup>) et un rapport de synthèse<sup>4</sup>. Quelque 2500 scientifiques ont collaboré au TAR. Les rapports ne prétendent pas à la vérité, mais expriment le consensus de ces scientifiques sur l'état actuel des connaissances. Les points controversés sont expressément mentionnés comme tels.

outre, les précipitations devraient varier davantage d'une année à l'autre et les épisodes de pluies intenses devenir plus nombreux. En été, les sécheresses augmenteront probablement dans la plupart des régions situées aux latitudes moyennes à l'intérieur des continents.

Les modèles climatiques ne disposent pas pour l'heure d'une résolution spatiale suffisante pour évaluer à petite échelle des phénomènes qui pourraient avoir des impacts considérables sur l'environnement et la société. Des tels phénomènes à petite échelle, qui ne sont pas simulés par les modèles, sont par exemple les orages, les tornades, la grêle et la foudre.

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.
- 5 IPCC, Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 514 p., 2000.

## 1.3. Événements extrêmes en Suisse

### 1.3.1. Caractérisation des événements climatiques extrêmes

Heinz Wanner

**Les principaux événements extrêmes en Suisse peuvent être caractérisés selon leur rapport à des situations météorologiques spécifiques. Le transport horizontal de masses d'air, et partant les grands courants atmosphériques, sont déterminants dans les processus conduisant à des températures, des taux d'humidité et des précipitations extrêmes. Les tempêtes et orages sont assujettis, en hiver, à des différences de pression à grande échelle géographique et, en été, à des effets plus locaux, tels que l'humidité du sol et la stabilité des masses d'air. Les crues sont la conséquence d'interactions entre l'atmosphère, le sol et la topographie.**

Un moyen de caractériser les principaux événements extrêmes est de considérer quelles situations météorologiques s'y rapportent et comment ces événements se manifestent à l'échelon régional. Le tableau 1 rassemble les points essentiels qui caractérisent les événements climatiques extrêmes en Suisse. Il indique aussi l'échelle spatiale de ces événements, car ceux-ci affectent des régions plus ou moins étendues. Des phénomènes faisant suite à ces événements, tels qu'avalanches et glissements de terrain, ne sont pas représentés. Cette approche schématique a ses limites, car les événements extrêmes associent souvent différents processus qui se renforcent mutuellement ou se succèdent en additionnant leurs effets. Des regroupements restent possibles, mais une analyse détaillée fait toujours apparaître des aspects spécifiques des différents cas.

Le climat d'une région est déterminé par l'interaction de courants atmosphériques à grande échelle (circulation) avec la topographie et la constitution du sol à l'échelon local. En Suisse, le climat est déterminé dans une large mesure par le courant d'ouest au-dessus de l'Atlantique et de l'Europe. L'état de l'océan (courants, températures superficielles, répartition de la banquise) joue aussi un rôle important en influant sur les principales trajectoires des zones de basse pression (storm tracks). La répartition entre terre et mer (Atlantique, Méditerranée et Eurasie) et la topographie des Alpes ont également une grande importance. De par leur forme en croissant et leur hauteur, ces dernières modifient le flux et les propriétés des masses d'air. Il s'ensuit des événements extrêmes tels que de forts vents rabattants (tempêtes de föhn), la sécheresse dans les Alpes (Valais) ou des dépressions sur le versant des Alpes sous le vent (dépression du golfe de Gênes).

Des déplacements horizontaux de masses d'air (advections), assujettis à la circulation à grande échelle, jouent un rôle déterminant dans les épisodes de températures et précipitations extrêmes (tableau 1, en haut). Les points essentiels à considérer sont alors d'où ces masses proviennent, comment leur température et leur humidité se sont modifiées en cours de route et à quelle vitesse elles passent au-dessus de la Suisse. L'influence à long terme des facteurs naturels (Soleil, volcans) et humains (effet de serre et des aérosols, modifications du sol) ou de fluctuations aléatoires du système climatique à l'échelle continentale à régionale, affectant la fréquence des températures et précipitations extrêmes et la circulation, n'est toujours pas claire.<sup>1,2</sup>

Les tempêtes et orages (tableau 1, au milieu) dépendent dans une large mesure, soit de différences de pression à grande échelle géographique (surtout en hiver), soit d'effets plus locaux, tels que la stagnation de masses d'air et l'humidité du sol (surtout en été). Les masses d'air peuvent stocker de l'énergie directement sous forme de chaleur ou indirectement sous forme d'humidité. En se condensant, la vapeur d'eau restitue l'énergie emmagasinée. Cette chaleur de condensation est la source d'énergie d'ouragans qui se produisent au-dessus d'une surface d'eau chaude lorsque l'évaporation atteint un niveau suffisant. Les flux de chaleur directs et indirects jouent un rôle important pour la Suisse, qu'ils soient à grande échelle (comme lors de tempêtes se formant au-dessus de l'Atlantique ouest) ou régionaux (lors des orages d'été).<sup>3</sup> Les tempêtes d'hiver, telles que Lothar, résultent de processus très complexes.<sup>4</sup>

Les situations les plus diverses se peuvent présenter lors des crues (tableau 1, en bas). Elles sont la conséquence d'interactions entre l'at-

<b>Tableau 1:</b> Caractérisation des événements climatiques les plus importants pour la Suisse et situations météorologiques correspondantes.		
Événement extrême	Hiver	Été
<p><i>Température</i></p> <p><b>(a) ) Froid-sec:</b>                      Courant d'air froid persistant dû à l'anticyclone continental de Sibérie:   <i>Dégâts de gel et de sécheresse</i>  <i>Echelle: semi-continentale</i></p> <p><i>Précipitations</i></p> <p><b>(c) Frais-humide:</b>                      Courant persistant du nord-ouest:   <i>Chutes de neige abondantes, avalanches</i>  <i>Echelle: régionale</i></p>	<p><b>(b) Très chaud-sec:</b>                      Effet de la chaleur et de la sécheresse dans le domaine de subsidence de l'anticyclone des Açores ayant pénétré sur le continent:   <i>Dégâts de chaleur et de sécheresse</i>  <i>Echelle: semi-continentale</i></p> <p><b>(d) Froid-humide:</b>                      Zones dépressionnaires se déplaçant du nord-ouest au sud-ouest:   <i>Dégâts à la végétation</i>  <i>Echelle: régionale à semi-continentale</i></p>	
<p><i>Tempêtes/orages</i></p>	<p><b>Forts gradients de pression en partie avec tourbillon secondaire:</b>   <i>Vents de tempêtes, rafales, ouragans</i>  <i>Echelle: régionale à semi-continentale</i></p>	<p><b>Faibles gradients de pression, dépressions thermiques, orages:</b>   <i>Fortes pluies, grêle, rafales</i>  <i>Echelle: locale à régionale</i></p>
<p><i>Inondations</i></p>	<p><b>Versant nord des Alpes:</b>                      Tendance aux situations météorologiques persistantes de sud-ouest, ouest et nord-ouest avec déplacement vers le sud de la trajectoire des zones dépressionnaires. Apport d'air chaud très humide qui s'élève dans des conditions d'ascendance extrêmes et conduit de ce fait à des précipitations abondantes et persistantes. Cela combiné éventuellement à un réchauffement, une fonte des neiges et, dans des cas rares, à des effets de barrage le long des Alpes.                      (Période: saisons chaudes et de transition, principalement du printemps au début de l'été)  <i>Inondations massives dans des vallées et régions de lacs</i>  <i>Echelle: régionale à semi-continentale</i></p> <p><b>Versant sud des Alpes et espace intraalpin:</b>                      Apport de masses d'air et ascendance extrême (due tant aux masses d'air qu'à la topographie des Alpes) suivis de chutes de pluie.                      Versant sud des Alpes: courant dominant du sud orienté vers les Alpes (avant tout lors du passage de zones dépressionnaires du sud); associé souvent au phénomène de «streamer» de la haute troposphère.                      Espace intraalpin: associé aussi à des creux barométriques stationnaires.                      (Période: Saisons froides et de transition, principalement en automne)  <i>Inondations massives dans des vallées et des régions de lacs</i>  <i>Intraalpin: dommages hydro- et géomorphologiques extrêmes, tels qu'éboulements, coulées de boue etc.</i>  <i>Echelle: locale à suprarégionale</i></p>	

mosphère, la constitution du sol et la topographie. En montagne, l'ascension de masses d'air amenées par des déplacements à grande échelle et les pluies qui s'ensuivent jouent un rôle important, de même que les courants atmosphériques dans l'ensemble de la troposphère. Les précipitations déclenchées par l'ascension de l'air sur le relief des Alpes ne sont pas autant déterminantes.<sup>5</sup> Des précipitations abondantes et persistantes peuvent saturer le sol d'eau et, combinées en partie avec la fonte des neiges dans les Alpes, conduire à des crues affectant l'échelon régional à suprarégional. Au nord des Alpes d'Europe centrale, il faut tenir compte surtout du mouvement des zones de basse pression. Quand

l'oscillation de l'Atlantique nord est négative (c'est-à-dire que l'Atlantique nord est chaud et l'Atlantique sud froid), elles se déplacent vers le sud et conduisent à des situations stationnaires de sud-ouest à nord-ouest.<sup>2</sup> Il peut se former alors des bulles d'air froid qui stagnent des jours durant au-dessus d'une même région où elles sont à l'origine de pluies persistantes. Au sud des Alpes, à part les dépressions sous le vent déjà mentionnées, il faut prêter attention avant tout aux zones de basse pression provenant de l'Atlantique, qui longent la Méditerranée et se déplacent lentement vers la bordure orientale des Alpes puis vers la Pologne.

## 1.3.2. Un aperçu des cinq cents dernières années

Christian Pfister

**La mise en évidence de tendances des événements extrêmes à l'aide de mesures instrumentées se heurte à des limites tenant à la brièveté des séries de mesures et à la rareté des événements. Des documents historiques<sup>6</sup> permettent de prolonger ces séries. Ils contiennent les informations les plus significatives sur les événements extrêmes entre 1100 et 1800. Les catastrophes naturelles ne peuvent être mises en évidence que sur la base de témoignages historiques: plus un événement fut exceptionnel et extrême, plus nombreux et plus détaillés sont les témoignages.**

Contrairement aux archives naturelles, telles que les cercles annuels de croissance des arbres, qui ne fournissent pas d'indications à une résolution inférieure à l'année, les documents historiques renseignent aussi sur les saisons et les mois. Ils datent les événements au jour et plus tard même à l'heure près. Pour préciser l'ampleur de l'anomalie, les observateurs ont souvent recouru à des indicateurs naturels qui peuvent être quantifiés et étalonnés aujourd'hui sur la base d'événements analogues. Par exemple, les cerisiers ont fleuri avec trois semaines de retard après des mois de mars et avril très froids. Selon les connaissances actuelles, cela correspond à un déficit de température de 5°C.<sup>7</sup>

Les documents ne couvrent chacun qu'une période limitée; ils sont hétérogènes et souvent lacunaires. En général, ils ne permettent pas de déduire des données quantitatives et ne peuvent donc pas faire l'objet d'un traitement statistique. Pour obtenir des informations quantitatives significatives, il faut réunir le plus grand nombre possible de sources fiables. Les données se complètent alors et peuvent être vérifiées. Pour la Suisse, quelque 40'000 observations tirées de 350 sources ont été rassemblées ayant trait à la période de 1500 à 1864.<sup>6,8</sup> A partir de 1550, il existe des descriptions du temps et/ou des observations se référant à des indicateurs pour 99% des mois.

Les informations sur les températures et les précipitations sont reportées mois par mois sur une échelle d'intensité à sept niveaux. Les séries d'indices ainsi obtenues sont comparées avec celles de régions voisines. Elaborées

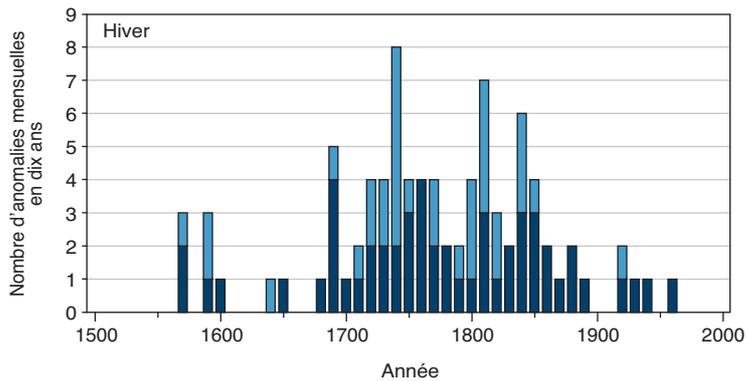
avec soin, elles correspondent presque aussi bien entre elles que des séries de mesures instrumentées.<sup>9</sup>

Quelques événements climatiques extrêmes survenus en Suisse ces 500 dernières années sont présentés ci-après selon la typologie des événements extrêmes décrite au chapitre 1.3.1.<sup>6</sup> Dans le présent chapitre, l'interprétation des séries temporelles consiste simplement à distinguer des périodes selon la fréquence des témoignages ayant trait à des événements extrêmes. Vu la rareté des événements, il n'est pas possible de déterminer avec certitude si les variations sont des fluctuations aléatoires ou des changements effectifs de la probabilité (cf. chapitre 1.4).

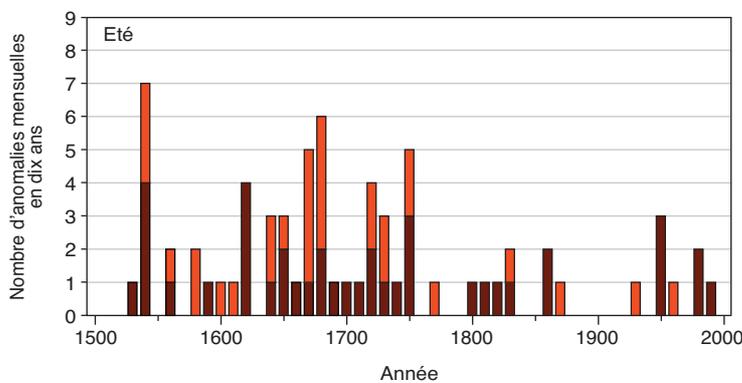
### *Froid et sec en hiver*

Des extrêmes froids-secs ne sont jamais survenus de 1496 à 1566 et ont été rares les 110 années suivantes (figure 3). Ils s'accumulent entre 1676 et 1895. Un à huit mois secs et froids avec apport d'air froid persistant de l'anticyclone de Sibérie sont attestés chaque décennie. Que le lac de Bienna





**Figure 3:** Fréquence des mois froids (bleu foncé) et froids-secs (bleu clair) pendant le semestre d'hiver (novembre à mars/avril) de 1496 à 2000 (sommés sur dix ans).



**Figure 4:** Fréquence des mois chauds (rouge foncé) et chauds-secs (rouge) pendant le semestre d'été (avril à septembre) de 1496 à 2000 (sommés sur dix ans).

soit entièrement recouvert de glace n'avait rien d'exceptionnel pour les gens du 18<sup>e</sup> siècle. De 1895 à janvier 1963 (dernier gel du lac de Zurich), les mois froids et secs sont redevenus plus rares et ont totalement disparu depuis lors (jusqu'en mars 2003).

### *Frais et humide en hiver*

Pour avoir de nombreuses avalanches dévastatrices, il suffit que des courants intenses du nord-ouest subsistent plusieurs jours consécutifs dans des conditions spécifiques. Vu que ces courants n'apparaissent pas dans les moyennes mensuelles des températures et des précipitations, les séries d'indices décrites plus haut ne sont pas un outil statistique utilisable.

Les hivers à avalanches dévastatrices se répartissent de façon assez homogène. Ils ne sont pas plus fréquents au 20<sup>e</sup> siècle que pendant les siècles précédents.

### *Très chaud et sec en été*

Les mois chauds et secs étaient nettement plus fréquents avant 1730 que par la suite (figure 4). Entre 1718 et 1728, un été sur deux était notablement trop sec. Aucun extrême météorologique séculaire (comme celui de 1540 ou de 1947) n'est survenu pendant ces années. Mais une situation comparable s'est présentée à deux reprises (en 1718/19 et 1723/24), de par les effets cumulés de deux étés secs consécutifs, alternant avec un hiver et un printemps pauvres en pluie.

Au 20<sup>e</sup> siècle – mis à part la décennie 1946–1955 – les mois chauds et secs ont été relativement rares pendant la période de végétation.

### *Froid et humide en été*

Avant que l'économie suisse, aux environs de 1880, ne soit reliée au réseau global de transport, les dégâts à la végétation pendant les étés froids et humides entraînaient une hausse des prix, des crises d'approvisionnement et dans certains cas la famine (p. ex. en

1816/17). De 1576 à 1635, les mois d'été froids et humides furent particulièrement nombreux et les glaciers ont grandi. Depuis lors, de tels événements extrêmes sont devenus plus rares.

### *Tempêtes en hiver*

Sur le versant nord des Alpes, le nombre des jours de tempête tend statistiquement à diminuer, de même que la durée des périodes de vent de force 7 à 9.<sup>10</sup>

Entre 1500 et 1960, la plupart des tempêtes se sont produites en décembre, les plus extrêmes toutefois en janvier et février. Il y a toujours eu de longues périodes sans tempêtes graves (figure 5). De 1600 à 1900, le Plateau a connu chaque siècle sa «tempête du siècle»: tempête d'ouest en hiver, causant des dégâts importants et à vaste échelle aux forêts, bâtiments et infrastructures. Au 20<sup>e</sup> siècle, trois tempêtes séculaires ont été enregistrées en l'espace de seulement trente-trois ans: en février

1967, en février 1990 (Vivian) et en décembre 1999 (Lothar). Mais ces événements sont trop rares pour qu'on puisse en déduire une tendance statistique à long terme.

### *Crués sur le versant nord des Alpes*

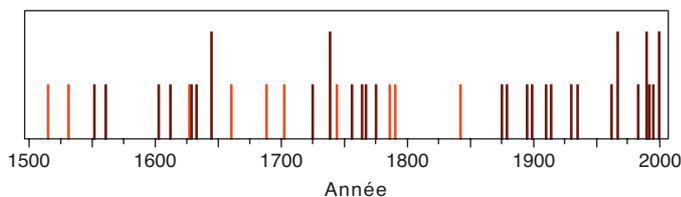
Sur le Plateau, la plupart des crués se produisent en été, quand la fonte des neiges dans les montagnes est importante et que de grandes parties du bassin versant subissent les plus fortes précipitations de l'année.

Jusqu'en 1762, le Rhin près de Bâle sortait de son lit en moyenne tous les dix ans (figure 6). Au cours des 120 années suivantes, ce rythme s'est ralenti. Il n'y a plus eu du tout de crués extrêmes de 1882 à 1992. Mais cette évolution ne peut pas être interprétée seulement selon des critères météorologiques et hydrologiques, car différentes interventions ont modifié les écoulements aux cours des 120 dernières années.

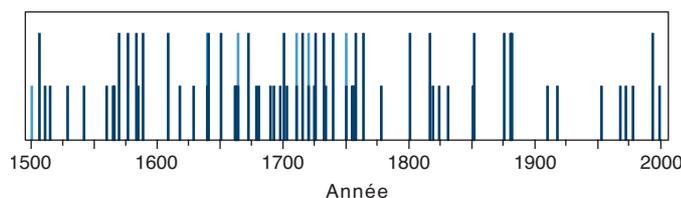
### *Crués dans les Alpes centrales et sur le versant sud des Alpes*

Dans les cantons du Valais, d'Uri, du Tessin et des Grisons, on relève, au cours des cinq derniers siècles, deux périodes pendant lesquelles les inondations furent relativement peu fréquentes (1641 à 1706; 1927 à 1975) et deux périodes pendant lesquelles elles le furent davantage (1550 à 1580; 1827 à 1875; figure 7). Des fluctuations à long terme de la fréquence des inondations ont été mises en évidence aussi dans les Pyrénées et en Allemagne<sup>11</sup>. Elles sont dues à des variations naturelles du climat, on ne leur connaît pas d'influences humaines.

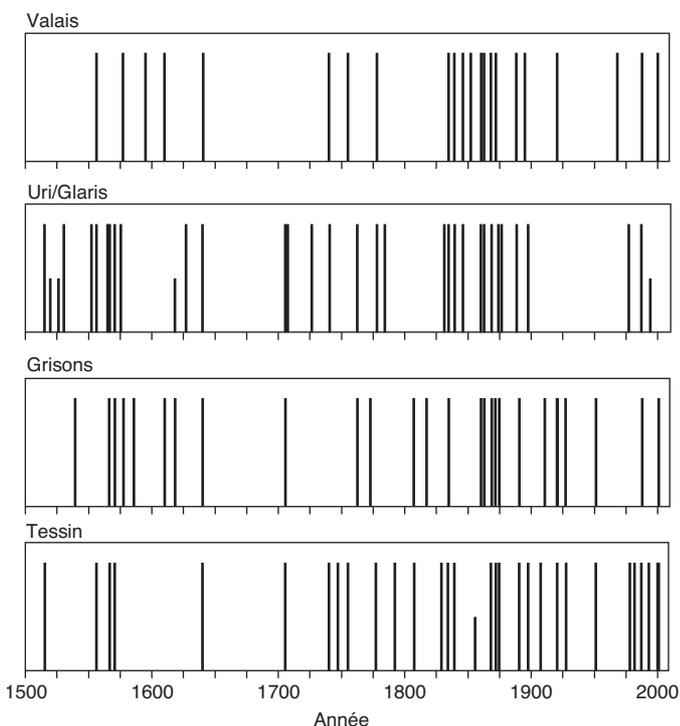
Par rapport aux moyennes du 20<sup>e</sup> siècle, le nombre d'inondations extrêmes dans les Alpes centrales et méridionales a augmenté ces quinze dernières années (août 1987, septembre 1993, octobre 2000); la fréquence de ces événements reste néanmoins confinée dans la largeur de bande antérieure.



**Figure 5:** Tempêtes d'hiver fortes (barres courtes) et extrêmes (barres longues) en Suisse pendant les 500 dernières années. Dans quelques cas (orange), les données historiques ne sont pas univoques.<sup>6</sup>



**Figure 6:** Crués du Rhin près de Bâle fortes (barres courtes) et extrêmes (barres longues), pendant les 500 dernières années. Dans quelques cas (bleu clair), les données historiques ne sont pas univoques.<sup>6</sup>



**Figure 7:** Inondations graves (barres courtes) et extrêmes (barres longues) dans les quatre cantons du Gothard (Valais, Uri, Tessin et Grisons) pendant les 500 dernières années. Des inondations sont qualifiées d'extrêmes si elles causent des dégâts dans au moins deux vallées et/ou au-delà des frontières.<sup>6</sup>

- 1 Easterling D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science* 289, 2068–2074, 2000.
- 2 Wanner H., S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surveys in Geophysics*, 2002.
- 3 Schär C., D. Lüthi, U. Beyerle, and E. Heise, The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model. *J. Climate* 12, 722–741, 1999.
- 4 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.
- 5 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.
- 6 Pfister C., *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995*, Haupt Verlag, Berne, 304 S., 1999.
- 7 Somme des écarts par rapport à la température moyenne de 1901 à 1960 pendant les deux mois.
- 8 Une version complète est stockée dans la banque de données Euro-Climhist. Des extraits sont accessibles librement comme version pilote à l’adresse [www.euroclimhist.com](http://www.euroclimhist.com).
- 9 Pfister C., *Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen*, vdf, Zurich, 142 S., 1998.
- 10 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94, *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
- 11 Glaser R., *Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*, Primus Verlag, Darmstadt, 227 S., 2001.

## 1.4. La détection de tendances se heurte à des limites

Christoph Frei

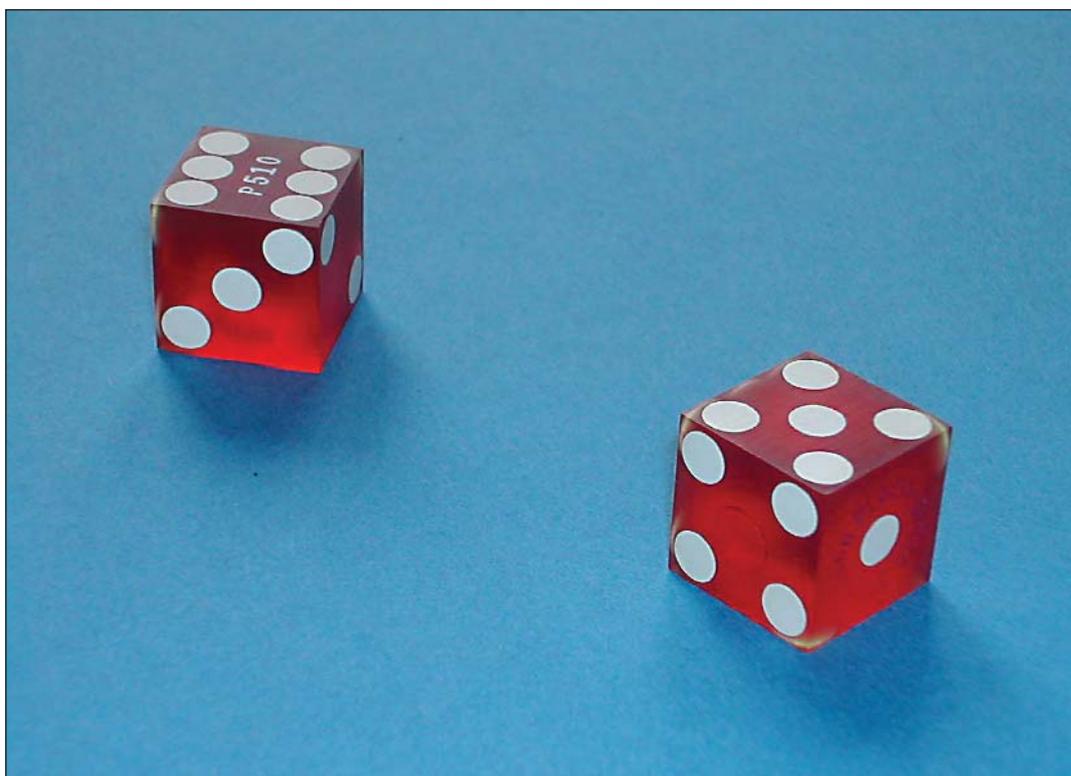
**La mise en évidence de tendances d'événements extrêmes se heurte à des limites tenant à la rareté de ces derniers. Plus ils sont rares, plus il est difficile de discerner leur tendance. Des petits changements de la fréquence d'événements très rares se confondent avec les variations naturelles du climat. L'accumulation apparente d'événements extrêmes au cours des dernières années pourrait tout aussi bien représenter une tendance réelle qu'être due au hasard. Aussi les événements extrêmes sont-ils de mauvais indicateurs des changements climatiques globaux.**

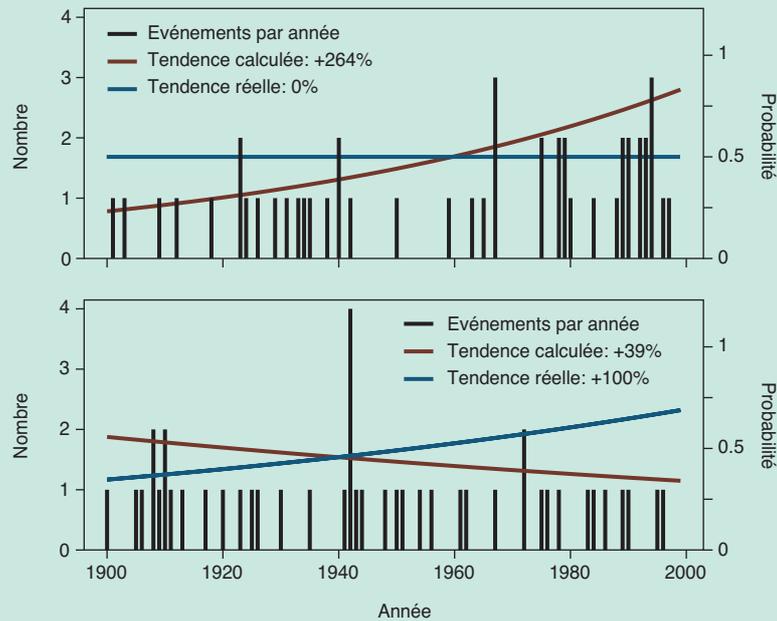
Avec un hiver à avalanches, des crues à Pentecôte, des orages de grêle en été, la tempête Lothar en hiver, 1999 fait figure en Suisse de l'année comprenant le plus de catastrophes naturelles dues à la météo de ces trente dernières. Cette accumulation est-elle anormale, voire un signe de changements climatiques globaux? Que peuvent nous apprendre à ce sujet les nombreuses années d'observation du climat au moyen d'instruments?

Les plus longues séries d'observations instrumentées remontent en Suisse au premier quart du 19<sup>e</sup> siècle (p. ex. à 1818 au Grand-Saint-Bernard). Des réseaux coordonnés de mesures climatiques, opérant dans des conditions comparables, ont été mis en place pendant la seconde moitié du 19<sup>e</sup> siècle. Grâce à ces réseaux, nous disposons aujourd'hui de séries de mesures continues, effectuées à un rythme quotidien, provenant d'une centaine de stations pluviométriques et d'une trentaine de points de mesure de la température.<sup>1,2</sup> Les bases de données sont moins bonnes pour d'autres observations: des mesures de la force du vent sur une période de cent ans n'existent par exemple que pour trois stations (Berne, Bâle et Zurich). Et vu que des instruments ont été souvent changés et des stations déplacées, il est difficile de purger les séries des données non climatiques (harmonisation).<sup>3</sup> Grâce à un effort intense d'élaboration des mesures, mené

ces dernières années, la Suisse dispose aujourd'hui de nombreuses séries de haute qualité en comparaison internationale, qui présentent la résolution temporelle et spatiale requise pour étudier des variations à long terme et les tendances d'événements extrêmes relatifs à la température et aux précipitations.

En dépit de cette confortable base de données, la mise en évidence de tendances des événements extrêmes se heurte à des limites. Elles tiennent à la rareté de ces événements et à l'incertitude statistique qui s'y rapporte: pour détecter une tendance, il faut pouvoir juger si la série d'événements observés est le produit d'un changement systématique (signalant une tendance) ou seulement un fait du hasard (le bruit de fond du climat). Il est d'autant plus difficile de distinguer entre signal et bruit de fond que les événements sont plus rares (plus extrêmes). Cette situation est comparable à celle d'un joueur qui devrait déceler en quelques coups de dé si celui-ci est pipé.





**Figure 8:** Séries d'événements au 20<sup>e</sup> siècle, générées artificiellement. Dans l'exemple du haut, on a supposé que l'événement a une probabilité constante (ligne bleue). L'accumulation fortuite d'événements à la fin du siècle contrefait une augmentation de la probabilité de plus de 250% (courbe rouge). Par contre, dans l'exemple du bas, on a supposé que la probabilité de l'événement double (ligne bleue). La distribution fortuite des événements contrefait une diminution de la probabilité de 39% (ligne rouge).

### Tendance masquée, apparente ou réelle?

Vu la rareté des événements extrêmes, leurs tendances ne peuvent être définies que de façon très floue. D'une part, une accumulation fortuite d'événements au début ou à la fin de la période d'observation peut contrefaire une tendance qui n'existe pas dans la réalité (tendance apparente). D'autre part, une tendance réelle peut se superposer à des variations fortuites et passer inaperçue lors de l'analyse statistique de séries de mesures (tendance masquée).

La figure 8 illustre les erreurs auxquelles une analyse des tendances peut conduire; elle montre des séries générées artificiellement d'événements extrêmes sur une période de cent ans (en noir, nombre d'événements par année, axe de gauche). Dans l'exemple du haut, la série est générée en supposant que la probabilité de l'événement (courbe bleue, axe de droite) est constante, donc qu'il n'y a pas de tendance réelle. Un événement se produit en moyenne une fois tous les deux ans. Or la tendance calculée pour cette série (courbe rouge) indique une augmentation de la probabilité de l'événement de plus de 250% en cent ans. Cette tendance apparente découle de l'accumulation fortuite d'événements à la fin de la période. Une telle accumulation fortuite d'événements aurait tout aussi bien pu se produire au début de la période. On aurait alors obtenu par erreur une tendance à la baisse.

Dans l'exemple du bas, la série est générée en supposant que la probabilité de l'événement double en l'espace de cent ans (courbe bleue). Or la séquence ainsi obtenue ne reflète guère cette situation, car une accumulation fortuite d'événements s'est produite au début de la période à contresens de la tendance réelle. L'analyse statistique de cette série indique une diminution d'environ 40% (courbe rouge). Dans ce cas, la «vraie» tendance est masquée et passe ainsi inaperçue. Plus les événements considérés sont rares, plus faible est la chance de détecter une tendance réelle.

*Christoph Frei*

Il est possible en théorie d'évaluer les limites de détection des tendances d'événements extrêmes. Pour pouvoir détecter une tendance concernant des événements ayant un temps de retour d'une année, il faudrait que la probabilité de ces événements double au moins en l'espace d'un siècle.<sup>4</sup> Et le changement devrait être encore bien supérieur pour des événements de l'ampleur de ceux de 1999, ayant une période de récurrence de dix à plus de cent ans. Les faibles tendances sont masquées par le bruit de fond des variations naturelles du climat.

Ce problème de détection a des conséquences tant pour les études scientifiques que pour le débat public sur les liens entre changements climatiques et événements extrêmes:

- (a) L'accumulation apparente d'événements extrêmes au cours des dernières années pourrait aussi bien signaler une tendance réelle qu'être un fait du hasard contrefaisant une tendance. Pour des raisons statistiques, il n'est pas possible pour l'heure de fournir des indications plus précises.
- (b) Les événements extrêmes sont de mauvais indicateurs des changements climatiques globaux. L'attention portée au problème du climat dans les médias chaque fois que surviennent des événements extrêmes suggère l'idée d'un lien qui ne peut être ni démontré ni réfuté. D'où le danger que dans la perception du public, le problème du climat puisse d'une part être dramatisé de façon non justifiée lorsque les événements extrêmes sont fréquents, et d'autre part minimisé de façon non justifiée lorsqu'ils sont peu fréquents.
- (c) Les données sur les tendances depuis que l'on effectue des mesures au moyen d'instruments se basent sur l'étude d'événements intenses, mais n'ayant pas nécessairement provoqué des dommages. On a trouvé p. ex. une augmentation de 20-80% des précipitations intenses tombées en hiver et en automne avec un temps de retour moyen de trente jours.<sup>4</sup> Cet accroissement se démarque nettement du pur hasard, surtout au nord du Plateau. Mais les données sur des événements intenses ne valent pas nécessairement

aussi pour les événements extrêmes. De plus, les tendances ne sont pas encore une preuve de changements climatiques provoqués par l'homme, elles peuvent tenir aussi à des variations climatiques naturelles à long terme et ne peuvent donc pas être extrapolées sans autres dans l'avenir.

- (d) Les données sur les changements futurs de la probabilité d'événements vraiment rares sont de peu d'utilité, du moins à l'échelon régional. Des changements marqués pourront également être prononcés à l'avenir par la composante aléatoire. Un accroissement éventuel du risque comme conséquence de changements climatiques globaux ne sera pas forcément perceptible ces prochaines décennies. Néanmoins, un renforcement des mesures techniques de protection peut se révéler efficace à plus brève échéance. Un exemple: les dispositions prises à Brigue après l'inondation de 1993 ont démontré leur utilité lors de la crue de l'automne 2000.
- (e) L'étude d'observations à long terme ne permet pas à elle seule une compréhension approfondie du lien entre changements climatiques et événements extrêmes. Les progrès scientifiques consistent ici plutôt en une meilleure compréhension des processus climatiques, atteinte notamment grâce au recours à des modèles de climat.

- 
- 1 Weingartner R., Niederschlagsmessnetze, in: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Landeshydrologie und -geologie EDMZ, Berne, 1992.
  - 2 Jungo P. and M. Beniston, Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes. *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 1–12, 2001.
  - 3 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94. *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
  - 4 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.

# 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

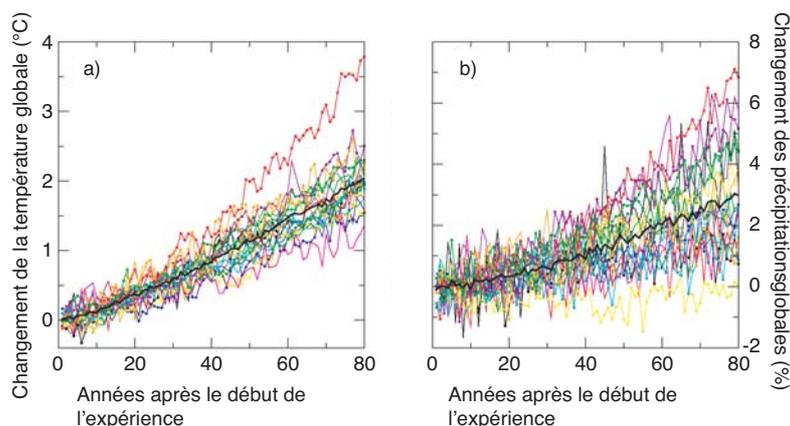
la montée de la limite des chutes de neige a-t-elle sur la formation des écoulements et sur la fréquence des hautes et basses eaux? Tous ces facteurs, qui ont des dimensions spatiales entièrement différentes, doivent être pris en compte par les scénarios climatiques régionaux.

## Modèles climatiques globaux

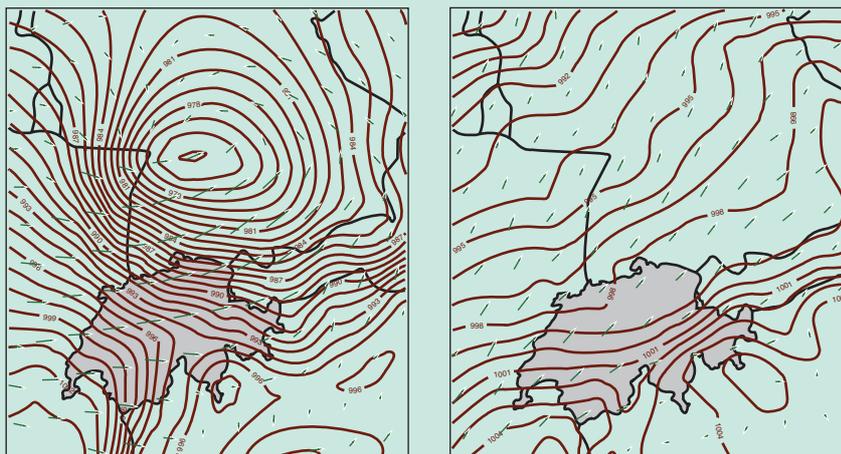
La climatologie recourt aujourd'hui à une large palette de modèles.<sup>1</sup> Selon les problèmes, ceux-ci prennent en compte différentes composantes du système climatique (atmosphère, océans, banquise, terre ferme) et différentes régions (Terre entière, continents, régions). Tous ces modèles ont en 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.<sup>1</sup> 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.<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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.

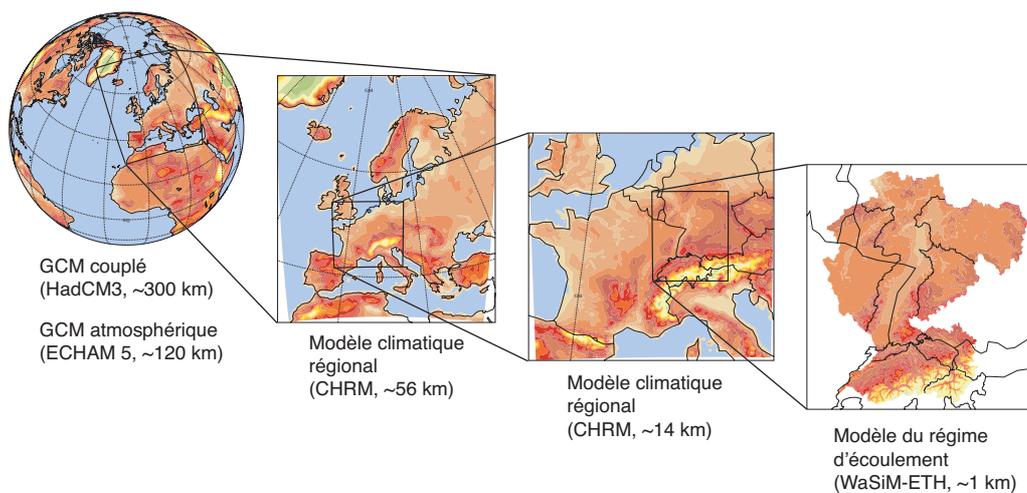
## Des chaînes de modèles pour évaluer les effets régionaux

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.<sup>3,4,5,6</sup> 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.<sup>8,9</sup> 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 précipitations<sup>10</sup> et aux ouragans<sup>11</sup>. 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.<sup>7</sup> 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.<sup>12,13</sup>

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 différents<sup>9</sup>) 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.<sup>14,15,16</sup>

- 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»<sup>1</sup>, 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.<sup>2,3</sup> 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.<sup>4</sup> Cette augmentation touche en particulier l'espace alpin.<sup>5</sup> 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.<sup>6</sup> 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.<sup>7</sup> 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<sup>8,9</sup> ou comme conséquence de l'augmentation de la nébulosité ou de la concentration en aérosols<sup>10,11</sup>.

### 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.<sup>12</sup> 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.<sup>6</sup> 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.

# 1.6. Les événements extrêmes dans la perspective de l'être humain

## 1.6.1. Influencer sur les risques et sur les dommages

Armin Petrascheck

En sciences, les événements naturels sont jugés selon des paramètres physiques. Tandis que l'être humain considère en premier lieu les dommages. Ceux-ci découlent d'un conflit entre l'affectation d'un site et un processus naturel. En Suisse, l'ampleur et la fréquence des dommages tiennent actuellement bien plus à des facteurs humains, tels que des changements d'affectation et la croissance économique, qu'aux changements climatiques, processus comparativement lents.

### Notion de risque

A la différence de la notion de danger, qui dénote la possibilité de subir un dommage, la notion de risque associe l'ampleur potentielle du dommage à la probabilité qu'il se produise. On entend généralement par risque élevé un dommage important ayant une faible probabilité. Dans le cas des dangers naturels liés à un site donné (p. ex. crues, avalanches, glissements de terrain et éboulements), l'ampleur du dommage est généralement aisée à déterminer, mais la probabilité incertaine. Dans celui du risque de réchauffement climatique, la situation est exactement l'inverse. La probabilité est très élevée, mais l'ampleur du dommage très incertaine, voire inconnue.

### Dommage découlant

#### de facteurs dynamiques

Un dommage découle du conflit entre une influence naturelle et l'affectation d'un site soumis à cette influence. Il est d'autant plus important que l'influence est plus forte et que le site est affecté à une utilisation plus vulnérable et de plus grande valeur. L'influence exercée par l'être humain sur un événement naturel est traitée au chapitre 1.6.2.

Pour qu'un dommage se produise, plusieurs conditions doivent être remplies – cela vaut pour tous les dangers naturels. La figure 12 présente à titre d'exemple la chaîne d'actions pour les dommages causés par des crues. De nombreux facteurs dynamiques interviennent dans le déroulement qui conduit des précipitations au dommage, si bien que le dommage ne permet pas de remonter directement à l'événement naturel. Les changements climatiques influent sur les dangers hydro-

logiques, avant tout sur les conditions météorologiques et sur l'état du bassin versant. Des interventions dans le bassin versant (retenue) ou dans le lit du cours d'eau (augmentation de la capacité d'écoulement) peuvent réduire le danger de débordement, mais des obstacles (ponts) peuvent aussi l'accroître, comme l'ont montré les exemples de Poschiavo (1987) et de Brigue (1993). On attend des ouvrages hydrauliques classiques de protection



qu'ils empêchent les inondations. Or ils n'offrent pas une protection totale, comme l'ont montré les exemples des crues de 1987, 1993, 1999 et 2000. Parce qu'on s'est fié à l'efficacité des mesures de protection, on a investi pendant des décennies dans des infrastructures situées dans des zones à risque, ce qui a fait croître les potentiels de dommages (cf. chapitre 1.6.3.).

Une diminution du potentiel de dommages est possible aussi sans changement d'affectation des sites. Les villes de Cologne, Ratisbonne ou Passau sont des exemples démontrant qu'une croissance économique est possible aussi dans des zones souvent inondées, pour autant que les modes d'utilisation et de construction soient adaptés au risque. Lorsqu'un événement survient, les dommages peuvent être empêchés ou limités par des mesures d'urgence. A Naters par exemple, en octobre 2000, les mesures provisoires prises par les pompiers ont permis de maintenir le Kelchbach dans son lit.<sup>1</sup>

L'hiver à avalanches 1999 est un exemple positif de l'action conjointe de plusieurs mesures de protection.<sup>2</sup> La zone concernée et le nombre d'avalanches de vallée sont comparables à celle et celui de l'hiver 1951, on peut donc parler d'un événement semblable. En dépit de l'augmentation considérable du nombre de bâtiments (parahôtellerie), de personnes, de voitures et de voies de circulation, on a dénombré 17 victimes en 1999 contre 98 en 1951 et 720 dommages aux bâtiments contre 1300. L'accroissement substantiel du potentiel de dommages fut plus que compensé par une politique de protection conséquente (paravalanches, délimitation des zones dangereuses, alarme et mesures d'urgence).

**Tableau 2:** Augmentation annuelle de la surface d'habitat et d'infrastructure (en ha) en Suisse.<sup>4</sup>

Période	Agglomérations	Routes	Chemins	Somme
1972-83	+1220	+1000	+680	+2900
1978-89	+1685	+250	+470	+2400
1984-95	+1620	+130	+350	+2100

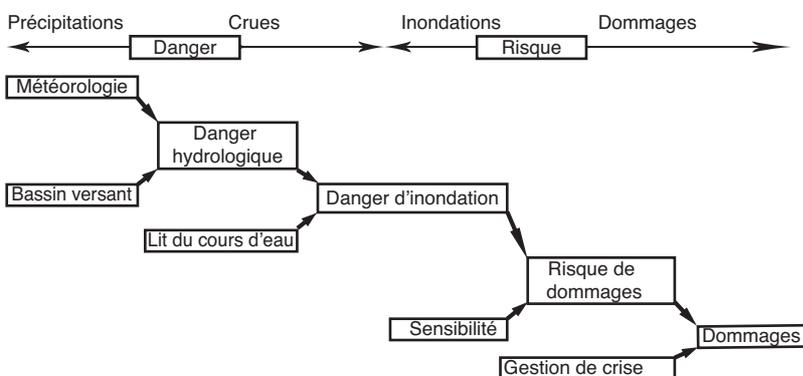
**Facteurs humains**

Une cause importante de l'augmentation des dommages est la croissance économique. En Suisse, quelque 40 milliards de francs sont investis chaque année dans des constructions. La surface construite (zones d'agglomérations, routes et chemins) augmente continuellement – quoiqu'un peu moins vite aujourd'hui que dans les années 1970 (tableau 2). La surface moyenne d'habitation augmente chaque année de presque un mètre carré par habitant. Ainsi les dommages augmentent-ils en raison de la valeur créée, ceci même si les dangers restent les mêmes.

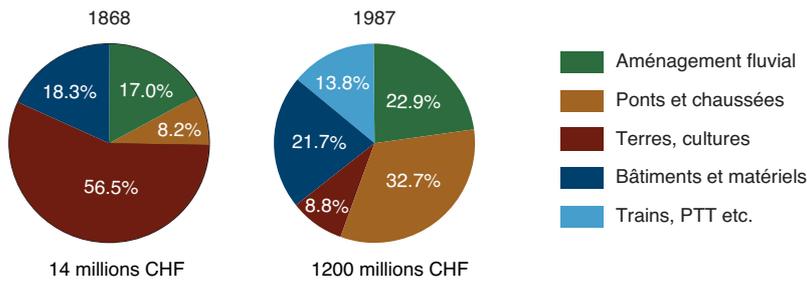
L'effet de la croissance économique sur l'ampleur des dommages peut être occulté en choisissant une grandeur de référence adéquate, par exemple le produit social brut ou la somme d'assurance: en 1868, la Suisse a subi une importante crue causant des dommages pour un montant de 14 millions de francs en valeur de l'époque (figure 13), ce qui représente aujourd'hui au moins 1400 millions de francs.<sup>3</sup> Lors de la crue de 1987, les dommages s'élevèrent à 1200 millions de francs.<sup>5</sup> Mesurés aux performances de l'économie nationale, les dommages de 1868 furent considérablement plus lourds. En effet, si les montants des dommages sont mis en relation avec le revenu national, les dommages

de 1987 correspondent à 2.2 jours de travail de la population suisse, mais ceux de 1868 représentent 4 à 6 jours. La figure 13 montre comment la distribution des dommages par secteurs économiques s'est modifiée.

Mais tous les changements relatifs aux dommages ne peuvent pas être expliqués par la croissance économique. En 1994 et 1999, la vallée de la Reuss, dans le canton d'Argovie, a subi des dommages dus aux



**Figure 12:** Chaîne d'actions pour les dommages dus aux crues.<sup>3</sup> De nombreux facteurs dynamiques influent sur le déroulement qui conduit des précipitations aux dommages. C'est pourquoi le dommage ne permet pas de déterminer l'ampleur de l'événement naturel.



**Figure 13:** En 1868, une grosse crue causa des dommages matériels pour un montant de 14 millions de CHF en valeur de l'époque (aujourd'hui au moins 1400 millions de CHF). Lors de la crue de 1987, les dommages se sont montés à 1200 millions de CHF. Au fil de l'évolution, non seulement l'ampleur, mais aussi le type de dommages change.<sup>5</sup>

crues. Entre 1994 et 1999, le dommage moyen par bâtiment a passé de 4500 à 9200 francs (61 resp. 87 bâtiments dans 12 communes). Les raisons en sont une plus grande vulnérabilité des biens touchés et une moindre tolérance aux dommages des personnes concernées.

### Les populations touchées sont dépassées par les catastrophes naturelles

Du point de vue scientifique, les événements naturels sont jugés selon des paramètres physiques, tels que l'écoulement en cas de crue, le volume d'un éboulement ou la portée d'une avalanche. Tandis que l'être humain considère en premier lieu les dommages. Les statistiques des catastrophes indiquent le nombre de victimes, l'ampleur des dommages matériels et le processus qui a déclenché l'événement, mais elles ne contiennent pas de données sur son intensité, sauf s'il s'agit d'un tremblement de terre. Par exemple, lors des intempéries d'octobre 2000 en Valais, la lave torrentielle de Fully, qui a dévasté terres et cultures, avait un volume d'environ 350'000 m<sup>3</sup>. A Gondo, une ovaïlle de près de 10'000 m<sup>3</sup> s'est accumulée derrière un mur de protection contre les chutes de pierres, mur qui n'a pas résisté à la pression; dix maisons furent détruites et treize personnes perdirent la vie.<sup>1</sup> Les dommages de Fully ont bientôt sombré dans l'oubli. Gondo par contre est entré dans les statistiques comme catastrophe naturelle.

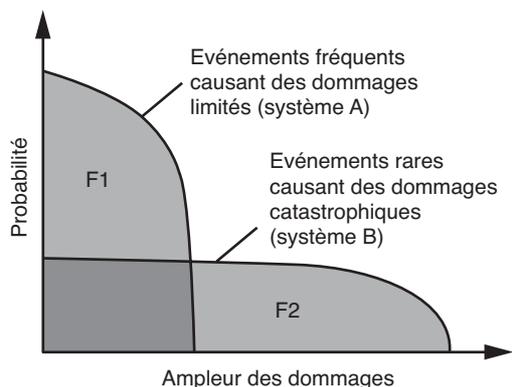
Selon la définition de la protection civile, une catastrophe est un événement causant des dommages auxquels la population touchée ne peut faire face par ses propres forces (cf. chapitre 1.1.). L'ampleur des dommages matériels n'est pas sans ambiguïté comme mode d'évalua-

tion des catastrophes. Lorsqu'en 1997, le Dorfbach dévasta la localité de Sachseln, causant pour quelque 100 millions de francs de dommages, il s'agissait bien d'une catastrophe naturelle, et les médias en ont rendu compte en détails. L'année suivante toutefois, un passage de grêle, qui fit pour 70 millions de francs de dommages dans le canton de Lucerne, est resté pratique-

ment inaperçu. Les dommages étaient répartis sur une vaste communauté, si bien que personne ne fut menacé dans son existence. Comme l'a déjà montré la comparaison des crues de 1868 et 1987, les dommages doivent être considérés en relation avec le niveau de performances de la population touchée. De ce point de vue, la Suisse – en dépit d'un nombre croissant de dommages – est devenue plus sûre en comparaison des siècles passés.

Les processus de concentration dans l'économie constituent un moteur essentiel conduisant à des dommages toujours plus élevés et à toujours plus de catastrophes. L'interdépendance croissante dans l'économie, la réduction des stocks et la concentration de la production sur peu de sites ont déplacé le profil de risques, comme représenté schématiquement à la figure 14. Même si le risque total (surfaces F1 et F2 de la figure 14) reste le même, le nombre et l'ampleur des catastrophes augmentent dans le système B.

Les calculs économiques aiguïssent la prise de conscience à l'égard des coûts. Lorsque les coûts «certains» des mesures de réduction du risque sont comparés aux dommages «possibles», le risque est pris en compte – au moins verbalement. On sait par exemple que le lac Majeur déborde plus ou moins régulièrement. En raison de leur belle situation, les rives sont intensément utilisées, mais le mode de construction n'est malheureusement pas adapté au danger. En octobre 2000, les dommages assurés à des bâtiments et au matériel ont atteint 160 millions de francs, presque autant qu'en Valais (180 millions de francs). En Valais toutefois, les dommages survinrent en des endroits inattendus



**Figure 14:** Changement du profil des risques. En raison des processus de concentration dans l'économie, la tendance évolue d'événements causant des dommages d'ampleur limitée et de probabilité élevée (système A) vers des événements plus rares causant des dommages de beaucoup plus grande ampleur (système B).<sup>6</sup>

et la dynamique des laves torrentielles et des flots eut pour effet de limiter les possibilités de se protéger. Ces mêmes régions précisément (le Haut-Valais et le lac Majeur) avaient déjà été frappées en 1993 par de graves intempéries. En Valais, on en avait tiré la leçon; réalisation d'ouvrages de protection et mesures mobiles basées sur une analyse minutieuse des dangers ont permis de réduire l'ampleur des dommages. Au lac Majeur, on n'a pas constaté que des mesures préventives aient été prises et les dommages furent nettement plus importants qu'en 1993. Il semble que ce risque y soit largement accepté.

### Les changements climatiques comme facteur supplémentaire d'incertitude

La dynamique de l'économie influe bien davantage sur l'ampleur et la fréquence des dommages que le processus jusqu'ici encore relativement

lent des changements climatiques. L'être humain choisit l'affectation d'un site en fonction des chances et des risques que ce dernier présente; l'expérience personnelle et historique est un critère de décision essentiel dans ce contexte. Mais les avantages financiers à court terme sont pris davantage en considération que les dangers naturels existants ou à venir.

Des catastrophes naturelles se produisent lorsque l'intensité des impacts dépasse fortement le niveau connu ou que des dangers apparaissent en des lieux que l'on jugeait sûrs. C'est peut-être ici que réside le plus grand danger des changements climatiques, parce qu'avec le climat, c'est tout le système qui change, et que dans un système sensible, tel que celui des Alpes, les moindres changements peuvent avoir de grands effets. Le cas contraire, à savoir des lieux devenant plus sûrs, n'apporte guère d'avantages économiques, car soit ces lieux ne sont pas utilisés, soit ils sont déjà équipés d'ouvrages de protection.

- 1 OFEG, Hochwasser 2000, Ereignisanalys., Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 248 p., 2002.
- 2 ENA, Der Lawinenwinter 1999 - Ereignisanalyse, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, Davos, 588 p., 2000.
- 3 CIPR, Kriterien für die Erstellung von Hochwassergefahren und Hochwasserrisikokarten, Commission internationale pour la protection du Rhin, Koblenz, 1999.
- 4 ARE, Landschaft unter Druck, 2. Fortschreibung, Office fédéral du développement territorial, Berne, 48 p., 2001.
- 5 Petrascheck A., Die Hochwasser 1868 und 1987, ein Vergleich. WEL, 81, 1-8, 1989.
- 6 Planat, Bewertung von Naturgefahren, Umgang mit Katastrophenereignissen, Vorstudie, Ernst Basler + Partner AG, Berne, 2000.

## 1.6.2. Evolution des dommages dus aux crues, glissements de terrain et avalanches

Christoph Hegg et Franziska Schmid

Chaque année en Suisse, des avalanches, des crues et des glissements de terrain causent des décès et des dommages matériels. Leur répartition au cours des trente dernières années ne présente pas de tendance manifeste. Les statistiques des dommages suivent avant tout la répartition des événements graves, qui sont rares. Des mesures de protection permettent de diminuer l'ampleur des dommages, mais il n'est pas possible d'en quantifier précisément les effets.

### Evolution du nombre des décès

Chaque année, des avalanches, des crues et des glissements de terrain font des victimes en Suisse – quelque deux cents décès dénombrés ces trente dernières années, soit sept par année en moyenne. Environ 60% des victimes sont tuées par des avalanches et 40% lors de crues et de glissements de terrain.<sup>1,2,3</sup> Ne sont pas prises en compte plus de six cents victimes tuées hors de la zone dite de sécurité, la plupart en pratiquant des loisirs. En font partie chaque année une vingtaine d'adeptes du ski hors piste ou de

randonnée ou les vingt et une victimes de l'accident de canyoning à Saxetbach le 27 juillet 1999.

La répartition des victimes d'avalanches, de crues et de glissements de terrain de ces trente dernières années est très hétérogène et n'indique aucune tendance manifeste (figure 15). Quelques années se distinguent des autres par un nombre particulièrement élevé de pertes humaines. En 2000 par exemple, on a déploré vingt décès dus aux intempéries, dont treize à Gondo. D'autres années, des événements aussi graves n'ont heureusement pas eu lieu. Plus loin dans le passé, de tels événements ont fait parfois bien plus de victimes que ces trente dernières années. Pendant l'hiver à avalanches de 1951, on a déploré nonante-huit victimes, et cinquante personnes ont péri lors des crues de 1868. D'autres catastrophes naturelles, comme p. ex. l'éboulement de Goldau, qui a enseveli quelque cinq cents personnes en 1806, peuvent faire encore davantage de victimes.

### Evolution de la totalité des dommages financiers

Il y a différentes manières de saisir les dommages financiers causés par des événements extrêmes. Les dommages à des objets assurés constituent une base possible à cet égard – elle est présentée au chapitre 1.6.3. Mais comme en Suisse tous les objets ne sont pas assurés – ceux appartenant au secteur public notamment ne le sont pas – ces chiffres ne fournissent, selon l'événement, qu'un aperçu incomplet de l'ensemble des dommages subis. L'évolution des dommages directs totaux au cours des trente dernières années est expliquée dans ce qui suit pour le cas des dégâts causés par des crues et des glissements de terrain. La base utilisée est la banque de données du FNP sur les dommages dus aux



intempéries. Elle contient entre autres des évaluations systématiques des dommages, fondées sur les données fournies par des communes, des assurances etc., mais aussi sur des articles de presse publiés à ce sujet en Suisse.<sup>1</sup> Les dommages indirects, p. ex. les pertes de revenu découlant de la fermeture de voies de circulation, ne sont pas pris en considération, parce qu'il n'est guère possible de les saisir.

Les dommages annuels, présentés à la figure 16, varient de plus de deux ordres de grandeur. Cela s'explique avant tout par le fait qu'une grande partie des sinistres sont provoqués par des événements de grande ampleur. En effet, les événements les plus graves des trente dernières années (07/08/78, 24/08/87, 24/09/93, 15/05/99, 15/10/00) ont causé plus des deux tiers du total des dommages financiers. Un tiers des dommages se répartissent sur les quelque 1300 autres événements. En conséquence, l'évolution des statistiques des dommages dépend avant tout de la distribution des rares événements de grande ampleur. On sait peu de chose sur leur répartition et sur leurs causes. En général, ils sont provoqués par des précipitations exceptionnelles.

La courbe des dommages cumulés depuis 1972 n'indique aucune tendance à l'augmentation ou à la diminution des dommages causés par des crues et des glissements de terrain. Des événements particulièrement dommageables sont survenus en nombre plus élevé tant au début qu'à la fin de l'intervalle considéré. Les données disponibles ne permettent pas de tirer des conclusions sur les évolutions à long terme ni sur des tendances relativement peu prononcées, masquées par la forte dispersion des dommages (cf. chapitre 1.4).

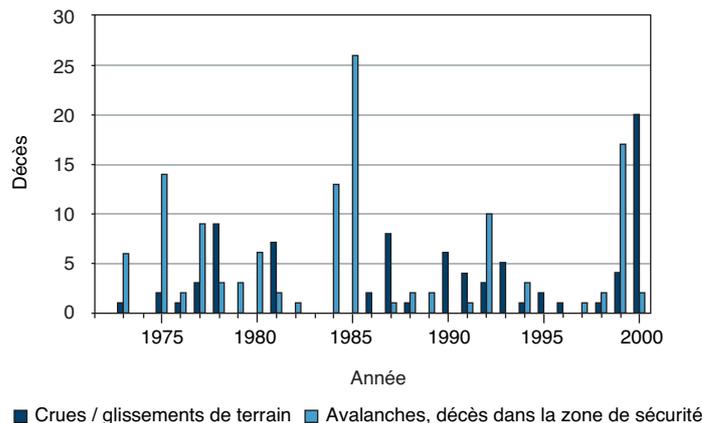


Figure 15: Nombre de décès causés en Suisse ces 30 dernières années par les avalanches, les crues et les glissements de terrain. La distribution ne révèle pas de tendance manifeste.

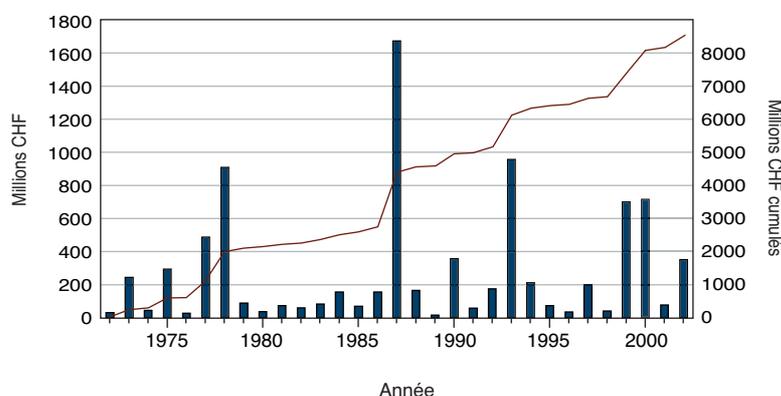
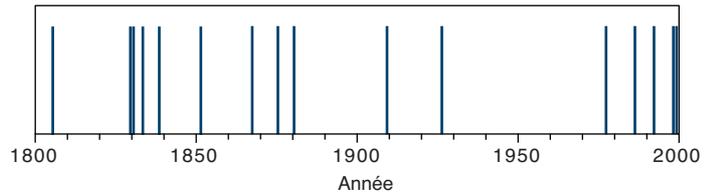


Figure 16: Dommages directs causés en Suisse par les crues et les glissements de terrain. Les colonnes se rapportent à la légende de gauche: elles représentent les dommages annuels, inflation déduite, jusqu'à fin 2000. La courbe représente les dommages cumulés; elle se rapporte à la légende de droite.

L'ampleur des dommages lors de précipitations extrêmes dépend de nombreux facteurs et contingences. Mais les mesures de protection exercent une influence non négligeable. A cet égard, un exemple saisissant est le rehaussement de la digue près de Viège, réalisé après la crue de septembre 1993, pour le coût modeste de 100'000 francs. En octobre 2000, elle a protégé de grandes installations industrielles contre les hautes eaux et évité des dommages qui se seraient chiffrés probablement par milliards. Il aurait suffi toutefois que le Rhône monte de seulement quelques centimètres de plus pour inonder ces installations en dépit du rehaussement de la digue, où l'on voit que le rapport entre un événement et les dommages qu'il provoque n'est pas linéaire. Il comprend plutôt des valeurs seuils, données par exemple par la hauteur de la digue.

Il n'est pas possible de quantifier pour l'ensemble de la Suisse les effets que les mesures de protection réalisées au cours des dernières décennies et des derniers siècles ont sur l'ampleur des dommages. Ces effets ne peuvent être établis que pour des cas précisément documentés, par exemple au moyen d'analyses de l'efficacité des coûts, tenant compte de l'entretien et des éventuelles défaillances des mesures prises. Aussi n'est-il guère possible de prévoir comment une augmentation des fortes précipitations, combinée à tous les autres facteurs d'influence décrits au chapitre 1.6.1., pourrait agir sur les coûts futurs des dommages.



**Figure 17:** Catastrophes dues aux hautes eaux en Suisse pendant les 200 dernières années.

- 1 Hegg C., D. Gerber, and G. Röhliberger: Unwetterschaden-Datenbank der Schweiz. Internationales Symposium Interpraevent 2000 – Villach / Autriche. Actes du symposium, volume 1: 37–48, 2000.
- 2 Röhliberger G.: Unwetterschäden in der Schweiz, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, 346, 51 p., 1998.
- 3 Latenser M., M. Schneebeil et, R. Wüthrich.: Die neue SLF-Schadenlawinendatenbank. Bündnerwald 51, 1, 35–39, 1998.

### 1.6.3. Evolution des sinistres de l'assurance contre les éléments naturels

Dörte Aller et Ewa Kozlowski

**A côté des changements affectant les dangers et les risques, des facteurs relevant de l'économie nationale influent aussi sur la gravité des dommages aux bâtiments. Depuis le début des années 1980, les dommages enregistrés en Suisse par les assurances cantonales des bâtiments évoluent dans le sens d'une augmentation de la variabilité des sinistres. Les dommages exceptionnels de 1999 révèlent par ailleurs l'énorme ampleur du potentiel de dommages.**

L'évolution des sinistres dans l'assurance des dommages dus à des événements naturels est souvent utilisée comme indice des changements climatiques. Ces derniers constituent un facteur important, qui n'est cependant pas le seul à influencer sur l'évolution des sinistres. Les coûts des dommages dépendent, à côté de facteurs modifiant les risques, aussi du développement économique (cf. chapitre 1.6.1.). Les facteurs d'influence sont abordés ici dans l'exemple des dommages couverts par les dix-neuf établissements cantonaux d'assurance des bâtiments<sup>1</sup> (ECA). Depuis la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, les ECA couvrent les dommages causés aux bâtiments par le feu. Les dommages dus aux événements naturels<sup>2</sup> ne furent inclus dans la couverture que vers la fin des années 1920.<sup>3</sup>

#### Etat des données

Les données sur les dommages dus aux événements naturels sont à disposition pour les trente dernières années dans dix-neuf cantons dotés d'ECA (figure 18). Etant donné que dans ces cantons les bâtiments sont obligatoirement assurés auprès de ces établissements de droit public et que ceux-ci ont le monopole de l'assurance contre le feu et les dommages dus à des événements naturels, pratiquement tous les dommages aux bâtiments sont enregistrés.

Les chiffres cités concernent exclusivement les dommages aux bâtiments.<sup>4</sup> Pour comparer les dommages, on établit pour chacune des trente années le rapport

entre le coût des sinistres et la somme d'assurance de l'année. La valeur numérique de ce rapport est appelée taux de sinistres. Le fait qu'il soit ajusté à la somme d'assurance devrait garantir une certaine comparabilité, car la somme d'assurance est adaptée constamment à l'index des coûts de construction et la valeur des bâtiments périodiquement réexaminée.<sup>5</sup>

#### Facteurs influant sur le coût des sinistres

A côté de l'ampleur des dommages, des facteurs économiques ont aussi une influence sur le coût des sinistres (figure 19). Celui-ci est soit couvert par l'assurance, soit à la charge du propriétaire.<sup>6</sup>

L'ampleur des dommages ne dépend pas seulement de l'intensité de l'événement. En effet, un événement extrême ne conduit pas nécessairement à des dommages extrêmes, s'il a lieu p.ex. dans une zone non habitée. Tandis qu'un événement dont l'intensité est simplement supérieure à la moyenne peut provoquer des dommages extrêmes s'il touche une zone à haute densité de population et à forte concentration de biens vulnérables (cf. chapitre 1.1.).



Les facteurs qui ont une influence sur les dommages se répartissent en facteurs modifiant les dangers et les risques et en facteurs modifiant les coûts.

**Facteurs modifiant les dangers et les risques**

Ces facteurs influent sur la fréquence et l'ampleur des sinistres. Les changements climatiques modifient l'intensité et le temps de retour d'événements naturels.

- Dans une zone donnée, la menace d'événements de gravité moyenne à forte peut être limitée par des ouvrages tels que des digues et des galeries pare-avalanches. Mais un risque résiduel subsiste en cas d'événements extrêmes (cf. chapitre 1.6.2).
- Lorsqu'un événement se produit, l'intervention des services de protection peut limiter l'ampleur des dommages.
- Les dommages effectifs dépendent de la vulnérabilité du bâtiment touché. A prendre en considération notamment lorsque:
  - la construction se trouve dans une zone à risque, p.ex. dans une région menacée par les inondations
  - le type de construction est vulnérable – il comprend p.ex. des ouvertures situées à faible hauteur, quand bien même il est situé dans une région menacée par les inondations
  - la construction est utilisée sans tenir compte des dangers naturels – p.ex. la cave sert de lieu d'habitation, quand bien même le bâtiment est situé dans une région menacée par les inondations – ou est mal entretenue
  - les matériaux utilisés sont vulnérables – le bâtiment comprend p. ex. un lumidôme qui ne résiste pas à la grêle

On ne peut nier l'augmentation du potentiel des sinistres due à l'exploitation de régions exposées et au recours à des matériaux et modes de construction vulnérables.

**Facteurs modifiant les coûts**

L'influence de ces facteurs sur le montant des dommages assurés tient à des aspects d'économie d'entreprise et d'économie nationale, tels que:

- les conditions de l'assurance, p.ex. un changement de la franchise

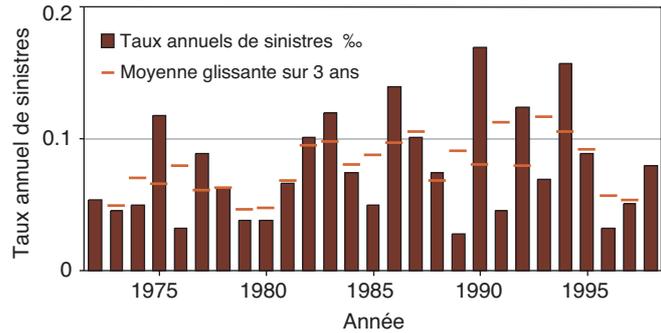


Figure 18: Taux annuels de sinistres affectant les bâtiments couverts par les dix-neuf établissements cantonaux d'assurance des bâtiments<sup>7</sup> (en % de la somme d'assurance, de 1972 à 1998).

- la somme d'assurance, p.ex. si une assurance couvrant la valeur actuelle a été transformée en une assurance couvrant la valeur à neuf
- le comportement des assurés, p.ex. s'ils procèdent eux-mêmes aux nettoyages ou confient ce travail à un institut spécialisé

La comparabilité de séries de données à long terme est garantie dans une large mesure par l'indexation au moyen de la somme d'assurance – qui tient compte du renchérissement et de l'accroissement du capital en nature. Il est plus difficile de prendre en considération les changements des conditions d'assurance et du comportement de l'assuré.

Ces différents facteurs ne peuvent guère être quantifiés isolément, raison pour laquelle ils ne sont pas mentionnés par ordre d'importance de leur influence.

**Série de données à long terme sur les dommages aux bâtiments**

La figure 20 fournit les taux de sinistres de 1972 à 2002. L'année 1999 saute aux yeux. La série de 1972 à 1998 (cf. figure 18), qui couvre donc presque trente années, ne donne aucun indice direct de la possibilité d'une année aussi extrême en termes de dommages. Le temps de retour des dommages de 1999 se situe entre 50 et 100

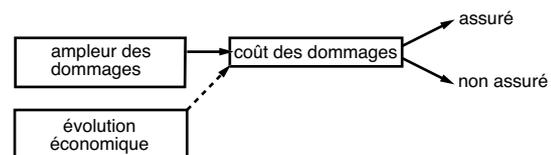
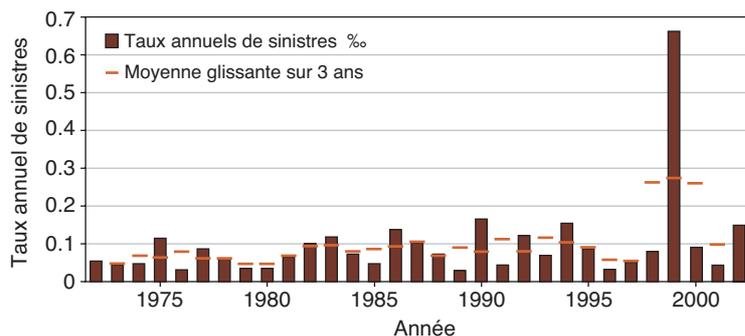


Figure 19: Schéma des facteurs d'influence qui déterminent le coût des sinistres.



**Figure 20:** Taux annuels de sinistres affectant les bâtiments couverts par les dix-neuf établissements cantonaux d'assurance des bâtiments<sup>7</sup> (1972 à 2002). Les écarts entre les lignes horizontales correspondent à ceux de la figure 18 (changement d'échelle).

ans. Ce qui explicite l'étendue de la variabilité et permet de conclure que des dommages encore plus extrêmes sont possibles en tout temps.

Jamais autant de sinistres qu'en 1999 n'étaient survenus la même année. Presque 300'000 sur près de 2 millions de bâtiments assurés ont subi un dommage. La somme des dommages aux bâtiments couverts par les dix-neuf établissements cantonaux d'assurance se monte à plus d'un milliard de francs, sur 1'500 milliards de francs que représente la valeur totale de tous les bâtiments assurés.

La somme par année sur les dix-neuf cantons ayant un ECA et sur les différents dommages dus à des événements naturels est plus ou moins équilibrée. Néanmoins, plusieurs sinistres exceptionnels se sont ajoutés et ont fait de 1999 une année extrême en termes de dommages, à savoir:

- des avalanches et la pression de la neige au printemps (env. 80 millions CHF),
- des inondations pendant la période de l'Ascension et de Pentecôte (env. 200 millions CHF),
- une tempête de grêle le 5 juillet (env. 80 millions CHF) et
- la tempête Lothar le 26 décembre (env. 600 millions CHF)

Le choix de la période de décompte – dans le secteur des assurances en général l'année civile – peut aussi avoir une influence substantielle sur les montants annuels des sinistres. Les dommages causés par Lothar sont un bon exemple à cet égard: si Lothar avait eu lieu une semaine plus tard, il aurait alourdi le décompte de 2000 et allégé celui de 1999. Le calcul de la moyenne glis-

sante sur trois ans permet d'émettre un avis sur l'évolution des données des sinistres au cours de ces trente ans.

La figure 18 fait apparaître un saut au début des années 1980. Les moyennes des taux de sinistres sont un peu plus élevées après 1981 qu'entre 1972 et 1981. La variabilité a augmenté pendant les années 80. On observe un accroissement encore plus marqué de la variabilité pendant la dernière décennie.

### Le rôle de la prévention

Il faudra compter avec des catastrophes naturelles aussi à l'avenir. Et il faudra préciser quelles responsabilités incombent aux individus et à la communauté pour faire face aux sinistres. A cet égard, la prévention prend toujours plus d'importance.

Les établissements cantonaux d'assurance des bâtiments étendent aux événements naturels la protection des bâtiments qui a fait ses preuves depuis des décennies pour les incendies.<sup>8</sup> Jusqu'à un certain point, prévenir les sinistres signifie construire en prenant les dangers naturels au sérieux. Si toutefois un événement plus intense se produit, un corps de sapeurs-pompiers bien formé et bien équipé peut limiter les dégâts. Enfin, le caractère obligatoire et de monopole de l'assurance garantit la réparation totale des dommages, les bâtiments étant tous suffisamment assurés. La synergie entre prévention des sinistres, lutte contre les dommages et assurance conduit à une protection étendue, économique et solidaire. Grâce aux ECA, la question de l'assurance et de la prévention contre les dommages dus aux événements naturels est réglée en Suisse de façon exemplaire en comparaison européenne.<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Il existe une assurance cantonale des bâtiments dans les cantons suivants: ZH, BE, LU, NW, GL, ZG, FR, SO, BS, BL, SH, AR, SG, GR, AG, TG, VD, NE, JU; cantons ne disposant pas d'une telle assurance: GE, UR, SZ, TI, AI, VS, OW.

- 2 Dommages dus aux événements naturels: dommages subits et inattendus, causés par les tempêtes, la grêle, les inondations, les avalanches, la pression de la neige, les laves torrentielles de boue, les glissements de terrain, les chutes de pierres, les éboulements, les écroulements.
- 3 Wanner C., vorbeugen – schützen – entschädigen. Die Entstehung der Elementarschadenversicherung in der Schweiz. Travail de licence à l'Institut d'histoire de l'Université de Berne, 2002.
- 4 Dommages aux bâtiments: dommages à des parties non mobiles après déduction de la franchise, à l'exclusion des dommages au mobilier et des coûts d'interruption d'exploitation.
- 5 Des spécialistes, internes et externes, du secteur du bâtiment (architectes, ingénieurs en génie civil...), formés à cet effet, déterminent le capital d'assurance et traitent des dommages.
- 6 Pour cette raison, et vu la saisie pratiquement exhaustive des sinistres, on peut considérer que la qualité des données est bonne.
- 6 Dans les cantons ayant une assurance cantonale des bâtiments, tous les bâtiments sont assurés contre les dommages dus aux événements naturels.
- 7 Les sinistres dans les cantons sans assurance cantonale des bâtiments ne sont pas pris en compte dans la figure (cf. note 1). La crue de 1993 à Brigue, par exemple, ou les inondations d'octobre 2002 au Tessin et en Valais ne sont pas représentées.
- 8 Assurances cantonales des bâtiments, Manifeste pour la prévention des dommages éléments naturels, 2001.
- 9 von Ungern-Sternberg T., Gebäudeversicherung in Europa – Die Grenzen des Wettbewerbs. Haupt Verlag, Berne, 178 S., 2002.

## 1.6.4. Les événements extrêmes dans la perspective du secteur des assurances

Gerry Lemcke

**Les dommages dus à des événements naturels varient d'année en année. Le taux de croissance des dommages assurés est d'environ 5.2% par année. Deux tiers des dommages dus à des événements naturels sont d'origine atmosphérique. Tout changement climatique peut modifier la fréquence et l'intensité de ces événements. En appliquant le principe de précaution et en développant de nouveaux produits, les assurances s'efforcent de garantir une couverture suffisante à l'avenir aussi.**

Par la somme des dommages assurés<sup>1</sup> de 28.6 milliards USD, mais aussi par ses sept milliards de dommages, 1999 figure au deuxième rang mondial dans la liste des années les plus coûteuses de l'histoire des assurances depuis 1989. De 1970 à 2000, les études sigma de la Swiss Re ont enregistré 47 dommages assurés atteignant chacun un montant de l'ordre du milliard: 33 de ces sinistres tombent dans les années 1989 à 2000. Les dommages dus à des événements naturels sont extrêmement fluctuants (figure 21): l'écart standard depuis 1989 est de 8.2 milliards USD pour un montant annuel moyen des sinistres de 20.2 milliards USD. Les tempêtes figurent pour 11.0 milliards USD, les séismes pour 2.0 milliards USD et les inondations pour 1.1 milliards USD. Le reste se répartit entre d'«autres dangers», p.ex. les tornades, la grêle ou les glissements de terrain. Le taux de croissance des dommages assurés, causés par des dangers naturels, est d'environ 5.2% par an. Si cette évolution devait simplement se poursuivre ces vingt prochaines années, la société et l'industrie se verraient confrontées en 2020 à des dommages assurés annuels moyens de 60 milliards USD.

Lothar et Martin, réunis le plus souvent sous le nom de Lothar, ont passé dans la presse comme les événements du siècle. Ils ont causé 80 morts d'hommes, dont 13 en Suisse, ainsi que quelque 12 milliards USD de dommages à l'économie nationale et 5.8 milliards USD de dom-

mages assurés. A l'exception des dommages provoqués en 1990 par les tempêtes Daria, Herta, Vivian et Wiebke, des dommages d'une telle ampleur n'avaient jamais été causés auparavant par des tempêtes aux latitudes moyennes. Bien que Lothar et Martin soient des événements d'intensité moyenne à l'échelle européenne, la succession immédiate de ces tempêtes a révélé à nombre d'assureurs primaires européens les limites de leur capacité de couverture: de nombreux programmes de réassurance sont conçus comme protection contre des événements isolés très rares, et non pas pour plusieurs sinistres se succédant à brève échéance.

La vulnérabilité à l'égard des catastrophes naturelles et le potentiel de risque qui en découle ont augmenté énormément ces dernières années en raison de changements démographiques, de l'évolution technologique et de développements socioéconomiques. C'est ainsi qu'aujourd'hui près de 40% de la population mondiale habite dans des régions côtières, plus exposées en moyenne aux dangers naturels. Même quand la



menace reste la même, la croissance des biens assurés augmente de façon durable le risque de subir des dommages plus importants. Pendant les dernières décennies, les dommages à l'économie nationale furent en gros 8 fois et les dommages assurés 12 fois plus élevés que pendant les années 1960.<sup>2</sup> Même s'il y a unanimité sur le fait que cette tendance est due avant tout à la croissance des biens assurés, il ne faut pas ignorer les changements de la fréquence et de l'intensité des dangers naturels, relevant des changements climatiques.

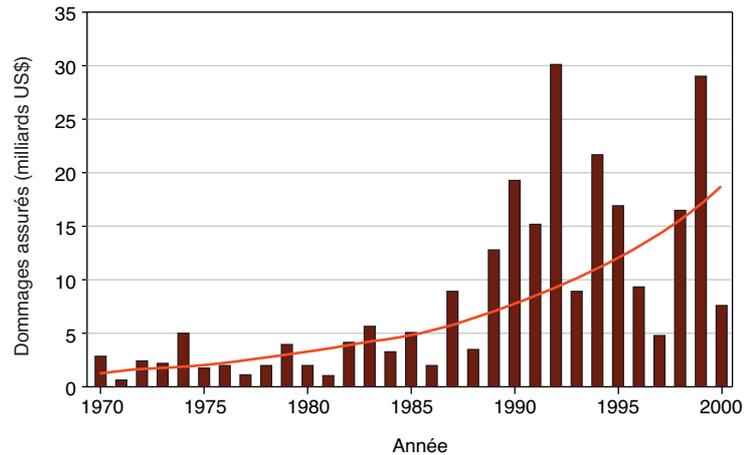
### Potentiel de risque plus élevé

Pour les assurances, le phénomène des événements extrêmes ne se réduit pas à des grandeurs physiques ou statistiques. Celles-ci découlent plutôt de l'interaction entre l'intensité et la fréquence des événements et les biens matériels ou immatériels touchés par l'événement. Le lien avec les dommages pécuniaires est impératif pour porter un jugement sur des événements extrêmes, au sens de la technique des assurances. Cette vision des choses doit toutefois être questionnée du point de vue humanitaire. Il faut toujours avoir à l'esprit que le propriétaire ou la communauté doit payer pour les dommages non assurés. Cela peut être lourd de conséquences pour les pays en développement, comme l'ont montré l'ouragan Mitch, qui a ravagé le Honduras en 1998 et fait plus de 9'000 morts.

En gros deux tiers des dommages liés aux dangers naturels sont d'origine atmosphérique. Ils sont donc causés p.ex. par des tempêtes, des inondations ou la grêle. Tout changement climatique – affectant l'équilibre atmosphérique global – comprend un potentiel de changement régional ou local de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques.

Les changements climatiques sont souvent envisagés comme changements de moyennes à long terme. On oublie souvent que les moyennes se rapportent à une distribution. A cet égard, il convient de relever les points suivants:

- Tout déplacement de la valeur médiane est causé par un déplacement de l'intensité resp. de l'intensité des événements. Des évé-



**Figure 21:** Dommages assurés lors de catastrophes naturelles de 1970 à 2000 en milliards USD au niveau des prix de 2000 (Swissre, étude sigma; inflation déduite).

ments «normaux» peuvent tout aussi bien augmenter que des événements rares. Si la probabilité d'événements extrêmes change, cela influe fortement sur l'ampleur d'un scénario d'estimation des dommages maximums (scénario EML), portant sur des événements extrêmes très rares.

- Si des événements d'ampleur moyenne augmentent, cela influe sur la charge des dommages de base: ces événements absorbent alors une grande partie des primes mises en réserve en vue de catastrophes naturelles plus rares.

Si et dans quelle mesure le réchauffement global conduit à un accroissement des dangers naturels et affecte leur fréquence n'est pas clair à l'heure actuelle. Alors que l'intensification du cycle de l'eau entraînant une augmentation des précipitations semble déjà en cours dans quelques régions d'Europe, des indices clairs de changements du régime des tempêtes d'hiver p.ex. font défaut. Mais il est évident que même une faible augmentation de la fréquence de tempêtes de l'ampleur de Lothar exerce des effets considérables, ceci pas seulement sur les futures primes d'assurance.<sup>3</sup>

### Rôle et possibilités de la réassurance

L'industrie des assurances suit avec attention l'augmentation notable du nombre des dommages au cours des dix dernières années. Les instruments les plus importants pour garantir, aussi à l'avenir, une couverture suffisante sont l'application du principe de précaution – y compris l'évaluation et la gestion proactives des risques basées

sur les connaissances scientifiques les plus récentes – ainsi que, à côté de solutions classiques, le développement de nouveaux produits d'assurance tels que les transferts sur le marché des capitaux (CAT-Bonds) ou les dérivés météorologiques.

La gestion des risques va nettement plus loin que les ouvrages de protection contre les dangers naturels. Elle inclut dans une large mesure une prise de conscience. Le public doit prendre conscience à quel point les technologies actuelles et les nouveaux styles de vie, interagissant avec des conditions climatiques en changement, créent un potentiel de risque qui ne peut pas être assumé dans tous les cas par des tiers sous sa forme actuelle. Qui construit sciemment dans des régions exposées, telles que des zones à inondations, devrait en assumer le risque seul ou le supporter sous la forme de primes d'assurances plus élevées, et non pas le rejeter sur la communauté. Lors de changements qui concernent la communauté, tels qu'une augmentation des crues en raison des changements climatiques, les capacités de couverture à disposition devraient servir à financer les gros dommages et non pas des bagatelles. Avec la franchise actuelle de 0.2% de la somme d'assurance, une grande partie des moyens est absorbée pour payer des dommages mineurs et minimes qui ne menacent pas l'existence des individus.

L'évaluation des risques, en tant qu'élément constitutif de la gestion des risques, consiste à appliquer le savoir-faire scientifique à l'évaluation des dangers naturels. Des modèles probabilistes, qui rendent compte de façon aussi réaliste que possible des dangers naturels, de la distribution des biens, de la répartition géographique et des conditions d'assurance, aident à estimer aussi des événements rares avec une précision suffisante,

au moyen de courbes de la fréquence des dommages. Un élément décisif, outre une connaissance géographique précise des biens exposés et de leurs spécificités, est de disposer d'un catalogue complet d'événements historiques.

Les capacités disponibles d'assurance et réassurance ont été constamment élargies par le développement systématique de modèles classiques d'assurances (p.ex. des modèles d'assurances non proportionnels ou de transfert alternatif des risques). Les possibilités ne sont toutefois pas extensibles à volonté, d'autant moins qu'une augmentation des capacités se fait sentir avant tout dans des régions où la densité de couverture est déjà importante. Cela va à l'encontre de la nécessité de diversification, c'est-à-dire d'un équilibre des risques dans l'espace et le temps. Il s'ensuit une augmentation massive des prix qui rendent ce genre de couvertures inabordable dans certaines régions.

Une tâche essentielle de l'industrie des assurances, pour garantir sa propre protection et celle de ses assurés, est d'estimer les conséquences directes et indirectes, effectives et possibles, des changements climatiques, et ceci le plus tôt possible, en dépit des grandes incertitudes sur les effets réels. Car le développement de produits qui répondent à de nouvelles demandes – pour garantir par exemple la couverture de dommages en cas d'inondation – prend du temps.

---

1 Seuls les dommages dus aux événements naturels sont considérés. Des événements extrêmes causés par l'être humain, tels que ceux du 11 septembre 2001 aux USA, ne sont pas pris en compte.

2 Müncher Rück, Nat Cat Service, 2001.

3 Swiss Re, Despite continued price erosion and overcapacity: Cat markets on the rebound? 1999.



**2<sup>e</sup> partie**

# **L'état des connaissances**

## 2.1. Extrêmes de température

Patricia Jungo

**Les températures des extrêmes de chaleur et de froid sont montées en toutes saisons au cours du 20<sup>e</sup> siècle. A haute altitude, on a observé un accroissement marqué des extrêmes de chaleur en hiver. Aux basses altitudes, les extrêmes de froid se sont produits plus rarement. Au 21<sup>e</sup> siècle aussi, les températures des extrêmes de chaleur et de froid devraient s'élever avec le réchauffement climatique attendu.**

### Introduction

Les changements à long terme des températures au sol peuvent avoir de multiples effets sur les écosystèmes (notamment sur les plantes<sup>1</sup>), le régime hydrologique au sol, les glaciers et le permafrost (cf. chapitre 2.9.). Sont essentiels à cet égard non seulement les changements des températures moyennes, mais aussi les extrêmes de température. A part leurs effets dans les domaines précités, les périodes de chaleur et de froid extrêmes peuvent provoquer des dommages durables aux écosystèmes et à l'agriculture ou même constituer un risque sanitaire pour l'être humain et l'animal. Les températures extrêmes sont perçues de différentes manières. Les aspects déterminants sont leur durée et leur extension. Leurs formes les plus extrêmes sont les vagues de chaleur et de froid affectant de vastes régions. Que l'on songe à l'hiver glacial 1962/63 ou à l'été caniculaire de 1947.<sup>2</sup> Toutefois, des extrêmes de température ayant une si longue période de récurrence sont peu utiles pour l'étude des tendances et des changements futurs possibles (cf. chapitre 1.4.). C'est

pourquoi le présent chapitre aborde l'évolution des extrêmes de température «modérés», en l'occurrence les 10% les plus hauts des maxima et les 10% les plus bas des minima d'une saison. Pour simplifier, les maxima peuvent être assimilés à des températures diurnes et les minima à des températures nocturnes.

En Suisse, les températures subissent de fortes variations saisonnières et, en raison de la topographie très diverse, de fortes influences régionales et locales. Nous distinguons ici grossièrement entre les régions alpines au-dessus de 1500 m et les régions de basse altitude situées au nord des Alpes au-dessous de 800 m. La région alpine est particulièrement importante parce qu'il existe à ces altitudes des écosystèmes bien adaptés au climat local et par conséquent sensibles aux changements. De plus, les températures mesurées dans ces régions retirées dépendent moins d'influences non naturelles (telle que l'urbanisation p.ex.).<sup>3</sup>

### Tendances observées au 20<sup>e</sup> siècle

Au 20<sup>e</sup> siècle, les extrêmes de chaleur et de froid ont subi tous deux un réchauffement, ceci aussi bien dans les régions alpines que dans celles de basse altitude. Depuis 1900, les températures des jours les plus chauds et des nuits les plus chaudes, de même que celles des jours les plus froids et des nuits les plus froides, ont subi une hausse qui se situe, suivant la saison, entre 0 et 3.3°C.<sup>4</sup>

Les extrêmes de chaleur et de froid ont aussi changé. Au cours des ans, les extrêmes de froid ont diminué surtout pendant

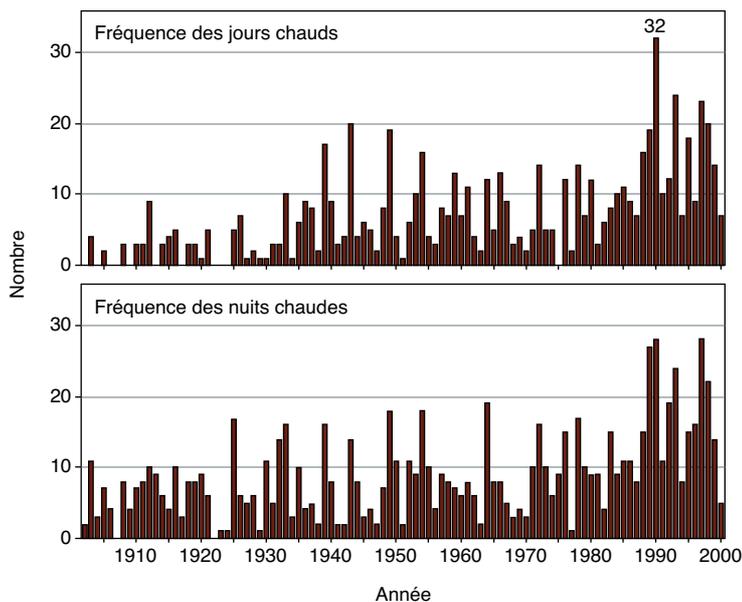


les mois d'hiver.<sup>5</sup> Pendant les hivers, printemps et étés des années 1990 notamment, la fréquence des extrêmes de chaleur fut nettement supérieure et celle des extrêmes de froid nettement inférieure à la moyenne des 90 années précédentes. Le changement le plus prononcé concerne les extrêmes de chaleur en hiver dans les régions alpines (figure 22). Pendant les années 1990, on a dénombré en moyenne 16 jours chauds et 17 nuits chaudes, alors qu'antérieurement, pendant des intervalles de temps de longueur comparable, on n'en a toujours comptés qu'entre 1 et 9.

Dans les régions plus basses, le réchauffement tient plutôt au fait que les extrêmes de froid se produisent un peu moins souvent. Sur le Plateau suisse, on a dénombré dans les années 1990 cinquante jours de gel de moins que pendant la première décennie du siècle (cf. chapitre 2.2.).<sup>6</sup>

### Facteurs d'influence des changements climatiques

Des changements climatiques peuvent se répercuter sur les températures à travers différentes chaînes de processus. En premier lieu vient l'influence directe du renforcement de l'effet de serre, consécutif à l'augmentation des gaz à effet de serre; il engendre un réchauffement. Mais les températures au sol sont aussi gouvernées par des processus dynamiques, dans lesquels la répartition des pressions détermine l'origine des masses d'air. C'est ainsi qu'il existe en Suisse un rapport étroit entre les situations météorologiques<sup>7</sup> et la fréquence des extrêmes de chaleur ou de froid (cf. chapitre 1.3.). Par exemple, la fréquence comparativement faible de jours d'hiver froids pendant les années 1990 est comprise comme conséquence d'une augmentation des régimes de haute pression et de vent d'ouest au détriment des régimes de bise. Ce changement semble être en relation étroite avec des modifications des courants atmosphériques au-dessus de l'Atlantique Nord et avec l'augmentation observée conjointement de l'indice de l'oscilla-



**Figure 22:** Nombre d'extrêmes de chaleur de 1902 à 2000 pendant les mois d'hiver dans les régions alpines (au-dessus de 1500m). La valeur seuil a été définie comme le percentile 90 des maxima (diurnes) et des minima (nocturnes) de température de la période climatique de référence 1961-1990.<sup>4</sup> En d'autres termes, ce n'est pas le plus grand des maxima ou minima de la période de référence qui a été choisi comme seuil: 10% des températures maximales ou minimales mesurées sont supérieures à ce seuil

tion nord-atlantique (NAO).<sup>8</sup> A l'heure actuelle, on ne sait pas encore au juste si ces changements des courants sont une conséquence des changements climatiques globaux ou s'ils sont l'expression d'une phase particulière de la variabilité naturelle du climat.

Les conditions au sol à l'échelon local et la couverture nuageuse jouent aussi un rôle, à côté de l'effet de serre et des influences dynamiques. Un exemple: vu le rôle de la neige dans l'équilibre radiatif, la diminution des neiges d'hiver, attendue en cas de réchauffement, pourrait conduire à renforcer le réchauffement à l'échelon régional. Ce processus pourrait être significatif avant tout pour les extrêmes hivernaux de température.

### Influence des changements climatiques

La hausse attendue des températures moyennes au cours du 21<sup>e</sup> siècle sera très probablement associée à une augmentation des extrêmes de température en Europe. Une analyse des extrêmes de température sur vingt ans, simulés pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle par un modèle climatique global, indique une hausse générale des minima et maxima de température.<sup>9</sup> Selon les régions les changements par rapport au climat actuel dépass-

sent parfois 5° pour les minima et se situent entre 1° et 4° pour les maxima. Les détails régionaux indiquent une hausse des minima surtout dans des régions où la couverture de neige se rapetisse et une hausse des maxima avant tout dans des régions où l'humidité du sol en été diminue. Un scénario conjecturant une diminution de l'humidité du sol est très incertain dans l'espace alpin, mais une réduction de la période d'enneigement en hiver est plausible. Il est intéressant de relever que la hausse des températures extrêmes simulée par les modèles est plus importante que celle des moyennes.<sup>10</sup> Même si l'interprétation des résultats suggère une certaine sensibilité des modèles dans l'approche des extrêmes de froid dans l'espace alpin, les chiffres mentionnés doivent être considérés avec prudence. Des modifications des courants à grande échelle auront une part importante dans les changements régionaux des extrêmes de température. Sur ce point toutefois, les modélisations actuelles sont très peu sûres.

- 1 Defila C. and B. Clot, *Phytophenological trends in Switzerland*, *Int. Journal of Biometeorology*, 45, 208–211, 2001.
- 2 Pfister C., *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995*, Haupt Verlag, Berne, 304 S., 1999.
- 3 Beniston M. and M. Rebetez, *Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993*, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 231–243, 1996.
- 4 Jungo P., *20th century minimum and maximum temperature variations analysed on a regional scale in Switzerland – statistical analyses on observational data*, Ph.D. Thesis No. 1365, University of Fribourg, Switzerland, 221 p., 2001.
- 5 Rebetez M., *Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland*, *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 13–21, 2001.
- 6 Heino R., R. Brazdil, E. Forland, H. Tuomenvirta, H. Alexandersson, M. Beniston, C. Pfister, M. Rebetez, G. Rosenhag, S. Rösner, and J. Wibig, *Progress in the study of climatic extremes in northern and Central Europe*, *Climatic Change*, 42, 151–181, 1999.
- 7 Schüepp M., *Klimatologie der Schweiz, Band III*, in: *Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt*, Zurich, 89 S., 1978.
- 8 Wanner H., R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, and M. Schüepp, *Global climate change and variability and its influence on Alpine climate – concepts and observations*, *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 221–243, 1997.
- 9 Kharin V. V. and F. W. Zwiers, *Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled Atmosphere-Ocean GCM*, *J. Climate*, 13, 3760–3788, 2000.
- 10 Gregory J. M. and J. F. B. Mitchell, *Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation in the current and 2xCO<sub>2</sub> climates of the UKMO climate model*, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 121, 1451–1476, 1995.

## 2.2. Le risque de gel

Claudio Defila

**Le gel cause souvent des dommages aux cultures. Vu que l'ampleur des dégâts ne dépend pas seulement de la température mais aussi du stade de développement des plantes, on craint en Suisse avant tout les gelées survenant tard au printemps. En Suisse, le stade d'évolution de quelques plantes a acquis en moyenne une avance de 11.6 jours au printemps et un retard de 1.7 jours en automne par rapport à 1950. Tandis que plusieurs stations de mesure ont enregistré le dernier jour de gel du printemps de plus en plus tôt au cours des trente dernières années. En même temps que le climat, le risque de gel changera aussi à l'avenir. Mais il n'est pas possible de prédire avec certitude s'il augmentera ou s'il diminuera.**

### Introduction

En climatologie, on parle d'un jour de gel si la température minimale descend au-dessous de 0°C. En biométéorologie, discipline qui étudie l'influence du temps et du climat sur les êtres vivants, la notion de gel doit être abordée de façon plus nuancée. En agrométéorologie, on ne parle de gel que lorsqu'il y a des dommages aux cultures. Vu que la résistance des plantes au gel varie selon leur stade de développement, le fait que le mercure descende au-dessous de 0°C n'équivaut pas forcément à un jour de gel. Ainsi le gel prend-il une autre signification suivant la saison, raison pour laquelle il est défini en fonction de la période à laquelle il survient.

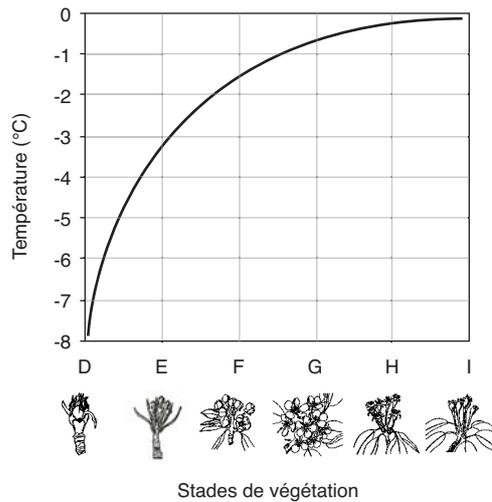
Les *gelées d'hiver* ont peu d'importance en Suisse. Les plantes indigènes sont adaptées aux basses températures en hiver, saison pendant laquelle elles supportent sans dommage jusqu'à -30°C. Par contre, les cultures exotiques et les plantes ornementales peuvent subir des dommages déjà à des températures moins basses en hiver. En 1985 et 1987, la vigne a souffert dans quelques régions de Suisse, lorsque la température est descendue au-dessous de -20°C.

Les *gelées précoces* en automne ne sont pas un grand problème en Suisse. Des dommages peuvent se produire uniquement lors du stockage en plein air des récoltes ou dans les cultures de légumes.

Les *gelées tardives* au printemps sont craintes en Suisse. C'est pourquoi MétéoSuisse publie des avis de gel en avril et mai. Les gelées tardives peuvent causer d'importants dommages aux vergers, à la vigne et aux cultures de légumes tout dépend du moment, car au printemps, les plantes sont plus ou moins sensibles selon leur stade de développement (figure 23). C'est ainsi que des boutons de fleurs fermés supportent sans dommage des températures jusqu'à -8°C, mais que des fleurs entièrement ouvertes ne supportent en revanche plus que des températures à peine inférieures au point de congélation.

Pour évaluer la situation en cas de gel, il faut donc considérer à la fois la température minimale, la saison et la durée. C'est pourquoi, il n'est pas possible de donner une définition unique des gelées extrêmes. Dans ce qui suit, nous faisons appel à la définition utilisée en agrométéorologie et nous référons à des gelées qui causent des dommages aux cultures.





**Figure 23:** Sensibilité au gel des poires à différents stades phénologiques.

### Conditions météorologiques

Les gelées tardives se subdivisent selon leur origine en gelées advectives, gelées par évaporation et gelées radiatives. En Suisse, seules les gelées radiatives et advectives sont d'importance.

Les gelées advectives surviennent à l'arrivée de masses d'air froid, provenant principalement du secteur nord à est. Elles dépendent donc de la circulation atmosphérique à grande échelle et pas du moment du jour et seulement dans une faible mesure de la nébulosité.

Les gelées radiatives se produisent en cas de bilan radiatif négatif, lorsque le rayonnement émanant du sol et des plantes est plus important que le rayonnement incident. De telles situations se présentent souvent au printemps par ciel clair aux premières heures de la matinée.<sup>1</sup>

### Tendances phénologiques

En Suisse, les manifestations saisonnières à récurrence périodique de la croissance et du développement des plantes font l'objet de relevés depuis 1951. Il existe en outre deux très longues séries de données qui remontent respectivement à 1894 et à 1808, la première sur la floraison des cerisiers à Liestal (cf. figure 24), la seconde sur l'éclosion des feuilles des marronniers à Genève.

Une analyse des tendances

de l'ensemble des données de 1951 à 1998 met en évidence un déplacement et un prolongement de la période de végétation. En particulier, les phases printanières (déploiement des feuilles, floraison) sont avancées de 11.6 jours. Les phases automnales (coloration et chute des feuilles) se présentent avec un léger retard de 1.7 jours. Il y a toutefois de grandes différences selon les régions.<sup>2</sup>

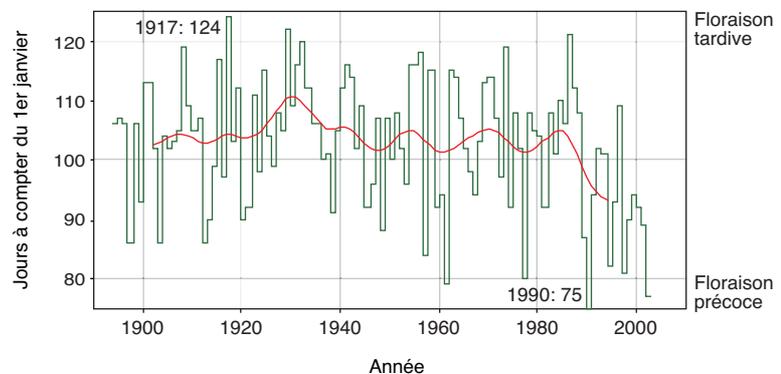
Un départ plus précoce de la période de végétation peut augmenter le risque de dégâts de gel, car le nombre de gelées est plus élevé en moyenne en mars qu'en mai. Un réveil plus précoce de la végétation peut amener les agriculteurs à commencer les semailles plus tôt, ce qui augmente le risque de dégâts de gel.

Mais ce risque plus élevé de dégâts de gel est relativisé par le fait que ces trente dernières années, le dernier jour de gel est survenu plus tôt au printemps dans plusieurs stations de mesure. A Zurich par exemple, le dernier jour de gel survient aujourd'hui en moyenne une dizaine de jours plus tôt qu'en 1975 (figure 25).

### Influence des changements climatiques

Les changements climatiques peuvent se répercuter de différentes manières sur les gelées:

- (a) *Augmentation de la température minimale*  
Les modèles du climat disponibles aujourd'hui indiquent une tendance à moins d'extrêmes de froid au déclin du 21<sup>e</sup> siècle (voir chapitre 2.1.). On a constaté notamment une hausse des températures nocturnes au 20<sup>e</sup> siècle.<sup>3</sup> Ce facteur pourrait contribuer à réduire le risque de gel.



**Figure 24:** Dates de la floraison des cerisiers à Liestal de 1894 à 2001. Depuis les années 1980, les cerisiers tendent à fleurir toujours plus tôt dans l'année. La période de végétation s'est prolongée en commençant plus vite au printemps.

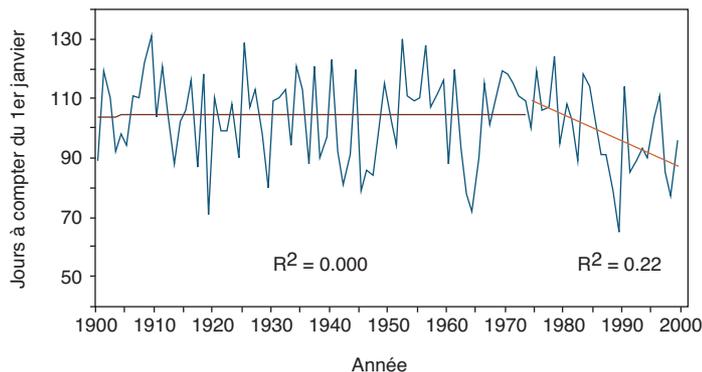
(b) *Modification de la circulation atmosphérique*

Les changements climatiques peuvent influencer sur la circulation atmosphérique à grande échelle. En cas de modification des courants atmosphériques, les gelées advectives peuvent survenir plus souvent ou aussi plus rarement. En effet, les modèles du climat disponibles donnent encore des résultats contradictoires sur les modifications de la circulation et ne permettent pas de conclusions qualitatives à l'heure actuelle.

(c) *Modification de la nébulosité*

Les conditions de nébulosité jouent un grand rôle dans les gelées tardives. Le refroidissement nocturne est plus important par ciel clair que par ciel couvert. Si la nébulosité augmentait en raison de températures plus hautes et de taux d'évaporation plus élevés, le nombre de jours de gel pourrait diminuer.

Il est possible que le risque de gel en Suisse soit modifié par les changements climatiques. Les connaissances sur les changements de la circulation à grande échelle, de la nébulosité et du réveil plus précoce de la végétation ne donnent matière qu'à des spéculations. Dans l'état actuel du savoir, il n'est pas possible de prédire une augmentation ou une diminution du risque de gel, car deux paramètres importants peuvent changer: le développement de la végétation et



**Figure 25:** A la station de mesure de Zurich, le dernier gel tardif tend à survenir toujours plus tôt dans l'année depuis 1975. Cette tendance n'est pas constatée dans toutes les stations de Suisse.

les températures. De plus, une seule nuit de gel suffit à faire de grands dégâts dans les cultures. Même si le risque de jours de gel venait à diminuer, on ne pourrait pas exclure des épisodes de gel causant des dommages aux plantes.

- 1 Brändli J., Das Frostrisiko im Frühling an ausgewählten Standorten in der Schweiz, 1961–1990, *Klimatologie* 1961–1990, 82 S., 1994.
- 2 Defila C. and B. Clot, Phytopenological trends in Switzerland, *Int. Journal of Biometeorology*, 45, 208–211, 2001.
- 3 Rebetz M., Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland, *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 13–21, 2001.

## 2.3. La sécheresse

Bruno Schädler

La sécheresse est dommageable pour l'être humain, les animaux et les plantes. Dans les différentes régions climatiques de Suisse, les sécheresses surviennent à d'autres moments et se manifestent souvent de façons différentes. On ne constate pas de tendance spécifique des sécheresses sur le Plateau au 20<sup>e</sup> siècle. Et l'on sait peu de chose sur les modifications qu'elles pourraient subir à l'avenir comme conséquences des changements climatiques. Au sud des Alpes, on s'attend à des débits de cours d'eau moins importants et à des sols plus secs. Au nord des Alpes, le débit des cours d'eau alimentés par la fonte des neiges devrait être plus faible en été et en automne en raison de moindres quantités de neige..

### Introduction

Définir la sécheresse est difficile et donne lieu à différents énoncés. Ceux-ci s'appuient souvent sur les effets économiques de la sécheresse plutôt que sur des critères météorologiques, climatologiques ou hydrologiques. Du point de vue météorologique, la sécheresse est une longue période extrêmement sèche, pendant laquelle le manque d'eau perturbe gravement l'équilibre hydrologique d'une région.<sup>1</sup> De façon plus générale, on entend par sécheresse une période pendant laquelle le déficit d'humidité exerce des effets négatifs sur la végétation, la faune et la population dans un large périmètre.<sup>2</sup>

Pendant les sécheresses, il ne pleut pas pendant longtemps, le sol se dessèche, le niveau de la nappe phréatique baisse, le débit des cours d'eau diminue et de petits plans d'eau s'assèchent. Les effets de la sécheresse sur l'agriculture et d'autres secteurs économiques dépendent fortement de la saison (période de croissance

pour l'agriculture, début de la saison de ski pour le tourisme d'hiver etc.). De plus, la situation est comparée aux conditions climatiques moyennes de la région.

En Suisse, du moins sur le Plateau, la sécheresse peut se mesurer au niveau resp. au débit des cours d'eau petits et moyens. Il reflète le bilan hydrique de tout un bassin versant et n'est guère influencé par des jours de pluie isolés interrompant une longue période sèche. Mais les cours d'eau considérés ne doivent pas être alimentés par un lac ni comprendre d'adductions ou dérivations artificielles. Le débit n'est pas un bon moyen de mesurer la sécheresse en montagne, car il dépend dans ce cas de la fonte de neige et de glace. En montagne, les débits faibles sont observés en hiver.

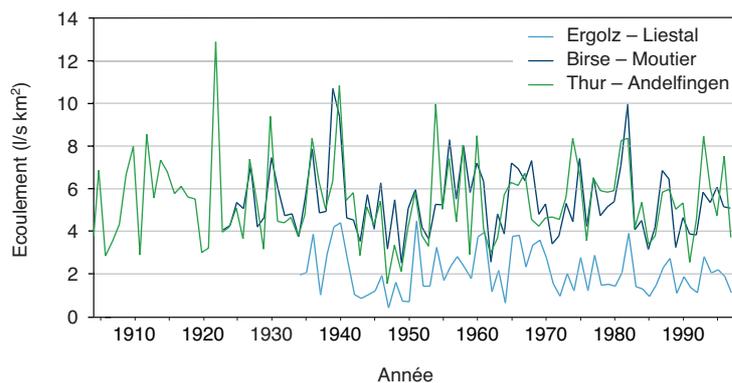
Du point de vue scientifique, l'écoulement moyen minimum sur sept jours consécutifs d'une même année civile est un bon indice pour mesurer la sécheresse. Cet indice est particuliè-

rement sensible en cas de sécheresses prononcées, car pour qu'il atteigne une faible valeur, il faut que l'intervalle de sept jours se situe au sein d'une période sèche relativement longue.

### Importance de la sécheresse

La sécheresse a des effets négatifs au plan écologique et économique.<sup>3,4</sup> en partie aussi au niveau politique:





**Figure 26:** Ecoulement moyen minimum sur sept jours consécutifs (en litres par seconde et kilomètre carré) de la Thur (Andelfingen), de l'Ergolz (Liestal) et de la Birse (Moutier), pour chacune des années de la série.<sup>5</sup>

### Conséquences écologiques

Le débit des cours d'eau diminue par temps sec. Et comme la sécheresse se produit fréquemment en période chaude, l'eau augmente souvent de température. Les substances en solution sont moins fortement diluées, elles se présentent en concentrations plus élevées. La teneur de l'eau en oxygène diminue. La situation se corse en raison de prélèvements d'eau plus fréquents dans les lacs et les rivières pour les besoins de l'agriculture. Cela fait subir à nombre d'organismes aquatiques, notamment aux poissons, un stress qui augmente leur taux de mortalité. La végétation des rives souffre aussi de la sécheresse, ce qui peut nuire également à la faune sauvage.

### Conséquences économiques

Les sécheresses prolongées affectent l'approvisionnement en eau. Elles peuvent conduire à un manque d'eau potable (sources et nappes phréatiques), contraindre des industries ayant un important besoin d'eau à réduire leur production (p.ex. industrie du papier, industries grandes consommatrices d'eau de refroidissement), ou encore entraîner une diminution de l'énergie générée par les centrales au fil de l'eau et à accumulation. Des centrales thermiques, p. ex. nucléaires, peuvent être affectées aussi, si elles ne disposent pas d'assez d'eau de refroidissement ou si celle-ci provient d'un cours d'eau dont la température a atteint le seuil limite autorisé. Des pertes sont possibles aussi dans l'agriculture et l'élevage. Le tourisme d'hiver peut être touché également si la neige se fait rare, de même que la navigation fluviale, si le niveau des cours d'eau baisse trop.

### Conséquences politiques

En cas de manque d'eau, les autorités doivent ordonner des réductions de la consommation d'eau (mesures d'économie, rationnement etc.) et réglementer les prélèvements dans les eaux publiques. Dans des régions fortement touchées, elles doivent prendre des mesures logistiques, telles que le transport d'eau par camions-citernes ou la mise en place de pompes, conduites et réservoirs provisoires, et assurer le maintien de l'hygiène.

Dans l'ensemble, les conséquences des sécheresses ne revêtent pas une importance existentielle en Suisse, vu l'imbrication de ce pays dans les marchés internationaux et la richesse en eau de ses montagnes. Et dans nombre de cas, les différentes régions climatiques de la Suisse ne sont pas affectées simultanément ni au même degré par la sécheresse.

### Observations et tendances

Les étés secs peuvent être identifiés et caractérisés en examinant l'évolution des précipitations et de la température. Pendant les 500 dernières années, le Plateau suisse a subi quatre sécheresses extrêmes qui ont eu lieu – par ordre d'intensité décroissante – en 1540, 1669, 1603 et 1947.<sup>6</sup> Avant 1730, on enregistrait un été sec à peu près tous les 12 à 15 ans. Après 1730, il n'y a eu plus que deux étés secs par siècle environ. Au 20<sup>e</sup> siècle, on n'a relevé qu'un seul été de sécheresse, en 1947. Le 20<sup>e</sup> siècle peut donc être considéré comme privilégié du point de vue des sécheresses.

Hors des sécheresses, les débits minimaux des cours d'eau du Plateau (figure 26) sont assez uniformes, peu influencés par les utilisations humaines<sup>5</sup>: 1947 apparaît en général comme l'année la plus sèche; une tendance n'est pas discernable au cours du 20<sup>e</sup> siècle sur le Plateau.

Faute de données adéquates, on ne peut pas juger de la situation sur le versant sud des Alpes.

### Changements possibles à l'avenir

Selon le GIEC<sup>7</sup>, les changements climatiques rendent probable une augmentation du temps sec en été sur les continents et du risque de sécheresse dans la plupart des régions situées aux latitudes moyennes à l'intérieur des continents.

Le régime hydrologique d'une région est impliqué dans sa totalité lors de la genèse du temps sec et de la sécheresse. Les données sur les changements de la pluviosité et de la température ne suffisent pas pour évaluer les possibles changements de la sécheresse. Il est plus important à cet effet de connaître les changements affectant l'intensité des précipitations et la succession des jours de pluie en fonction de la saison.

Les prévisions sur l'évolution des précipitations sont difficiles à établir et entachées d'incertitudes. Les changements possibles incluent le déplacement de la distribution spatiale des précipitations en Europe, espace alpin compris, l'augmentation de l'intensité moyenne des pluies et la diminution de la teneur en eau du sol en été.

Suite aux changements climatiques, il pleuvra davantage et neigera moins aux altitudes basses et moyennes et les réserves de neige diminueront en montagne. Dans les régions où la neige ne joue pas un rôle important comme stock d'eau – en particulier au Sud des Alpes – il faut s'attendre en été en moyenne à une diminution de l'écoulement, à une intensification des régimes de basses eaux et à des sols plus secs, en raison de la pluviosité plus faible et de la température plus élevée. Mais sur le versant nord des Alpes aussi, les cours d'eau alimentés par la fonte des neiges devraient avoir des débits plus faibles en été et en automne s'ils disposent de moindres réserves de neige. Cela devrait conduire notamment à des régimes de basses eaux plus marqués sur le cours du Rhin inférieur, qui ne seront pas sans conséquence pour la navigation sur ce fleuve.<sup>8</sup>

Dans l'ensemble, le savoir actuel sur les changements futurs des sécheresses en Suisse est limité. Les effets de ces changements pour-

raient se faire durement sentir. Un regard vers le passé montre que les sécheresses ont touché souvent de vastes régions. Leurs conséquences économiques à court terme pourraient être considérables à l'avenir, en dépit de l'imbrication de la Suisse dans le commerce international. Les conséquences écologiques sont elles aussi très difficiles à évaluer. Toutefois l'eau ne devrait pas devenir systématiquement rare en Suisse et dans les régions des Alpes où les pluies sont abondantes.

- 1 Huschke R. E. [ed.], Glossary of meteorology, American Meteorological Society, Boston, 638 p., 1959.
- 2 Warwick R. A., Drought hazard in the United States: A research assessment, University of Colorado, Institute of Behavioral Science, Monograph No. NSF/RA/E-75/004, 199 p., 1975.
- 3 Kleeberg H.-B. und U. Mayer, Hydrologische Extreme – Gefährdungspotentiale in Fließgewässern durch Trockenperioden, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Mitteilung Nr. 70, 189 S., 1999.
- 4 Schorer M., Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft, Geographica Bernensia, G40, 192 S., 1992.
- 5 Kan C., Niedrigwasserstatistik des Bundesamtes für Wasser und Geologie, persönliche Mitteilung, 2002.
- 6 Pfister C. und M. Rutishauser, Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. In: M. Schorer, Trockenheit in der Schweiz, Workshopbericht, OcCC, Berne, 2000.
- 7 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 8 Grabs W. [ed.], Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), CHR-Report, No. 1–16, Lelystad, 172 p., 1997.

## 2.4. Les incendies de forêts

Marco Conedera

**Les incendies de forêts se produisent plus souvent sur le versant sud que nord des Alpes, la plupart causés par l'homme. Leur évolution future sera influencée aussi par l'homme tant comme cause de ces incendies que comme promoteur de mesures de prévention. Des facteurs naturels, tels que la sécheresse et le vent, pourraient augmenter au Sud des Alpes avec les changements climatiques et accroître encore le danger d'incendie.**

### Introduction

Le feu nécessite un combustible, de l'oxygène et de l'énergie d'allumage. Le combustible des feux de forêts est du matériel végétal, tel que litière sèche et du bois mort. Il est plus ou moins inflammable selon sa densité, sa composition chimique et son degré d'humidité.

L'impact d'un incendie de forêt dépend entre autres de la vulnérabilité au feu de l'écosystème, du type de végétation, de feux antérieurs et de la menace potentielle subséquente d'autres événements naturels affectant la région touchée. Les effets du feu sur l'environnement sont encore peu étudiés.<sup>1</sup> Mais il est incontestable que le feu porte atteinte à la fonction protectrice de la forêt. Les températures élevées et les cendres ont pour effet d'obturer les pores du sol. Ce dernier est alors moins perméable à l'eau<sup>2</sup>, ce qui accentue le ruissellement et l'érosion en cas de fortes pluies.<sup>3</sup> Cet effet est particulièrement marqué dans les régions épargnées par le feu depuis plus de dix ans, où la végétation ne s'est donc pas adaptée en conséquence.<sup>4</sup> En 1997 par exemple, un incendie a fait des dégâts dans 80% du bassin versant de la Buffaga dans la région de Ronco s. Ascona (TI). Le mois suivant – c'était août – des pluies d'une intensité qui est atteinte en moyenne une fois pas décennie ont provoqué une crue séculaire. Une coulée de boue de 4000 m<sup>3</sup> s'est déversée sur des zones habitées et a causé des dommages pour plusieurs millions de francs. Par chance, il n'y a pas eu de victimes. Les frais d'extinction, qui se mon-

tent dans des cas extrêmes jusqu'à un demi-million de francs, sont modestes en comparaison des dommages.

Dans ce chapitre, un événement extrême désigne un ou plusieurs incendies de forêts qui se produisent en périodes sèches et sont donc très intenses, et qui s'étendent sur une surface de plus de 100 ha resp. sur tout un bassin versant qui n'a pas été touché par le feu pendant plus de dix ans.

### Conditions

De tous les incendies de forêts enregistrés entre 1981 et 2000 sur le versant sud des Alpes, 8,6% sont dus à la foudre (tableau 3). Ils produisent des feux de sous-sol qui se propagent lentement. La fréquence et les causes de ces incendies varient fortement d'année en année. Dans 40% des cas, la cause n'est pas élucidée. Plus de 90% des incendies dont les causes sont connues sont dus à des actes intentionnels ou à des négligences. Cela concerne presque 97% des surfaces atteintes par les flammes entre 1981 et 2000.

A part la foudre, cause directe de feux de forêts, des facteurs naturels augmentent le danger d'incendie (tableau 3). L'absence de pluie,



une vitesse élevée du vent et une humidité relative faible sont souvent déterminantes. Le rayonnement solaire, le déficit d'humidité et la fréquence des vents jouent aussi un rôle. L'absence de pluie et le déficit d'humidité peuvent avoir des effets à long terme, qui se font sentir pendant des années.

L'homme provoque des incendies le plus souvent par négligence ou intentionnellement. Dans des cas rares, il suffit d'une étincelle produite par un train ou un court-circuit ou d'impacts de projectiles lors d'exercices militaires. L'homme peut changer quelque chose au danger d'incendie dans une région donnée. Actuellement, ce sont les mesures législatives qui ont le plus d'influence à cet égard. Les développements socioéconomiques (p.ex. le recul de l'agriculture traditionnelle, l'émigration hors des vallées latérales) revêtent aussi beaucoup d'importance, de même que l'entretien du paysage et l'éducation à l'environnement. Mais leurs effets s'exercent avant tout à long terme.

### Quelles tendances sont-elles déjà discernables?

Des dépôts de particules de charbon dans le lac d'Origlio indiquent que le versant sud des Alpes est par nature vulnérable au feu (figure 27). Mais l'homme influe depuis longtemps sur la fréquence des incendies de forêts par la pratique des brûlis (âge du fer et du bronze) ou en assumant une fonction de contrôle (époque romaine). Des données provenant du lac de Lobsigen (BE) montrent que le niveau général des incendies de forêts sur le versant nord des Alpes a dû être 2 à 5 fois inférieur à celui du versant sud. Mais là aussi, l'influence de l'homme due aux brûlis pendant l'âge du fer est manifeste.<sup>6</sup>

Au 20<sup>e</sup> siècle, le nombre annuel d'incendies sur le versant sud des Alpes a passé en moyenne de 30 à 80 à partir des années 1960 et diminue

**Tableau 3:** Résumé des principaux facteurs ayant une influence sur les incendies de forêts en Suisse.<sup>5</sup>

			Fréquence / pondération	Horizon temporel
Conditions	nature	précipitations	++	un jour à des années
		fréquence du vent	+	un à plusieurs jours
		vitesse du vent	++	un jour
		humidité relative	++	un jour
		rayonnement solaire incident	+	un jour
		déficit d'humidité	+	un jour à des années
	homme	développement socioéconomique	+	des mois à des années
		entretien du paysage	+	des mois à des années
		cadre législatif	++	des mois à des années
		éducation à l'environnement	+	des mois à des années
causes directes	nature	foudre	8.6%	
	homme	négligence	26.1%	52.5%
		incendie criminel	15.2%	
		chemin de fer	3.6%	
		militaires	1.7%	
		lignes électriques (court-circuit)	1.7%	
		cas intermédiaires	1.7%	
	autres	2.4%		
	cause peu claire ou inconnue	38.9%		

++ = fréquent / déterminant ; + = récurrent / influent  
 Les données en pour cent se réfèrent à la période 1981 – 2000

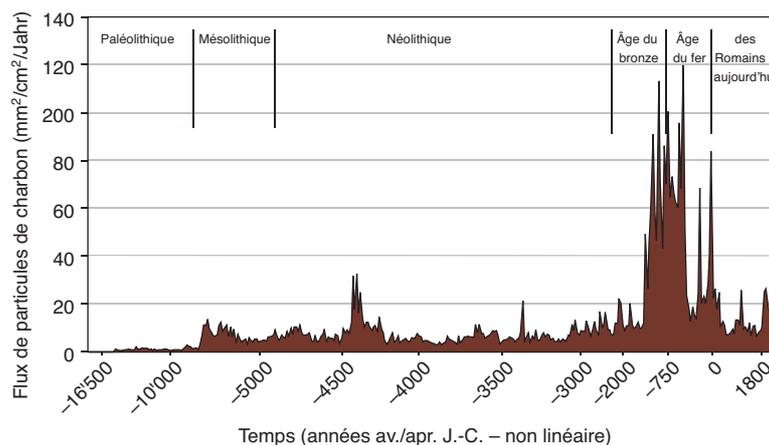
de nouveau depuis 1980 (figure 28a). Les surfaces touchées par le feu diminuent depuis les années 1960, surtout après 1980. 1973 fait exception. Les événements extrêmes, au cours desquels les incendies de forêts s'étendent sur plus de 100 ha, atteignent leur fréquence la plus haute entre 1941 et 1980 (figure 28b). Entre 1981 et 2000, le nombre d'incendies revient à son niveau de 1921-1940.

Il n'existe pas de données couvrant l'ensemble du versant nord des Alpes. Au nord du Valais, le nombre des incendies et les surfaces touchées par le feu ont augmenté depuis 1990 en moyenne d'un facteur 3 à 4 par rapport aux décennies précédentes (de 5.2 à presque 20 incendies par an<sup>7</sup>). A partir de 1978, la foudre a été identifiée comme cause naturelle dans 12% des cas. Dans 34% des cas, la cause est inconnue.<sup>7</sup> Dans les Grisons, les incendies de forêts ne sont saisis systématiquement qu'à partir des années 1980. En général, les surfaces touchées sont petites (1-10 ha), mais quelques grands événements sont à signaler (Calanda près de Coire en 1943, env. 477 ha; Müntertal en 1983, env. 60 ha; St-Luziensteg en 1985, env.

110 ha; Misox en 1997, env. 405 ha). Contrairement au versant sud des Alpes, l'évaluation de ces incendies dans l'espace et le temps a permis de distinguer clairement entre causes humaines et naturelles. Les incendies causés par l'homme (74% depuis 1980, y compris causes inconnues) sont signalés avant tout dans le haut et moyen pays grison et la vallée du Rhin. Les incendies dus à des causes naturelles (foudre, 26% depuis 1980) se concentrent dans la basse Engadine, le Münstertal et les vallées méridionales des Grisons.<sup>10</sup>

L'évolution et la fréquence des incendies de forêts reflètent l'influence de l'homme. Sur le versant sud des Alpes, la progression des forêts et l'accumulation de matériaux combustibles sur le sol depuis les années 1960 sont à l'origine de nombreux incendies. La surface moyenne touchée et le nombre d'événements extrêmes ont toutefois reculé, avant tout grâce à une bonne organisation de la prévention des incendies. Au Tessin, des mesures en ce sens sont en vigueur depuis 1980. Une ordonnance prescrit depuis 1987 une interdiction absolue des feux en plein air (assouplissement partiel depuis 1996). Les informations des médias sur le danger d'incendie ont un impact et la population est devenue aussi plus sensible à l'environnement. En Valais, cette évolution n'a pas la même ampleur et suit avec un retard de vingt ans. Dans les Grisons, l'interdiction générale des feux en plein air a été supprimée en 1996 avec l'entrée en vigueur de la nouvelle loi cantonale des forêts. L'office des forêts des Grisons peut promulguer au besoin des interdictions régionales et temporaires des feux au moyen du système INCENDI de prévision des feux de forêts ([www.wald.gr.ch](http://www.wald.gr.ch)).<sup>11</sup> D'autres méthodes de prévisions sont en phase de développement pour l'ensemble du versant sud des Alpes.<sup>12</sup>

L'homme crée des conditions moins propices au feu en faisant appel à l'entretien du paysage, à la législation et à la prévention. Et des



**Figure 27:** L'influence de l'homme sur la fréquence des incendies de forêts ne date pas d'aujourd'hui. Des particules de charbon, qui se sont déposées pendant l'ère postglaciaire en proportion de la fréquence des incendies, ont été détectées dans les sédiments du lac d'Origlio.<sup>8</sup> La période de 5000 à 7200 av. J.-C. indique le niveau des incendies de forêts naturels dans des conditions climatiques semblables à aujourd'hui. La fréquence extrême de ces incendies pendant l'âge du bronze

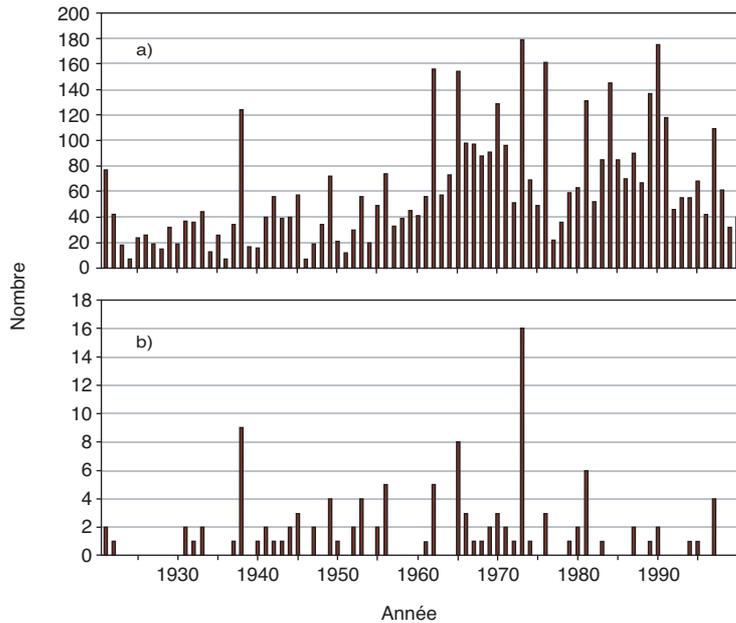
mesures de lutte contre le feu l'aident à maîtriser les incendies. Toutefois, il est toujours encore responsable de la plupart des incendies, que ceux-ci soient dus à la négligence ou à des actes délibérés.

### Influence des changements climatiques

Des événements extrêmes se produiront aussi à l'avenir, surtout lorsque les conditions météorologiques leur seront particulièrement favorables. En dépit de leur tendance générale à la baisse (figure 28b), quelques gros incendies de forêts se sont produits sur le versant sud des Alpes au printemps 1997, après une longue période sèche et lors de violentes tempêtes de fœhn.<sup>13</sup>

Une analyse des périodes sèches au Tessin a mis en évidence d'assez longues périodes sans pluie vers la fin du 20<sup>e</sup> siècle<sup>14</sup>; toutefois, elle n'indique aucun lien avec les observations sur les feux de forêts selon la figure 28. Selon le chapitre 2.3., il faut s'attendre à l'avenir, spécialement en été au Sud des Alpes, à une diminution des écoulements, à des régimes de basses eaux plus marqués et à des sols plus secs, comme conséquence d'une pluviosité réduite et de températures plus élevées. Cela pourrait augmenter la probabilité que plusieurs conditions favorables aux incendies coïncident.

L'évolution future d'événements extrêmes lors d'incendies de forêts tient d'une part à des



**Figure 28:** Distribution (a) du nombre d'incendies par an et (b) du nombre d'événements extrêmes affectant une surface > 100 ha. Intervalle de référence 1900-2000. Banque de données sur les incendies de forêts sur le versant sud des Alpes.<sup>5</sup>

interventions humaines telles que l'entretien du paysage, la prévention des incendies et la lutte contre le feu. Mais la fréquence de situations météorologiques extrêmes telles que de longues sécheresses associées à de forts vents joue d'autre part un grand rôle. La recherche sur les tendances caractérisant l'évolution des incendies de forêts doit tenir compte des deux facteurs.

- 1 Moretti M., M. Conedera und P. Duelli, Grosse Dynamik nach Waldbränden auf der Alpensüdseite, *Inf. bl. Forsch. bereich Wald*, 7, 1–3, 2001.
- 2 Letey J., Causes and consequences of fire-induced soil water repellency, *Hydrol. Process.*, 15, 2867–2875, 2001.
- 3 Neary D. G., C. C. Klopatek, L. F. DeBano, and P. F. Ffolliott, Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis, *Forest Ecology and Management*, 122, 51–71, 1999.
- 4 Marxer P., M. Conedera, and D. Schaub, Postfire runoff and soil erosion in the sweet chestnut belt of Southern Switzerland. In: Trabaud L. [ed.], *Fire Management and Landscape Ecology*, International Association of Wildland Fire, Washington, 51–62, 1998.
- 5 Conedera M., M. Marcozzi, B. Jud, D. Mandallaz, F. Chatelain, C. Frank, F. Kienast, P. Ambrosetti, G. Corti, Incendi boschivi al Sud delle Alpi: passato, presente e possibili sviluppi futuri, PNR31, vdf, Zurich, 143 p., 1996.
- 6 Tinner W. and B. Ammann, The Late-Glacial and Holocene fire history of the western Swiss Plateau (unpubl.).
- 7 Bochatay J. et J.-B. Moulin, Inventaire des incendies de forêt dans le Canton du Valais, Rapport final du projet 98.12 du Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois, Salvan-Vollèges, 45 p., 2000.
- 8 Tinner W., M. Conedera, B. Ammann, H. W. Gäggeler, S. Gedyé, R. Jones, and B. Sägesser, Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in Southern Switzerland since 1920, *The Holocene*, 8, 32–42, 1998.
- 9 Tinner W., P. Hubschmid, M. Wehrli, B. Ammann, and M. Conedera, Long-term forest fire ecology and dynamics in Southern Switzerland, *Journal of Ecology*, 87, 273–289, 1999.
- 10 Langhart R., Räumliche und jahreszeitliche Charakteristiken von Waldbrandherden (Kanton Graubünden), Diplomarbeit, Geographisches Institut Universität Zurich, Zurich, 117 p., 1999.
- 11 Schöning R., A. Bachmann und U. Maissen, Incendi: Unterstützung der Waldbrandwarnung im Kanton Graubünden, *ArcAktuell*, Nr. 3, ESRI Kranzberg (D), 1998.
- 12 Par exemple l'adaptation, en cours actuellement à l'ENA, de la méthode du plus proche voisin, appliquée avec succès à la prévision du risque d'avalanches.
- 13 Conedera M., P. Marxer, P. Ambrosetti, G. Della Bruna, and F. Spinedi, The 1997 forest fire season in Switzerland, *Int. For. Fire News*, 18, 85–88, 1998.
- 14 Rebetz M., Twentieth century trends in drought in Southern Switzerland, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 6, 755–758, 1999.

## 2.5. Les fortes précipitations

Christoph Frei

En Suisse, les fortes précipitations sont soit courtes et intenses, associées alors à des orages, soit moins intenses et d'une durée de plusieurs jours, associées dans ce cas à des systèmes météorologiques stationnaires. Les précipitations extrêmes peuvent donner lieu à des crues, des débordements, des laves torrentielles et des glissements de terrain. Pendant le 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations journalières intenses ont augmenté dans de grandes parties du Plateau et de la bordure nord des Alpes. Il n'est pas possible de se prononcer sur d'éventuels changements des précipitations extrêmes. La majorité des modèles prévoit que l'intensité moyenne des précipitations et la fréquence des précipitations journalières intenses augmenteront à l'avenir. En cas d'intensification du cycle de l'eau, les fortes précipitations de longue durée pourraient augmenter avant tout dans les Alpes.

### Types de fortes précipitations en Suisse

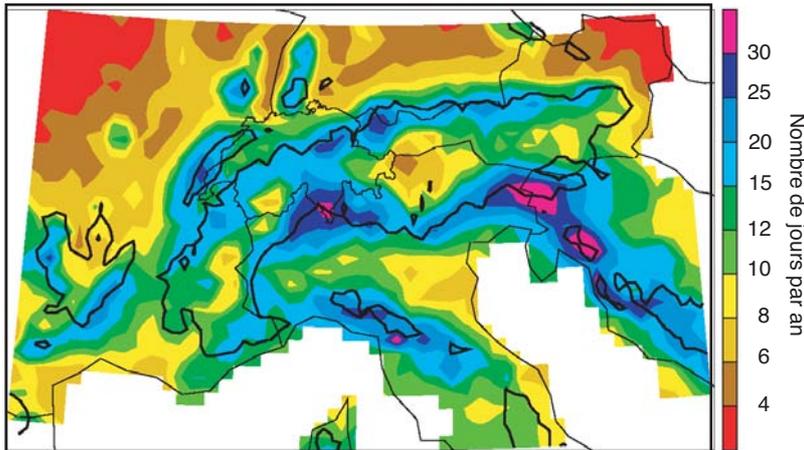
Il existe en Suisse en gros deux types de fortes précipitations: les unes sont intenses et de courte durée, les autres plus persistantes, mais moins intenses.

Les fortes précipitations de courte durée (une à quelques heures) et de grande intensité (40-80 mm par heure) se produisent avant tout en été en relation avec des orages et se limitent au passage orageux proprement dit (jusqu'à quelques dizaines de kilomètres). Des événements extrêmes de ce type peuvent faire déborder des petits cours d'eau et provoquer des laves torrentielles en montagne (cf. chap. 2.7. et 2.8.). Des zones habitées peuvent être inondées si la capacité du système d'évacuation des eaux usées est dépassée. Ces précipitations intenses sont accompagnées parfois de grêle (cf. chap. 2.6.). L'orage du 15 août 1997 à Sachseln est un exemple d'un événement extrême de ce type.

Les précipitations de longue durée (un à plusieurs jours) mais de moindre intensité (100-400 mm par jour) peuvent se produire toute l'année. Elles sont associées à des systèmes météorologiques à grande échelle, intenses et/ou plus ou moins stationnaires. Des pluies persistantes extrêmes peuvent provoquer des crues, faire déborder de grands cours d'eau et des lacs et déclencher des laves torrentielles et des glissements de terrain (cf. chap. 2.7. et 2.8.). Des exemples sont les pluies de mai 1999 en Suisse orientale, d'octobre 2000 en Valais et au Tessin et d'août 2002 en Europe centrale. Sous forme de neige, les précipitations persistantes extrêmes peuvent causer de grosses avalanches dans un vaste périmètre (cf. chap. 2.9.).

En général, les dommages dus aux fortes précipitations ne sont pas immédiats, mais résultent d'effets subséquents, tels que crues, glissements et avalanches (cf. chap. 2.7., 2.8. et 2.9.), ou secondaires, tels que la grêle (cf. chap. 2.6.). Ainsi ces dommages ne dépendent pas seulement de la durée et de l'intensité des précipitations, mais aussi de la constitution de la région (p.ex. humidité préexistante) et de phénomènes concomitants (p.ex. fonte des neiges).

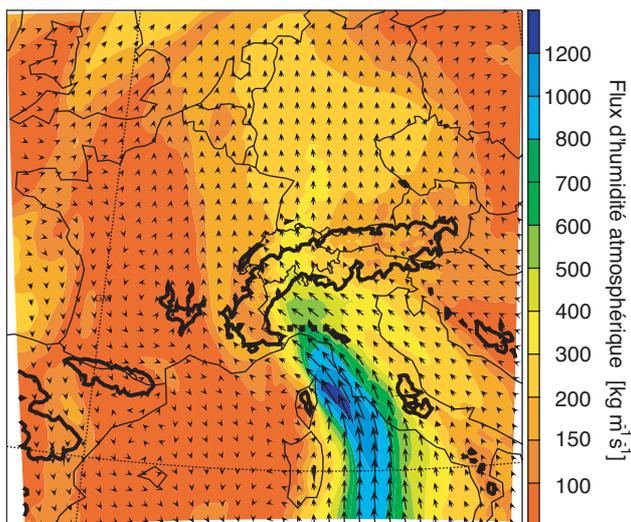




**Figure 29:** Fréquence climatologique des précipitations journalières de plus de 20 mm par jour dans l'arc alpin (1971-1990, nombre de jours par an).

### Climatologie

En Suisse, la topographie est un facteur important des fortes précipitations. Le relief peut favoriser p.ex. des situations de barrage ou d'ascendance thermique. La topographie détermine ainsi largement la fréquence et la répartition géographique de la pluie. Les précipitations journalières de 20 mm par jour ou plus sont plus fréquentes sur la bordure nord ou sud des Alpes et dans le Jura que sur le Plateau et dans les vallées intra-alpines (figure 29). Le nombre élevé d'événements au Tessin (en gros deux fois plus que sur le Plateau) est exceptionnel dans l'arc alpin.



**Figure 30:** Flux d'humidité intégré sur la colonne atmosphérique, le 15 octobre 2000. Du 12 au 16 octobre, une quantité d'eau estimée à l'équivalent du lac Léman fut transportée par l'atmosphère vers les Alpes méridionales.

Au Tessin, les fortes précipitations sont particulièrement fréquentes en automne. A cette saison, des fronts et des zones dépressionnaires parviennent au bassin méditerranéen en passant plus au sud qu'en été et entraînent ainsi de l'humidité vers les Alpes méridionales. Lors des fortes précipitations d'octobre 2000, une quantité d'eau estimée à l'équivalent du volume du lac Léman fut ainsi transportée en cinq jours vers les Alpes (figure

30). Le Valais et le Puschlav aussi sont souvent concernés par de tels événements dus à des courants du sud.

### Tendances observées au 20<sup>e</sup> siècle

Les précipitations dans les Alpes varient fortement d'année en année. Suivant la saison et la région, les années humides et sèches diffèrent d'un facteur 2 à 4. Des observations indiquent qu'au 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations moyennes ont augmenté en hiver de 20-30% dans les Alpes septentrionales et occidentales.<sup>1</sup> Tandis qu'elles ont diminué dans une proportion semblable en automne dans les Alpes méditerranéennes.

Les données sur les tendances en matière de précipitations extrêmes ne peuvent pas être fiables, car les événements rares se prêtent mal à une approche statistique (cf. chap. 1.4.). Les analyses de tendances ne portent donc que sur des événements plus fréquents, dont l'intensité est beaucoup plus faible. En Suisse, la plupart des stations à long terme du Plateau et de la bordure nord des Alpes ont enregistré une augmentation des précipitations journalières intenses (temps de retour de 30 jours) en hiver et en automne (figure 31).<sup>2</sup> Cette tendance est significative pour quelque 30% des stations. Les augmentations se situent dans une fourchette de 20 à 80% en 100 ans. Des tendances similaires ont été décelées pour des précipitations intenses d'une durée de 2 à 5 jours. Les précipitations journalières intenses d'été ne font pas

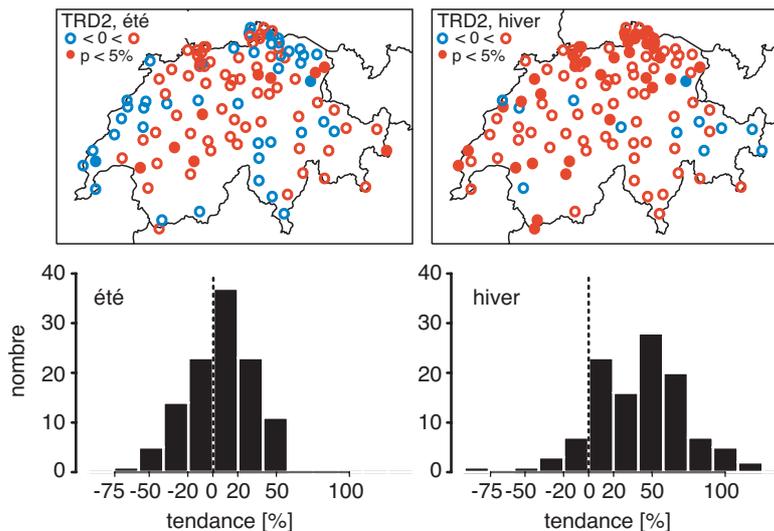
apparaître de changements systématiques (figure 31). Mais on ne peut exclure des tendances de l'intensité des orages d'été. La courte durée des orages permettrait d'obtenir des données plus significatives sur les tendances de l'intensité horaire des précipitations. Mais la résolution temporelle des mesures à long terme n'est pas suffisante.

Comme en Suisse, on observe en Europe voisine une augmentation des précipitations moyennes et intenses en hiver.<sup>3</sup> La diminution de la moyenne et l'augmentation des événements intenses constatées en automne au sud des Alpes sont confirmées également par des études de tendances en Italie.<sup>4</sup>

### Changements consécutifs aux changements climatiques globaux

On distingue trois chaînes d'actions différentes par lesquelles les changements climatiques globaux peuvent influencer sur les fortes précipitations:

- (a) On s'attend à ce que les changements climatiques entraînent un réchauffement plus marqué dans les régions polaires que sous les tropiques et qu'ils accroissent l'humidité de l'air. Ces deux facteurs peuvent influencer sur l'intensité, la fréquence et la trajectoire des zones dépressionnaires aux latitudes moyennes. Ces modifications seraient couplées à celles de la répartition géographique et de l'intensité des précipitations en Europe, arc alpin inclus.
- (b) Aux latitudes moyennes, le réchauffement de l'atmosphère va de pair avec une augmentation de la teneur en vapeur d'eau d'env. 6% par degré (loi de Clausius-Clapeyron). On admet aujourd'hui comme relativement certain que l'intensification du cycle hydrologique qui en résulte contribue à accroître l'intensité moyenne des précipitations et qu'elle exerce un effet plus que

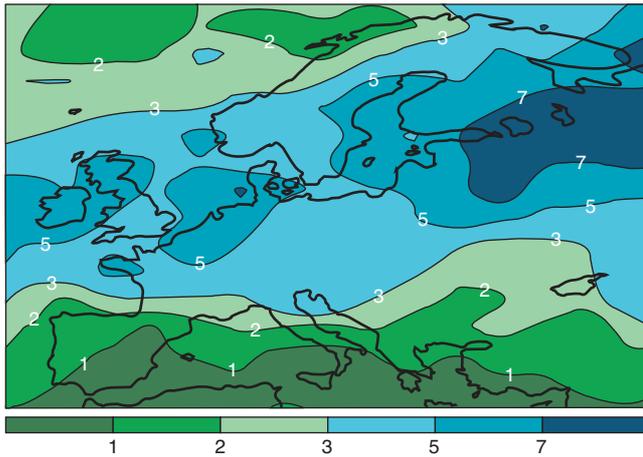


**Figure 31:** Tendances de la fréquence des précipitations journalières intenses (en moyenne un événement par mois) dans 110 stations pluviométriques de Suisse de 1901 à 1994. En haut: augmentation en rouge, diminution en bleu. Les cercles pleins désignent les stations où le changement est statistiquement significatif. En bas: histogramme du pourcentage de changement de la probabilité depuis 1901 pour toutes les stations.<sup>2</sup>

proportionnel sur la fréquence des fortes précipitations.<sup>5</sup>

- (c) L'intensification du cycle hydrologique va aussi de pair avec un renforcement de l'évaporation. Dans des régions telles que le bassin méditerranéen, où la saison sèche dure longtemps, il pourrait s'ensuivre une diminution de la teneur du sol en eau en été et en automne. Cela peut influencer sur la thermodynamique de la troposphère inférieure et sur les précipitations. L'ordre de grandeur de cet effet et son rôle possible dans l'espace alpin ne sont pas encore bien compris.

Les caractéristiques des fortes précipitations de la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle ont été examinées pour différents scénarios climatiques globaux. La majorité des résultats indique un accroissement global de l'intensité moyenne des précipitations et de la fréquence des précipitations journalières intenses.<sup>6</sup> Cette tendance est confirmée en Europe par les analyses basées sur des modèles régionaux. Ceux-ci indiquent une augmentation du maximum annuel de précipitation journalière de 10-25%, ainsi qu'un accroissement d'un facteur 2 et plus de la fréquence, celle-ci dépassant les extrêmes annuel et cinquantennal actuels des précipitations.<sup>8</sup> Une analyse détaillée de 19 modèles climatiques globaux montre que les hivers extrêmement riches



**Figure 32:** Changement relatif de la fréquence des hivers extrêmement humides en cas de doublement du  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Des précipitations d'hiver, qui se produisent aujourd'hui en moyenne tous les 40 ans, augmentent d'un facteur 3 à 5 en Europe centrale et septentrionale. Synthèse de simulations sur 19 modèles climatiques.<sup>7</sup>

en précipitations (temps de retour actuel de 40 ans) pourraient même devenir 3 à 5 fois plus fréquents (figure 32)<sup>7</sup>. Ces augmentations sont attendues pendant le semestre d'hiver sur tout le continent européen et en été avant tout en Europe centrale et septentrionale.

L'augmentation des fortes précipitations, prévue par de nombreux modèles, s'interprète en premier lieu comme conséquence d'un cycle hydrologique stimulé par le réchauffement global (chaîne d'actions b). On considère aujourd'hui l'intensification du cycle hydrologique comme probable sur tout le continent pendant le semestre d'hiver.<sup>9</sup> Dans l'arc alpin, il pourrait s'ensuivre une augmentation des fortes précipitations de longue durée. Celles-ci ne dépendent pas que de la situation météorologique, mais aussi de la quantité d'humidité amenée par l'atmosphère. Les événements extrêmes de l'automne sur le versant sud des Alpes pourraient compter dans cette catégorie.

Il y a cependant de grandes différences entre modèles au sujet des changements à l'échelon régional. Elles découlent du fait que les trajectoires et intensités des zones dépressionnaires (chaîne d'actions a) changent différemment selon les modèles. Aussi ne sait-on pas encore au juste comment et où l'intensification du cycle hydrologique est compensée ou renfor-

cée en Europe par d'éventuelles modifications de la dynamique à grande échelle. Les données quantitatives pour l'arc alpin sont donc tout au plus de grossières estimations.

Fournir des données qualitatives ou quantitatives sur les fortes précipitations d'été dans les Alpes n'est pas possible actuellement. Les modélisations heure par heure font défaut et les modèles comportent des erreurs systématiques importantes pour l'été. En outre, les interactions entre hydrologie du sol, végétation et précipitations d'été (chaîne d'actions c) sont mal comprises; et les modèles disponibles les représentent de façon peu précise.

- 1 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.
- 2 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.
- 3 Frich P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, and T. Peterson, Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Res.*, 19, 193–212, 2002.
- 4 Brunetti M., M. Maugeri, and T. Nanni, Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995. *Theor. Appl. Climatol.*, 65, 165–174, 2000.
- 5 Frei C., C. Schär, D. Lüthi, and H. C. Davies, Heavy precipitation processes in a warmer climate, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1431–1434, 1998.
- 6 Kharin V. V. and F. W. Zwiers, Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled Atmosphere-Ocean GCM. *J. Climate*, 13, 3760–3788, 2001.
- 7 Palmer T. N. and J. Räisänen, Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 415, 512–514, 2002.
- 8 Durman C. F., J. M. Gregory, D. C. Hassell, R. G. Jones, and J. M. Murphy, A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 127, 1005–1015, 2001.
- 9 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.

## 2.6. La grêle

Hans-Heinrich Schiesser

Lors de chutes de grêle extrêmes, les cellules orageuses s'organisent le long d'une ligne qui s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres à travers tout le Plateau et les Préalpes. Plus de 500 communes furent touchées par chacun des cinq événements du genre enregistrés depuis 1920. Ces événements sont répartis régulièrement dans le temps. Par contre, la fréquence des quatre situations météorologiques à l'origine de chutes de grêle extrêmes a sensiblement augmenté depuis 1940. Si elle continue de s'accroître, il faudra compter à l'avenir avec davantage de chutes de grêle extrêmes.

### Définition des chutes de grêle extrêmes

La grêle est souvent un phénomène très local. Une cellule de grêle produit une averse de grêle occasionnant plusieurs passages de grêle au sol. Mais plusieurs cellules de grêle peuvent se réunir en un système de tempêtes qui s'étend sur toute la Suisse et produit de nombreuses averses de grêle. Un tel système provoque des dégâts de grêle, d'eau et de vent dans un vaste périmètre à l'agriculture, aux forêts, aux bâtiments et aux voitures. Dans de rares cas, on a affaire à plusieurs systèmes de tempêtes recouvrant toute l'Europe.

Des cellules isolées peuvent aussi bien conduire à des chutes de grêle extrêmes que des systèmes de tempêtes. Des valeurs extrêmes observées dans le cas de cellules isolées sont par exemple des grêlons de 5-10 cm de diamètre, des rafales avec des pointes de 144-180 km/h, des intensités de pluie de 100 mm/h, une pluviométrie de 30-50 mm/m<sup>2</sup> ou encore quelques éclairs par km<sup>2</sup>.<sup>1</sup> Dans un système de tempêtes extrême, les cellules orageuses se disposent en une ligne s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres et traversant d'ouest en est tout le Plateau suisse et les Préalpes. Les météorologues parlent dans ce cas de système convectif d'échelle moyenne (MCS). Une zone de précipitation, de grande étendue et produisant en partie des pluies intenses, suit à l'arrière de cette ligne. Les intensités de grêle et de pluie, la pluviométrie, la force du vent et l'activité orageuse sont plus importantes dans les cellules de grêle de cette formation que dans des cellules isolées.<sup>2</sup>

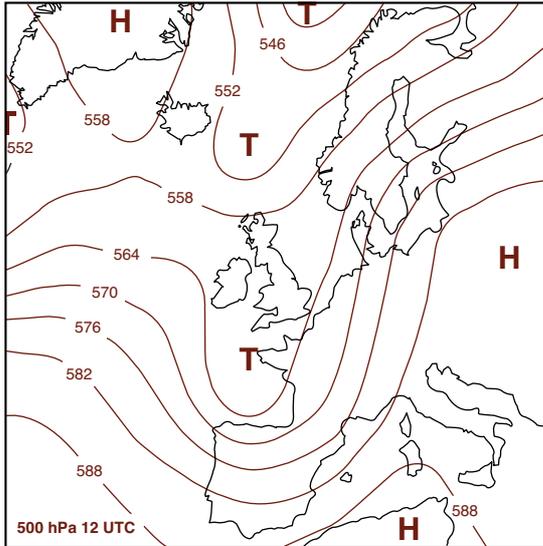
Pour la Suisse, de tels systèmes convectifs (MCS) sont définis dans ce qui suit comme événements extrêmes. Ils se déchaînent sur une grande partie du pays et causent des dommages sur une large étendue géographique.

### Conditions météorologiques

Il est apparu que les MCS extrêmes se produisent en Suisse dans des conditions météorologiques bien définies<sup>3</sup>:

- La situation météorologique est déterminée par ce qu'on appelle un creux barométrique, qui produit un courant du sud-ouest en direction de la Suisse.
- Un front froid, caractérisé par de grandes différences de température, est situé au-dessus de la France et s'étend jusqu'en Espagne.
- De l'air tropical ou subtropical chaud et humide s'écoule à l'avant du front froid.
- Au-dessus de la Suisse, les différences de pression sont faibles et la stratification atmosphérique est instable.





**Figure 33:** Creux barométrique sur la Biscaye avec courant du sud-ouest en direction de l'Europe centrale (niveau 500 hPa). Exemple du 5 juillet 1999.

Quatre grandes situations météorologiques différentes furent à l'origine des cinq chutes de grêle extrêmes des 80 dernières années. Elles ont en commun un courant du sud-ouest précédant le passage du front. Un creux barométrique caractéristique au-dessus de la Biscaye, accompagné d'un courant de sud-ouest en direction de l'Europe centrale, a conduit aux chutes de grêle extrêmes du 5 juillet 1999 (figure 33).

### Fréquence et tendance des événements extrêmes

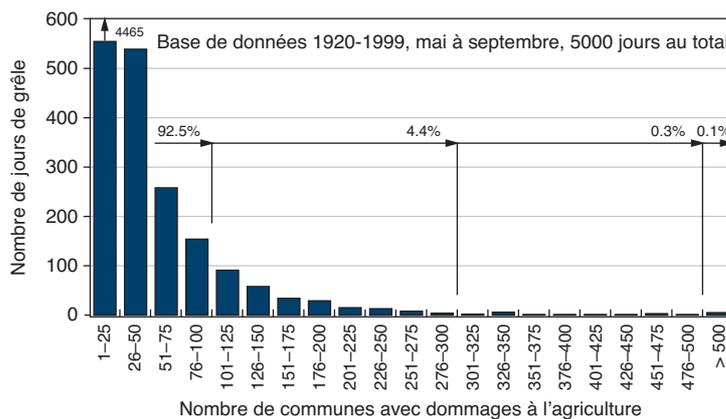
Le radar météorologique permet de suivre les zones de précipitations et d'identifier les grandes cellules générant des chutes de grêle intenses. Les cellules isolées peuvent être subordonnées à des systèmes de tempêtes. En Suisse, ce genre de mesure n'est toutefois effectué systématiquement que depuis 1980 environ.

Il n'existe donc pas de longues séries de mesures qui permettraient d'étudier la fréquence et la tendance d'événements extrêmes de type MCS. L'assurance contre la grêle est une source d'informations sur l'étendue des zones touchées par la grêle. La statistique des dommages permet une approche scientifique des effets des changements climatiques sur les chutes de grêle extrêmes.

Cette statistique est une série de données fiable et relativement homogène. Elle indique, par jour depuis 1920, combien de communes du nord des Alpes ont annoncé des dommages causés par la grêle à l'agriculture.<sup>4,5</sup> Le nombre des communes concernées permet de cerner l'étendue d'un système de tempêtes – ceci en supposant qu'au moins un agriculteur par commune frappée par la grêle associée à ce système ait annoncé un dommage.

La figure 34 montre, pour la période de 1920 à 1999, combien de communes ont annoncé tant ou tant de jours de grêle ayant causé des dommages à leur agriculture. Au total, 5690 jours de grêles ont été enregistrés. Dans cinq cas (0.1%), 500 communes ou plus (sur 2400) ont été touchées. Le fait qu'il s'agisse dans ces cinq

- (e) Jusque peu avant l'arrivée du front froid d'ouest, l'ensoleillement sur le Plateau est maximal. Les plus basses couches de l'atmosphère sont réchauffées à plus de 30°C.
- (f) Le front froid arrive vers la fin de l'après-midi. Des cellules orageuses se forment à l'avant et à l'intérieur du front.
- (g) Les cellules orageuses se regroupent en un ou plusieurs MCS alignés.



**Figure 34:** Nombre de jours de grêle ayant provoqué des dommages à l'agriculture dans un nombre donné de communes (sur 2400 communes suisses du nord des Alpes). Cinq (0.1%) des 5690 jours de grêle de 1920 à 1999 ont touché plus de 500 communes (dernière colonne). Ces cas sont définis comme «extrêmes». Les jours où 100-200 communes sont concernées sont désignés comme événements «forts» (3.9%, colonnes 5 à 8). Pendant cette période, 4465 jours de grêle n'ont touché que 1-25 communes (79%, première colonne).

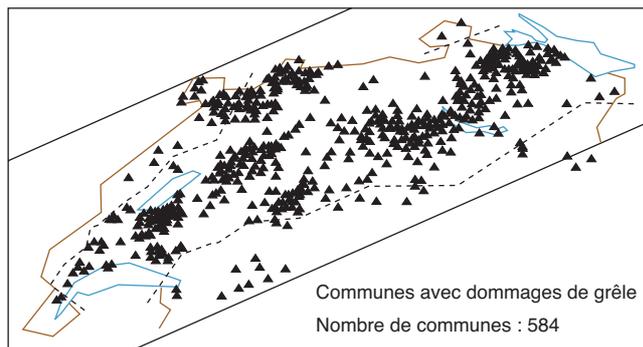
cas extrêmes d'un MCS est illustré par la distribution des communes ayant subi des dommages lors des chutes de grêle du 21 juillet 1992 (figure 35). Cet événement a causé pour quelque 100 millions de francs de dommages assurés, auxquels s'ajoutent des dommages non assurés, tels que des dégâts importants aux forêts.

La figure 36 représente les jours de grêle pour lesquels plus de 100 communes ont annoncé des dommages pendant la période de 1920 à 1999. Les cinq événements extrêmes sont distribués régulièrement sur la période d'observation. Les «fortes» chutes de grêle, qui ont causé des dommages dans 100 à 200 communes, ont augmenté après 1980. Cette tendance est explicitée par la figure 37: avant 1980, la fréquence des fortes chutes de grêle est à peu près constante; de 1980 à 1994, elle marque une nette augmentation; elle diminue de nouveau après 1994, année où la grêle a beaucoup frappé, mais reste supérieure à la moyenne d'avant 1980.

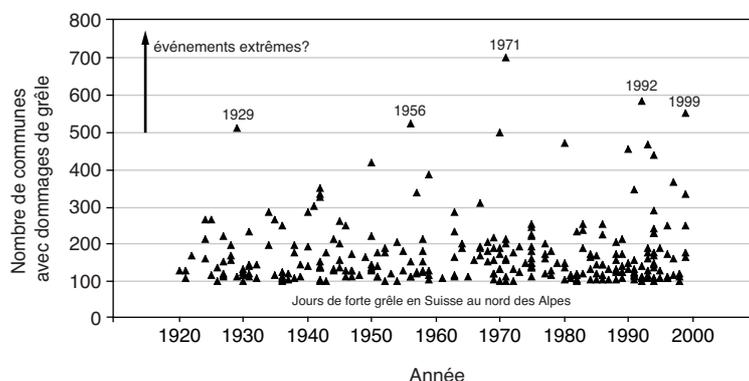
Depuis 1940, la fréquence des quatre grandes situations météorologiques qui furent à l'origine des chutes de grêle extrêmes a sensiblement augmenté en été en Europe centrale (figure 38).

### Influence des changements climatiques

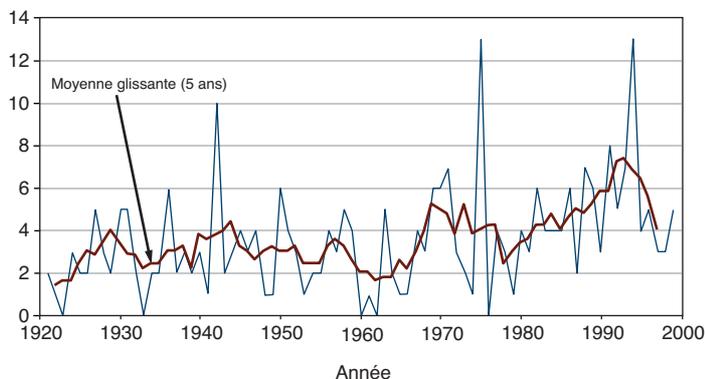
Si, en raison des changements climatiques, la fréquence de ces quatre grandes situations météorologiques continuait d'augmenter dans l'espace européen et atlantique, les conditions qui favorisent les systèmes de tempêtes se présenteraient aussi



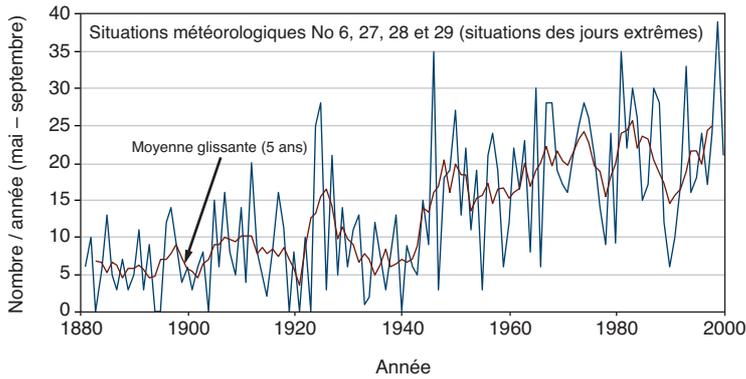
**Figure 35:** Distribution des communes ayant annoncé des dommages de grêle un «jour extrême» (21/7/1992). Les passages de grêle du système de tempêtes (direction SO-NE) sont reconnaissables à la répartition géographique de ces communes.



**Figure 36:** Jours où la grêle a provoqué des dommages à l'agriculture dans 100 ou davantage de communes suisses du nord des Alpes de 1920 à 1999. Les cinq «jours extrêmes» sont répartis assez régulièrement le long de la période. La distribution des «fortes» chutes de grêle, touchant entre 100 et 200 communes, devient un peu plus dense après 1980.



**Figure 37:** Evolution de 1920 à 1999 du nombre de jours comportant 100 ou davantage de communes touchées. Une hausse tendancielle de la «forte» grêle est bien reconnaissable de 1980 à 1994.



**Figure 38:** Survenance des quatre situations météorologiques responsables des jours de grêle «extrêmes», de 1881 à 2000.<sup>6</sup> Celles-ci ont en commun un courant du sud-ouest précédant le passage du front (figure 33). Depuis 1940, on observe une augmentation prononcée de ces quatre situations météorologiques.

plus souvent. Il faudrait alors compter avec davantage de chutes de grêle extrêmes. La tendance à l'augmentation des jours de forte grêle pourrait également se poursuivre.

La question de savoir si ces événements deviendront plus intenses dépend notamment de la capacité des changements climatiques à rendre la stratification de la troposphère plus instable en été. Une stratification instable favorise la formation de cellules orageuses lors du passage du front. Des mesures au moyen de sondes, effectuées entre 1954 et 1993, ont montré que la troposphère inférieure se réchauffe plus vite que la troposphère supérieure et que la stabilité de la stratification s'est affaiblie.<sup>1,5</sup>

La série de données sur les jours de grêle est mise à jour jusqu'en 1999. Des données plus récentes mettent en évidence un nouveau «jour extrême» en 2000 (le 3 juillet): 620 communes ont été touchées. Ce qui signifie que nous avons enregistré trois cas pendant les dix dernières années, contre trois pendant les 70 années précédentes. Les données ne sont toutefois pas encore assez nombreuses pour que l'on puisse distinguer s'il s'agit d'une tendance effective ou d'une accumulation fortuite (cf. chapitre 1.4.).

- 1 Schiesser H.-H., A. Waldvogel, W. Schmid und S. Willemse, *Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten*, Schlussbericht NFP31, vdf, Zurich, 132 S., 1997.
- 2 Schiesser H.-H., R. A. Houze, and H. Huntrieser, The meso-scale structure of severe precipitation systems in Switzerland, *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2070–2097, 1995.
- 3 Huntrieser H., *Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage von Gewittern in der Schweiz*, Ph.D. Thesis No. 11020, ETH Zurich, 246 S., 1995.
- 4 Bider M., *Statistische Untersuchungen über die Hagelhäufigkeit in der Schweiz und ihre Beziehung zur Grosswetterlage*. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat.*, 6, 66–90, 1954.
- 5 Willemse S., *A statistical analysis and climatological interpretation of hailstorms in Switzerland*, Ph.D. Thesis No. 11137, ETH Zurich, 194 p., 1995.
- 6 Situations météorologiques d'après Hess-Brezowsky: situation 6 (situation cyclonique du sud-ouest, 5.7.1999, 3.7.2000), 27 (situation cyclonique du sud, 10.9.1956), évent. 28 (dépression sur les Iles britanniques, probablement le 21.7.92) et 29 (creux barométrique sur l'Europe occidentale, 4.7.1929, 26.8.1971).

## 2.7. Les crues

Armin Petrascheck

Les précipitations, la température et l'état du bassin versant concourent à la formation des crues. L'ampleur des crues extrêmes dépasse nettement les pointes des crues ordinaires. En Suisse, les pointes des crues ne présentent ni augmentation ni diminution uniforme pendant le 20<sup>e</sup> siècle. Mais les changements climatiques peuvent influencer sur les crues par l'augmentation de la température, par des modifications du régime des précipitations et par des transformations du bassin versant. Un accroissement du danger est probable dans des régions du Plateau où des crues se produisent aujourd'hui déjà en hiver. Dans les bassins versants des hautes Alpes, certains facteurs ont pour effet d'augmenter et d'autres de diminuer les débits des cours d'eau, aussi des changements du danger de crue sont-ils difficilement prévisibles.

### Introduction et définition

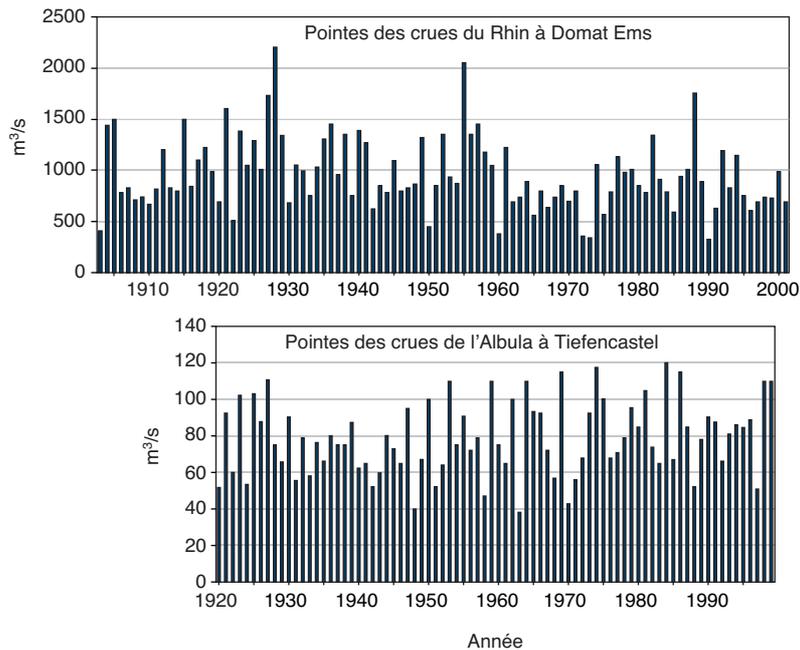
Une crue est un débit d'un cours d'eau nettement supérieur à la moyenne. Les données hydrologiques sur les maxima annuels permettent d'associer une probabilité (un temps de retour) aux débits de pointe et d'identifier ainsi des crues décennales ou centennales (HQ10 ou HQ100). HQ100 est certes un événement rare, mais n'est un sinistre que si le débit est très nettement supérieur à la plupart des valeurs observées d'ordinaire. A cet égard, la comparaison des pointes des crues de l'Albula à Tiefencastel et du Rhin à Domat Ems (figure 39) illustre bien l'importance des variations naturelles. Dans le cas du Rhin, le débit d'une crue centennale est de 40% supérieur à celui d'une crue décennale et le niveau du fleuve de 1.5 m plus élevé. Alors que pour l'Albula, le débit est seulement de 20% supérieur et le niveau de 25 cm plus élevé.

La mention de la probabilité est nécessaire pour plusieurs raisons, mais ne dit rien sur l'ampleur du débit ni sur sa portée pour l'environnement et l'être humain. Du point de vue de l'environnement naturel, l'attention porte sur les écoulements qui provoquent un débit de charriage, inondent les zones alluviales ou modifient le lit du cours d'eau. Ce sont-là des événements relativement fréquents, avec un temps de retour de moins de 2 à 10 ans. Le plus

souvent, ils ne causent pas de dommages et passent presque inaperçus – l'écosystème et l'homme se sont adaptés à ces événements relativement fréquents. Du point de vue de l'homme, l'intérêt porte sur des écoulements pour lesquels le cours d'eau sort de son lit et pénètre dans des zones affectées à l'habitat ou à d'autres utilisations.

Les événements extrêmes dépassent en général nettement les crues observées d'ordinaire. En 1987 par exemple, la Reuss uranaise a atteint un débit plus de 50% plus élevé qu'au cours des nonante années précédentes. La situation fut encore plus extrême lors des crues de la Langeten à Lotzwil en novembre 1975 (figure 40), où toutes les pointes des crues survenues depuis 1924 furent dépassées d'un multiple. De tels événements transforment le système hydrologique et inondent des surfaces qui s'étendent bien au-delà du lit du cours d'eau. Pour la natu-





**Figure 39:** Les pointes des crues du Rhin à Domat Ems présentent une très grande variabilité. De 1899 à 1962, une crue décennale correspondait à un débit de 1550 m<sup>3</sup>/s et à un niveau du fleuve de 10.1 m. Une crue centennale avait un débit de 43% plus important (2200 m<sup>3</sup>/s) et un niveau de 1.5 m supérieur (12.6 m). En revanche, les pointes des crues de l'Albula à Tiefencastel sont réparties de façon plus régulière et une crue centennale n'est guère perçue comme extrême. Une crue décennale correspond à un débit de 105 m<sup>3</sup>/s et à un niveau de 8.2 m; lors d'une crue centennale, le débit s'élève à 130 m<sup>3</sup>/s et le niveau à 8.45 m.

re, ces événements font partie de la dynamique du paysage. Pour l'homme, ils représentent d'importants dommages, voire des catastrophes naturelles.

Les ouvrages de protection ont une influence sur la perception des crues comme événements dévastateurs. En septembre 1993 par exemple, la Saltina a causé pour environ 500 millions de francs de dommages; son débit avait atteint 90 m<sup>3</sup>/s. En octobre 2000, son débit s'est élevé à 125 m<sup>3</sup>/s. Mais les ouvrages de protection érigés entre-temps ont limité les dégâts. La crue la plus dévastatrice à Brigue reste celle de 1993.

### Les conditions de la formation des crues

Les crues résultent de l'action conjointe des précipitations, de la température et de l'état du bassin versant.

Dans les grands bassins versants (>300 km<sup>2</sup>), les crues extrêmes sont associées à des fronts amenant des précipitations de longue durée qui se déversent abondamment sur l'ensemble du bassin

(cf. chapitre 2.5.). Les crues de grande étendue de 1910 et 1999 résultent de situations météorologiques à grande échelle centrées au Nord des Alpes et celles de 1987, 1993 et 2000 de situations de barrage sur le versant sud. Dans les petits bassins versants (<100 km<sup>2</sup>), les orages constituent le plus grand danger (exemples Sachseln 1997, Gantrisch 1990).

Il n'y a pas de lien direct entre le volume ou l'intensité des précipitations et l'ampleur des pointes des crues, car les quantités d'eau stockées dans le bassin versant diffèrent selon les antécédents. Dans l'exemple de la Langeten (figure 40), ce ne sont pas seulement des précipitations exceptionnelles qui ont conduit à une pointe de débit extrême, mais aussi le fait que les capacités de stockage étaient épuisées.

Sous d'autres conditions, des précipitations d'ampleur comparable ont été largement résorbées par les débordements.

La température joue un rôle important dans les régions alpines. Quand la limite du zéro degré est basse, une partie des précipitations tombe sous forme de neige et ne s'écoule donc pas immédiatement. Lors de la crue d'octobre 2000 par exemple, le fait que la limite du zéro degré soit descendue de 3000 à 2600 m pendant la dernière phase des précipitations a épargné au Valais des conséquences encore plus dramatiques. Le stockage temporaire des précipitations sous forme de neige diminue les écoulements. Inversement, la fonte des neiges accroît les écoulements, auquel cas il s'ensuit avant tout des débits importants pendant une à deux semaines, plutôt que de grosses pointes de crue. Au printemps 1999 par exemple, la fonte des neiges, associée à des précipitations importantes mais pas exceptionnelles, a fait monter fortement le niveau des lacs des Préalpes et provoqué des crues du Rhin, de la Thur et de l'Aare.

## Tendances au 20<sup>e</sup> siècle

Aucune tendance uniforme ne se dessine à propos des pointes de débit des crues des cours d'eau suisses. Cela tient en partie aux interventions humaines. Près de Domat Ems par exemple (figure 39), le développement de la capacité hydroélectrique entre 1955 et 1970 a conduit à une diminution des pointes de débit du Rhin. D'autres facteurs, tels que les boisements et le renforcement de la protection contre les hautes eaux influent aussi sur les débits. Une étude systématique de l'office bavarois d'économie hydraulique<sup>2</sup> n'a relevé aucune tendance dans 73 stations; seules deux stations ont présenté une tendance, l'une positive, l'autre négative.

Il n'est pratiquement pas possible de mettre en évidence des événements extrêmes très rares sur une base statistique (cf. chapitre 1.4.). On relève actuellement une accumulation de gros sinistres (1987, 1993, 1999, 2000, 2002). Toutefois, de telles accumulations se sont produites aussi au 19<sup>e</sup> siècle (1834, 1838, 1852, 1868). Les longues séries de mesures et les chroniques font apparaître aussi des périodes sans crues notables, par exemple de 1940 à 1950. Il n'y a pour l'heure que des spéculations et pas d'explications au sujet de ce déroulement épisodique.

## Influence des changements climatiques sur les crues

Les changements climatiques peuvent influencer sur la formation des crues par différents processus:

### Influence de l'augmentation de température

En Suisse, le danger de crue ne peut pas être abordé indépendamment de la position de la limite du zéro degré. Les bassins versants des Alpes ayant leurs racines à haute altitude, la neige y joue un rôle très important – d'une part en retenant les précipitations, d'autre part en restituant de l'eau lors de la fonte. Sous l'effet des changements climatiques, la limite du zéro degré montera, ce qui peut conduire à un accroissement de pluies sur de vastes parties des bassins. La probabilité que de fortes précipitations aient

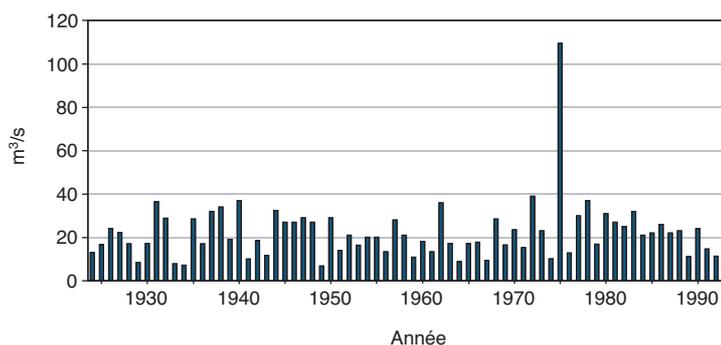


Figure 40: Débits maximaux des crues d'été et d'hiver de la Langeten de 1924 à 1993.<sup>1</sup>

lieu quand la limite du zéro degré est élevée et soient la cause de débits extrêmes en haute montagne augmente. Et si la pluviosité s'accroît également sous l'effet des changements climatiques, tant les débits de pointe que la probabilité des crues augmenteront. A défaut de prendre des mesures de protection, le danger de crues peut s'accroître dans le sens de sinistres plus nombreux et plus importants.

### Changements des précipitations

Selon les calculs au moyen des modèles les plus récents, une augmentation des précipitations sous l'effet des changements climatiques est probable en hiver dans l'arc alpin. Il pleuvra davantage et neigera moins aux basses et moyennes altitudes, raison pour laquelle les crues seront plus fréquentes en hiver sur le Plateau. Le Rhin en aval de Bâle est particulièrement concerné. En Suisse, des aires limitées dans les cantons d'Argovie, de Thurgovie, de Bâle-Campagne, du Jura et de Zurich sont menacées. La question de savoir si cette augmentation concerne seulement les événements fréquents ou aussi les événements extrêmes dépend des changements de la fréquence du passage des fronts et de leur intensité.

Des crues se produisent au printemps lorsque la fonte des neiges coïncide avec des précipitations. L'apport de chaleur au printemps variera probablement peu avec les changements climatiques. C'est pourquoi les modifications des précipitations influenceront davantage sur les crues que la fonte des neiges. Certes, l'augmentation des précipitations d'hiver moyennes entraînera un enneigement plus important dans les hautes Alpes. Mais simultanément, la cou-

verture de neige diminuera à plus basse altitude en raison des températures d'hiver plus élevées. Lequel de ces effets est plus important dans la formation des crues dépend de la structure en altitude du bassin versant, de l'accroissement quantitatif des précipitations d'hiver et de la fréquence de l'alternance entre chute et fonte de neige. Mais quoi qu'il en soit, les périodes dépourvues de crues en raison de basses températures seront plus courtes.

C'est le plus souvent lors des orages d'été que les petits bassins versants sont touchés par des crues. La thermique locale est alors déterminante pour l'intensité et le volume des précipitations. Les hypothèses ayant trait à une augmentation ou à une diminution tiennent de la spéculation. Des changements de fréquence dus aux situations météorologiques sont cités à propos des dégâts de grêle plutôt que des crues (cf. chapitre 2.6.).

### *Changements dans le bassin versant*

Une conséquence des changements climatiques est le recul des glaciers et du permafrost dans les hautes Alpes. Il s'ensuit que davantage de terre, pierres et autres débris sont charriés. En outre, des changements de la végétation, tels que la montée de la limite des arbres, exercent une influence sur la formation des sols. Ces processus peuvent transformer les lits des cours d'eau et modifier le danger de crue. Mais ils sont très lents: les changements du permafrost prennent des décennies à des siècles, ceux de la formation du sol durent des siècles à des millénaires.

On se rendra compte plus vite du fait qu'à plus hautes températures, les plantes évaporent davantage d'eau. L'eau stockée dans le sol sera plus rapidement consommée, ce qui peut avoir un effet de modération sur les crues. Un effet perceptible surtout là où les hautes eaux sont fréquentes ainsi que dans des régions des Alpes et des Préalpes où des crues se produisent en été sans que l'on s'attende à des changements significatifs des précipitations pendant cette saison.

En résumé, une augmentation du danger de crues menace avant tout dans les régions du Plateau où les crues d'hiver jouent aujourd'hui déjà un rôle déterminant. L'accroissement prévu des précipitations d'hiver et l'enneigement plus faible aux altitudes comprises entre 1000 et 1500 m augmentent le risque de crues. Dans des sites des hautes Alpes, où des crues d'été sont coutumières, la montée de la limite du zéro degré peut prolonger la période sans précipitations sous forme de neige, pendant laquelle ces crues peuvent survenir. Jusqu'où l'activation de l'évapotranspiration à plus basse altitude compense ces effets est difficile à prévoir.

- 1 Spreafico M. und K. Stadler, Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten des Rheins und der Aare. Band I, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Berne, 1986.
- 2 Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.], Hochwasser, SpektrumWasser 1, 80 S., Munich 1998.

## 2.8. Les mouvements de masse: glissements de terrain et éboulements

Hugo Raetzo et Olivier Lateltin

Un excès d'eau prolongé dans le terrain peut y déclencher des mouvements de masse. Environ 7% de la surface de la Suisse comporte des pentes instables. En Suisse occidentale, où les précipitations sont devenues plus abondantes depuis les années 1970, ces mouvements se sont accentués dans plusieurs zones de glissement. Plus récemment, de grands volumes d'eau de fonte, s'ajoutant à des précipitations d'hiver en augmentation, ont également favorisé les glissements. L'instabilité des pentes pourrait augmenter de façon générale en raison du recul des glaciers, du dégel du permafrost et de l'accroissement des précipitations d'hiver.

### Définition

Les mouvements de masse sont des déplacements de matériaux solides et/ou meubles le long d'une pente tels que chutes de pierres, éboulements, écroulements, glissements de terrain et ovaïles. Ils peuvent être rapides et subits ou lents et continus.

Quelque 7% de la surface de la Suisse est concernée par ces instabilités. Des zones de glissement de grande étendue sont nombreuses en particulier dans le flysch<sup>1</sup>, où la proportion élevée d'argile et de limon favorise les instabilités. Dans ces zones, des sols à grain fin ralentissent l'infiltration de l'eau de pluie, ce qui maintient toute l'année un haut degré d'humidité. La teneur élevée en eau de la terre et des roches augmente les forces à l'origine de l'instabilité.

Des petits mouvements de masse dans des régions non habitées passent souvent inaperçus. Mais des petites ovaïles peuvent déjà avoir des effets dévastateurs à l'échelon local (cf. Gondo le 14/10/2000, Lutzenberg le 1/9/2002, Schlans le 16/11/2002). Sont considérés comme événements extrêmes dans le présent chapitre des glissements de grande ampleur (volume supérieur à 1 million de m<sup>3</sup>), caractérisés par des accélérations d'une rare intensité, ou la conjonction de plusieurs petits glissements (jusqu'à plusieurs 100'000 m<sup>3</sup>). En été 2002 par exemple, après des précipitations abondantes, environ un millier de glissements se sont produits dans toute la Suisse, dont quelques centaines en Suisse centrale et orientale.

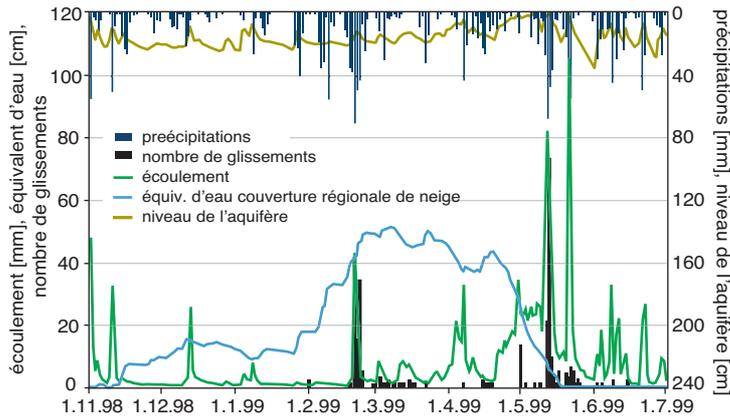
### Situations météorologiques critiques et disposition à l'instabilité

Nombre de mouvements de masse se produisent lors d'un excès d'eau prolongé dans le terrain. En montagne, cela n'est le cas que par des tem-

pératures supérieures au point de congélation, sans quoi les précipitations sont stockées sous forme de neige et de glace. L'eau est abondante au printemps quand une forte fonte des neiges coïncide avec de violentes précipitations, et en été et en automne lors de précipitations intenses et persistantes (cf. chapitres 2.5., 2.7.):

- Après les hivers à avalanches 1888/89, 1950/51 et 1998/99 (cf. chapitre 2.9.), la neige tombée en masse a rapidement fondu pendant une longue période de pluies abon-





**Figure 41:** Evolution des précipitations et de la nappe phréatique en 1999, année d'intempéries.<sup>2</sup> Les précipitations (en bleu en haut), le niveau de l'aquifère (en olive en haut), l'écoulement (en vert en bas) et l'équivalent d'eau de la couverture de neige (en bleu clair en bas) de l'Alptal dans le canton de Schwyz (données FNP) sont comparés aux instabilités de pentes (en noir en bas, intervalles journaliers). Une première période de glissement a eu lieu du 20 au 23 février 1999, après les dernières chutes de neige. Une seconde période a suivi du 12 au 17 mai 1999 pendant de fortes précipitations coïncidant avec la fonte des neiges.

dantes. De nombreuses zones de glissement se sont réactivées (cf. figure 41). Une situation semblable, mais locale, mettant en jeu de grandes quantités d'eau de fonte, a réactivé le glissement de Falli Hölli dans le canton de Fribourg. Quarante maisons furent déplacées de 200 m en aval et détruites.

- En 1987, 1993 et 2000, plusieurs jours de précipitations intenses en été et en automne (cf. chapitres 2.5., 2.7.) dans de nombreuses vallées des Alpes ont déstabilisé les pentes et provoqué des inondations. Une situation extrême s'est produite les 13/14 octobre 2000 dans la région du Simplon, sous l'influence d'un régime du sud qui a entraîné beaucoup d'air humide vers les Alpes: en deux jours, il est tombé près de 500 mm de pluie, ce qui correspond, à un événement tricentennal à millennal. Le 14 octobre 2000, le mur de soutènement au-dessus de Gondo a lâché. Le glissement de terrain, accompagné d'une ovaille, a fait treize victimes.

## Instabilité des pentes dans le passé

### La phase préhistorique:

Les grandes zones de glissement étaient très actives dans les Alpes à la fin de la dernière glaciation, lorsque les glaciers se sont retirés, et au début de

l'holocène il y a env. 11'600 ans (figure 42). Les forces exercées par les glaciers sur les flancs des vallées s'étaient relâchées, tandis que de vastes zones de permafrost qui stabilisaient des roches meubles avaient disparu. A part les glissements, il y eut de nombreux éboulements<sup>3,4</sup>, des matériaux se sont accumulés dans les vallées des Alpes et en maints endroits des mouvements de masse ont barré le passage aux cours d'eau qui ont alors formé des lacs et des marais (Davos, Flims, bois de Finges, lac Noir etc.).

Au cours des dernières 9'000 années (holocène), les températures ont été assez constantes. Des instabilités de pente ont été causées probablement avant tout par les variations des précipitations.

Mais les courbes de température et de précipitation sont lacunaires et peu précises pour l'holocène et l'on ne peut établir que des liens incertains entre l'instabilité des pentes et le climat. Les glissements ont été par exemple sensiblement plus nombreux dans toute l'Europe pendant la phase froide et pluvieuse de Lössen, il y a environ 3'000 ans (figure 42).

### Phase historique et 20<sup>e</sup> siècle

Après le 15<sup>e</sup> siècle, les données sur le climat peuvent être reconstituées assez exactement. Il existe par exemple une corrélation entre les années riches en précipitations et les années de forte activité de glissement pendant la «petite période glaciaire», qui s'étend de la fin du 13<sup>e</sup> au milieu du 19<sup>e</sup> siècle.

Depuis les années 1970, l'augmentation des précipitations en Suisse occidentale a activé les mouvements dans plusieurs zones de glissement. S'il y a eu davantage de glissements dans le passé récent, cela tient avant tout à l'effet conjoint de précipitations plus abondantes en hiver et de l'eau de fonte.

Du point de vue statistique, les événements de 1951 (hiver alpin), 1987 (précipitations en été dans les Alpes), 1993 (intempéries à Brigue), 1999 (fonte des neiges et précipitations au printemps) et 2000 (intempéries en automne au Valais et au Tessin) sont des événements extrêmes.

## Effets des changements climatiques

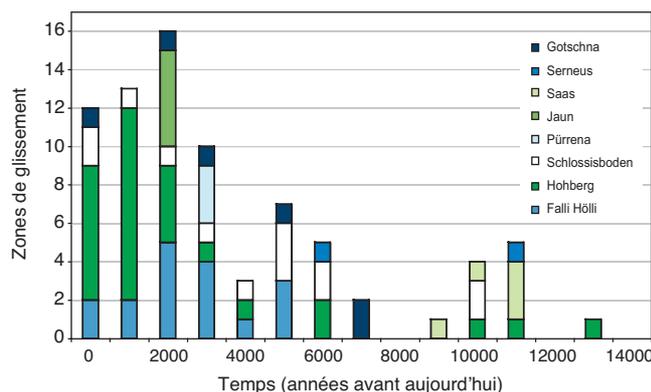
La fréquence des mouvements de masse est influencée par des changements des températures, du cycle de l'eau, des glaciers et du permafrost. L'augmentation des températures en hiver et au printemps change la forme des précipitations, la hauteur de la couverture de neige et les températures du sol. A long terme, les changements climatiques influent sur la stabilité de grands volumes de matériaux dans les zones de glissement. Tandis que des petites zones de glissement et d'ovailles peuvent devenir instables à court terme sous l'action d'événements extrêmes tels que des précipitations intenses ou des orages.

### Glaciers et permafrost

Le recul des glaciers et le dégel du permafrost dégagent de grandes masses d'éboulis, qui peuvent alors se mettre en mouvement sous l'action de l'eau. Le réchauffement global aura des effets considérables en montagne dans les zones glaciaires et périglaciaires.<sup>3</sup> Toutefois, il est difficile de prévoir quantitativement les effets des changements climatiques sur le permafrost.

De façon générale, il est probable qu'une augmentation à long terme de la température sera suivie avec un certain retard par le dégel du permafrost. Des variations saisonnières, qui dépendent principalement de l'épaisseur de la couverture de neige, se superposent à cette tendance. Une couche de neige précoce ralentit le refroidissement du sol: la chaleur géothermique qui s'y accumule facilite la fonte l'été suivant. A l'inverse, une couche de neige persistante au printemps isole le sol froid: la phase de dégel étant plus courte, moins de chaleur pénètre dans le sol en été. Ces variations saisonnières ne semblent toutefois pas devoir changer grand chose à la fonte à long terme du permafrost.

Le système du permafrost a une grande inertie, vu que les capacités thermiques de la glace et du sol sont plus grandes que celle de l'air. Ainsi seuls des changements à long terme ont une influence, mais celle-ci conduira à son tour à une situation de longue durée. Le permafrost se réchauffera d'abord dans les couches proches de la surface, dans des zones dépourvues de neige et

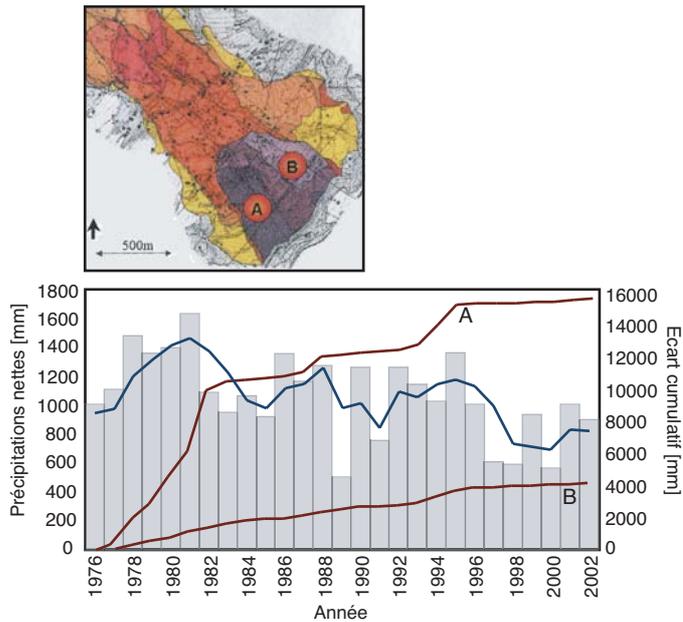


**Figure 42:** Fréquence des glissements en Suisse pendant l'holocène<sup>5,6</sup>. Les pentes choisies représentent un volume de plusieurs millions de mètres cubes. Ces glissements profonds ont passé par plusieurs phases d'accélération depuis la dernière glaciation. La datation par le C-14 de troncs d'arbres fossiles conservés dans les matériaux de glissements du passé fournit des données qualitatives sur l'activité de glissement pendant l'holocène et, sous réserve, sur les conditions climatiques. La probabilité étant plus grande, lors de forages et de fouilles, de trouver du bois relativement jeune, situé à moindre profondeur que le vieux bois fossile, les datations au C-14 sont plus nombreuses pour les deux à trois derniers millénaires que pour des temps plus reculés. La datation la plus ancienne dans la zone de glissement du Hohberg est antérieure au Dryas récent (plus de 12 700 ans). Après le retrait des glaciers, plusieurs grands éboulements se sont produits dans les vallées des Alpes fribourgeoises et grisonnes (Hohberg, Schlossisboden, Saas et Semeus) au cours des 12<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> millénaires, pendant lesquels le climat s'est réchauffé. Les instabilités de pentes furent nombreuses de 7000 à 5000 ans avant aujourd'hui (AA) – une période à climat variable. Après une phase relativement tranquille, plusieurs zones de glissement se sont réactivées il y a environ 3400 ans: Falli Hölli, Hohberg, Schlossisboden, Pürrena et Gotscha. Du point de vue climatique, la fin du subboréal est un événement important en Europe. Les périodes froides «Löbben» (3500 à 3100 ans AA) et «Göschenen I» (2830 à 2270 ans AA) sont caractérisées par une progression des glaciers. La phase de haute activité de glissement dure jusqu'au 2<sup>e</sup> siècle av. J.-C.; elle diminue ensuite un peu, mais varie en suivant les phases humides.

dans des formations où il n'atteint qu'une faible épaisseur. Dans de telles régions, les chutes de pierre, l'érosion, les glissements de terrain et les ovailles pourraient augmenter. Au Ritigraben par exemple, le glacier rocheux situé à 2500 m d'altitude fut la source de plusieurs ovailles ces dix dernières années. Pendant cette même période, plusieurs fois des matériaux rocheux se sont précipités de zones de permafrost vers les vallées (Tschierva, Piz Serscen, Mättenberg, mont Rose (face italienne), Gruben<sup>8,9</sup>).

### Précipitations

L'intensification du cycle de l'eau (cf. chapitre 2.5.) a un effet négatif sur la stabilité des pentes. Les précipitations augmentant en hiver, les glis-



**Figure 43:** Zone de glissement de La Frasse près d'Aigle.<sup>7</sup> Le graphique compare, de 1976 à 2002, les précipitations nettes (colonnes grises) et les écarts cumulatifs (lignes rouges) des zones A et B. La ligne bleue indique la moyenne sur trois ans des précipitations nettes. Quand cette moyenne dépasse 1150 mm, le front de la zone de glissement qui avance vers le lit de la Grande Eau s'accélère. La zone A réagit alors par une accélération prononcée (notamment de 1977 à 1982), tandis que B ne subit que des changements de vitesse minimales. Le front de la zone de glissement réagit donc de façon plus ou moins sensible aux précipitations et à la pression de l'aquifère, c'est-à-dire indirectement aux changements climatiques.

sements pourraient devenir plus nombreux. Et les températures étant plus hautes, il pleuvra davantage et neigera moins. La stabilité des pentes diminue du fait que l'eau est plus abondante en hiver.

Selon les scénarios climatiques, des courants du sud, tels que celui qui a conduit à la situation extrême des 13/14 octobre 2000 dans la région du Simplon, seront plus fréquents à l'avenir, quand davantage d'humidité est transportée de la Méditerranée en direction des Alpes. Lorsque de telles situations de barrage maintiennent pendant plusieurs jours la limite du zéro degré à très haute altitude, il faut s'attendre à davantage de glissements de terrain et d'ovailles.

- Sédiments qui ont été transportés de zones seuils émergeant de la mer et se sont déposés lors de l'orogénèse en strates à rapides variations de faciès (grès marins, souvent riches en glauconite, marne, schistes argileux, calcaires).
- Nach Bollinger D., C. Hegg, H.-R. Keusen und O. Lateltin, Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999, Bulletin für angew. Geologie Nr. 5/1, 5-38, 2000.
- Kääb A., J. M. Reynolds and W. Haeberli, Glacier and permafrost hazards in high mountains. In: Huber U. M., M. A. Reasoner, and B. Bugmann [Eds], Global change and mountain regions: a state of knowledge overview. Advances in global change research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003 (in press).
- Haeberli W., A. Kääb, M. Hoelzle, H. Bösch, M. Funk, D. Vonder Mühl und F. Keller, Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31, vdf, ETH Zurich, 1999.
- Raetzo H., Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Bericht des NFP31, vdf, ETH Zurich, 256 S., 1997.
- Dapples F., Instabilités de terrain dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse) au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène: influence des changements climatiques, des fluctuations de la végétation et de l'activité humaine. Thèse 1395 UNIFR, Multiprint S.A. Fribourg, 2002.
- Bonnard, communication personnelle.
- Noetzli J., M. Hoelzle, and W. Haeberli, Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: A GIS-based approach to determine critical factors. In: Phillips M., S. M. Springman, and L. U. Arenson [Eds.], 8th International Conference on Permafrost, Zurich/Switzerland; Proceedings 2, 827 - 832, 2003.
- Haeberli, W., C. Huggel, A. Kääb, A. Polkvoj, I. Zotikov, and N. Osokin, Permafrost conditions in the starting zone of the Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 in North Osetia (Russian Caucasus). In: Haeberli W. and D. Brandova [Eds.], 8th International Conference on Permafrost, Zurich/Switzerland, Extended abstracts reporting current research and new information, University of Zurich, 49 - 50, 2003.

## 2.9. Les avalanches

Walter J. Ammann

**Le cumul de nombreuses avalanches destructrices est une catastrophe lourde de conséquences. En Suisse, ce genre d'événement est provoqué en général par une succession rapide de situations de barrage du nord-ouest et du sud, qui entraînent de violentes précipitations et plus de 1 m de neige fraîche. Au 20<sup>e</sup> siècle, on n'a observé ni augmentation ni diminution manifeste de la couverture de neige d'hiver, mesurée dans un certain nombre de stations alpines. Les dégâts d'avalanches n'ont pas évolué non plus à Davos. Il n'est pas possible de prévoir de façon fiable l'influence des changements climatiques sur l'activité des avalanches et sur les dommages causés.**

### Définition, portée et ampleur

Les avalanches constituent un danger naturel important pour le pays de montagnes qu'est la Suisse. De nombreuses avalanches s'y produisent chaque hiver. On désigne par avalanche le déplacement des masses de neige sur toute leur trajectoire de la zone de décrochement à la zone de dépôt. Chaque avalanche peut être classée selon des caractéristiques purement extérieures, morphologiques, relatives à la zone de décrochement, à la trajectoire et à la zone de dépôt. Les avalanches se distinguent en outre par leur ampleur.

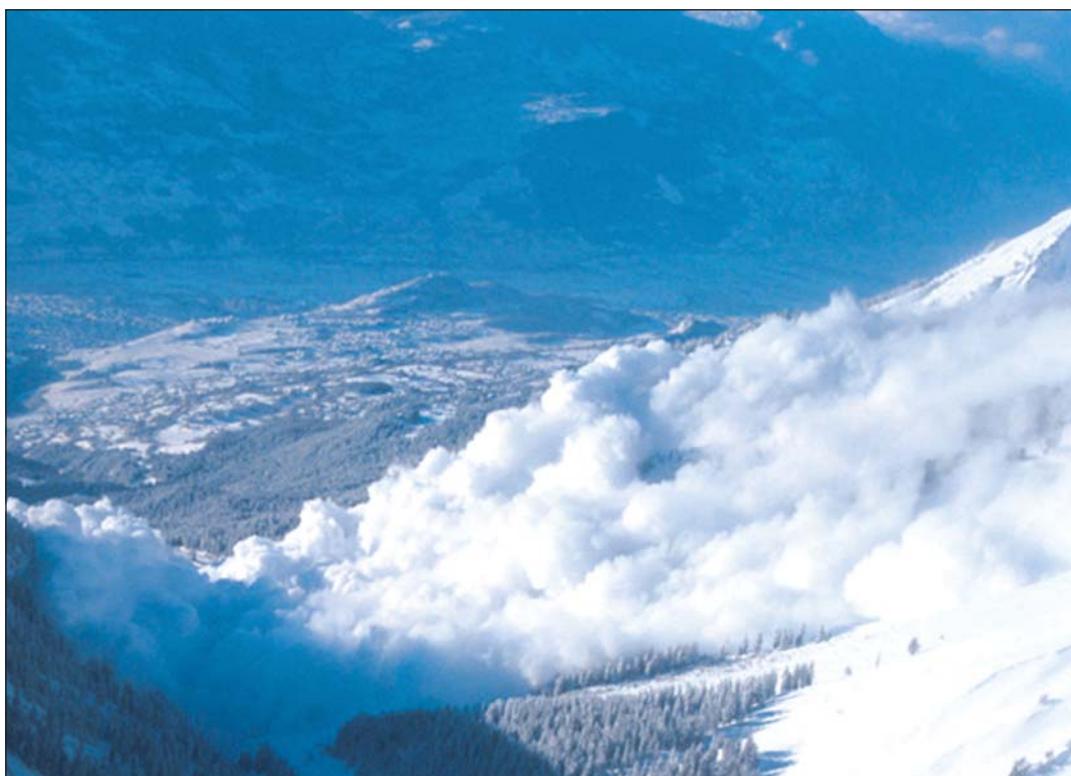
Des avalanches au cours desquelles relativement peu de neige coule le long d'une courte trajectoire se produisent chaque hiver et sont dites avalanches de plaque. Elles sont réparties régulièrement dans l'espace et le temps. En moyenne à long terme, 23 personnes en sont chaque année les victimes en Suisse (cf. chapitre 1.6.2.).

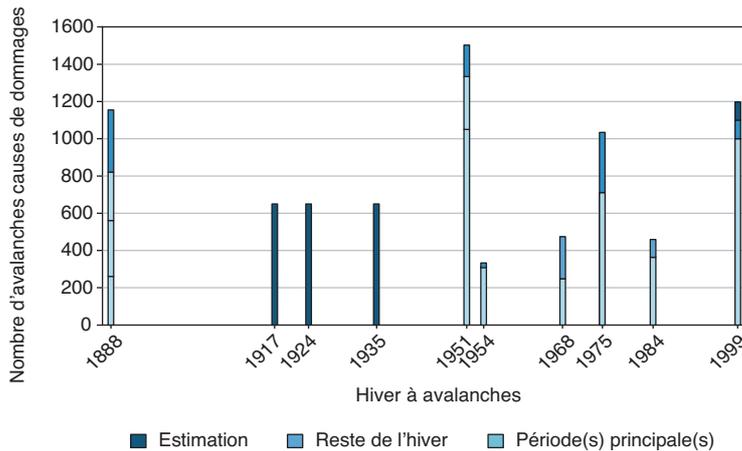
Des avalanches qui mettent en mouvement de grandes masses de neige sur de longues trajectoires – souvent de quelques kilomètres – sont dites grosses avalanches. Elles peuvent descendre jusque dans les vallées et être de véritables catastrophes naturelles. Elles se présentent sous forme d'avalanches coulantes, d'avalanches poudreuses, ou encore d'une combinaison des deux. On entend par avalanche coulante le glissement d'une masse de neige compacte, tandis que lors d'une avalanche poudreuse, la neige tourbillonne et est soulevée par l'air.

Des avalanches extrêmes se produisent relativement rarement dans une région donnée. Leur temps de retour se situe entre 10 et 30 ans et dépasse même le siècle pour les très grosses avalanches. Elles sont perçues comme catastrophes quand elles mettent en danger l'être humain, les agglomérations et les voies de communication. Dans le passé, elles ont fait à maintes reprises de nombreuses victimes et des dommages matériels – la dernière fois en février 1999: plus de 1200 avalanches ont tué 17 personnes et causé pour plus de 600 millions de francs de dommages.<sup>1</sup>

### Causes et conditions

Des situations catastrophiques, au cours desquelles de très nombreuses avalanches sévissent pendant une même période dans un large périmètre géographique, sont toujours causées par des situations météorologiques particulières. Dans les Alpes suisses, il s'agit en général d'une situation de barrage du nord-ouest ou du sud – ou d'une succession rapide de telles situations – qui conduit à de violentes chutes de neige d'une





**Figure 44:** Les hivers à avalanches dans les Alpes suisses depuis 1887/88. Le nombre d'avalanches ayant causé des dommages sert de critère de comparaison. Sont considérés comme dommages aussi bien, par exemple, une étable endommagée qu'une route nationale coupée par une avalanche. Les subdivisions des colonnes correspondent aux principales périodes d'avalanches. Il y eut trois de ces périodes en 1888 (entre mi-février et fin mars), deux en 1951 (en janvier et février). Les données pour 1916/17, 1923/24 et 1934/35 sont des estimations.<sup>2,3</sup>

durée de plusieurs jours et à des hauteurs de neige fraîche supérieures à 1 m. De telles situations peuvent survenir pendant tout l'hiver, de décembre à avril, mais ne conduisent pas forcément à des avalanches catastrophiques. En février 1999, d'abondantes chutes de neige ont déposé par endroit jusqu'à plus de 5 m de neige fraîche.<sup>1</sup> De tels épisodes de fortes précipitations sont souvent accompagnés de vents tempétueux. De grandes quantités de neige fraîche sont ainsi déportées, qui s'accumulent avant tout sur les pentes abruptes à proximité des crêtes. Dans de telles situations, la couche de neige, qui se décroche et produit une avalanche, peut avoir une épaisseur de plusieurs mètres, une largeur de plus de 1 km et un volume pouvant atteindre jusqu'à un million de mètres cubes.

La zone de décrochement des grosses avalanches se situe généralement bien au-dessus de la limite des forêts. Pendant l'hiver à avalanches 1999, elle se trouvait en moyenne à environ 2300 m d'altitude.<sup>1</sup> Les grosses avalanches s'élancent à grande vitesse vers la vallée: les avalanches coulantes atteignent plus de 100 km/h, les avalanches poudreuses près de 300 km/h. Leur force de destruction est énorme. Elles exercent une pression allant jusqu'à 1000 kN/m<sup>2</sup>. Protéger des bâtiments contre de telles forces est illusoire. En dévalant les pentes, les masses de neige perdent de l'énergie par frottement. Le frottement étant faible pour les masses de neige

glissant sur le sol, les avalanches coulantes ne ralentissent qu'une fois parvenues sur un terrain de moins de 12° de pente. Aussi la portée et l'effet dévastateur d'une telle avalanche sont-ils considérables.

Par temps printanier ou lorsque la pluie pénètre dans la couverture de neige, le risque d'avalanches augmente. Ces avalanches de neige mouillée doivent surmonter toutefois un frottement plus important. Aussi leur portée est-elle sensiblement plus courte que celle des avalanches de neige sèche, même si les volumes de neige sont comparables.

## Avalanches historiques et tendances

### Hivers à avalanches dans le passé

Des catastrophes, en termes d'avalanches comparables à celle de l'hiver 1999, se sont produites pendant l'hiver 1950/51, où l'on a déploré 95 victimes<sup>4</sup>, et l'hiver 1887/88 (figure 44). On a connaissance aussi de catastrophes similaires qui ont lieu plus loin en arrière dans le passé un peu partout dans les Alpes.<sup>5</sup>

A partir de 1500, les événements marquants en matière d'avalanches sont de mieux en mieux documentés. Ils sont tous consignés depuis 1888. Jusque vers 1500, les témoignages à ce sujet sont lacunaires. Depuis 1945, toutes les avalanches ayant causé des dommages sont systématiquement enregistrées par l'ENA dans une banque de données. On dispose ainsi d'une vue d'ensemble détaillée de la distribution spatio-temporelle de ces avalanches dans les Alpes suisses. Combinée avec les données météorologiques, elle permet d'estimer, pour une situation du temps donnée, la probabilité que des avalanches fassent des dégâts. D'autre part, un projet du PNR31<sup>5</sup> a constitué, pour Andermatt, Bever et Davos, des séries de données remontant aussi loin que possible dans le passé. Ces stations se trouvent à peu près à la même altitude (env. 1500 m) dans des régions climatiques différentes des Alpes suisses. L'épaisseur de la couverture de neige est mesurée quotidiennement à

Davos depuis 1896, à Bever depuis 1910 et à Andermatt depuis 1947.

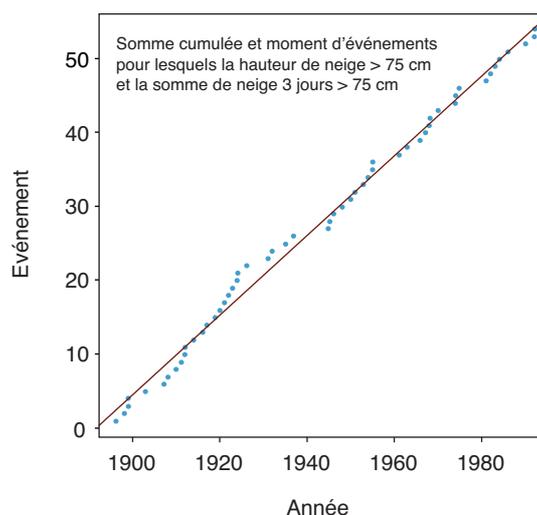
Ces données ont permis d'étudier l'évolution de la couverture de neige au 20<sup>e</sup> siècle. Pour Davos, on a calculé aussi un paramètre dépendant uniquement de données météorologiques, qui décrit l'activité potentielle en matière d'avalanches destructrices. Les principales conclusions sont (cf. aussi figure 45):

- (a) La hauteur de neige varie fortement d'année en année. On ne constate pas de tendance univoque, probablement du fait que la température moyenne en hiver est aujourd'hui encore nettement inférieure à 0°C. Du point de vue de la hauteur de neige, les dernières années n'eurent rien d'exceptionnel dans les stations étudiées. La hauteur moyenne de neige marque une légère tendance à la baisse au cours des années 1990. Des années pauvres en neige se sont déjà présentées en formation serrée dans les années 1920.
- (b) A Davos, les avalanches destructrices n'ont ni augmenté ni diminué (cf. figure 45).
- (c) Les sinistres se limitent à l'échelon régional. Au cours des 600 dernières années, les avalanches n'ont jamais frappé en même temps dans tout l'arc alpin suisse. On ne distingue pas de tendance à l'augmentation ni à la diminution des avalanches.

#### Mesures de protection et ampleur des dommages

Les premiers ouvrages anti-avalanches pour protéger les agglomérations ont été érigés déjà après l'hiver 1887/88. On a d'abord construit des murs en blocs de pierre pour le terrassement de pentes, et plus tard surtout des protections en acier pour stabiliser la neige dans les zones de décrochement. Ces mesures furent renforcées massivement après l'hiver catastrophique 1950/51. Jusqu'à maintenant, la Confédération a investi en gros 1.5 milliards de francs dans les ouvrages de protection anti-avalanche.

L'ampleur considérable des dommages causés par les avalanches pendant l'hiver 1999 ne remettent pas en question les mesures de protection prises au cours des décennies précédentes. Au contraire: le travail de prévention effectué depuis de nombreuses années en étroite collaboration par les communes, les cantons et la Confédération a fait ses preuves! La vulnérabilité des êtres humains et des biens matériels s'est accrue d'un multiple



**Figure 45:** Somme et moment des événements pour lesquels la hauteur de neige et la somme de neige sur 3 jours étaient supérieures chacune à 75 cm. La ligne droite indique la tendance moyenne de 1896 à 1993 pour Davos. La pente est plus forte pour les séquences potentiellement actives que pour celles pauvres en avalanches.<sup>5</sup>

depuis 1950/51.<sup>1</sup> Or en 1999, on a déploré six fois moins de morts qu'en 1950/51. Les dommages matériels ont augmenté un peu plus que proportionnellement aux sommes d'assurance pour les bâtiments et les infrastructures. Des dispositions techniques, des mesures d'aménagement du territoire et d'organisation, mais aussi la protection à grande échelle assurée par les forêts de montagne ont permis de limiter les dommages.

#### Influence des changements climatiques

Des situations extrêmes en matière d'avalanches découlent de situations météorologiques exceptionnelles, qui produisent des jours durant des chutes de neige abondantes au-dessus de 1200 m environ.

On s'attend à ce que les changements climatiques entraînent un réchauffement des températures moyennes ainsi qu'une augmentation en hiver des précipitations et de la fréquence de situations météorologiques extrêmes. Il n'existe encore que peu d'études à ce sujet et celles-ci examinent exclusivement l'influence de l'augmentation des températures sur la couverture de neige et les avalanches.<sup>6</sup> L'influence d'autres changements et de leur combinaison sur la couverture de neige et les avalanches n'est pas encore étudiée. Si bien qu'on ne peut faire encore que des évaluations qualitatives<sup>7</sup>:

- (a) La limite des chutes de neige montera de quelques centaines de mètres en raison du réchauffement. Considéré isolément, ce dernier réduira l'épaisseur et la durée du manteau neigeux.<sup>6</sup>
- (b) D'autre part, des précipitations d'hiver plus abondantes forment des couches de neige plus épaisses au-dessus de la limite des forêts, c'est-à-dire dans des zones de décrochage potentiel. Si cette augmentation des précipitations n'est pas répartie sur tout l'hiver, mais a lieu principalement lors d'une situation météorologique exceptionnelle, le potentiel de situations extrêmes en matière d'avalanches s'accroîtra par rapport à aujourd'hui.
- (c) Aujourd'hui, des conditions météorologiques exceptionnelles conduisent une fois sur trois à une situation extrême en matière d'avalanches.<sup>1</sup> La probabilité de telles situations extrêmes augmentera donc si la situation météorologique sort plus souvent de l'ordinaire.
- (d) A plus basse altitude, des pluies plus fréquentes sur la couverture de neige peuvent conduire à davantage d'avalanches de neige mouillée. Mais ce genre de situations se présente aujourd'hui déjà au printemps, aussi le risque n'augmentera-t-il guère.
- (e) Le glissement de la couverture de neige sur le sol devrait s'accroître avec le réchauffement, ce qui pourrait accroître les dommages causés à la végétation et au sol par le glissement de la neige.

- 
- 1 SLF, Der Lawinenwinter 1999 – Ereignisanalyse. Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, Davos, 588 S., 2000.
  - 2 Source: banque de données des avalanches de l'ENA.
  - 3 Calonder G. P., Ursachen, Wahrscheinlichkeit und Intensität von Lawinenkatastrophen in den Schweizer Alpen, Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zurich, 1986.
  - 4 SLF, Schnee und Lawinen in den Schweizeralpen im Winter 1950/51, Winterbericht des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, Nr. 15, SLF Davos, 1952.
  - 5 Schneebeili M., M. Latenser, P. Föhn und W. Ammann, Wechselwirkungen zwischen Klima, Lawinen und technischen Massnahmen, Schlussbericht NFP31, vdf, Zurich, 132 S., 1998.
  - 6 Föhn P. M. B., Climatic change, snow-cover and avalanches, CATENA, Supplement 22, 11–21, 1992.
  - 7 Ammann W. J. and V. Stöckli, Economic consequences of climate change in Alpine regions: Impact and mitigation. In: Steiniger K. and H. Weck-Hannemann [eds.], Global environmental change in Alpine regions, impact, recognition, adaptation and mitigation, Edward Elgar Publishing, London, 2002.

## 2.10. Les tempêtes d'hiver

Heini Wernli, Stephan Bader et Patrick Hächler

**Les tempêtes d'hiver sont associées à de profondes zones dépressionnaires. En Europe centrale, ces tempêtes sont plus nombreuses en période de forte activité cyclonique sur l'Atlantique, situation plus fréquente depuis les années 1930. De nombreuses modélisations prévoient une augmentation de l'activité cyclonique sur l'Atlantique Nord oriental et l'Europe occidentale comme conséquence des changements climatiques. Selon des considérations prudentes, les tempêtes pourraient gagner en intensité en Europe occidentale. Il n'existe pas d'estimations sur les changements futurs de la fréquence du föehn.**

### Introduction

Des tempêtes d'hiver extrêmes telles que Lothar (décembre 1999) ou Vivian (janvier 1990) sont des cas isolés rares. Aussi n'est-il pas possible de tirer des conclusions statistiquement fondées sur les changements de fréquence et d'intensité de tels événements. Les tendances à ce sujet sont incertaines.

L'intensité des tempêtes se mesure à la vitesse du vent à 10 m du sol. Il faut distinguer entre les pointes des rafales (durée de quelques secondes) et le vent moyen (sur plus de 10 minutes). Les comptes-rendus des médias se réfèrent généralement aux pointes des rafales. C'est sur elles aussi que s'orientent les assurances pour fixer la limite de couverture des dommages (à partir de 75 km/h). La notion de «tempête» utilisée dans ce cas n'est pas bien choisie. En effet, la norme la plus connue et la plus ancienne pour caractériser les vents est celle de Beaufort. Or elle fait appel à des valeurs moyennes: il y a tempête à partir d'un vent de force 9, c'est-à-dire de moyennes d'au moins 75 km/h. La notion d'«ouragan» (événement extrême) correspond à un vent de force 12 sur l'échelle de Beaufort, soit à des moyennes de 118 km/h et plus, qui ne sont pratiquement jamais atteintes à basse altitude loin des côtes. Les pointes des rafales sont en général de 30 à 80% supérieures à la force du vent moyen.

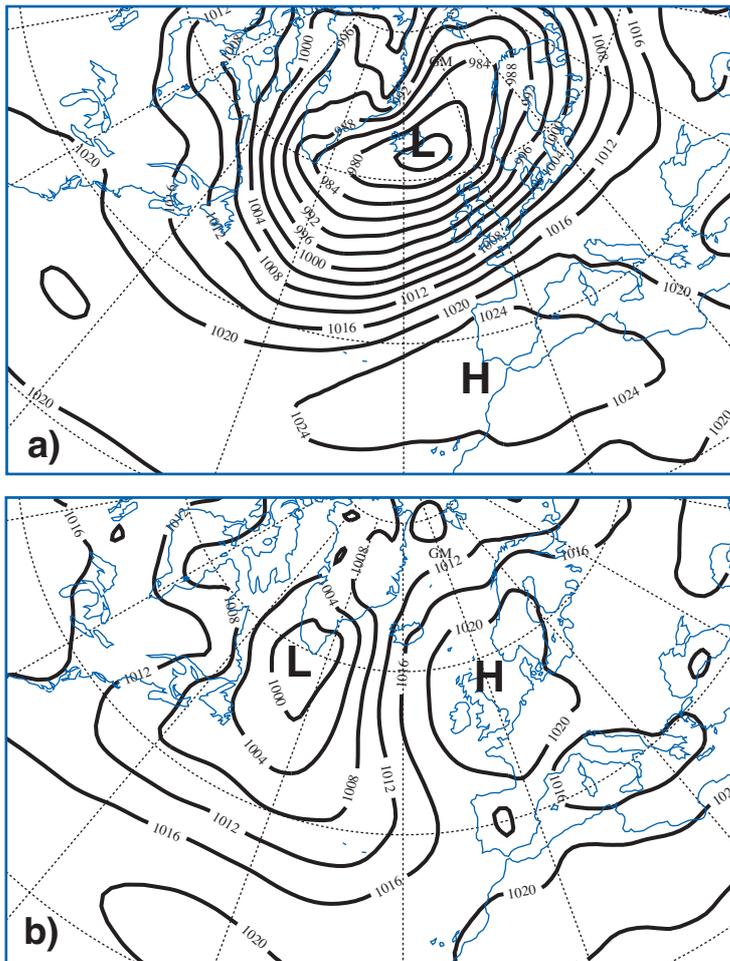
### Conditions météorologiques

Les tempêtes d'hiver se développent en présence de profondes zones dépressionnaires (cf. chapitre 1.3.). Celles-ci se forment dans des régions à gradient horizontal de température élevé, c'est-à-dire à la transition entre l'air subtropical et polaire. L'Atlantique Nord occidental comporte un important gradient de température dirigé du nord au sud. De nombreuses dépressions

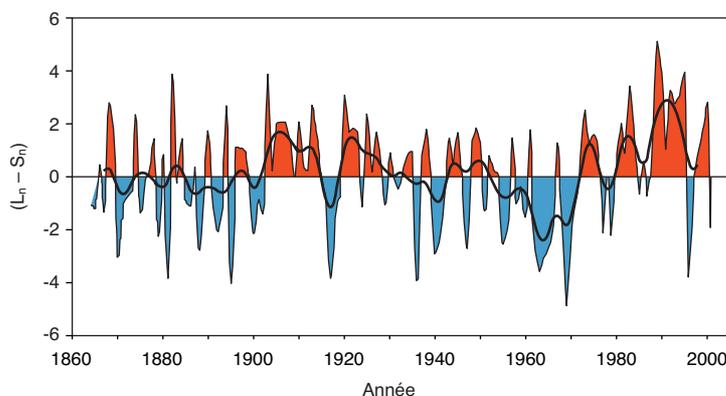
s'y forment et se déplacent ensuite vers l'Europe nord-occidentale. Leur trajectoire conduit rarement directement au-dessus de l'Europe centrale, c'est pourquoi ce sont souvent seulement les fronts froids issus de la dépression qui nous atteignent en Suisse. Quand les différences de pression entre les Açores et l'Islande sont importantes, le courant atlantique d'ouest se renforce de même que la fréquence des zones dépressionnaires pénétrant sur le continent.

Les tempêtes d'hiver extrêmes sont dues à la conjonction de nombreux processus (gradient nord-sud de température élevé; puissants courants-jets; perturbation à une altitude d'env. 9 km





**Figure 46:** Répartition des pressions au sol pour un mois où l'indice ONA est (a) fortement positif (février 1990) resp. (b) fortement négatif (janvier 1987). Ecart entre isobares: 4 hPa. En cas de phase ONA positive, on observe en moyenne mensuelle une profonde dépression sur l'Islande, tandis que l'anticyclone des Açores s'étend sur l'Espagne. Lors d'une phase négative, un anticyclone domine en Europe nord-occidentale et une dépression d'intensité moyenne au sud du Groenland.



**Figure 47:** Reconstitution de l'indice ONA depuis 1864. L'indice ONA exprime la différence de pression entre les Açores et l'Islande.<sup>4</sup> Un indice élevé caractérise une grande différence de pression. Depuis le début des années 1970, l'indice ONA est en majorité positif.

(tropopause); condensation de vapeur d'eau), dont l'importance varie selon les cas. Dans celui de Lothar (décembre 1999), les modélisations montrent que la condensation de vapeur d'eau a joué un rôle très important dans la formation et l'intensification du système au-dessus de l'Atlantique<sup>1</sup> (cf. figure 10 et encadré *Lothar – une étude du processus*).

### Tendance observée au 20<sup>e</sup> siècle

Pendant les périodes à haute activité cyclonique au-dessus de l'Atlantique, la fréquence des tempêtes augmente en Europe centrale. Un indicateur de l'activité cyclonique mensuelle sur l'Atlantique Nord et l'Europe est l'indice de l'oscillation nord-atlantique ONA<sup>2,3</sup>, qui correspond à la différence de pression au sol entre les Açores (ou le Portugal) et l'Islande (figure 46).<sup>4</sup> Quand l'indice ONA est élevé, cette différence de pression est grande.

Depuis une trentaine d'années, les courants d'hiver sur l'Atlantique Nord et l'Europe sont dominés par un indice ONA élevé (figure 47). Les hivers des tempêtes Vivian et Lothar (1989/90 resp. 1999/2000) tombent pendant cette période. Le lien entre la fréquence de fortes tempêtes en Europe centrale et l'indice ONA n'est toutefois pas démontré.

Des études statistiques de toutes les zones dépressionnaires d'hiver, fortes et faibles, de 1958 à 1999, montrent que ces dernières sont devenues un peu plus rares au-dessus de l'Atlantique Nord. Leurs trajectoires se sont décalées vers le nord.<sup>3</sup> Les changements ne sont pas significatifs en Europe centrale. Par contre, la fréquence des fortes dépressions sur l'Atlantique Nord a augmen-

té depuis les années 1930<sup>5</sup> (figure 48). Leurs trajectoires se sont aussi déplacées vers le nord. Ainsi la Suisse se trouve-t-elle aujourd'hui davantage au bord sud ou même à l'extérieur des zones de tempêtes.<sup>6</sup> En Suisse nord-orientale, le nombre de jours caractérisés par une vitesse du vent élevée fut nettement plus grand de 1880 à 1930 que par la suite (figure 49). Autre fait remarquable, le début des tempêtes en Suisse s'est déplacé toujours plus d'octobre/novembre en décembre. Globalement, l'intensité et la fréquence des tempêtes non tropicales ne présentent pas de tendances significatives relatives aux changements climatiques.<sup>7</sup>

### Perspectives en relation avec les changements climatiques

Les changements climatiques globaux pourraient

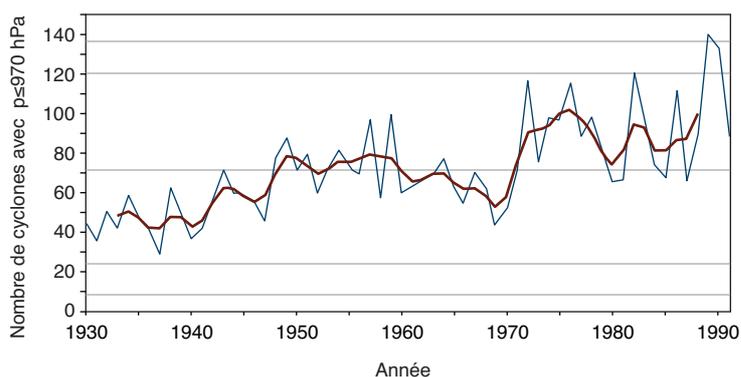
modifier la probabilité des conditions favorisant les tempêtes d'hiver extrêmes. Par exemple, l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère – prévision qui fait quasiment l'unanimité – peut renforcer l'intensité et la fréquence des dépressions génératrices de tempêtes.

De nombreux modèles climatiques globaux prévoient un accroissement de l'activité cyclonique sur l'Atlantique Nord oriental et l'Europe occidentale.<sup>8,9</sup> Mais les processus physiques responsables ne sont pas clarifiés.<sup>7</sup> On ignore par exemple si c'est l'augmentation de la fréquence des dépressions ou celle de leur intensité qui renforce l'activité cyclonique.

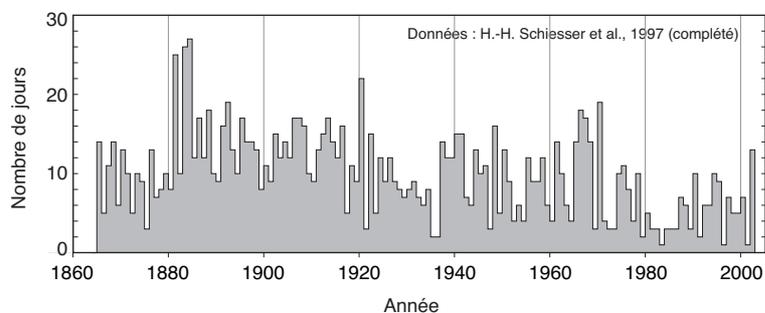
Les prévisions sur la fréquence de tempêtes d'hiver fortes et extrêmes doivent être interprétées avec prudence. La simulation des trajectoires des dépressions par les modèles climatiques glo-

baux comprend souvent d'assez grosses erreurs.<sup>10</sup> Il se peut aussi qu'elle ne reproduise pas assez bien des processus jouant un rôle important lors de dépressions relativement petites mais très intenses (Lothar, Vivian). Les maxima de la vitesse du vent près du sol sont par exemple fortement influencés par la topographie locale et doivent être estimés au moyen de méthodes numériques laborieuses.<sup>11</sup>

Des considérations prudentes, s'appuyant sur les mesures et sur les modèles, permettent d'envisager un renforcement des tempêtes aux latitudes moyennes (p. ex. en Europe occidentale) comme une évolution possible. D'un autre côté, la plupart des modèles prévoient un réchauffement plus marqué aux hautes qu'aux basses latitudes, ce qui réduirait alors les contrastes de température, et donc aussi le potentiel de formation des dépressions.



**Figure 48:** Nombre de fortes dépressions par année dans l'Atlantique Nord et en Europe de 1930 à 1990. Une dépression est considérée forte si la pression minimale est inférieure à 970 hPa.<sup>5</sup> La figure révèle une augmentation sensible de la fréquence de ces fortes dépressions pendant la période considérée..



**Figure 49:** Nombre de jours de fort vent (pointes de rafales de 90 km/h (50 nœuds) et plus) pendant le semestre d'hiver de 1864/65 à 2001/02 à la station de mesure de Zurich<sup>6</sup> (complété). Cette station est considérée comme représentative de la Suisse nord-orientale. Des données de quelques stations des environs ont servi à des comparaisons et comblé des lacunes.

### Le fœhn comme vent extrême

A part les vents classiques d'ouest, le fœhn fait partie des risques de tempête au nord des Alpes en Suisse et donne lieu aussi à des événements extrêmes. La tempête de fœhn des 7 et 8 novembre 1982 a fait des dégâts considérables aux forêts dans les Alpes.

Le fœhn est un phénomène très fréquent dans nos vallées alpines. Les pointes de vent atteintes par le fœhn restent le plus souvent inférieures à 100 km/h. Une analyse des maxima annuels montre cependant que les vallées, surtout celles orientées du sud au nord, qui canalisent le fœhn et l'accélèrent encore, subissent de temps à autres de fortes tempêtes. La station de mesure d'Altdorf compte chaque année avec une bourrasque de fœhn d'au moins 110 km/h. Les 140 km/h sont atteints tous les dix ans et le maximum cinquantennal est estimé à presque 160 km/h. Des valeurs semblables ont été trouvées pour Vaduz, mais sont toutefois inférieures de 5 km/h en moyenne à celles d'Altdorf.

De façon générale, il convient d'admettre que dans toutes les vallées à fœhn, les tempêtes de fœhn peuvent atteindre des pointes de plus de 100 km/h. Dans de rares cas, elles touchent des régions qui ne sont pas spécialement exposées au fœhn (le pays d'Appenzell, le Zugerberg, Obwald, l'Oberland bernois). Au-dessus de 2000 mètres environ, le fœhn atteint souvent la force d'une tempête pratiquement sur tout le versant nord des Alpes; il peut même dépasser 200 km/h en des lieux exposés, proches des crêtes (p. ex. Gütsch/Andermatt). A part les risques découlant de la pression du vent, le fœhn représente un risque non négligeable en rapport avec les incendies. Ce vent, qui est parfois persistant, peut attiser et propager le feu et entrave le travail des pompiers.

Il n'existe pour l'heure aucune estimation sur l'évolution future de la fréquence du fœhn dans le contexte des changements climatiques. Sachant que le fœhn est étroitement associé à certaines situations météorologiques et à leurs caractéristiques régionales, il faut d'abord attendre des résultats fiables sur l'évolution future des conditions météorologiques régionales.

*Patrick Hächler*

- 1 Wemli 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.
- 2 Wanner H., S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surveys in Geophysics*, 2002.
- 3 Gulev S. K., O. Zolina, and S. Grigoriev, Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data, *Clim. Dynam.*, 17, 795–809, 2001.
- 4 Hurrell J. W., Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science*, 269, 676–679, 1995.
- 5 Schinke H., On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930–1991, *Contrib. Atmos. Phys.*, 66, 223–237, 1993.
- 6 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94. *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
- 7 IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 8 Sinclair M. R. and I. G. Watterson, Objective assessment of extratropical weather systems in simulated climates, *J. Climate*, 12, 3467–3485, 1999.
- 9 Ulbrich U. and M. Christoph, A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing, *Clim. Dynam.*, 15, 551–559, 1999.
- 10 Carnell R. E., C. A. Senior, and J. F. B. Mitchell, An assessment of measures of storminess: Simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO<sub>2</sub>, *Clim. Dynam.*, 12, 467–476, 1996.
- 11 Goyette S., M. Beniston, P. Jungo, D. Caya, and R. Laprise, Numerical investigation of an extreme storm with the Canadian Regional Climate Model: The case study of windstorm Vivian, Switzerland, February 27, 1990. *Climate Dynamics*, 18, 145–168, 2001.

# **Annexes**

# A1. Impressum

## Auteurs du Rapport

Dörte Aller	Union Intercañonale de Réassurance (UIR), Berne
Walter J. Ammann	Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ENA), Davos
Stephan Bader	MétéoSuisse, Zurich
Marco Conedera	WSL Sottostazione Sud delle Alpi, Bellinzona
Claudio Defila	MétéoSuisse, Zurich
Christoph Frei	Institut für Atmosphären und Klima, EPF Zurich
Patrick Hächler	MétéoSuisse, Zurich
Christoph Hegg	Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf
Roland Hohmann	ProClim-, Berne
Patricia Jungo	Office fédéral de la statistique (OFS), Neuchâtel
Ewa Kozłowski	Union Intercañonale de Réassurance (UIR), Berne
Olivier Lateltin	Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne
Gerry Lemcke	Swiss Re, New York, USA
Urs Neu	ProClim-, Berne
Atsumu Ohmura	Institut für Atmosphären und Klima, EPF Zurich
Armin Petrascheck	Office fédéral des eaux et de la géologie, Bienne
Christian Pfister	Historisches Institut, Université de Berne
Hugo Raetzo	Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Bienne
Bruno Schädler	Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Berne
Christoph Schär	Institut für Atmosphären und Klima, EPF Zurich
Hans-Heinrich Schiesser	Zurich
Franziska Schmid	Inst. fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf
Heinz Wanner	Geographisches Institut, Université de Berne
Heini Wernli	Institut für Atmosphären und Klima, EPF Zurich

## Experts

Martin Beniston	Institut de Géographie, Université de Fribourg
Harald Bugmann	Departement Forstwissenschaften, EPF Zurich
Hans Elsasser	Geographisches Institut, Université de Zurich
Martin Grosjean	NCCR Climate, Berne
Wilfried Haerberli	Geographisches Institut, Université de Zurich
Markus Nauser	Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)
Martin Schneebeli	Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ENA), Davos

## Directeur du projet et rédaction

Roland Hohmann

## Collaboration rédactionnelle

Theres Grau, Urs Neu, Christoph Ritz, Daniel Weyerman, Bettina Büchler

## Layout

Roland Hohmann und Gabriele Müller-Ferch

## Traduction française

Jean-Jacques Dätwyler, Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Berne

## Révision

Jean-Claude Baltzinger, Pomi-Verdan, 1267 Vich

Ce rapport a été accepté par l'OcCC le 27 février et le 28 mai 2003.

## A2. Crédits photographiques

Photo de couverture	Peter Schlegel/Keystone
Page 18	Association des Etablissements Cantonaux d'Assurance Incendie
Page 20	Christoph Kull, Berne
Page 25	Artiste inconnu
Page 29	Markus Hohmann, Zurich
Page 38	Armin Petrascheck, OFEG
Page 42	Marcia Phillips, SLF
Page 45	Association des Etablissements Cantonaux d'Assurance Incendie
Page 49	Hugo Raetzo, OFEG
Page 54	Walter Bieri/Keystone
Page 57	Claudio Defila, MeteoSuisse
Page 60	Roland Hohmann, ProClim-
Page 63	Marco Conedera, MeteoSuisse
Page 67	Walter Bieri/Keystone
Page 71	Daniel Maurer/Keystone
Page 75	Katharina Iseli-Reist, Biembach
Page 79	Association des Etablissements Cantonaux d'Assurance Incendie
Page 83	Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ENA), Davos
Page 87	Stephan Bader, MeteoSuisse

## A3. Membres de l'OcCC

### Membres

**Dr. Kathy Riklin** (Präsidentin)  
Conseillère nationale  
8001 Zurich

**PD Dr. med. Charlotte Braun-Fahländer**  
Institut für Sozial- und Präventivmedizin  
Universität de Bâle

**Dr. Thomas Bürki**  
Thomas Bürki GmbH  
8121 Benglen

**Dr. Andreas Fischlin**  
Institut für Terrestrische Ökologie  
EPF Zurich

**Dr. Pamela Heck**  
Umweltgefahren, Swiss Re  
8022 Zurich

**Gabi Hildesheimer**  
Directeur , Ökologisch bewusste Unternehmen  
8035 Zurich

**Prof. Ruth Kaufmann-Hayoz**  
Interfakultäre Koordinationsstelle für Allgemeine Ökologie  
Universität de Berne

**Prof. Christian Körner**  
Botanisches Institut – Pflanzenökologie  
Universität de Bâle

**Prof. Urs Luterbacher**  
Institut Universitaire de Hautes Etudes Internationales  
Universität de Genève

**Prof. Hansruedi Müller**  
Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus  
Universität de Berne

**Dr. Ulrich Niederer**  
UBS Global Asset Management  
8098 Zurich

**Prof. Christian Pfister**  
Historisches Institut  
Universität de Berne

**Prof. Gian-Reto Plattner**  
Conseiler des États  
Vizektor Forschung, Universität de Bâle

**Prof. Christoph Schär**  
Institute for Atmospheric and Climate Science  
EPF Zurich

**Prof. Heidi Schelbert-Syfrig**  
3457 Wasen

**Prof. Thomas Stocker**  
Physikalisches Institut  
Universität de Berne

**Prof. Hubert van den Bergh**  
Institut de Génie de l'Environnement  
EPF Lausanne

**Prof. Heinz Wanner**  
Directeur NCCR Climate, Geographisches Institut  
Universität de Berne

**Prof. Alexander Wokaun**  
Allgemeine Energieforschung  
PSI, 5232 Villigen

### Membres avec voix consultative

**Dr. Roger Biedermann**  
Directeur de la Conférence suisse des services de protection  
de l'environnement, 8201 Schaffhouse

**Claudia Guggisberg**  
Office fédéral du développement territorial (ARE)  
3003 Berne

**Dr. Bernd Hägele**  
Office fédéral de l'éducation et de la science (OFES)  
3003 Berne

**Heinz Hänni**  
Office fédéral de l'agriculture (OFAG)  
3003 Berne

**Daniel K. Keuerleber-Burk**  
Directeur, MétéoSuisse  
8044 Zurich

**Renato Marioni**  
Secrétariat d'Etat à l'économie (seco)  
3003 Berne

**Dr. Pascal Previdoli**  
Office fédéral de l'énergie (OFEN)  
3003 Berne

**Dr. José Romero**  
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du  
paysage (OFEFP), 3003 Berne

**Dr. Bruno Schädler**  
Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG)  
3003 Berne – Ittigen

**Dr. Dimitri Sudan**  
Fonds National Suisse (FNS)  
3001 Berne

**Ursula Ulrich-Vögtlin**  
Office fédéral de la santé publique (OFSP)  
3003 Berne

### Membre d'office

**Dr. Ingrid Kissling-Näf**  
Secrétaire générale de l'Académie suisse des sciences  
naturelles (ASSN), Berne

### Sécretariat

**Dr. Christoph Ritz**  
Secrétaire de ProClim-, Berne

**Dr. Roland Hohmann**  
Secrétaire de l'OcCC, Berne