

OcCC

Organe consultatif en matière de recherche sur
le climat et les changements climatiques
Beratendes Organ für Klimaforschungsfragen
des EDI und UVEK

La Suisse face au changement climatique
Impacts des précipitations extrêmes

Rapport sur l'état des connaissances

Edition et diffusion du document:
Secrétariat OcCC
ProClim-
Bärenplatz 2
3011 Bern
tél: (41 31) 312 21 14, fax: (41 31) 312 55 37
proclim@sanw.unibe.ch
web: <http://www.proclim.unibe.ch>

Berne, décembre 1998

Comité de rédaction

Ce rapport a été commandé par l'Organe consultatif du DFI et du DETEC en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques (OcCC). Il synthétise l'état actuel des connaissances sur le sujet. Il s'appuie sur des entretiens personnalisés et un atelier organisé en mars 1998 avec les spécialistes mentionnés ci-dessous. Ces derniers ont par ailleurs, révisé le contenu du présent document.

Spécialistes

Institut/Entreprise

Dr. Walter Ammann	Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (FNP)
Dr. Christoph Frei	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Dietmar Grebner	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Christoph Hegg	Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (FNP)
Martin Kamber	Union intercantonale de réassurance, Berne
Prof. Ernst Mohr	Institut für Wirtschaft und Ökologie, Universität St. Gallen
Dr. Armin Petraschek	Office fédéral de l'économie des eaux
Prof. Christian Pfister	Historisches Institut, Université de Berne
Alexander Rist	Service d'étude des transports DETEC; membre OcCC
Ulrich Roth	Direction du PNR 31, Sigmoplan AG, Berne
Dr. Bruno Schädler	Service hydrologique et géologique national, Berne
Prof. Christoph Schär	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Michael Sturm	Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux, Zurich
Georg Weber	Association suisse pour l'aménagement des eaux, Baden
PD Rolf Weingartner	Geographisches Institut, Université de Berne

A part les personnes mentionnées ci-dessus, les spécialistes et institutions suivants ont été consultés lors de la révision du rapport:

Dr. Stefan Bader	Direction du PNR 31, Institut suisse de météorologie, Zurich
Bruno Hostettler	Office fédéral de la protection civile, Berne
Dr. Ivo Knoepfel	Société suisse de réassurance, Zurich; membre OcCC
Dr. Reto Schleiniger	Institut für empirische Wirtschaftsforschung, Universität Zürich
Felix Walter	Ecoplan, Berne
Heinz Wandeler	Plattform Naturgefahren (PLANAT), Berne

Auteurs

Dr. Hansjörg Blöchliger	BSS Volkswirtschaftliche Beratung, Bâle
Frank Neidhöfer	Sigmoplan AG, Berne

Groupe d'accompagnement OcCC

Prof. André Musy	Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux, EPF Lausanne
Prof. em. Heidi Schelbert	Institut für empirische Wirtschaftsforschung, Universität Zürich
Prof. Heinz Wanner	Geographisches Institut, Université de Berne

Direction du projet et rédaction

Dr. Christian Plüss	OcCC, ProClim-, Berne
Dr. Christoph Ritz	ProClim-, Berne

Préface

Changement climatique: la Suisse doit agir!

Un réchauffement de plus de 1°C et une augmentation des précipitations de 10 à 30% pendant les mois d'hiver, tels sont les faits connus aujourd'hui concernant l'évolution du climat en Suisse au cours de ce siècle. Ces chiffres paraissent peu spectaculaires, si on les compare aux humeurs quotidiennes de la météo, et cette évolution rampante n'est guère perceptible à chacun. Néanmoins, les scientifiques sont d'avis aujourd'hui que l'être humain porte une part de responsabilité sur le changement climatique observé. Lors des conférences globales sur le climat, à Kyoto et à Buenos Aires, des délégués venus du monde entier ont examiné comment atténuer ce changement climatique et les impacts qu'il menace de produire.

Grâce à sa situation au cœur de l'Europe, la Suisse n'est que rarement touchée par des événements climatiques extrêmes. Des tempêtes comme 'Vivian', qui a fait des ravages en 1990, ou des inondations comme à Uri en 1987 ou à Brigue en 1993 nous rappellent que le climat nous prépare, à nous aussi, des surprises douloureuses. C'est pourquoi l'Organe consultatif du DFI et du DETEC en matière de recherche sur le climat et les changements climatiques (OcCC) a fait établir un rapport qui présente l'état des connaissances sur les impacts actuels et prévisibles des changements climatiques en Suisse, en prenant pour exemple les précipitations extrêmes.

Il faut s'attendre à une intensification du cycle hydrologique comme conséquence du changement climatique global. Les modèles climatiques prévoient que les précipitations continueront d'augmenter chez nous en hiver, ce qui - combiné au réchauffement et à la montée de la limite des neiges - conduira à un accroissement des crues d'hiver. Même si on ne peut pas en conclure sans autre que les inondations vont se développer, la direction est donnée: nous allons vers une augmentation des dommages dus aux crues.

Au cours du dernier quart de siècle, les crues nous ont coûté en moyenne 450 millions de francs par année. De l'avis des économistes, l'augmentation possible des dommages dus aux crues est importante, mais pas critique. Tant que les futurs événements resteront comparables aux inondations de ce siècle, les dommages seront limités et pourront être couverts par les assurances conventionnelles. Seules des inondations de grande étendue - comme elles ont eu lieu dans les temps historiques, mais pas pendant ce siècle - pourraient produire pour des milliards de francs de dommages et ne pas être assurables. Les événements de ce genre sont trop rares pour qu'on puisse juger par des méthodes statistiques s'ils vont se produire plus souvent à l'avenir; et ce que nous savons de ces processus ne nous permet pas encore non plus de tirer des conclusions. Aurions-nous donc tort de nous alarmer, et faudrait-il laisser aller les choses comme jusqu'à présent?

Cela ne serait pas une stratégie avisée. Tout comme les données globales, les résultats des recherches font état d'une évolution peu réjouissante. Certes, au vu des concentrations actuelles de gaz à effet de serre, il n'y a pas lieu de craindre une catastrophe climatique; mais les changements lents, à peine perceptibles à l'échelle de l'année, peuvent nuire massivement à notre économie nationale, de façon directe ou indirecte.

Dans une série de recommandations, les experts associés au rapport de l'OcCC soulignent les actions qui s'imposent de toute évidence:

La politique climatique ne doit pas être menée de façon isolée en Suisse, mais nous devons nous engager dans le contexte international. Cependant, pour réussir au niveau international, il faut d'abord une stratégie climatique nationale, qui doit comporter les éléments suivants:

1. des mesures nationales d'encouragement des technologies qui ménagent les ressources, et des incitations axées vers une réduction des émissions;
2. l'encouragement de la recherche pour combler des lacunes du savoir;
3. des mesures destinées à atténuer les impacts.

C'est faire preuve de clairvoyance que d'agir aujourd'hui avec prudence, car demain – quand nous serons tout à fait sûr de ce qui se passe – ce sera probablement trop tard!



Prof. Gian-Reto Plattner
Président de l'OcCC

Table des matières et résumé

1 Changement climatique et risques naturels

7

Si l'on ne diminue pas significativement les émissions de gaz à effet de serre, le changement climatique résultant aura de très sérieux effets sur toute la planète. En Suisse, ce sont surtout les risques naturels, et plus particulièrement les crues, qui affiche le potentiel de dégâts le plus élevé. Ce rapport traite de la fréquence et des conséquences économiques possibles de précipitations extrêmes en Suisse. La question d'une sécheresse potentielle est également abordée.

2 Climat, précipitations extrêmes et écoulement des eaux

9

Ce n'est que très récemment que la recherche est parvenue à une meilleure compréhension des processus à l'origine des précipitations extrêmes et des crues. Même si les modèles globaux de circulation actuels sont en mesure d'évaluer les changements moyens du climat futur, ils ne peuvent cependant pas fournir des renseignements valables sur l'évolution des mécanismes de formation d'épisodes extrêmes à moyen et long terme. Seuls les modèles de prévision météorologique sont en mesure de détecter, à un stade précoce, la formation de précipitations extrêmes.

Les processus à l'origine de sécheresses de longue durée sont encore mal connus dans l'arc alpin.

3 Fréquence des précipitations et des crues

16

Les modèles prévoient que le réchauffement climatique dû aux activités humaines modifiera le cycle hydrologique. Les observations réalisées en Suisse au cours des cent dernières années confirment ces prévisions: on a constaté dans les Alpes une augmentation des précipitations atteignant parfois jusqu'à 30% en automne et en hiver. Cette tendance pourrait se renforcer à l'avenir. On s'attend également à des crues plus fréquentes en hiver sur le Plateau et en Suisse méridionale. Bien évidemment ceci résulte de l'augmentation des pluies pendant cette période.

En été par contre, les précipitations varient peu; leur évolution future est incertaine. L'impact sur l'écoulement des cours d'eau alpins ne peut pas encore être estimé; l'effet sur les crues non plus puisque ces dernières résultent le plus souvent d'orages estivaux.

4 Impacts économiques des précipitations extrêmes

20

Les impacts économiques varient selon les cas suivants:

- Une *sécheresse saisonnière* n'aurait pas d'effets économiques graves en Suisse car on dispose de réserves d'eau suffisantes.
- Une augmentation des *crues régionales* entraînerait des coûts de quelques centaines de millions de francs par année. Cette augmentation du potentiel des dommages peut être couverte par les assurances, les réassurances ou encore par les "chaînes" de solidarité existantes.

- L'histoire du climat montre que des crues extrêmes peuvent largement dépasser l'ampleur des événements régionaux connus à ce jour. Les coûts des dommages pourraient alors dépasser de beaucoup ceux prévus par la couverture d'assurance actuelle. Il n'est toutefois pas possible d'établir un lien avec les changements du climat en raison de la rareté de ce type d'événements.

5 Mesures destinées à diminuer les dommages causés par les crues futures

25

Les mesures visant à diminuer les dommages causés par les crues peuvent être classés en trois catégories distinctes:

- En Suisse, les *ouvrages de protection* sont nombreux et généralement bien dimensionnés. Une réévaluation globale des critères de dimensionnement s'impose néanmoins lors de nouveaux investissements.
- Le risque de crue peut être bien maîtrisé par une politique cohérente au niveau de *l'aménagement du territoire*. Une planification adaptée de l'occupation des sols diminue le potentiel des dommages.
- Une *réduction des émissions des gaz à effet de serre* n'entraînerait pas d'effets directs. La Suisse tirerait un profit maximum en matière de politique environnementale, si elle s'engageait fermement au niveau international dans cette direction. Il va de soi que ce qui s'applique au niveau international doit également être répercuté à l'échelon national.

6 Synthèse et mesures à prendre

29

Différentes institutions sont impliquées dans les efforts visant à maîtriser une augmentation de la fréquence des crues:

- La *recherche* doit améliorer les modèles climatiques, la qualité des prévisions météorologiques et les techniques visant à maîtriser les risques naturels. Il faudrait également disposer de meilleures bases d'évaluation des coûts et des dommages pour procéder à des analyses «coût – bénéfice» plus vraisemblables lors de la comparaison de différentes mesures de protection.
- Les *assurances* devraient vérifier les sommes de couverture et mieux tenir compte de l'évolution spatio-temporelle des risques dans le calcul des primes.
- L'*Etat* est sollicité à trois niveaux :
 - les communes doivent prendre en compte la protection contre les crues dans les plans d'affectation;
 - les cantons doivent élaborer des directives et s'engager plus efficacement en s'octroyant les moyens nécessaires à la protection contre les crues;
 - la Confédération doit renforcer la coordination en matière d'aménagement du territoire, engager de façon efficace les subventions allouées aux ouvrages de protection contre les crues, et prendre des initiatives diplomatiques pour aboutir à des accords internationaux sur l'environnement et le climat.

1 Changement climatique et risques naturels

Introduction

L'augmentation des risques naturels pourrait être une des conséquences principales d'un changement climatique. Souvent, le public perçoit toute modification des risques naturels et des conditions météorologiques comme des signes révélateurs d'un changement du climat. En Suisse, les crues comptent parmi les risques naturels causant le plus de dégâts; d'où l'intérêt porté à leur évolution future. Le présent rapport décrit l'état des connaissances en matière d'influence des changements climatiques sur les précipitations extrêmes. Il considère également les possibles répercussions économiques dans notre pays.

Contexte international

Le changement climatique au niveau planétaire comporte le risque d'une détérioration du milieu vital, d'une dégradation d'espaces économiques et d'écosystèmes, d'une élévation du niveau de la mer et d'une augmentation possible des risques naturels (IPCC 1996). Si les émissions des gaz à effet de serre ne peuvent pas être réduites de manière significative, il faut s'attendre à des impacts économiques et sociaux importants à l'échelle de toute la planète.

Parmi les tâches internationales en politique environnementale, la réduction de l'influence humaine sur le climat est certes, une des plus importantes. Dans l'accord cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), 159 Etats se sont engagés à stabiliser la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau permettant d'éviter des perturbations dangereuses du climat (article 2).

Les décisions prises à Kyoto constituent les premiers pas visant à limiter les gaz à effet de serre dans un contexte international. La Suisse s'est engagée à réduire ses émissions de 8% d'ici 2010 par rapport au niveau de 1990.

Etat des connaissances sur les impacts en Suisse

Le programme national de recherche 31 «Changements climatiques et catastrophes naturelles» (PNR 31) et le programme prioritaire «Environnement» (PPE) ont permis de réaliser des progrès considérables dans l'identification des problèmes et l'analyse des liens de causalité au sein du système climatique en Suisse (Bader et Kunz, 1998). Ces projets ont établi des relations entre les changements climatiques et les événements extrêmes. Ils ont également mis en évidence l'évolution potentielle des risques naturels. En outre, ces résultats sont étayés par des travaux scientifiques de portée internationale.

Les crues figurent parmi les plus grands risques naturels en Suisse (Office fédéral de la protection civile, 1995). Les résultats du PNR 31 indiquent qu'une augmentation des dommages dus aux crues constitue une part importante des coûts découlant du changement climatique. Les milieux économiques, politiques et le public dans son ensemble ont tout intérêt à prendre connaissance des influences possibles des changements climatiques sur les risques naturels.

L'organe consultatif du DFI et du DETEC en matière de recherche sur le climat et sur les changements climatiques (OcCC), en sa qualité de médiateur entre la recherche, l'administration et le public, a donc décidé de faire le point sur les coûts liés aux précipitations extrêmes en Suisse. Il s'agit d'en déduire le degré d'urgence des mesures à prendre.

Ce rapport s'appuie sur l'état des connaissances au sujet de l'influence des changements climatiques sur les précipitations. Il en déduit les impacts sur l'écoulement des eaux en Suisse. Les prévisions en matière de coûts liés aux dégâts provoqués par les crues s'appuient sur la synthèse d'impacts vécus lors de crues historiques.

Ce rapport n'entre pas en matière sur les conséquences de changements au niveau des précipitations moyennes, facteurs certainement plus déterminants pour l'agriculture et le tourisme.



Photo: Plate-forme nationale «Dangers naturels», PLANAT

Suisse, les crues comptent parmi les
risques naturels causant le plus de
dégâts. Reuss, près de Seedorf (Uri),
7 août 1987

2 Climat, précipitations extrêmes et écoulement des eaux

2.1 Impacts globaux d'un changement climatique

«Au stade actuel de nos connaissances, une influence humaine sur le climat global ne fait plus guère de doute¹»

Les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O), ont sensiblement augmenté depuis les débuts de l'ère industrielle, aux environs de 1750 (IPCC 1996). Cette évolution est largement imputable aux activités humaines, principalement à la combustion d'agents énergétiques fossiles, à des changements de l'affectation des sols, et à l'agriculture. Schématiquement, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre exerce les effets suivants sur le climat:

- Elle augmente l'absorption du rayonnement infrarouge dans les couches basses de l'atmosphère et par conséquent la température à la surface du globe.
- Elle modifie le cycle hydrologique global en intensifiant certains flux comme l'évaporation. L'augmentation conséquente de la teneur en vapeur d'eau ne peut qu'aggraver l'effet de serre naturel.
- Elle influence les courants atmosphériques et océaniques à l'échelle planétaire.

Comme de nombreux gaz à effet de serre ne sont pas en mesure de se dégrader ni de se déposer rapidement, leurs effets perdurent très longtemps (décennies, siècles).

En plus des gaz à effet de serre, il faut prendre également en compte les aérosols. Il s'agit d'infimes particules en suspension dans l'air, produites principalement par des processus de combustion. Contrairement aux gaz à effet de serre, les aérosols tendent à refroidir la couche de l'atmosphère proche du sol. Mais cet effet réfrigérant est limité dans l'espace et dans le temps. Il s'exerce surtout au-dessus des régions très industrialisées. Compte tenu de leur courte durée de vie, les variations des aérosols suivent de très près celles des taux d'émission.

A l'échelle planétaire, le réchauffement dû aux gaz à effet de serre l'emporte sur le refroidissement par les aérosols. A long terme (quelques décennies), l'influence des gaz à effet de serre dominera même dans les régions les plus industrialisées de la planète (IPCC 1996).

Les plus récents modèles de circulation globaux prévoient à l'horizon 2010 les changements suivants: (IPCC 1996, ProClim- 1996):

- une augmentation de la température moyenne globale près du sol de 1 à 3.5°C (une valeur de 2°C semble la plus probable)
- une élévation du niveau de la mer de 15 à 95 cm (50 cm est le chiffre le plus vraisemblable).

¹En anglais: «The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate» (IPCC,1996)

Faits à relever:

- en hiver, la température de l'air augmentera plus au-dessus des terres qu'au-dessus de la mer
- le réchauffement de l'air sera maximal dans les hautes latitudes nord et en hiver; il sera minimal dans les basses latitudes et en été
- certains flux du cycle hydrologique seront intensifiés
- en hiver, les précipitations augmenteront dans les régions sises en moyenne et/ou haute latitude

2.2 Etablissement des preuves d'un changement climatique

Il n'est pas facile d'établir des liens de causalité entre les activités humaines et les changements climatiques en raison de plusieurs facteurs dont les plus déterminants sont : la grande variabilité naturelle du climat, la durée excessivement courte des séries de données disponibles ou encore la très grande complexité du système météorologique. Toutefois, de grands progrès ont été réalisés ces dernières années. Ainsi, le climat global est mieux modélisé, les données historiques sont mieux interprétées et les mesures mieux exploitées.

Pour apporter les *preuves* d'un changement climatique, il faut faire appel à des procédés statistiques. Ainsi, il est très peu probable que la hausse de température de la surface du globe, observée pendant ces cent dernières années, soit d'origine purement naturelle (IPCC 1996).

Pour imputer aux activités humaines une *responsabilité* quelconque dans le changement climatique, il faut s'appuyer sur des modèles numériques. On ne peut donc expliquer certains changements spatio-temporels observés au niveau de la température que par une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols, associée à une diminution de l'ozone stratosphérique. On en déduit qu'il y a un lien entre l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et celle de la température moyenne globale de l'air près du sol (IPCC 1996). L'augmentation de la température en Suisse d'un peu plus de 1°C, retrouvée dans l'analyse des données historiques récoltées tout au long de ce siècle, pourrait être également interprétée dans ce sens (Beniston et al. 1994, Bader et Kunz 1998).

Un fait important doit cependant être relevé; il n'est pas possible d'utiliser la fréquence d'apparition d'événements extrêmes comme une preuve de l'occurrence d'un changement climatique. Par définition, les événements extrêmes sont rares. Les séries de mesures disponibles aujourd'hui couvrent un intervalle de temps beaucoup trop court et ne sont donc pas suffisamment homogènes pour que l'on puisse y découvrir des liens de ce type (figure 1).

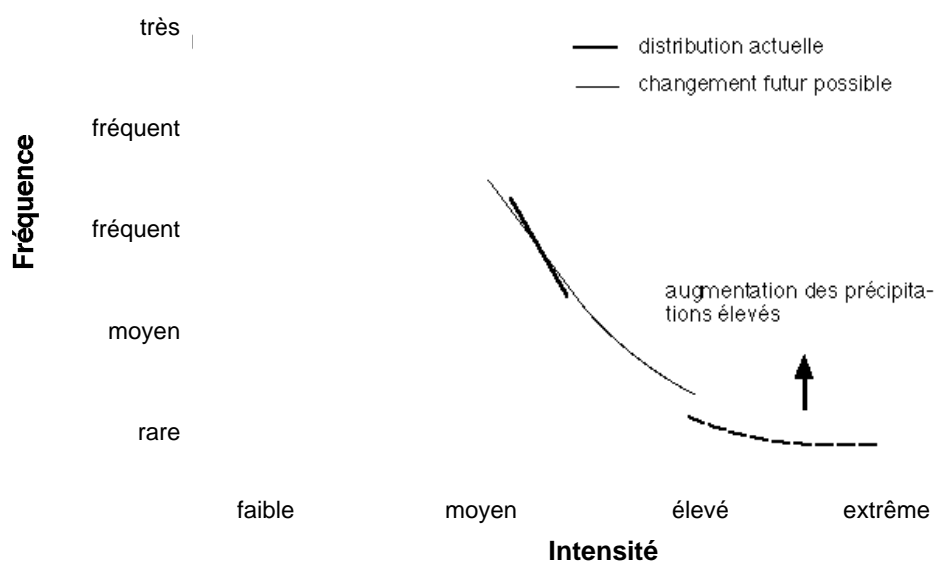


Fig.1: Distribution journalière schématique des précipitations. L'intensité est représentée sur une échelle logarithmique. La ligne discontinue indique le domaine dans lequel les données actuelles ne permettent pas d'indications statistiques sur les tendances en matière de fréquence.

2.3 Précipitations extrêmes et crues dans l'arc alpin

Au cours de ces dernières années, la recherche a contribué à une meilleure compréhension des processus qui conduisent aux précipitations extrêmes et aux crues. On peut donc formuler les premières conclusions sur les changements potentiels susceptibles d'affecter l'arc alpin.

Processus à l'origine des précipitations dans l'arc alpin

Les mécanismes physiques (figure 2) qui gouvernent le climat et le temps en Suisse se déroulent à différentes échelles (Wanner et al. 1997, Schär et al. 1998b, Grebner et Roesch 1998).

La différence de rayonnement solaire incident à l'équateur et aux pôles provoque un gradient global de température et alimente un fort courant d'ouest dans les latitudes moyennes des deux hémisphères. Ce courant ondoyant délimite de grands domaines où s'alternent les basses et hautes pressions. Ces étendues ont d'une part une activité météorologique propre et génèrent d'autre part, des zones plus petites de haute et de basse pression. Les grands domaines sont à l'origine des périodes humides et sèches de plus de trois jours et des réactions respectives des grands systèmes fluviaux. Les zones de haute et basse pression, se formant à l'échelon régional sous l'influence des grands domaines, sont responsables de la variabilité journalière du temps et des précipitations. De plus, la distribution de la quantité et de l'intensité des précipitations dans l'arc alpin est fortement influencée par la topographie. Cette dernière modifie l'évolution et la trajectoire des systèmes régionaux de précipitations (systèmes de basse pression, fronts) et provoque des effets complexes sur les processus locaux de formation des pluies.

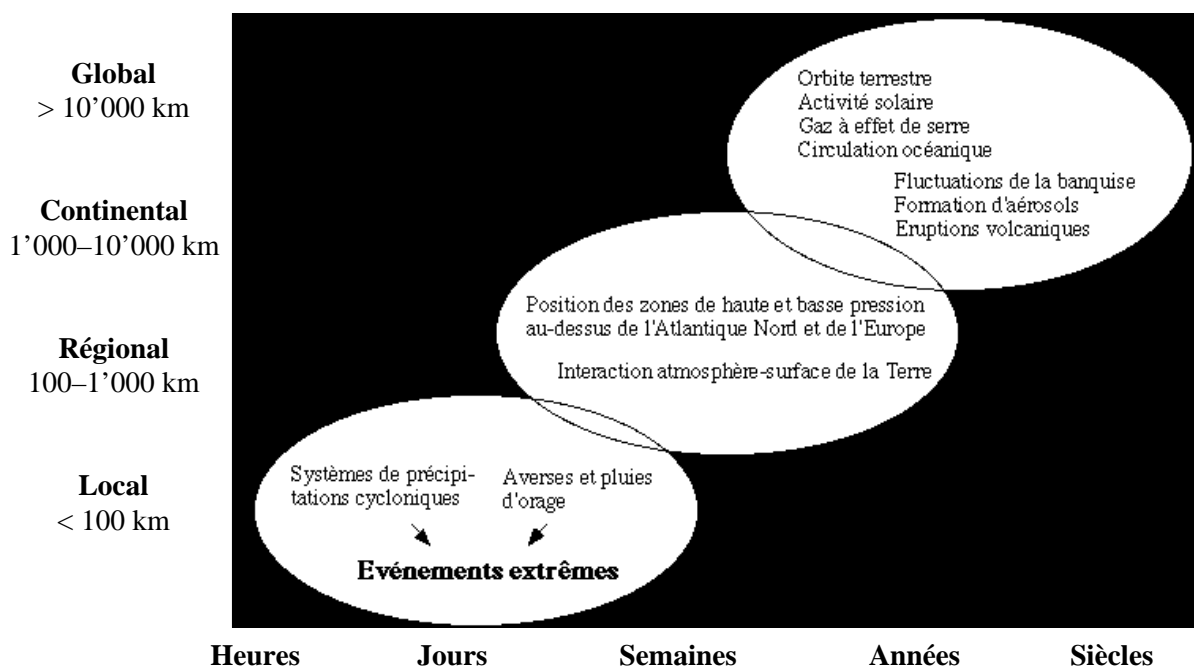


Fig.2: Facteurs importants vis-à-vis des précipitations en Suisse à différentes échelles spatiales et temporelles. La plupart des processus et de leurs impacts sont relativement bien connus. De sérieuses incertitudes subsistent toutefois lors du passage d'une échelle à l'autre, en particulier pour les interactions entre climat et phénomènes météorologiques.

Processus de précipitations extrêmes

Les précipitations se forment selon deux processus fondamentalement distincts, qu'il convient d'analyser du point de vue de la durée et de celui de l'étendue spatiale; on distingue:

- *des processus convectifs* (averses et orages)
- *des processus cycloniques* (pluies généralisées)

Les précipitations convectives sont de courte durée (quelques heures) et couvrent une faible étendue. Elles peuvent néanmoins atteindre de fortes intensités et surviennent principalement pendant le semestre d'été. Les dégâts liés à ce type de précipitations sont localisés: coulées de boue, crues des torrents, inondations sectorielles (Kienholz et al. 1998, Zimmermann et al. 1997). L'intensité de ces événements diminue des Préalpes aux Alpes centrales (Grebner et Roesch 1998, Frei et Schär 1998). Les rafales et la grêle affichent également un potentiel élevé de dégâts (Schiesser et al. 1997).

Les précipitations cycloniques associées à une zone de basse pression peuvent durer jusqu'à trois jours. Cependant, leur intensité reste inférieure aux valeurs convectives (-20%). Les averses cycloniques surviennent plutôt pendant le semestre d'hiver, en particulier pendant les saisons de transition, comme l'automne. Elles sont provoquées par des zones de basse pression isolées, ou encore, par des séries de systèmes de basse pression accompagnée de durée comprises entre quelques jours et plusieurs semaines. Les secteurs touchés (systèmes flu-

viaux, voire régions et pays entiers) sont d'autant plus étendus que la situation cyclonique perdure.

Dans l'arc alpin, les précipitations les plus intenses sont observées sur le versant sud. Les fortes pluies sont fréquentes au Tessin et dans les régions voisines de l'Italie du nord, surtout en automne (Courvoisier 1998, Frei et Schär 1998). Ces événements sont souvent le résultat d'une combinaison de précipitations cycloniques et convectives. Entraîné par une zone active de basse pression et influencé par la dynamique des courants d'altitude, l'apport d'air humide de la Méditerranée joue un rôle déterminant (Grebner 1980, Buzzi et Tartaglione 1995, Masacand et al. 1998).

Processus d'écoulement des eaux et de formation des crues en Suisse

L'écoulement annuel moyen d'un cours d'eau est caractérisé par son régime hydrologique. Celui-ci dépend en premier lieu de l'altitude moyenne du bassin versant et de sa situation par rapport aux Alpes. Le régime d'écoulement de la plupart des cours d'eau en Suisse présente un maximum entre le printemps et l'été. Ce dernier résulte de la fonte des neiges. En été et en automne, les écoulements diminuent pour atteindre finalement un minimum hivernal (Grabs et al. 1997, Gurtz et al. 1997).

Ce comportement moyen subit de temps à autre des variations plus brutales provoquées par des crues. Il s'agit d'un événement isolé qui dépend principalement des éléments suivants:

- la quantité de pluie;
- la structure, la durée et la forme des précipitations (orage, front pluvieux; pluie ou neige);
- l'état des réservoirs (glaciers, couverture neigeuse, humidité des sols, les niveaux des barrages, etc.);
- l'évaporation;
- la surface du bassin versant et l'étendue des zones contributives.

Certains facteurs deviennent déterminants lors de fortes crues:

- la couverture du sol (roche, glacier, degré d'imperméabilisation);
- le type de végétation (pâturage, forêt, cultures);
- le type de sol (structure, densité, épaisseur);
- la structure du réseau hydrographique et les caractéristiques des différents tronçons (canalisation, drainage, surfaces inondables, biefs naturels, lits majeurs, etc.).

La situation, l'étendue et la formation des surfaces contributives sont des paramètres importants pour évaluer les débits maximaux d'un cours d'eau. La complexité des processus, ajoutée à leur forte variabilité régionale, rend difficile une estimation rapide et globale du risque de crue.

2.4 Sécheresse extrême

Les processus qui pourraient conduire à une sécheresse de longue durée dans l'arc alpin sont mal connus.

Il existe relativement peu de publications sur la dynamique du climat lors de périodes prolongées de sécheresse en Europe centrale et en Suisse. Les processus qui gouvernent de tels événements dans l'arc alpin sont encore mal connus. La résolution spatiale des modèles ne permet pas non plus de préciser dans quelle mesure le changement climatique global peut influencer ces processus. Compte tenu de l'importance des impacts écologiques et socio-économiques de longues périodes de sécheresse survenues dans le courant de ce siècle, il est surprenant de constater que les connaissances sur la physique de ces événements extrêmes sont très lacunaires (Grütter et al. 1948, Schorer 1992).

2.5 Evénements extrêmes et modèles climatiques

Les modèles climatiques sont en mesure de bien évaluer les changements moyens du climat. On ne peut pas en dire autant de la modélisation d'événements extrêmes. Cette dernière suscite encore beaucoup de réserves. On peut cependant recourir à des modèles en tant qu'instruments de recherche. Il s'agit d'identifier dans le changement climatique global, les facteurs susceptibles d'influencer les événements extrêmes.

Les modèles globaux de circulation décrivant l'atmosphère et l'océan constituent une base valable pour évaluer des changements moyens à l'échelle planétaire, voir continentale. En revanche, leur résolution spatiale grossière et les incertitudes liées aux interactions entre phénomènes atmosphériques à différentes échelles, interdisent toute forme de prévision au niveau local. On ne peut donc pas descendre à des échelles régionales comme l'arc alpin. Or c'est précisément à ce niveau géographique que les problèmes se posent sur les plans politique, économique et social. Il existe, tout de même, deux approches permettant de dégager des estimations locales:

- L'extrapolation statistique vers une échelle inférieure («Downscaling», Gyalistras et al. 1994): un modèle statistique, construit à partir de données observées, établit un lien entre l'état de l'atmosphère à grande échelle et les précipitations mesurées ponctuellement ou sur une surface donnée. On peut déduire de ce modèle un scénario de précipitations en Suisse. L'état futur de l'atmosphère calculé au moyen des modèles climatiques globaux, sert de nouvelle condition initiale. Le PNR 31 et le PPE ont fait, ou feront, usage de ce type de procédé (Overney et al. 1997).
- Les modèles climatiques régionaux : un modèle physique du climat régional avec une résolution de quelques dizaines de kilomètres est implanté sur l'arc alpin à l'intérieur d'un modèle climatique global. Les conditions de bord sont celles données par le modèle global. Des applications préliminaires de cette approche, ont été effectuées par Ohmura et al. 1996 et Lüthi et al. 1996.

Ces deux procédés peuvent fournir des scénarios interprétables à l'échelon local (< 100 km) portant sur les températures et les précipitations moyennes futures. Les données obtenues peuvent être introduites dans des modèles de comportement pour étudier l'impact sur le régime des cours d'eau ou encore la réaction des forêts. Malheureusement, ces modèles ne sont pas encore en mesure d'évaluer ni l'ampleur ni l'incidence probables d'événements extrêmes. Ils permettent cependant de développer une meilleure compréhension des processus physiques à l'origine de tels événements.

Il convient finalement de souligner que les progrès acquis ces dernières années, en matière de modélisation climatique, permettent de prévoir à court terme les processus à l'origine de l'enclenchement des précipitation extrêmes. On peut donc prendre les mesures nécessaires avec une certaine anticipation.



Photo: PLANAT

Écoulement maximal de la Saltina, près de l
25 septembre 1

3 Fréquence des précipitations et des crues

En Suisse, les observations climatiques couvrent une période d'environ 100 ans. On constate que les précipitations ont augmenté en hiver dans des proportions variables, parfois jusqu'à 30%. Les averses accompagnées d'intensités élevées sont nettement plus fréquentes en automne et en hiver. On n'a toutefois pas assez de recul pour juger d'une éventuelle augmentation de la fréquence d'apparition des événements extrêmes.

3.1 Les précipitations observées dans le courant de ce siècle

Les données journalières suisses affichent une dérive montrant une augmentation des lames précipitées en hiver, jusqu'à 30% selon les endroits (Institut suisse de météorologie 1996, Widmann et Schär 1997). De son côté, le nombre de jours pluvieux n'a pas sensiblement changé. Les précipitations de forte intensité semblent plus fréquentes en automne et en hiver, en particulier sur le versant nord des Alpes (Courvoisier 1998). On peut supposer que cette tendance est imputable à l'augmentation de la température observée dans le courant de ce siècle.

Aucun changement de la pluviosité estivale n'a pu être mis en évidence.

Les changements observés se situent dans le domaine des variations naturelles et ne peuvent donc pas être imputés à un changement climatique causé par l'être humain. Les exemples illustrés par Overmey et al. (1997) sont très évocateurs puisque les variations potentielles des précipitations extrêmes liées aux changements climatiques sont bien inférieures aux incertitudes actuelles. Cependant, quelques indices laissent supposer que l'amorçage de certaines tendances est compatible avec les prévisions des modèles climatiques.

3.2 Crues et inondations pendant les 700 dernières années

La fréquence d'apparition des crues a varié pendant ces sept cents dernières années. Des périodes pendant lesquelles les crues se sont produites fréquemment côtoient d'autres, où les documents historiques ne signalent aucun dégât lié à l'eau (Pfister, sous presse). Malheureusement, ces variations ne peuvent pas être expliquées. Certains liens hypothétiques avec les pressions et les courants sur l'Atlantique Nord ou encore avec les fluctuations du rayonnement (soleil, volcans) sont actuellement à l'étude (Wanner et al. 1998). Quoiqu'il en soit, la sensibilité des événements extrêmes aux changements globaux ne fait pas de doute.

L'analyse historique a par ailleurs clairement démontré que les crues observées dans le courant de ce siècle affichent une très forte variabilité naturelle à l'intérieur de laquelle il est difficile de percevoir une tendance quelconque. Les sédiments dans les lacs suisses montrent que l'ampleur des crues extrêmes n'a pas augmenté pendant le dernier millénaire. En fait, c'est en 1342 que la sédimentologie situe la plus importante crue de notre histoire (Siegenthaler et Sturm 1991).

On ne peut donc pas établir un lien entre le changement climatique d'origine anthropique et la fréquence des crues. Cependant, il est important de souligner que l'étude historique du climat a montré que la fréquence des crues et des inondations

avait tendance à augmenter pendant les périodes de transition, que ce soit lors d'un refroidissement ou d'un réchauffement. (Pfister, sous presse). Dans l'état actuel de nos connaissances, c'est malheureusement tout ce que l'on peut affirmer; les crues extrêmes sont beaucoup trop rares pour dégager une tendance quelconque, surtout à partir d'échantillons très courts.

D'après les observations, l'écoulement moyen des principaux cours d'eau suisses semble augmenter (Schädler 1987). Overney et al. (1997) constatent la non stationnarité des écoulements de six bassins versants. Cependant, ce comportement ne peut pas être mis en parallèle avec une modification du régime des précipitations.

3.3 Ce que l'on peut dire sur les précipitations futures

En cas de réchauffement de l'atmosphère, certains flux du cycle hydrologique seront intensifiés (pluie, évaporation, écoulement). D'après les modèles, cette évolution est le résultat de précipitations intenses plus fréquentes en hiver et pendant les saisons de transition. Quant à l'évolution des précipitations estivales, elle reste très incertaine.

Sous nos latitudes, des raisonnements physiques combinés aux résultats des modèles climatiques globaux indiquent qu'une élévation de la température au sol entraîne une augmentation de l'humidité. A un réchauffement de 2°C correspond une augmentation de 15% de l'humidité de l'air. Ceci est de nature à provoquer une intensification des éléments du cycle de l'eau (IPCC 1996).

Comme mentionné au chapitre 2.3, l'évolution des précipitations extrêmes dépend largement des processus atmosphériques à grande échelle et de la structure de l'atmosphère (température et humidité) à moyenne échelle. Malheureusement, l'évolution future de ces paramètres et de leurs interactions restent incertaines.

Semestre d'hiver

Il est vraisemblable que pendant les périodes hivernales et de transition les précipitations moyennes augmentent, tout comme la fréquence d'apparition des averses intenses (Frei et al. 1998). Les variations des lames précipitées sont d'autant plus importantes que les intensités sont élevées; on peut atteindre 10% d'augmentation pour un réchauffement de 2°C (figure 3). C'est le versant sud des Alpes qui sera principalement concerné. Il s'agit d'une zone sensible; actuellement, elle subit les dégâts importants infligés par les pluies d'automne. Dans un contexte aussi sensible, il est raisonnable de s'inquiéter sur les conséquences d'une éventuelle superposition de situations météorologiques défavorables et d'une intensification des flux du cycle de l'eau. Pour le moment, les risques liés à ce phénomène sont difficiles à chiffrer. L'élévation de la limite des chutes de neige ne peut qu'aggraver la situation en matière de précipitations; il faut donc s'attendre à ce que l'écoulement atteigne des extrêmes plus importants.

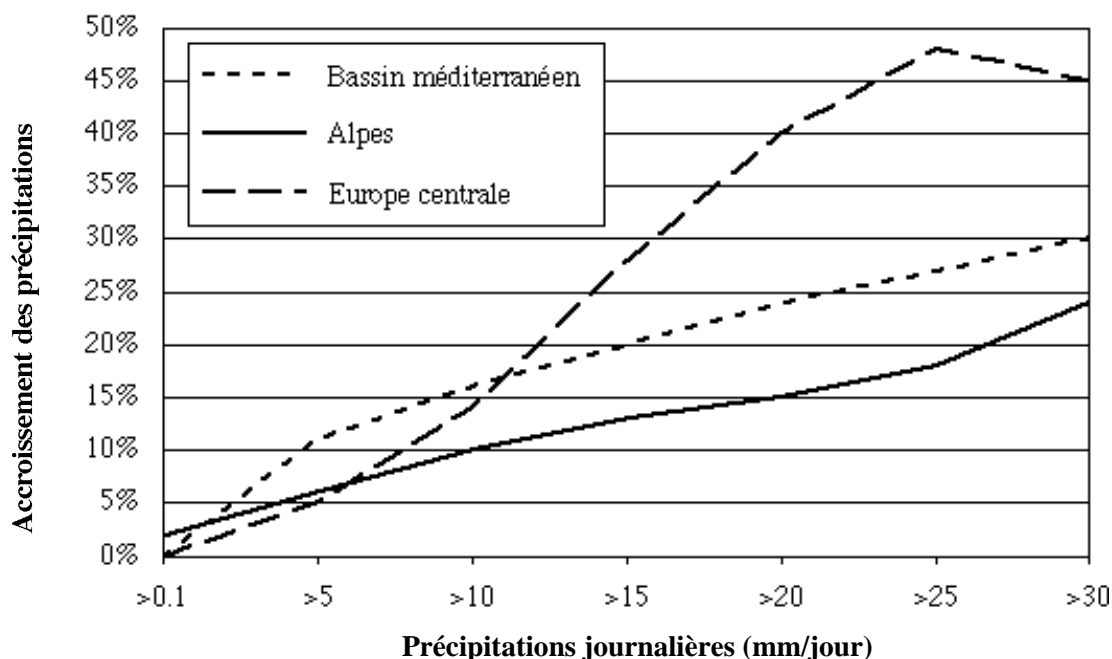


Fig.3: Accroissement des précipitations en hiver dans trois régions d'Europe centrale, calculé pour une atmosphère réchauffée de 2°C en moyenne et 15% plus humide que dans les conditions actuelles (d'après Frei et al. 1998).

Semestre d'été

C'est pendant le semestre d'été que survient la plupart des crues sur le versant nord des Alpes; elles résultent essentiellement de précipitations convectives. Pour le moment, aucune prévision fiable n'est encore possible quant à l'évolution future des précipitations pendant cette période de l'année. On n'observe aucune tendance significative. Les résultats des modèles ne sont pas suffisamment convaincants (Schär et al. 1998a). Des lacunes importantes doivent être comblées ; par exemple, mieux saisir les processus convectifs qui agissent sur le régime estival des précipitations ou encore, améliorer la prise en compte des mécanismes d'évaporation.

3.4 Ce que l'on peut dire sur les crues futures

Les variations des précipitations pourraient modifier l'aspect saisonnier des écoulements en décalant les périodes d'apparition des maxima et des minima. En hiver, les crues pourraient être plus fréquentes alors qu'en été, elles auraient tendance à se raréfier. Comme à présent, les surfaces habitées et les infrastructures seraient plus exposées dans les Alpes que sur le Plateau. Pour le moment, il n'est pas possible de se prononcer sur les variations de la fréquence des crues et par conséquent sur les dégâts associés.

Changements du régime d'écoulement sur le Plateau suisse

Un réchauffement du climat entraînera une certaine redistribution des régimes d'écoulement pendant l'année.

De décembre à mars il faudra compter avec une augmentation des écoulements moyens alors que d'avril à septembre, ils vont plutôt diminuer. L'augmentation hivernale résulte de l'accroissement des précipitations sous forme de pluie au

détriment des chutes de neige. La diminution estivale est liée à une évaporation plus active et à la réduction des précipitations (Bader et Kunz 1998, Grabs et al. 1997). Il convient de noter que les résultats concernant les tendances du régime estival des précipitations sont encore très incertains. L'écoulement moyen au début de l'été sera inférieur et le régime annuel affichera moins de variabilité. Sur le Plateau, le tarissement des cours d'eau pourrait survenir très tôt, déjà au début de l'été; les besoins en irrigation pourraient alors augmenter.

Changements du régime d'écoulement dans les Alpes suisses

Dans les bassins versants des Alpes, les différences entre les écoulements moyens d'été et d'hiver seront moins marquées. Cependant, les débits hivernaux augmenteront puisque la rétention assurée par la couverture de neige sera réduite. En été, les bassins versants influencés par les glaciers profiteront d'un appoint d'eau de fonte. L'écoulement faiblira moins que celui des cours d'eau du Plateau. Toutefois, cet effet diminuera avec le recul croissant des glaciers (Grabs et al. 1997, Gurtz et al. 1997).

Changements du risque de crue

Sur la base des connaissances actuelles, on ne peut s'exprimer que sur le comportement futur moyen de l'atmosphère. En ce qui concerne l'évolution future du risque de crue, on ne peut fournir que des pronostics basés sur des tendances. On n'a donc pas d'indications concrètes pour des régions isolées ni même pour l'ensemble de la Suisse.

Sur le Plateau en Suisse méridionale, la fréquence des crues pourrait à la rigueur augmenter légèrement pendant le semestre d'hiver. En effet, différents processus indiquent une tendance dans ce sens: la teneur en eau de l'atmosphère augmentera, les précipitations tomberont davantage sous forme de pluie et moins sous forme de neige, ou encore la durée de vie du manteau neigeux se raccourcira (Gurtz et al. 1997, Schulla 1997).

Il n'est pas non plus possible de s'exprimer sur le devenir des inondations estivales locales dans l'arc alpin. Cela tient au fait que ces crues sont produites essentiellement par des orages, dont la fréquence d'apparition n'affiche aucune tendance perceptible.

Naef et al. (1998) ont montré qu'une augmentation de 20% de la quantité et de l'intensité des précipitations n'épuiserait pas la capacité de rétention des sols en Suisse. Par conséquent, on ne s'attend pas à un accroissement disproportionné de l'écoulement de surface et du risque de crue.

Toujours dans la région du Plateau, Overney et al. (1997) montrent que les débits de projet sont sensibles aux modifications prévues des régimes des précipitations. Cependant, ces variations sont comprises dans la plage d'incertitude actuelle. Il conviendrait déjà de développer des méthodes de dimensionnement capables de prendre en considération les incertitudes liées au climat. Cet effort de recherche peut être entrepris sans attendre les améliorations nécessaires du côté des modèles climatiques. D'après Overney et al. (1997), une marge d'incertitude subsistera toujours dans la description des processus météorologiques et dans l'étude de leurs interactions avec l'hydrologie des bassins versants.



Photo: PLANAT

Erosion causé par la Varuna
Poschiavo, Juni 1

4 Impacts économiques des précipitations extrêmes

4.1. Processus et évaluation économique

Les chapitres scientifiques ont abordé la partie liée aux processus «changements de l'atmosphère - précipitations - impacts sur les crues et les étiages – potentiel de risque supplémentaire – accroissement des dégâts». A présent, il s'agit de faire le point sur la dimension économique et sociale de l'évolution potentielle du risque de crue.

L'économie se préoccupe essentiellement des dégâts causés par les crues et les sécheresses ainsi que des impacts associés au niveau de l'économie nationale et du comportement de la population affectée. Elle évalue également les mesures visant à réduire ou à éliminer les pertes directes et indirectes.

Du changement climatique à la fréquence des crues, le passage est parsemé de pièges. De grandes incertitudes subsistent. L'approche économique doit pouvoir s'accommoder de ces lacunes scientifiques d'autant plus que les incertitudes sont monnaie courante dans le métier. C'est pourquoi, l'approche économique des crues relevant d'effets climatiques fait appel à des *scénarios*; ils permettent de tirer des conclusions sur les effets escomptés si, par exemple, les crues venaient à se produire plus fréquemment.



Photo: PLANAT

Dégâts à Brig causés par la crue de l'Inn, septembre 1993

4.2. Scénarios d'évolution des précipitations

En sciences naturelles et économiques, il est judicieux de considérer les impacts d'événements extrêmes sur la base de scénarios qui reposent sur l'expérience historique. (Office fédéral de la protection civile 1995). Trois scénarios ont été considérés.

- *La crue régionale.* Cette crue a des impacts locaux et régionaux très importants (par exemple Uri 1987, Brigue 1993, Sachseln 1997).
- *La crue extrême:* Inondations couvrant une grande partie du pays comme celles survenues en 1342. Des événements de ce genre se sont produits plus récemment en Allemagne en 1993 et en 1995.
- *La sécheresse extrême:* Une sécheresse s'étalant sur une année entière en Europe centrale, comme ce fut le cas en 1540.

Ces trois scénarios servent de base pour estimer les conséquences économiques d'événements climatiques extrêmes.

4.3. Crues régionales

Les crues régionales pourraient devenir plus fréquentes suite à l'augmentation des précipitations hivernales. On estime les dégâts supplémentaires à quelques centaines de millions de francs par année. Ils peuvent être couverts dans une large mesure par les systèmes d'assurance existants.

Domages supplémentaires liés aux crues régionales

Des crues régionales se produisent régulièrement en Suisse, aussi bien sur le Plateau que dans les Alpes. Les dégâts dus à ces crues ont augmenté de 1815 à 1885 et diminué jusqu'au milieu du 20e siècle. Depuis, les tendances sont de nouveau à la hausse (Röthlisberger 1998, Weingartner et al. 1998, Pfister 1998). Ces variations sont difficiles à expliquer. On ne peut pas savoir si le recul des dégâts, constaté pendant le milieu de ce siècle, est dû au climat ou aux ouvrages de protection. D'ailleurs, l'accroissement des sinistres signalés ces dernières décennies est plutôt imputable à l'occupation de zones à risque qu'à d'éventuelles modifications du climat.

Le PNR 31 estime à 450 millions de francs les coûts annuels des dégâts dus aux intempéries (en francs de 1995, Meier 1998). Il s'agit d'une valeur moyenne des dépenses reportée par le FNP entre 1972 et 1996 (Röthlisberger 1998). La figure 4 montre l'évolution de ces coûts. Ces informations constituent le scénario de base à partir duquel on étudiera les impacts des changements climatiques.

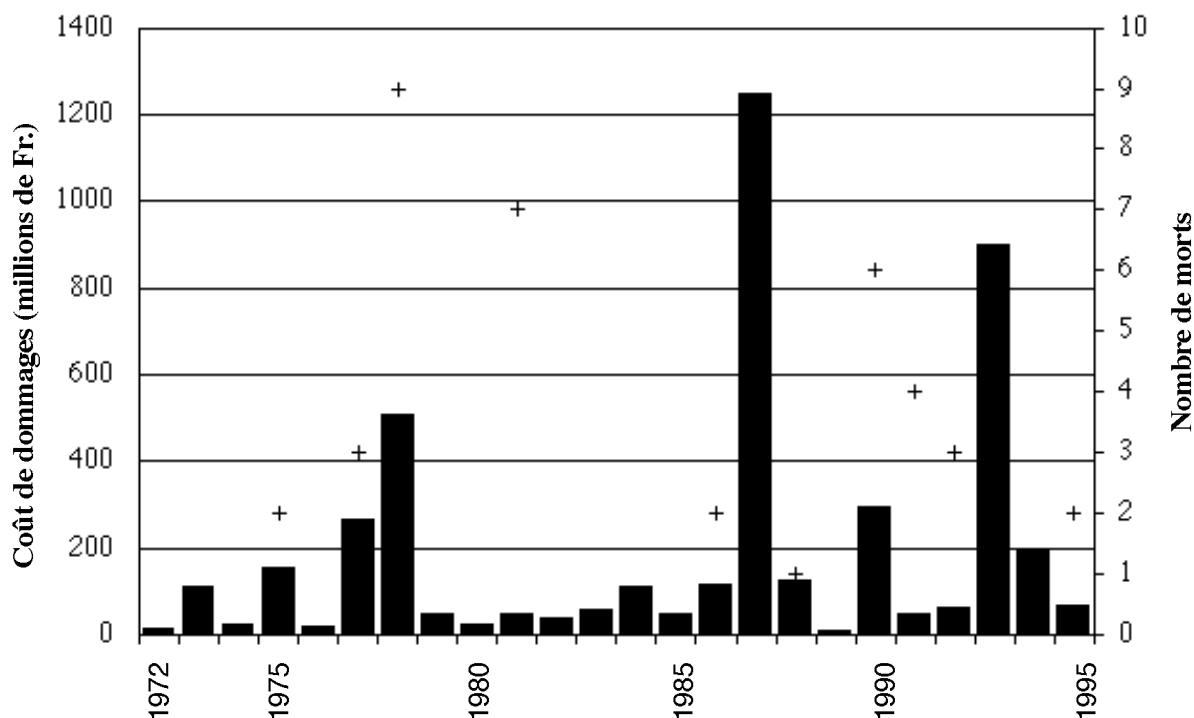


Fig.4: Sommes annuelles des dommages (colonnes) et nombre des victimes (+) des crues en Suisse (d'après Röthlisberger 1998, sans prise en compte du renchérissement)

Le scénario de la crue régionale part d'une augmentation de 30 à 100 pour cent des sinistres suite à des précipitations plus nombreuses et plus intenses. Ces hypothèses sont difficiles à justifier statistiquement; elles restent cependant vraisemblables (Meier 1998). En plus des précipitations, des facteurs comme l'élévation de la limite du permafrost, des coulées de boue devenues plus fréquentes et la réduction de l'interception des forêts ont une influence certaine dans le déroulement des sinistres. Le potentiel de dégâts est le résultat de la combinaison de plusieurs ou de tous ces facteurs. Dans ces conditions, il faut escompter une augmentation des dégâts que les différentes études estiment entre 135 et 450 millions de francs suisses. Ces montants incluent les coûts d'évacuation ainsi que ceux induits par l'interruption des activités économiques et par les travaux de reconstruction.

Couverture d'assurance

Les dégâts liés aux crues sont couverts essentiellement par les assurances contre les risques naturels. La couverture est illimitée pour les assurances immobilières cantonales; elle plafonne à 300 millions de francs suisses pour les assureurs privés, comme le prévoit l'Ordonnance sur l'assurance des dégâts dus à des événements naturels. Pour garantir cette prestation, les assurances privées ont constitué un Pool. Lors de dégâts élevés (jusqu'à 100 millions de francs par événement), les assureurs cantonaux peuvent faire appel à l'union inter - cantonale de réassurance. Pour des sinistres très importants (jusqu'à 750 millions de francs par année), ils bénéficient du support de la CIRE (communauté inter - cantonale des risques contre les éléments naturels). Les assureurs privés sont également regroupés en plusieurs associations. Les dégâts aux infrastructures publiques sont à la charge de la Confédération, des cantons et des communes.

Les limites d'assurance pourraient être atteintes lors d'une crue régionale d'une ampleur équivalente à celle de 1817 dans la plaine du Rhin Saint-Galloise. Le potentiel de dommages est estimé à plus d'un milliard de francs (Hausmann 1998). L'assurance immobilière du canton de Saint-Gall pourrait tout juste couvrir ces dégâts si l'on compte la déduction du montant CIRE, c'est à dire 250 millions de francs.

4.4. Crue extrême

Une crue extrême peut causer des dégâts atteignant les milliards de francs. Déjà aujourd'hui, de telles prestations ne peuvent pas être assurées; ceci ne changera pas dans un avenir prochain.

Potentiel de dégâts d'une crue extrême

Vers la fin du Moyen Age (1342), de vastes surfaces à l'ouest de l'Europe centrale furent inondées par des crues extrêmes (Pfister 1998). Sans aucun doute, l'importance de cet événement est supérieure à celle des crues extrêmes documentées jusqu'à maintenant. On peut étudier cet épisode et extrapoler les dégâts potentiels si une telle crue venait à se produire aujourd'hui. Il convient cependant de souligner que cette méthode ne présuppose aucun lien avec les changements climatiques.

Une crue catastrophique, comparable à celle de 1342, inonderait en premier lieu les infrastructures dans les vallées. On ne peut faire que des suppositions très vagues sur les dégâts résultants. Cinq pour cent (5%) des infrastructures seraient touchées. Les pertes varient entre 7 et 20% de la valeur des objets touchés; une valeur moyenne de 10% est vraisemblable. Si l'on part d'une valeur à neuf de 2'400 milliards de francs pour la totalité des ouvrages de génie civil en Suisse (Baumarkt-Schweiz 1998), les dégâts aux infrastructures pourraient se chiffrer à environ 12 milliards de francs. Il faudra encore ajouter les pertes en valeurs mobilières (le contenu des bâtiments) ainsi que les coûts induits par l'évacuation des populations, les pertes humaines et les interruptions de production.

Les limites des assurances

Ainsi, les dégâts liés à une crue extrême ne sauraient être couverts par les fonds disponibles auprès des assurances. Si une crue de cet ordre de grandeur venait à se produire demain, les coûts devraient être supportés dans une large mesure par les sinistrés et par la main publique. Les banques seraient également touchées par la perte de valeur des immeubles hypothéqués. La question d'un éventuel renforcement de la couverture d'assurance contre un événement extrême reste toujours ouverte.

Par définition, les crues extrêmes sont très rares; leur probabilité d'occurrence est donc très faible. Elles possèdent cependant un potentiel de dégât très élevé. La prise en charge d'épisodes de ce type n'est pas triviale compte tenu de ce qui suit:

- Les contrats d'assurances ne sont pas conclus volontairement. Ignorer la probabilité d'occurrence, n'est pas une raison valable pour ne pas contracter une assurance (Borch 1988). L'absence de couverture généralement constatée tient davantage au jugement porté sur la probabilité: la population sous-estime la probabilité d'événements très rares (Yates 1992). C'est pourquoi les gens ne sont pas prêts à payer les primes nécessaires même s'ils ont une allergie² manifeste à encourir des risques (Zweifel et Nocera 1996).
- En rendant les assurances obligatoires, on ne résout que partiellement le problème de la couverture insuffisante. Une extension de la responsabilité légale, atteignant à la rigueur la couverture totale des dégâts, conduirait à percevoir pendant une longue période des primes beaucoup trop élevées. Ceci tient moins à l'ampleur du dégât qu'à l'impossibilité de déterminer s'il se produira dans les dix, cent ou mille prochaines années. Les assurances devraient exiger des primes importantes pour constituer le fonds nécessaire à couvrir les valeurs assurées. Il en résulterait une charge excessive pour les personnes et les organisations concernées.
- Du point de vue des assurances, un tremblement de terre est une catastrophe naturelle comparable à une crue extrême; il se produit rarement mais entraîne des dégâts importants (bien plus importants que ceux d'une crue (Bachmann et al. 1998). La facture du tremblement de terre de San Francisco en 1906 se chiffrait à plusieurs milliards de francs. Incapables de couvrir une grande

² La notion «d'allergie au risque» s'applique à des individus qui, de deux événements avec une valeur équivalente du produit dommage – probabilité, préfèrent celui où la perte est moindre même si la probabilité est proche de 1. Cette notion exprime ce que quelqu'un est prêt à payer pour éviter un risque. Du point de vue de la mathématique des assurances, l'allergie correspond à ce qu'il faut ajouter à la prime «neutre».

partie des dommages, la plupart des assurances firent faillite. Les sinistrés durent supporter eux-mêmes les pertes (NZZ 1998).

- L'énergie nucléaire peut aussi servir d'analogie, encore faudrait-il ne pas la pousser trop loin (il ne s'agit pas d'une catastrophe naturelle; les responsables sont des personnes physiques; en principe ils peuvent être poursuivis en accord avec le droit civil). Même si de graves accidents nucléaires ne se produisent que très rarement, ils entraînent des dégâts de l'ordre de billions de francs (Prognos/Infras/econcept 1997). Il s'agit d'un multiple de la valeur ajoutée de l'économie, cette charge ne peut donc pas être assurée. C'est pourquoi la limite de responsabilité en cas d'accidents de centrales nucléaires a été fixée à un milliard de francs. Les sinistrés doivent supporter eux-mêmes le reste des coûts.

L'extension des limites de la responsabilité civile ou l'accumulation de fonds publics d'assurance peuvent « amortir » le choc. Toutefois, les instances politiques et la société doivent être conscientes du fait que les événements extrêmes à faible probabilité d'occurrence sont des cas difficiles à traiter au niveau des assurances. Les pertes dues à une crue catastrophique devront être supportées par les sinistrés et par l'ensemble de l'économie.

4.5. Sécheresse extrême

Les dommages résultant d'une période de sécheresse d'une année seraient relativement faibles en Suisse.

De longues périodes de sécheresse se sont produites en 1947, 1949 et 1976. Ces années sèches sont relativement bien documentées (Schorer 1992). La sécheresse la plus grave fut celle de 1540 puisque pendant dix mois, il n'est pratiquement pas tombé une seule goutte de pluie sur le versant nord des Alpes (Pfister 1998). Pendant les cinq cents dernières années, il n'y a pas eu en Suisse de sécheresses extrêmes aussi prolongées. C'est pourquoi, le scénario utilisé se base sur un seul été complètement sec mais analogue à celui de 1540.

Une sécheresse de ce type aurait des impacts au niveau de l'agriculture et de la production électrique d'origines hydraulique et nucléaire. Elle aurait également des répercussions sur les réserves en d'eau pour l'industrie et les ménages. L'expérience de 1976 indique toutefois que les conséquences ne sont pas très graves: l'agriculture déplora des pertes d'environ 100 millions de francs, tandis que l'industrie parvint à éviter des pénuries en gérant avec souplesse les ressources en eau et en électricité. On imposa aux ménages des restrictions de consommation d'eau.

Les impacts économiques de sécheresses extrêmes sont donc limités. La Suisse dispose d'un réservoir d'eau suffisant sous forme de glaciers. Elle peut largement faire face à la pénurie en développant son système d'approvisionnement en eau et en adoptant des stratégies de consommation et de production de courant qui s'adaptent aux circonstances avec souplesse. Cette situation pourrait, bien évidemment changer si la fonte des glaciers alpins se poursuit.

5 Mesures destinées à diminuer les dégâts dus aux crues futures

Les dégâts dus aux crues résultent du cycle: «changements de l'atmosphère - variations des précipitations - crues et sécheresses - potentiel de dégâts – pertes». Pour limiter les dégâts, on peut agir sur chacun des maillons de ce cycle. On pourrait diminuer l'influence humaine sur le climat en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, entraver la formation des crues par le reboisement ou par des ouvrages protégeant les zones vulnérables ou contrôlant les écoulements superficiels, abaisser le potentiel de dégâts avec une politique cohérente au niveau de l'aménagement du territoire et enfin, limiter les pertes par des ouvrages de protection sectoriels ou encore en mobilisant l'aide en cas de catastrophe.

Bien évidemment, chaque mesure présente des avantages et des inconvénients. Pour identifier la combinaison optimale de mesures, les autorités politiques devront analyser les rapports coût – efficacité correspondants. Pour le moment, la plupart des critères d'appréciation restent subjectifs; ils sont donc pas toujours faciles à justifier, voire défendre en cas de contestation.

Ce chapitre passe en revue les mesures suivantes:

- ouvrages de protection
- aménagement du territoire
- diminution des émissions des gaz à effet de serre provenant d'activités humaines.

Le reboisement n'a pas été examiné. En raison de la part élevée du territoire occupé par les forêts, cette option aurait certainement des effets limités.

5.1. Ouvrages de protection

Jusqu'à présent, la plupart des ouvrages de protection ont été dimensionnés en fonction de la plus forte crue survenue dans le courant de ce siècle. Un développement excessif des ouvrages de protection contre les crues peut engendrer de nouveaux risques. Une réévaluation globale s'impose pour les nouveaux investissements.

Ces dernières décennies, la Suisse a beaucoup investi dans la protection contre les crues, entre 4 et 5 milliards de francs. C'est grâce à ces investissements, du moins en partie, que l'on a réussi à diminuer les inondations et les dégâts associés. Les frais annuels d'entretien de ces ouvrages se situent aux environs de 40 à 50 millions de francs.

La plupart des ouvrages de protection existants ont été conçus en fonction d'une crue qui se produit, en moyenne, une fois par siècle («la crue du siècle»). A vrai dire, cette règle est très schématique: elle ne tient pas compte du fait que le potentiel des dégâts varie d'un secteur à un autre en fonction de la vulnérabilité des objets sis dans le territoire. Il suffira de mentionner que les pertes potentielles en zone rurale sont souvent bien inférieures à celles que pourraient subir les agglomérations. En outre, les investissements nécessaires à la mise en place d'ouvrages de protection sont trop souvent accordés sous la pression des événements. L'his-

toire est pleine d'exemples où l'on construit des ouvrages sur la base de décisions sectorielles, en particulier aux abords des zones ayant déjà subi des pertes. Ce n'est que très récemment que l'on commence à comprendre qu'un problème local peut

être résolu par une intervention ailleurs du point concerné. Il faut donc investir sur la base d'une évaluation globale. Depuis sa révision en 1993, la Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau a une approche plus nuancée de la protection contre les crues; elle a notamment pris ses distances par rapport à la règle des cent ans.

Un développement excessif des ouvrages de protection peut favoriser une attitude téméraire. Les assureurs connaissent bien ce phénomène. Se croyant mieux protégés, les individus se comportent de façon insouciante en sous-estimant les risques encourus. C'est au niveau de l'aménagement du territoire que l'on retrouve les attitudes les plus téméraires. A partir du moment où une zone à risque est «protégée» par des ouvrages, une pression politique très forte s'exerce sur les aménagistes pour qu'elle puisse être utilisée. A long terme, un tel comportement peut conduire à des dégâts élevés, en particulier à la suite de crues dépassant la valeur de dimensionnement (Schweizer Rück 1994).

L'aménagement de méandres est, dans certains cas, une alternative efficace et avantageuse par rapport aux ouvrages de protection classiques (structures figées et dures). Il laisse un certain champ libre aux débordements et diminue la vitesse du courant (Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage 1997). Les espaces nécessaires peuvent être pris, du moins en partie, sur le compte des surfaces de compensation écologiques.



Photo: PLANAT

Exemple d'un ouvrage de protection
à Ragelbach, Glarus

5.2. Aménagement du territoire

Une politique cohérente au niveau de l'aménagement du territoire constitue l'arme la plus efficace pour diminuer le potentiel de dégâts. Un renforcement ciblé des compétences de la Confédération en matière d'aménagement du territoire serait judicieux.

Le rôle de l'aménagement du territoire est d'affecter le sol du pays à des usages opportuns et de veiller à ce que la répartition de l'habitat soit ordonnée. Pour atteindre cet objectif, le territoire est subdivisé en différents types d'utilisation. Les crues ont une influence évidente sur l'affectation des sols; elles représentent cependant une menace pour l'état existant. Si le risque de crues venait à augmenter suite aux changements climatiques, l'aménagement du territoire en Suisse serait confronté à des décisions très graves (Bloetzer et al. 1998).

Les instances de l'aménagement du territoire ont examiné minutieusement les catastrophes naturelles survenues dans le courant de ces dernières années (Bloet-

zer et al. 1998). En matière de protection contre les crues, l'aménagement du territoire est impliqué au niveau de la récolte des données et sur le plan des mesures à prendre:

- *Relevé des données*: Des cartes décrivant l'étendue spatiale des dangers, expliquant la nature des phénomènes et des processus à l'origine des dégâts, donnent des indications précieuses sur la vulnérabilité des zones potentiellement affectées. De tels relevés constituent une base essentielle à l'élaboration des plans d'affectation.
- *Mesures à prendre*: Toute une série de mesures peuvent être prises au niveau de l'aménagement du territoire pour réduire les inondations. En effet, les dégâts potentiels diminuent lorsque l'on redonne au cours d'eau un espace de liberté. Cette mesure est d'autant plus efficace que l'on déplace les objets vulnérables sis dans les zones à risque. Des aménagements favorisant la rétention ou l'infiltration des eaux de surface aident à contrôler les crues et les risques d'inondation. Ces mesures constituent des exemples, parmi tant d'autres, elles font partie d'un aménagement efficace du territoire.

Actuellement, les décisions d'aménagement se prennent, pour l'essentiel, au niveau communal. La Confédération et les cantons, ont peu d'influence sur les plans d'affectation des communes. Comme chaque commune planifie en fonction de ses besoins propres, elle néglige les retombées externes, par exemple les impacts sur d'autres communes ou cantons. A cet égard, la délimitation des zones de débordement est un exemple classique; des modifications de l'affectation des sols en amont peuvent altérer les conditions d'écoulement à l'aval et par conséquent, les risques d'inondations. Malheureusement, les communes cèdent facilement aux pressions visant à ouvrir de nouvelles zones aux activités économiques.

La Confédération et les cantons ont cependant des moyens pour influencer indirectement les décisions en matière d'aménagement du territoire. L'octroi de certaines subventions fédérales est subordonné à l'existence d'un plan de zones en bonne et due forme. La loi sur les forêts et la loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau révisée en 1993 vont également dans cette direction. En outre, la distinction entre zones habitées et non habitées, exigée par la loi sur l'aménagement du territoire, permet à la Confédération et aux cantons d'empêcher des modifications d'affectation dans les zones à risque. Une question importante subsiste. C'est celle du renforcement de la coordination des décisions d'aménagement du territoire aux échelons supérieurs en cas d'augmentation du risque de crue.

Les assurances peuvent également soutenir l'aménagement du territoire en faisant payer des primes en fonction des risques. Une majoration des ces dernières aurait un effet dissuasif sur la construction.

5.3. Réduction des émissions des gaz à effet de serre

La stabilisation et la réduction des émissions des gaz à effet de serre peut diminuer le risque d'événements extrêmes liés à des facteurs climatiques. La Suisse devrait poursuivre ses propres efforts de réduction et s'investir davantage au niveau international en vue de la conclusion et de l'application de conventions sur l'environnement et le climat.

La stabilisation et la réduction des émissions des gaz à effet de serre sont des mesures à la source visant à éviter l'amorçage du cycle «altération de l'atmosphère – précipitations – crues - potentiel de dégâts - pertes». Plusieurs moyens permettent de satisfaire cet objectif : diffusion de l'information, mise en place de prescriptions, établissements d'accords, prélèvement de taxes, etc. Certaines de ces mesures sont déjà en vigueur. Une série d'études indiquent que les taxes écologiques constituent un moyen efficace de réduire les émissions des gaz à effet de serre (par exemple Nordic Councils of Ministers 1994). Les effets secondaires et tertiaires de ces taxes, notamment sur l'emploi, la croissance et le système fiscal, sont le sujet de différentes controverses. Partant de certaines hypothèses théoriques, des taxes introduites dans le cadre de réformes fiscales écologiques pourraient produire des effets positifs sur les finances publiques, l'emploi et la croissance. L'éventualité d'un «Alleingang» de la Suisse fait également l'objet de débats animés (au sujet du CO₂, des taxes écologiques et des réformes écologiques de la fiscalité, voir Staehelin-Witt et Blöchlinger 1997).

Les mesures prises à l'échelon national pour réduire les émissions des gaz à effet de serre contribuent au bien être social; les coûts sont à la charge de la Suisse alors que les avantages se répartissent sur l'ensemble de la planète. La diminution des émissions *suisses* des gaz à effet de serre n'a pas d'effet direct sur le climat, les précipitations et les crues *en Suisse*. Les effets climatiques dépendent surtout des mesures prises à l'échelon international. La réduction des seules émissions suisses des gaz à effet de serre affiche un rapport coût – utilité nettement négatif.

Ce n'est qu'à l'échelon international que la réduction des émissions des gaz à effet de serre parviendra à stabiliser le climat. La Suisse s'est plusieurs fois engagée à réduire ses émissions, par exemple dans le cadre du protocole de Kyoto de 1992. En plus de la poursuite de ses propres efforts, la Suisse doit s'investir au niveau *international*. En effet, c'est un contrat sur l'environnement et le climat, contraignant à l'échelle planétaire, qui offre le plus d'avantages à la Suisse en matière de politique environnementale.

6 Synthèse et mesures à prendre

6.1 Changements du cycle hydrologique

La recherche scientifique apporte suffisamment de preuves imputant à l'influence humaine une responsabilité vis-à-vis des changements climatiques. En particulier, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère provoque des changements climatiques qui influencent la quantité et l'intensité des précipitations et augmentent le risque de crues et d'inondations. Toutefois, de grandes incertitudes subsistent sur les processus, les interactions et l'ampleur des variations potentielles.

Les principaux acquis sont les suivants:

Précipitations

Les observations accumulées pendant ces cent dernières années indiquent qu'un changement notable du cycle hydrologique s'est produit en parallèle au réchauffement. On a constaté une augmentation des précipitations en hiver, accompagnée d'une aggravation des extrêmes, également en automne. Ces observations sont compatibles avec les résultats des modèles climatiques qui prévoient une intensification de certains flux du cycle hydrologique suite au réchauffement de la planète. Contrairement à la situation hivernale, les changements du régime des précipitations estivales sont minimes; leur évolution future reste incertaine.

Régime d'écoulement et crues

L'impact d'un réchauffement du climat sur le régime d'écoulement des cours d'eau dépendra essentiellement des modifications de la capacité de rétention des sols et de la couverture neigeuse. Le régime annuel d'écoulement sera plus équilibré, le maximum du début de l'été moins marqué, le minimum hivernal moins prononcé. Les cours d'eau du Plateau seront davantage concernés par cette évolution que ceux des Alpes.

Les changements des composants atmosphériques du cycle hydrologique laissent entrevoir une légère augmentation de la fréquence des crues hivernales sur le Plateau. Une tendance analogue se retrouve pour les débits d'automne en Suisse méridionale.

En raison de l'incertitude sur le régime estival des précipitations, on ne peut pas encore faire de prévisions sur la fréquence et l'ampleur de futures crues dont l'origine, en milieu alpin, sont justement les averses convectives.

6.2. Impacts économiques des précipitations extrêmes

Dans ce rapport, les conséquences économiques d'événements extrêmes sont présentées sur la base de trois scénarios:

- *Crues avec impacts lourds au niveau local et régional*, comme celles survenues dans le canton d'Uri, à Brigue ou à Sachseln. Des événements de ce type pourraient se produire plus fréquemment à l'avenir. Des dommages supplémentaires se chiffrant à quelques centaines de millions de francs par année sont envisageables. Ce potentiel de dégâts peut être couvert presque entièrement par les assurances actuelles, les réassurances et les conventions de solidarité.
- *Crues extrêmes submergeant de grandes parties de la Suisse*. Un événement de cette envergure est survenu une fois (en 1342) au cours du dernier millénaire. Il conduirait aujourd'hui à des dommages économiques d'un montant global se chiffrant en milliards de francs. Les fonds des assurances seraient insuffisants, les coûts devraient être supportés entièrement, ou presque, par les sinistrés ainsi que par l'économie. Vu la rareté d'un tel événement, il n'est pas possible d'établir un lien avec les changements climatiques.
- *Périodes de sécheresse extrême* pendant toute une année en Europe centrale. Une telle sécheresse n'aurait pas d'impacts économiques graves en Suisse pour autant que le réchauffement n'entame pas l'essentiel des réserves qui se présentent sous forme de glaciers.

6.3 Directives pour la maîtrise des crues futures

Plusieurs institutions sont impliquées dans les efforts pour faire face à une augmentation possible de la fréquence des crues:

La recherche

La compréhension scientifique des processus gouvernant les précipitations extrêmes présente encore des lacunes; il en va de même des connaissances au sujet des impacts économiques provoqués par de tels événements. Il faut donc continuer à encourager fortement la recherche dans ces domaines.

Au niveau scientifique, différents processus se déroulant au sein de l'atmosphère ou concernant la genèse des risques naturels sont toujours mal maîtrisés. Il faut approfondir la compréhension de ces processus dans le cadre d'une collaboration internationale et contribuer notamment:

- à l'amélioration des modèles climatiques tout en mettant l'accent sur la compréhension des processus;
- à la détection précoce des tendances du climat ou des changements des risques naturels, ainsi qu'à l'entretien et au développement des réseaux d'observation dans les régions climatiques sensibles;
- à l'élargissement des connaissances sur la variabilité du climat, en exploitant davantage les observations et en interprétant mieux les résultats des modèles;
- à une meilleure prévention des dégâts, en améliorant les modèles de prévision et de comportement des processus à l'origine des dangers.

Au niveau de l'économie nationale, les rapports entre les milieux scientifiques et sociaux n'ont pas été suffisamment étudiés. L'identification, l'évaluation et la maîtrise des risques se situent au premier plan des préoccupations. Il faut donc:

- réunir les bases nécessaires à l'estimation des coûts des dégâts; à l'étude de la culture du risque, à l'évaluation des impacts sociaux des catastrophes naturelles et à consolider les liaisons avec l'aménagement du territoire;
- développer des instruments pour éviter ou maîtriser les dégâts dus aux crues;
- procéder à des analyses coût – efficacité des différentes mesures envisageables.

Les assurances

Les assurances devraient de toute urgence procéder à un examen approfondi de l'accroissement des risques découlant du changement climatique. Elles devraient réexaminer la couverture des dommages et mieux prendre en compte l'évolution des risques dans le calcul des primes..

La politique

Les stratégies et mesures suivantes figurent au premier plan des responsabilités de l'Etat pour diminuer les dommages dus aux crues:

- entretien et optimisation des ouvrages de protection existants; analyses coût - efficacité lors de nouveaux investissements;
- aménagement du territoire, en adaptant les plans d'affectation aux risques de crues et en réservant suffisamment d'espace pour la libre divagation des cours d'eau;
- respect des engagements internationaux sur la réduction des gaz à effet de serre; initiatives politiques et économiques plus nombreuses au plan international en vue d'obtenir des accords contraignants sur l'environnement et le climat.

Ces stratégies doivent être mises en œuvre aux trois niveaux de l'organisation de l'état:

- *au niveau communal*, par une prise en compte appropriée de la protection contre les crues dans les plans de zone;
- *au niveau cantonal*, par l'élaboration de directives et un engagement efficace des moyens alloués à la protection contre les crues;
- *au niveau fédéral*,
 - par un renforcement de la coordination en matière d'aménagement du territoire;
 - par un engagement efficace des subventions aux ouvrages de protection;
 - par un concept flexible d'aide en cas de catastrophe;
 - par des initiatives diplomatiques visant à établir des accords internationaux sur l'environnement et le climat.

Bibliographie

- Bachmann H. et al., 1998. Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz.
- Bader S., Kunz P., 1998. Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. Hrsg. von der Programmleitung NFP31. Wissenschaftlicher Schlussbericht NFP31. VdF Hochschulverlag AG, Zürich.
- Beniston M., M. Rebetez, F. Giorgi and M. Marinucci, 1994. An analysis of regional climate change in Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* 49, 139-159.
- Bloetzer W., T. Egli, A. Petrascheck, J. Sauter and M. Stoffel, 1998. Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung, Synthesebericht NFP31, VdF Hochschulverlag AG, Zürich.
- Borch K., 1988. *Economics of Insurance*. North Holland, Amsterdam.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1997. *Landschaftskonzept Schweiz*. Bern.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1995. *Anforderungen an den Hochwasserschutz*. Bundesamt für Wasserwirtschaft. Bern.
- Bundesamt für Zivilschutz, 1995. *Katanos-Bericht. Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht*. Bern.
- Buzzi A., and N. Tartaglione, 1995. Preliminary meteorological analysis of the Piedmont flood of November 1994. *MAP newsletter*, 2, 2-6.
- Courvoisier H. W., 1998. Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge in der Schweiz 1901-1996. *Arbeitsbericht der SMA*, Nr.194, 20pp.
- Frei C., C. Schär, D. Lüthi and H. C. Davies, 1998. Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geoph. Res. Letters*, 25, 1431-1434.
- Frei, C. and C. Schär, 1998. Aprecipitation climatology of the alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900.
- Grabs W., K. Daamen, D. Gellens, J. C. J. Kwadijk, H. Lang, H. Middelkoop, B. W. A. H. Parmet, B. Schädler, J. Schulla and K. Wilke, 1997. *Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Ressources Management in the Rhine Basin*, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), CHR-Report No. I-16.
- Grebner D., 1980. Starkregensituation vom 7./8. August 1978 im Schweizer Alpenraum; Entwicklung, Bewertung und Vorhersagbarkeit. *Interpraevent 1980*, Bad Ischl, Band1 (215-224).
- Grebner, D. und T. Roesch, 1998. Flächen-Mengen-Dauerbeziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte für die Schweiz, *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Grütter M., W. Kuhn und Ch. Golaz, 1948. Übersicht über den Witterungsverlauf in der Schweiz im Jahre 1947 – Die Dürre des Sommers 1947 – Description synoptique de l'évolution du temps au cours des mois particulièrement secs de l'année 1947. Separatabdruck aus den *Annalen der Meteorologischen Zentralanstalt (Jahrgang 1947)*, City-Druck AG, Zürich.
- Gurtz J., A. Baltensweiler, H. Lang, L. Menzel und J. Schulla, 1997. Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins, *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Gyalistras D., H. v. Storch, A. Fischlin and M. Beniston, 1994. Linking GCM-Simulated Climatic Changes to Ecosystem Models: Case Studies of Statistical Downscaling in the Alps. *Clim. Res.* 4: 167-189
- Hausmann P., 1996. 1 Milliarde sFr. Schadenspotential für die Versicherer aus einem Ueberschwemmungsereignis in der Schweiz? Vortrag anlässlich eines Seminars der Schweizer Rück.
- IPCC, 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*.
- Jeanrenaud, Claude et M. Stritt, 1994. *Instruments économiques et politiques de l'environnement*. Université de Neuchâtel (dossier 36).
- Kienholz, H., H. M. Keller, W. Ammann, R. Weingartner, P. F. Germann, C. Hegg, P. Mani und D. Rickenmann, 1998. Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Lüthi D., A. Cress, H. C. Davies, C. Frei and C. Schär, 1996. Interannual Variability and Regional Climate Simulations, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 185-209.
- Massacand, A.C., H. Wernli and H. C. Davies, 1998. Heavy Precipitation on the Alpine southside: An upper-level precursor. *Geophys. Res. Lett.*, 25,1435-1438

- Meier R., 1998. Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen, vdf, Zürich.
- Meier R., Messerli P., Stephan G., 1998. Ökologische Steuerreform für die Schweiz. Rüegger-Verlag Chur/Zürich.
- Naef F., S. Scherrer, A. Faeh, 1998. Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser. Schlussbericht NFP31, Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Nordic Councils of Ministers, 1994. The Use of Economic Instruments in Nordic Environmental Policy, Copenhagen.
- Overney O., D. Consuegra, A. Musy, P. Lazaro, J. Boillat et R. Sinniger, 1997. Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique et hydraulique des cours d'eau. Rapport Final PNR 31. Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Ohmura A., M. Beniston, M. Rotach, P. Tschuck, M. Wild, M. R. Marinucci, 1996. Simulation of Climate Trends over the Alpine Region, Schlussbericht NFP31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Pfister, C., 1998. 500 Jahre Klimanachhersage, Paul Haupt Verlag Bern.
- ProClim- (Hrsg.), 1996. Zweiter umfassender IPCC-Bericht – Zusammenfassung für Entscheidungsträger und Synthesebericht, ProClim-, Forum für Klima und Global Change, Bern.
- Prognos/Infras/Econcept, 1997. Die vergessenen Milliarden, Verlag Haupt, Bern.
- Röthlisberger G., 1998. Unwetterschäden in der Schweiz. Bericht der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Schädler B., 1987. Long Water Balance Time Series in the Upper Basins of Four Important Rivers in Europe – Indicators for Climate Change? IAHS-Publication No. 168, 209-219.
- Schär C., D. Lüthi, U. Beyerle und E. Heise, 1998a. The Soil-Precipitation Feedback: A Process Study with a Regional Climate Model. J. Climate, 11, in press.
- Schär C., T. D. Davies, C. Frei, H. Wanner, M. Widmann, M. Wild und H. C. Davies, 1998b. Current Alpine Climate. In: A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change (Eds: P. Cebron, U. Dahinden, H. C. Davies und C. Jaeger). MIT Press, Boston.
- Schiesser, H.H., A. Waldvogel, W. Schmid, S. Willemse, 1997: Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten, Schlussbericht NFP31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Schorer, M., 1992. Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft, Geographica Bernensia G40, Geogr. Inst. d. Univ. Bern.
- Schulla, J., 1997. Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Zürcher Geographische Schriften, 69. ETH Zürich, Geographisches Institut.
- Schweizerische Meteorologische Anstalt SMA, 1996. Klima-90 Schlussbericht. Arbeitsbericht der SMA, Zürich.
- Schweizerischer Bundesrat, 1997. Botschaft zum Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen. Bern.
- Schweizer Rück, 1994. Risiko Klima, Zürich.
- Siegenthaler C. und M. Sturm, 1991. Die Häufigkeit von Ablagerungen extremer Reusshochwasser. Die Sedimentationsgeschichte im Urnersee seit dem Mittelalter, Mitt. Bundesamt für Wasserwirtschaft 4, 127-139.
- Staehelin-Witt, Elke und Blöchliger Hansjörg, 1997. Ökologisch orientierte Steuerreformen. Verlag Haupt, Bern.
- Wanner, H., R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, M. Schüepp, 1997. Global Climate Change and Variability and its Influence on Alpine Climate – Concepts and Observations, Theor. Appl. Climatol. 58, 221-243.
- Weingartner R., H. Aebischer, A. Elsasser, A. Gees, C. Kann, S. Manser, 1998. Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Widmann, M. und C. Schär, 1997. A Principal Component and Long-Term Trend Analysis of Daily Precipitation in Switzerland, Int. Journal of Climatology, 17, 1333-1356.
- Yates F., 1992. Risk: Analysis, Perception and Management. MacMillan, London.
- Zimmermann M., P. Mani, P. Gamma, P. Gsteiger, O. Heiniger, G. Hunziker, 1997. Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Zweifel P. und S. Nocera, 1996. Risikoaversion gegen und Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von nuklearen Umweltrisiken. Bundesamt für Energiewirtschaft.