



Département fédéral des transports, des communications
et de l'énergie
Office fédéral de l'économie des eaux

Département fédéral de l'intérieur
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Service hydrologique et géologique national

Analyse des causes des crues de l'année 1987

Rapport final



Mai 1991



Département fédéral des transports, des communications
et de l'énergie
Office fédéral de l'économie des eaux

Département fédéral de l'intérieur
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
Service hydrologique et géologique national

Analyse des causes des crues de l'année 1987

Rapport final

Mai 1991

Communication de l'Office fédéral de l'économie des eaux Nr. 5
Communication du Service hydrologique et géologique national Nr. 15

Préface

L'eau constitue l'un des éléments fondamentaux de toute forme de vie. Mais, outre cette fonction de base, elle intervient, à des intervalles réguliers, comme un élément perturbateur de notre milieu vital, sous la forme de crues catastrophiques. En 1987, la Suisse a été touchée à de nombreux endroits par de tels événements dévastateurs, qui ont coûté huit vies humaines et causé des dégâts compris entre 1200 et 1300 millions de francs. En quelques heures ont été anéanties des œuvres que les hommes avaient mis des dizaines d'années à réaliser. Il est utopique de croire que l'homme sera un jour en mesure de maîtriser la nature au point d'empêcher de tels événements. C'est pourquoi nous devons toujours nous efforcer d'apprendre, de lire les signes de la nature et d'en tirer les conséquences.

Le mandat donné par le Conseil fédéral d'analyser les causes des crues de 1987 a été l'occasion de procéder à une étude approfondie d'une catastrophe naturelle de rare ampleur. Les résultats aujourd'hui à disposition nous permettent de mieux comprendre les événements, sans toutefois pouvoir les expliquer totalement. Mais il ne suffit pas de comprendre les choses: les principes élaborés en vue d'une protection contre les crues exceptionnelles doivent être transposés en pratique. Cette tâche exige de la part des autorités responsables de l'aménagement des eaux une appréciation soigneuse de nombreux facteurs. Il ne s'agit pas de préconiser des solutions schématiques, car chaque cours d'eau est unique, il exige un traitement individuel bien adapté.

Le présent rapport, en regard de cette tâche exigeante, vise à constituer une source d'informations et à offrir diverses suggestions. Une présentation synthétique des résultats des travaux des divers groupes de projet est publiée dans la même série sous le titre «Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Ergebnisse der Untersuchungen». Les dossiers très volumineux des différentes études peuvent être consultés auprès de l'Office fédéral de l'économie des eaux.

Nos remerciements pour leurs prestations vont à tous ceux qui ont participé à cette étude: autorités, économie privée et groupes de projet.

Service hydrologie et
géologique national

Office fédéral
de l'économie des eaux

Le directeur:

Le directeur:

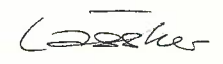


Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Le mandat	7
1.2	Exécution du mandat	7
1.3	Les thèses mises en discussion	7
2	Les intempéries de 1987	9
3	Bases de travail	11
3.1	Mise en œuvre	11
3.2	Définition du concept de cause	11
3.3	Les questions en détail	12
3.4	Limites spatiales et temporelles	12
4	Les causes des dégâts de 1987	13
4.1	Les facteurs météorologiques	13
4.1.1	La situation météorologique générale	13
4.1.2	Les processus atmosphériques	13
4.1.3	Déroulement des précipitations	13
4.2	Les écoulements	18
4.2.1	Les écoulements extrêmes observés	18
4.2.2	La formation des écoulements. Exemple de la Witenwasserenreuss	19
4.2.3	Les autres bassins versants	22
4.2.4	Que se serait-il passé si...?	23
4.3	Les causes de l'entraînement des matériaux	31
4.3.1	Les laves torrentielles	31
4.3.2	Formes d'érosion dans les bassins versants	33
4.3.3	Morphologie des cours d'eau	34
4.4	Les causes des dégâts	35
4.4.1	Risques de dégâts	35
4.4.2	Processus à l'origine des dégâts	37
5	Les crues de 1987 dans leur contexte historique	39
6	Développements possibles	41
6.1	Croissance économique	41
6.2	Modifications climatiques	41
7	Leçons et conséquences	43
7.1	Planification de la sécurité	43
7.2	Objectifs de la protection	43
7.3	Utilisation du sol et aménagement du territoire	44
7.4	Mesures constructives	45
7.5	Autres mesures de protection	45
7.6	Etablissement des données de base	46
8	Conclusions finales	47
8.1	Réponses aux questions	47
8.2	Résumé	47
9	Références	48
9.1	Références bibliographiques	48
9.2	Références photographiques	48

Introduction

1.1 Le mandat

En 1987, la Suisse fut frappée par une série de fortes intempéries, tout comme d'ailleurs l'Autriche voisine et surtout aussi la Valteline. Devant l'ampleur des dégâts, le Conseil fédéral a donné, en date du 29 février 1988, un mandat pour une analyse des causes des crues de 1987.

Le but de cette analyse était avant tout l'étude de la situation météorologique particulière, ainsi que des autres facteurs déterminants dans le déroulement de ces événements. Il s'agissait aussi d'apprécier la probabilité de la répétition d'un événement aussi exceptionnel et de juger s'il était nécessaire, au vu de ces connaissances nouvelles, de modifier les critères adoptés jusqu'ici pour la planification des mesures de protection contre les crues.

Une restriction importante dans l'exécution du mandat a été de devoir renoncer à toute recherche de type fondamental. Les phénomènes observés ont donc dû être interprétés uniquement sur la base de connaissances scientifiques reconnues et selon des méthodes déjà bien établies. Là où les théories actuellement disponibles sont insuffisantes, les lacunes devaient être mises en évidence et pourront servir de thèmes à de nouvelles recherches. De plus, au risque de laisser l'étude inachevée, les limites financière et temporelle devaient être strictement respectées.

1.2 Exécution du mandat

L'Office fédéral de l'économie des eaux a été mandaté pour la conduite de l'étude et la direction du projet a été confiée au Dr Armin Petrascheck (section protection contre les crues). Un groupe de travail a été formé dans le cadre du «Programme national des crues» (programme commun de l'Office fédéral de l'économie des eaux et du Service hydrologique et géologique national), afin d'assurer la coordination avec les autres offices fédéraux et les différents cantons concernés. Ce groupe était dirigé par le Dr Manfred Spreafico (Service hydrologique et géologique national). Un certain nombre de thèmes de recherches se sont dégagés des discussions au sein du groupe de travail, ce qui a permis d'attribuer 18 mandats partiels.

Les résultats de ces projets partiels paraissent simultanément dans les séries de publications du Service hydrologique et géologique national (Communication n° 14) et de l'Office fédéral de l'économie des eaux (Communication n° 4) sous le titre «Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen». Le présent rapport final en constitue une vue d'ensemble et se base sur les différents mandats individuels. Les personnes suivantes ont participé à sa rédaction:

Dr Armin Petrascheck, Office fédéral de l'économie des eaux,

Andreas Götz, Office fédéral de l'économie des eaux,
Prof. Dr Daniel Vischer, Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'EPFZ

Prof. Dr André Musy, Institut d'aménagement des terres et des eaux de l'EPFL

Dr Hans Kienholz, Institut de géographie de l'Université de Berne

Dr Hans Keller, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf

Dietmar Grebner, Institut de géographie de l'EPFZ, Département d'hydrologie

Que soient ici remerciés en particulier tous les collaborateurs des groupes de travail, ainsi que les services fédéraux et cantonaux, sans l'appui efficace desquels le mandat n'aurait pu être mené à terme.

1.3 Les thèses mises en discussion

Les suppositions quant aux causes possibles des crues de 1987, émises immédiatement après l'événement, ont été formulées sous forme de thèses et soumises aux différents groupes de travail. Les réponses qui leur ont été proposées, rappelées ci-dessous, sont un reflet des discussions menées tout au long du projet, et apportent un premier élément de réponse. Les justifications de ces réponses se trouvent plus loin, dans le corps du texte.

Thèse 1

Un événement comme celui de 1987 ne s'est encore jamais produit.

Cela est inexact. Des événements plus désastreux encore ont déjà été observés, qu'il s'agisse de pluies, de débits, du transport de matériaux ou de l'impact sur la population. Au vu de leur étendue, les crues de 1987 doivent être comptées parmi les événements très rares, sans être toutefois uniques.

Thèse 2

La fréquence des crues importantes augmente suite au changement climatique et à la mort des forêts.

Cette inquiétude est justifiée. Les crues de 1987 ne peuvent cependant pas être utilisées pour prouver cette thèse, car les débits importants sont apparus principalement au-dessus de la limite des forêts. Le dépérissement des forêts ne peut donc pas être retenu comme cause dans ce cas-là. La preuve d'une augmentation de la fréquence des crues due à un hypothétique changement de climat ne peut pas (pas encore?) être établie.

Thèse 3

L'utilisation du sol déjà rare s'intensifie et la valeur des biens immobiliers ne cesse de s'accroître dans certaines zones à risque.

Ceci est tout à fait exact. Malheureusement des zones sûres ne sont pas disponibles à volonté pour satisfaire tous nos besoins. Les tentatives en vue de diminuer les risques par des ouvrages de protection ne sont pas toujours concluantes. L'homme et son économie doivent accepter un certain nombre de risques dans les zones de montagne.

Thèse 4

La pluie acide influence la pédogenèse et l'infiltration.

La réponse à cette question n'est pas immédiate, les différents aspects de la formation des sols n'ayant pas été examinés dans le cadre du projet. Par contre on a pu constater, dans l'Urserental, que la saturation a été atteinte, même dans des sols possédant une bonne capacité de stockage et un taux d'infiltration élevé. Une fois la saturation atteinte, la pluie ruisselait alors dans sa presque totalité. La dégradation des conditions d'infiltration pourrait favoriser la formation des crues et augmenter la fréquence des petites et moyennes crues, mais elle n'influence en fait qu'assez peu les crues extrêmes.

Thèse 5

En cas de précipitations extrêmes, la forêt n'a qu'un effet retardateur limité sur la crue, mais augmente par contre le danger représenté par les arbres déracinés et emportés par les eaux.

Exact. La forêt agit sur l'écoulement, principalement par l'augmentation de la capacité de stockage des sols. Dans ce sens, tout réservoir potentiel est certes utile, mais une fois

rempli, il perd de son utilité, comme ce fut le cas en 1987, à la suite des très fortes pluies. On peut alors très bien reprendre la réponse donnée à la thèse 4. Le désavantage que présente le risque de bois flottants est contrebalancé par un renforcement du sol dû aux racines (protection contre l'érosion).

Thèse 6

Des voûtages sous-dimensionnés ont été obstrués, ce qui a provoqué des débordements incontrôlés, accompagnés de dégâts.

Exact. Des dommages mineurs en ont ainsi résulté en différents endroits, ce qui n'a cependant pas beaucoup influencé le déroulement général des événements de 1987, pas plus que le volume total des dégâts, mis à part quelques cas exceptionnels. Ce problème se pose bien davantage pour les petites crues, plus fréquentes. Il peut, dans des cas isolés, conduire à des dommages difficilement évaluable.

Thèse 7

Les drainages liés tant aux travaux d'améliorations foncières qu'à la construction de routes modifient le cheminement de l'écoulement, provoquant une augmentation imprévue des débits.

Inexact en ce qui concerne 1987. Comme au sujet des thèses 4 et 5, cela se vérifie plutôt pour des crues moins importantes ou pour des événements très localisés.

Thèse 8

Les machines agricoles lourdes compactent le sol et le rendent moins perméable; les cultures intensives augmentent la disposition à l'écoulement de surface.

La réponse à la thèse 4 peut encore s'appliquer ici. Il faut remarquer aussi que les régions touchées par les grandes crues de 1987 ne comportent pas de zone de cultures intensives auxquelles ces effets pourraient être imputés.

Thèse 9

Les corrections de cours d'eau (canalisation des ruisseaux, déboisement des rives) créent des conditions favorisant la formation de crues subites.

Partiellement juste. Chaque mesure contre les inondations signifie une diminution du volume de rétention. Ce qui est avantageux pour les zones protégées l'est parfois moins en aval. D'autre part, l'utilité de la végétation des berges comme protection contre l'érosion est compensée par un risque accru d'inondation en raison de la diminution de la section transversale. Il ne faut pas perdre de vue non plus le fait que de grands arbres isolés constituent un danger sérieux, en cas de crue, en risquant de devenir du bois flottant.

Thèse 10

C'est l'effet combiné, exceptionnel, de pluies de fortes intensités et de températures élevées qui est à l'origine de ces événements.

Exact. Des précipitations abondantes sont tombées sur un relief très accentué, avec des bassins versants à fortes pentes, cela en période de fonte tardive de la neige. C'est la combinaison de tous ces facteurs qui a été déterminante concernant l'ampleur des dégâts, et non l'un d'eux pris isolément.

Thèse 11

Le véritable problème ne réside pas tant dans la crue que dans le transport solide.

Cela est vrai pour des régions de montagne avec de fortes pentes naturelles. L'évacuation des volumes d'eau vers un

thalweg y est techniquement aisée. Cependant une crue provoque des phénomènes d'érosion et de charriage, modifiant constamment la section du canal. Il s'ensuit que des considérations purement hydrauliques ne s'avèrent pas suffisantes. A ce sujet, on peut remarquer que des mesures de sécurité adoptées précédemment deviennent inopérantes si le cours d'eau se crée un nouveau lit.

Thèse 12

L'accumulation lente mais continue de matières charriées dans un bassin versant est interrompue brutalement lors des crues et cette masse est transportée par paquets dans les cours d'eau. Comme ces phénomènes de transport ne se produisent qu'à de longs intervalles de temps, ils sont ressentis comme extraordinaires.

Juste, au moins pour les torrents de montagne. Pour les rivières et les fleuves, le charriage est important même entre les crues.

Thèse 13

Les principes et les normes de dimensionnement adoptés jusqu'ici pour les ouvrages de protection ne sont pas fiables.

Il n'en est rien, bien qu'on ne dispose toujours pas de bases suffisantes pour dimensionner les ouvrages, que ce soit dans les domaines des événements extrêmes, du transport solide ou des laves torrentielles. Pourtant de nombreux ouvrages de protection se sont révélés efficaces. Pour des raisons financières, écologiques et techniques aussi, les ouvrages ne peuvent pas être dimensionnés en fonction de l'événement le plus désastreux possible. Ils sont donc dimensionnés en fonction d'un événement dit de projet, qui ne représente pas un maximum possible absolu. Un certain risque résiduel doit finalement toujours être pris en compte.

2 Les intempéries de 1987

L'année 1987 s'est révélée être une vraie année à catastrophes: presque toute la Suisse a été touchée par des intempéries (fig. 1). Au printemps déjà – inhabituellement froid et humide – de nombreuses crues ont provoqué des dégâts. Cela a commencé en avril et en mai par des glissements de terrain dans des zones à problèmes bien connues, comme Wattenwil (BE), La Frasse/Ormonts (VD), Turbachtal (BE), Läufelfingen (BL).

Puis en juin, des pluies fréquentes et persistantes provoquèrent de nombreux dégâts:

- D'une part, elles contribuèrent à activer des glissements de terrain, comme à Lauterbrunnen (BE) et Balsthal (SO), ainsi que des éboulements à Almens (GR) et Elm (GL). Un incident inhabituel survint les 24 et 25 juin près de Schwarzenegg avec l'apparition d'une poche d'eau dans la Zug. Un barrage, de 300 m de long et haut de 20 m, s'est formé, créant un petit lac, qui s'est rapidement comblé par la suite.
- D'autre part ces précipitations provoquèrent des crues dans beaucoup de cours d'eau. Les quantités importantes d'eau précipitées, liées à la fonte tardive de la neige, provoquèrent finalement aussi des crues dans les rivières plus importantes, crues qui sont entrées dans la chronique des événements extrêmes moins en raison de leur débit de pointe que de leur durée particulièrement longue. L'importance des volumes écoulés a amené les lacs préalpins à leur niveau maximal. Sur les rives du lac de Constance, en particulier, les dégâts se sont chiffrés par millions de francs.

Les premiers jours de juillet ont été marqués par de violents orages. Cinq forts orages ont été recensés en une semaine seulement. Ce sont avant tout les cantons de Schwyz et de Berne qui ont été touchés. On a eu à déplorer la mort de deux personnes. Entre le 1^{er} et le 9 juillet, les dégâts se sont élevés à 100 millions de francs. Le village de Boll (BE) fut atteint par une forte intempérie (la troisième en 14 mois!).

Mais les vraies catastrophes de l'année 1987 commencèrent les 18 et 19 juillet seulement. Des précipitations diluviennes causèrent de gros dommages, surtout dans les cantons du Tessin et des Grisons (fig. 2). L'extension de la zone touchée démontre bien l'influence déterminante d'une situation météorologique supra-régionale, qui sera

discutée plus bas. Quatre personnes perdirent la vie pendant ces deux journées et les dégâts matériels dépassèrent 250 millions de francs. La cause principale des dégâts réside en de nombreuses coulées de laves torrentielles. Une coulée dans la Varunasch obstrua le Poschiavino, lequel a été refoulé jusque dans le vieux quartier du centre de Poschiavo, dévastant maisons, commerces et véhicules, et déposant une énorme quantité de matériaux dans les rues et sur les places. Ce sont des coulées torrentielles de la Zavraggia et de la Plaunca, liées à un refoulement du Rhin antérieur, qui causèrent les dégâts les plus graves dans la vallée. Au Tessin, les dégâts se sont répartis autour de deux centres de gravité, l'un situé dans le Val Blenio et l'autre près de Faido. Le Rhin a amené à Diepoldsau une quantité d'eau qui correspond à peu près à celle des crues catastrophiques de 1868. Seuls les travaux de correction effectués depuis empêchèrent le débordement. Une seule rupture de digue, sans graves conséquences, a été constatée près de Fussach en Autriche, dans la zone de l'embouchure. Toutefois, bien que plusieurs débits records aient été enregistrés (Brenno, Bernina, Inn, Somvixerrhein, etc.), les grands dégâts ne provinrent pas de débordements, mais essentiellement de coulées de laves torrentielles.

Une situation météorologique similaire a provoqué les 24 et 25 août 1987 des intempéries extrêmes dans le Gothard et a eu des effets dévastateurs dans les cantons d'Uri, du Valais, du Tessin et des Grisons (fig. 3). Dans la plaine de la Reuss, entre Attinghausen et Seedorf, des ruptures de digues ont provoqué l'inondation de 270 hectares de terres cultivées. Et 150 autres hectares ont été inondés dans la vallée d'Ursen. Des centaines de personnes ont dû être évacuées, plus de 500 habitations et près de 200 autres types de bâtiments ont été endommagés. La ligne CFF du Gothard a subi une interruption totale du 24 août au 12 septembre et ne put être remise en service sur 2 voies qu'après le 25 septembre. La ligne Furka–Oberalp ne fut même entièrement rétablie qu'après le 12 novembre. La durée de ces interruptions donne une idée de l'ampleur des dommages. Sur la route nationale, près de Wassen, la voie amont du pont sur la Reuss s'est affaissée de 1,50 m à la suite d'un affouillement sous un pilier. Comme dans ce secteur la route cantonale était également coupée en plusieurs endroits, la seule liaison possible dans le haut du canton était la voie aval de la N2.

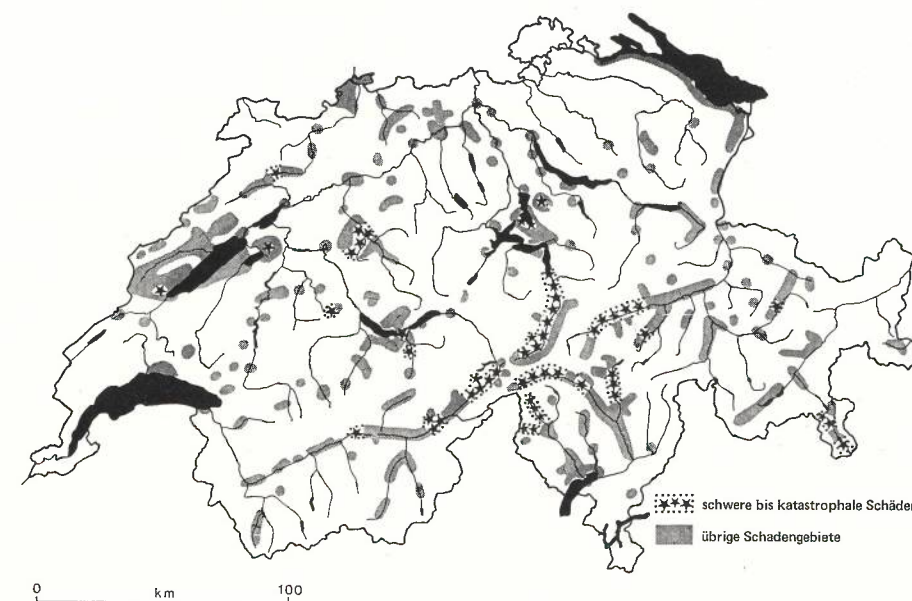
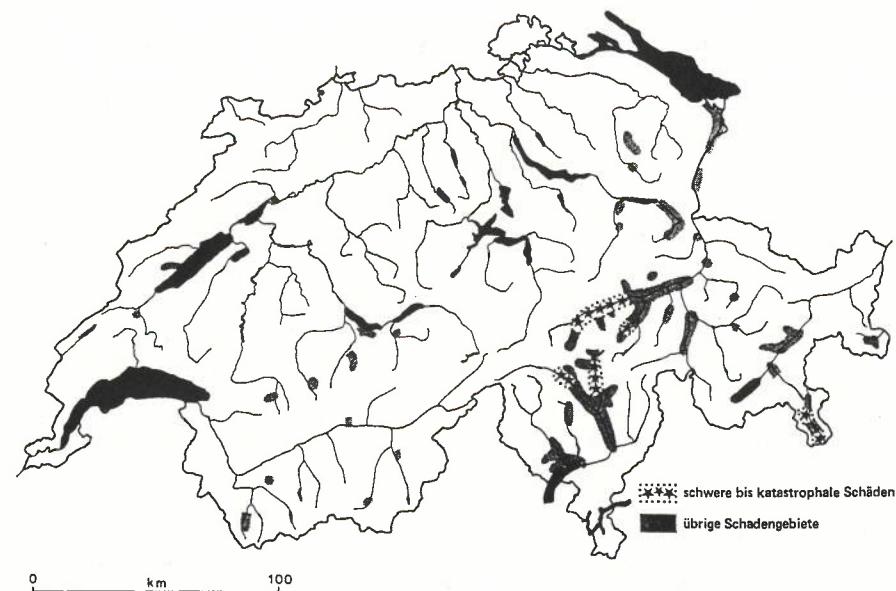


Fig. 1: Vue d'ensemble des zones de dégâts de l'année 1987.

Fig. 2: Régions touchées par les intempéries du 17 au 19 juillet 1987.



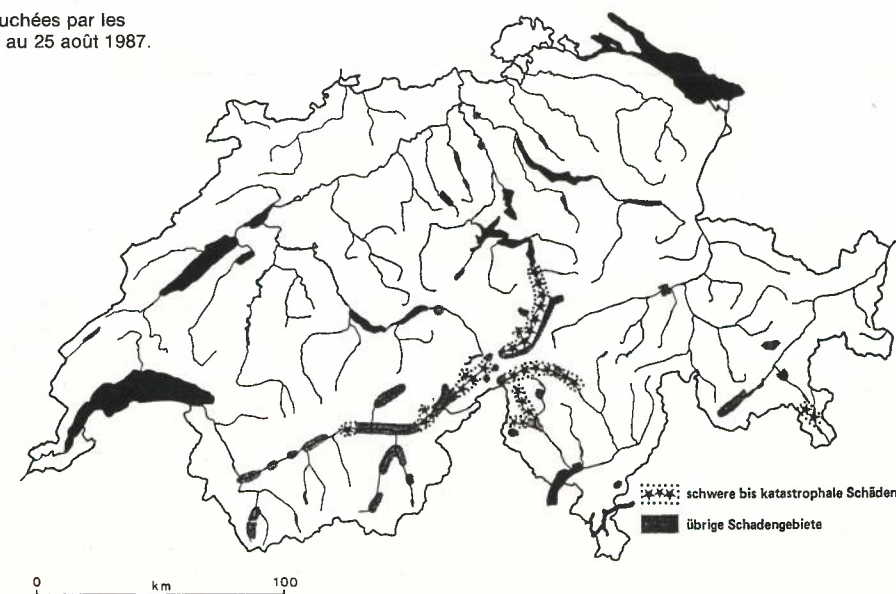
Dans le Haut-Valais, le Rhône déborda en plusieurs endroits. Une coulée torrentielle provoqua d'importants dégâts à Münster. Des routes et des voies de chemin de fer ont été coupées en plusieurs endroits. Certaines vallées latérales également, les vallées de Zermatt et de Saas Fee, furent le théâtre de coulées torrentielles et d'inondations. Au Tessin, Faido était lourdement touchée pour la deuxième fois la même année. Mais le véritable centre de gravité des dégâts se localisa cette fois dans le Val Bedretto et la Leventine jusqu'à Ambri-Piotta. Des dégâts importants ont également été signalés dans le Val Bavona et le Val Rovana. Dans les Grisons, pour la deuxième fois cette même année, Poschiavo fut touchée par une coulée torrentielle de la Varunash. Cette fois par contre le débordement du Poschiavino fut empêché par un dragage continu des alluvions. Les dégâts du mois d'août furent provoqués autant par des coulées torrentielles, des inondations que des érosions.

La Suisse fut frappée une troisième fois cette année encore par des précipitations exceptionnelles. Du 25 au 27 septembre tombèrent dans le Jura, surtout dans la zone du lac de

Neuchâtel, des pluies qui ne furent pas loin d'égaler les anciens records, en volume comme en intensité. Il n'existe cependant pas une corrélation directe entre le volume des précipitations et les dégâts provoqués. Des inondations, dommages aux cultures, glissements de terrain et ruptures de routes ont certes été signalés dans les cantons de Vaud et de Neuchâtel, mais les dégâts matériels sont restés relativement limités.

En bref: 1987 fut pour la Suisse une année catastrophique. Presque tous les cantons ont été touchés par un grand nombre d'événements marquants. Les 17 et 18 juillet, de même que les 24 et 25 août, des précipitations diluviennes, tombant sur des terrains aux pentes abruptes, provoquèrent dans les Alpes des coulées torrentielles, des érosions et des inondations. Les dommages matériels qui en ont résulté dépassent tout ce qui a été vécu dans le passé. Ces événements déclenchèrent une vague de solidarité exemplaire. Ils nous montrent également les limites des ouvrages de protection contre les crues et devraient nous inciter à repenser nos exigences de sécurité.

Fig. 3: Régions touchées par les intempéries du 24 au 25 août 1987.



3 Bases de travail

3.1 Mise en œuvre

Le mandat peut se résumer à deux questions fondamentales:

1. Pourquoi y a-t-il eu de si gros dégâts? (recherche des causes ultimes)

Des dégâts se produisent quand un événement naturel empiète sur notre espace vital (fig. 4). L'importance de tels événements naturels provient essentiellement de la concomitance de facteurs naturels agissant sur un bassin versant. Les divers processus se déroulent selon l'enchaînement suivant: les précipitations produisent un ruissellement qui, à son tour, met en mouvement des matières solides. Ce sont les débits, l'érosion et le dépôt de matières solides qui provoquent des dégâts dans les zones exploitées par l'homme.

Le volume et l'intensité des précipitations dépendent de processus atmosphériques. L'écoulement est fonction, en plus des précipitations, de facteurs topographiques et de la capacité de stockage du sol qui, de son côté, est dépendante de la géologie et de la couverture végétale. La mise en mouvement des matières solides dépend des mêmes facteurs, mais pas dans les mêmes proportions. Ici, le rôle déterminant est tenu par la force de l'eau ruisselée.

Les dommages dépendent des dégâts potentiels dans le secteur touché, c'est-à-dire de son exploitation. La mise en exploitation d'une région ne tient que partiellement compte de la présence de risques naturels, car elle doit être comprise dans des objectifs de politique économique à l'échelle régionale. En raison du dynamisme du développement économique, les conclusions des diverses études, surtout en termes monétaires, ne présentent qu'un aspect local et limité dans le temps. Le recensement des dommages se limite donc délibérément aux données facilement accessibles.

2. Que peut-on entreprendre? (planification des mesures de protection)

La planification des mesures à prendre exige au préalable une prise en considération des interdépendances complexes (fig. 5). Des mesures concrètes ne peuvent être prévues qu'en connaissance du but des protections envisagées, but

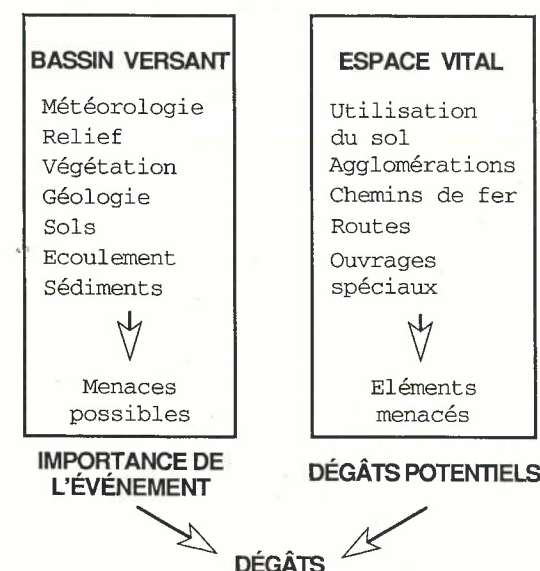


Fig. 4: L'importance d'une crue dépend de nombreux paramètres liés au bassin versant. Les dégâts possibles sont fonction de l'occupation des sols de la région touchée. Ces deux éléments déterminent l'ampleur des dommages.

qui lui-même se déduit de l'ensemble des dégâts potentiels et de la grandeur comme de la fréquence des événements naturels. Il existe un fort effet rétroactif entre les mesures à prendre et les buts de la protection, en passant par le coût, non seulement en argent mais aussi en perte de terrains, en dévalorisation du paysage et atteintes à l'environnement. La rétroaction entre mesures à prendre et dommages potentiels est également très forte; en effet le but des mesures préventives est aussi souvent une utilisation plus intensive des secteurs menacés. Par ces mesures, les événements eux-mêmes sont à leur tour influencés, souvent non seulement dans la région concernée, mais aussi en aval de la zone à protéger.

L'analyse des causes ne peut et ne doit pas intervenir dans les processus de formation de la volonté politique. Elle n'est pas en mesure de fixer le seuil du risque résiduel acceptable, car il est tout autant lié à des considérations financières. Cette analyse peut et doit par contre fournir des bases pour l'évaluation de l'amplitude et de la probabilité d'apparition des événements extrêmes. La transposition en mesures concrètes est du ressort de la planification cantonale. Ceci conforte la décision prise de se contenter des domaines techniques et scientifiques. Les travaux prévus dans le secteur de la planification se sont donc limités à la détermination de lignes directrices et à la mise en évidence de possibilités (par exemple, limites à fixer aux mesures d'aménagement des cours d'eau, service d'aide en cas de catastrophe, mesures dans le cadre de plans d'aménagement, etc.).

3.2 Définition du concept de cause

Deux éléments sont à distinguer dans la notion de causes d'un événement: la prédisposition d'une part (conditions initiales, aptitude, état) et son déclenchement d'autre part. La prédisposition décrit la situation avant l'occurrence de l'événement. Dans le cas d'un incendie, par exemple, la prédisposition est d'autant plus grande qu'il y a de matériel inflammable présent.

Le déclenchement est lié de façon immédiate à l'occurrence

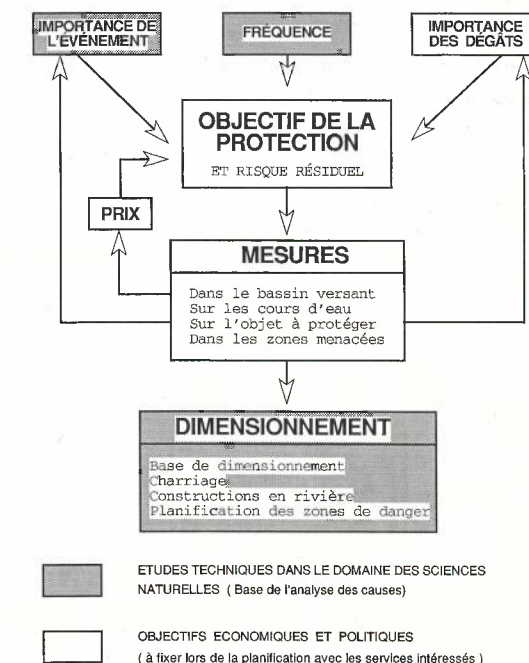


Fig. 5: Les mesures préventives sont élaborées en fonction de l'importance et de la fréquence de la crue estimée. Ces mesures peuvent à leur tour influencer ces mêmes paramètres ainsi que les dégâts possibles, car l'utilisation du sol varie lorsqu'il y a des ouvrages de protection. Le choix des mesures doit être correctement apprécié, car il influence les coûts.

même de l'événement. Dans l'exemple de l'incendie, c'est l'étincelle qui allume le feu.

Il existe une certaine dépendance entre prédisposition et déclenchement: plus la prédisposition est grande, plus le facteur de déclenchement sera faible. Le plus souvent, on désigne le moins probable des deux facteurs comme étant la cause. Par exemple si une maison est incendiée (prédisposition normale) par la foudre (déclenchement rare), c'est la foudre qui est considérée comme cause. Si de l'essence, exceptionnellement entreposée à ciel ouvert (prédisposition forte), s'enflamme à la moindre étincelle (déclenchement banal), c'est alors un stockage dangereux qui est perçu comme cause de l'incendie. Si l'on veut combattre les causes, il faut être conscient qu'il est souvent difficile d'agir sur la prédisposition. Mais ce n'est pas en éloignant le facteur de déclenchement que nous n'obtiendrons la pleine sécurité; tout au plus retarderons-nous un peu la catastrophe.

Dans les régions alpines, la prédisposition aux crues, glissements de terrains et autres catastrophes naturelles est imposée par la nature. Les causes résideraient alors dans les mouvements de grande envergure de l'atmosphère ou de la lithosphère, difficiles à saisir, impossibles à influencer. Il ne reste plus donc qu'à se concentrer sur les facteurs directs de déclenchement.

3.3 Les questions en détail

Au sens des concepts définis ci-dessus, ce sont les fortes précipitations qui seront désignées comme facteur de déclenchement. L'état de la région frappée est responsable de la prédisposition à la formation des crues, et le degré d'exploitation par l'homme détermine, quant à lui, la prédisposition aux dégâts. Il fallait donc en premier lieu examiner si:

- Les précipitations, en termes de volume et d'intensité, pouvaient être considérées comme suffisamment rares pour que les crues et les mouvements de terrains induits puissent être considérés comme étant des conséquences naturelles.

Une question subsidiaire émerge, motivée par la vogue des spéculations relatives aux changements climatiques:

- Doit-on compter dans l'avenir avec un accroissement de la fréquence de précipitations analogues ou plus fortes encore, en raison des changements du climat, induits par l'effet de serre?

Aucune étude spécifique n'a été entreprise ici, car cette problématique d'envergure mondiale aurait fait exploser le cadre du mandat. Des contacts avec les responsables du programme PROCLIM (dont le but est d'étudier les conséquences de l'effet de serre) ont toutefois eu lieu, afin que des éléments de réponses puissent être formulés, conformément aux dernières tendances de la recherche climatologique.

Comme facteur de déclenchement et prédisposition ne peuvent être traités indépendamment l'un de l'autre, les questions suivantes se posent selon l'état de la zone atteinte par les intempéries:

- Est-il possible que des changements naturels ou des modifications d'origine humaine puissent accroître la prédisposition aux crues, à tel point que les volumes générés en arrivent à dépasser ceux prévus par les fonctions pluie-débit utilisées jusqu'ici?

Comme les dégâts ont avant tout été causés par le transport de matières solides (laves torrentielles, érosion des berges,

atterrissements) accompagnant les crues, il fallait contrôler si:

- La mobilisation de matières solides a pu être facilitée par des modifications naturelles ou humaines.

Comme nous ne pouvons évaluer les dégâts que selon notre point de vue d'êtres humains, et que les crues qui ne touchent pas directement l'homme ou ses activités ne sont pas considérées comme des événements dévastateurs, la question suivante se pose:

- Aurions-nous, par une utilisation intensive, modifié notre espace vital dans une mesure telle que des crues rares puissent provoquer des dégâts énormes?

La description de la situation météorologique, de l'espace naturel et de l'espace vital touchés, se limite aux questions clef suivantes:

- Quels facteurs ont été déterminants dans la genèse des crues et lesquels ont été responsables des dégâts; et parmi ces facteurs, lesquels peuvent être qualifiés d'extraordinaires?
- De quelle façon ces facteurs ont-ils été modifiés au cours du temps et plus précisément pendant la dernière décennie?

3.4 Limites spatiales et temporelles

L'année 1987 a été caractérisée par de très nombreuses intempéries. En raison du peu de temps disponible, mais aussi à cause de la multiplicité des phénomènes et du caractère local de certains d'entre eux, les événements suivants n'ont pas été traités dans l'étude:

- Les dégâts d'avril et de mai; il s'agissait là principalement de glissements de terrain dans des zones à risques connues.
- Les débordements des lacs périalpins, suite aux fréquentes et persistantes pluies de juin.
- Les inondations dans le Jura dues aux fortes intempéries de septembre.

Le mandat pour cette analyse des causes a été axé sur l'étude des intempéries du 17 au 19 juillet et du 24 au 25 août 1987. Les orages du 1^{er} au 16 juillet 1987 y ont été inclus en partie.

Les régions les plus fortement touchées se situent dans la région du Gothard. Un grand nombre de facteurs déterminants pour le déroulement des événements sont fixés par les conditions spécifiques aux régions touchées:

- L'altitude élevée, qui influence fortement la température, sous-entend une forêt clairsemée et un relief escarpé.
- Les propriétés des roches et la nature du sol sont conditionnées par le caractère cristallin des Alpes centrales, du moins dans la majorité des régions touchées.
- Les vallées de montagne touchées, peu peuplées, sont cependant traversées par d'importantes voies de communications.

Ces conditions cadres, importantes en ce qui concerne les processus déterminants des événements traités, peuvent différer fondamentalement de celles des régions de plaine. Pour cette raison, les discussions qui suivent (chapitre 4) ne sont valables que pour les zones touchées lors de ces événements et dans les conditions spécifiques à 1987, sauf mention spéciale.

4 Les causes des dégâts de 1987

4.1 Les facteurs météorologiques

4.1.1 La situation météorologique générale

Dans le sens défini au chap. 3.2, les précipitations seraient le facteur de déclenchement des crues, donc l'une des causes de ces événements. Les conditions météorologiques antérieures sont aussi importantes que celles du jour même car elles ont préparé le terrain pour la formation des crues. Le printemps humide de 1987 avait été précédé d'un hiver froid. Dans le nord de la Suisse, la hauteur des précipitations du mois de mai a été d'environ 50% supérieure à la moyenne pluriannuelle. En juin, les excédents de précipitations ont été répartis de façon très irrégulière. Les plus faibles (+30%) furent enregistrés dans la région de Zurich-Lucerne et en Thurgovie. Dans le Jura et le bassin du Rhône, ils furent voisins de +75% et ils atteignirent même +125%, soit plus du double de la moyenne mensuelle, au Tessin et dans le bassin versant du Rhin alpin. Non seulement les quantités d'eau tombées furent supérieures à la moyenne, mais aussi le nombre d'heures de pluie, ce qui signifie que:

- la pluie étant tombée de façon abondante pendant une période prolongée, les débits des cours d'eau étaient déjà élevés avant les crues de juillet;
- les sols étaient saturés d'eau car non seulement les pluies avaient été abondantes, mais les intervalles entre les épisodes pluvieux très courts. De plus, les températures étant restées inférieures à la moyenne, l'évapotranspiration des plantes avait aussi été réduite.

Les orages qui éclatèrent entre le 1^{er} et le 9 juillet trouvèrent dans les Préalpes des sols déjà largement saturés d'eau, soit des conditions idéales pour que des crues se produisent. Les conséquences en furent très graves. Du 17 au 19 juillet, les précipitations furent particulièrement abondantes sur la partie centrale des Alpes. Les précipitations antérieures ainsi que les variations de la température eurent une influence décisive sur la formation des crues. Lorsque, durant un épisode de mauvais temps, l'isotherme de 0° reste à une altitude supérieure à celle de la crête des montagnes, les précipitations ont lieu sous forme de pluie. Si une couche de neige épaisse de l'hiver précédent est encore présente, elle peut retenir une partie de cette eau. La neige commence à fondre seulement lorsque l'air se réchauffe durablement. L'eau de fonte s'ajoute à l'eau de pluie et va saturer le sol. C'est ce qui se produisit durant l'épisode de mauvais temps de juillet 1987 (fig. 6): de fortes chutes de neige se produisirent en mai, le mois de juin fut frais et la fonte retardée puis, à partir du 26 juin, la température s'éleva brusquement.

La fonte des neiges n'a pas été décisive lors des crues des 24 et 25 août, mais la température joua tout de même un rôle important. D'une part, il n'y eut pas de chutes de neige sur les bassins les plus touchés, malgré leur altitude élevée (par exemple, les 192 km² du bassin de la Reuss jusqu'à Andermatt sont à l'altitude moyenne de 2280 m). D'autre part, juste avant les pluies, un épisode de beau temps favorisa la fonte des glaciers. La pluie tombant sur les glaciers et les surfaces de rocher put ruisseler directement vers les cours d'eau.

En bref: Les pluies antérieures, la fonte des neiges et les variations de la température ont créé des conditions favorisant les écoulements. En haute montagne, une isotherme de 0° à une altitude élevée et une période prolongée de

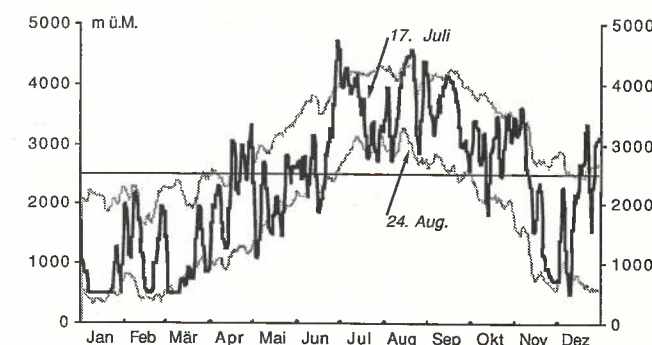


Fig. 6: Variation annuelle de l'isotherme 0°C au cours de l'année à la station de Payerne. Courbe médiane: moyenne mobile sur 3 jours des mesures à 12 h TU; courbes extérieures: moyenne mobile sur 5 jours de l'écart-type des mesures à 12 h TU pour la période 1976-1989 (TU = temps universel).

chaleur avant l'arrivée des précipitations sont des conditions favorisant les crues. C'est ce qui s'est passé au cours de l'été 1987.

4.1.2 Les processus atmosphériques

Entre le 1^{er} et le 9 juillet, une série de fronts froids s'est déplacée d'ouest en est, provoquant de nombreux orages locaux. Les quantités d'eau tombées furent élevées sans être exceptionnelles. C'est surtout la succession rapide des épisodes pluvieux qui fut remarquable. Lorsque les dégâts les plus importants se produisirent, c'est-à-dire entre le 17 et le 19 juillet ainsi que les 24 et 25 août, une situation météorologique très semblable régnait sur la Suisse: une zone de basse pression provenant d'Islande recouvrait l'Europe centrale. Un courant d'air frais du nord-ouest rencontre alors, au-dessus de la Suisse et de la France, de l'air chaud et humide venant du sud-ouest. Un front froid, entre ces deux masses d'air, provoque la formation d'une turbulence secondaire qui restera stationnée sur le Tessin et la Valteline. Les différences de températures très marquées provoquent une forte instabilité verticale. L'intensité des précipitations résultant de cette situation n'aurait rien eu d'exceptionnel si la pluie avait été de courte durée, mais pour un épisode pluvieux prolongé, elle fut élevée.

Dans une telle situation, on s'attend plutôt à une augmentation de la durée et de la somme des précipitations qu'à une plus forte intensité ponctuelle. Ce genre de situation météorologique n'est en fait pas rare: des situations analogues ont été observées une centaine de fois depuis 1901. Des crues extrêmes ne se produisent cependant que si la zone perturbée reste stationnaire, et tout particulièrement si, comme ce fut le cas le 24 août, elle est accompagnée de précipitations. Ce fut par exemple le cas en 1978, en 1951 ou encore en 1927, ce qui provoqua chaque fois des crues exceptionnelles.

En bref: Des pluies exceptionnelles, accompagnées d'une isotherme de 0° à une altitude élevée, ne sont possibles dans la région du St-Gothard que si une dépression accompagnée d'air froid rencontre un courant d'air chaud et humide et que le système reste stationnaire. Ce fut le cas en juillet et en août 1987.

4.1.3 Déroulement des précipitations

La distribution des précipitations entre le 18 et le 19 juillet 1987 est représentée à la figure 7. Un axe de précipitations est bien visible entre la vallée de la Maggia au Rhin antérieur et l'embouchure du Rhin dans le lac de Constance. La fi-

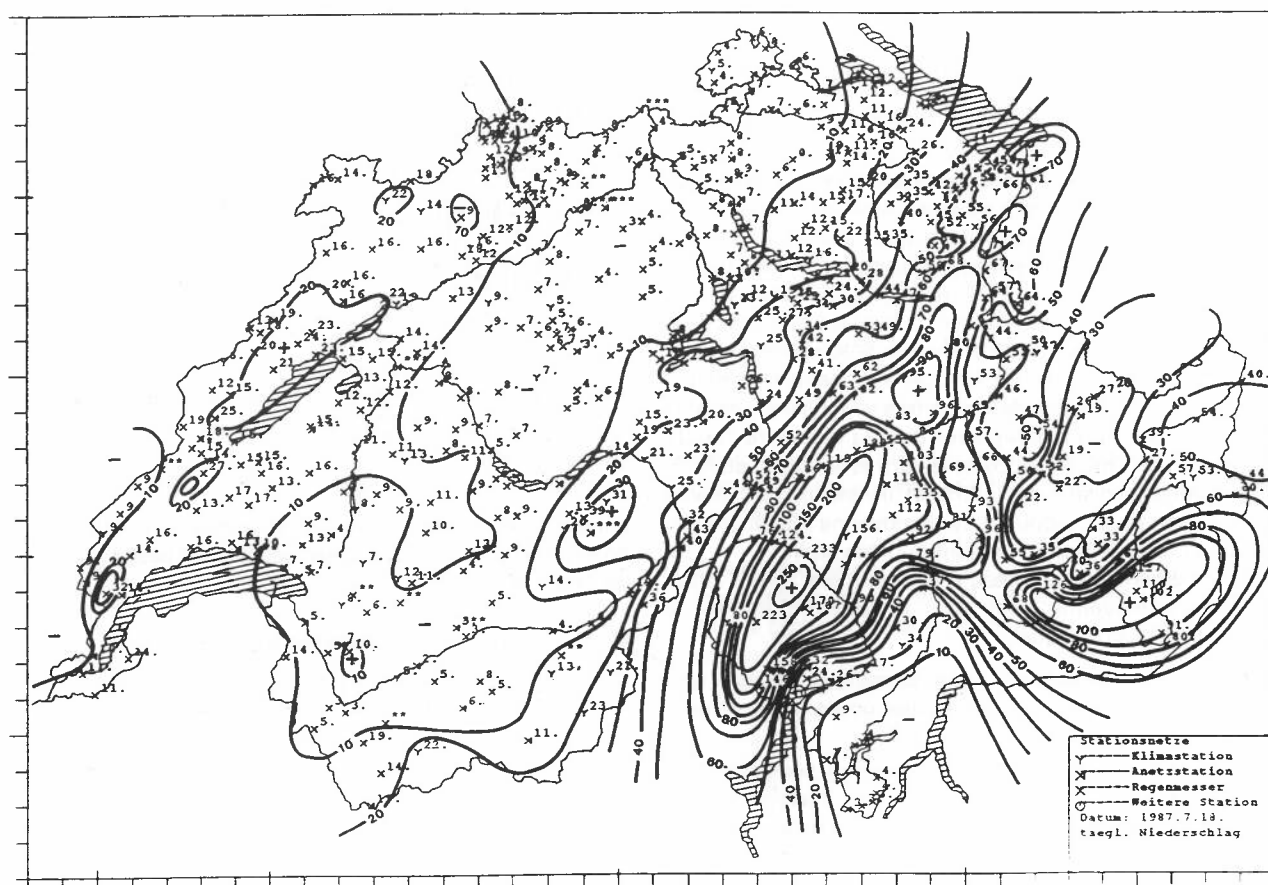


Fig. 7: Précipitations journalières du 18 juillet (6 h TU) au 19 juillet (12 h TU) 1987.

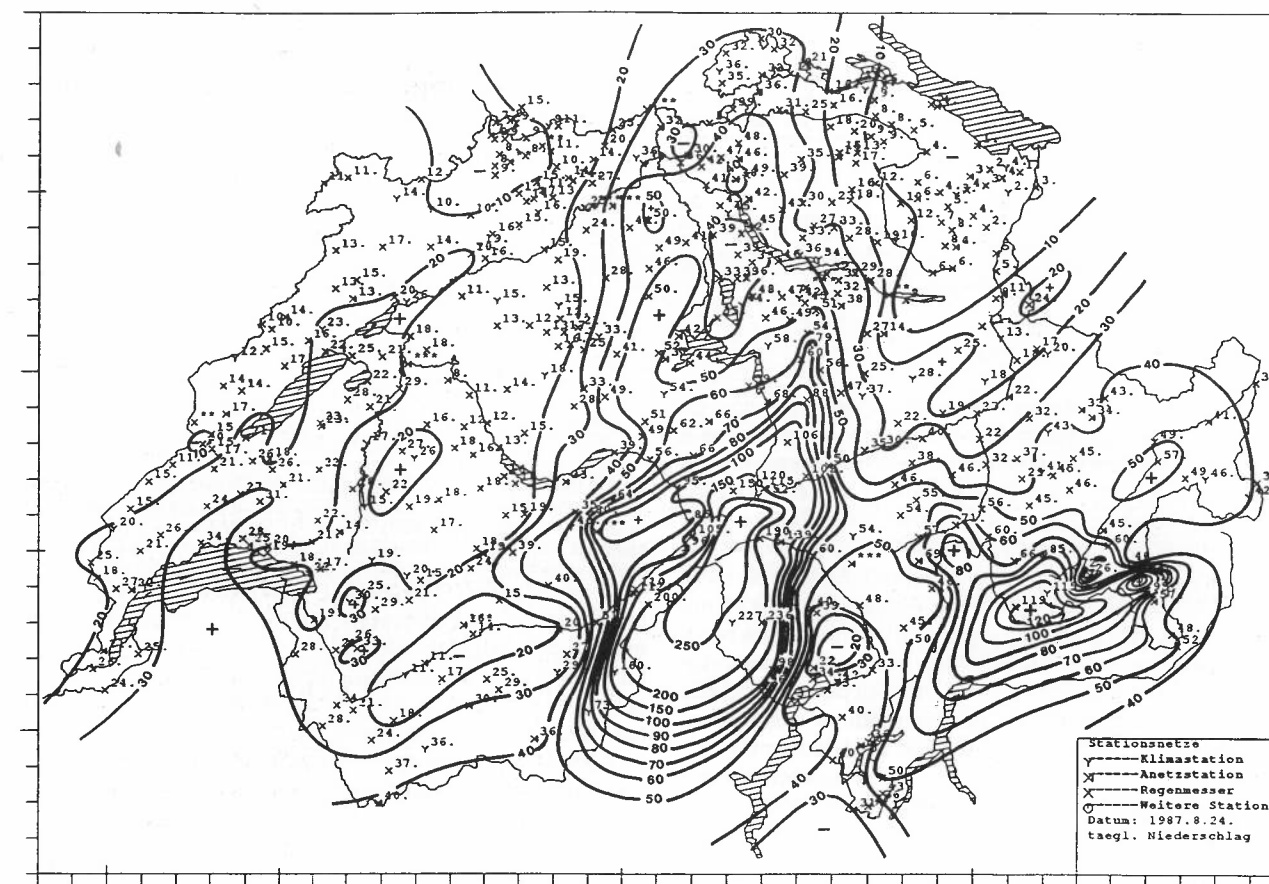


Fig. 9: Pluie journalière du 24 août (6 h TU) au 25 août (6 h TU) 1987.

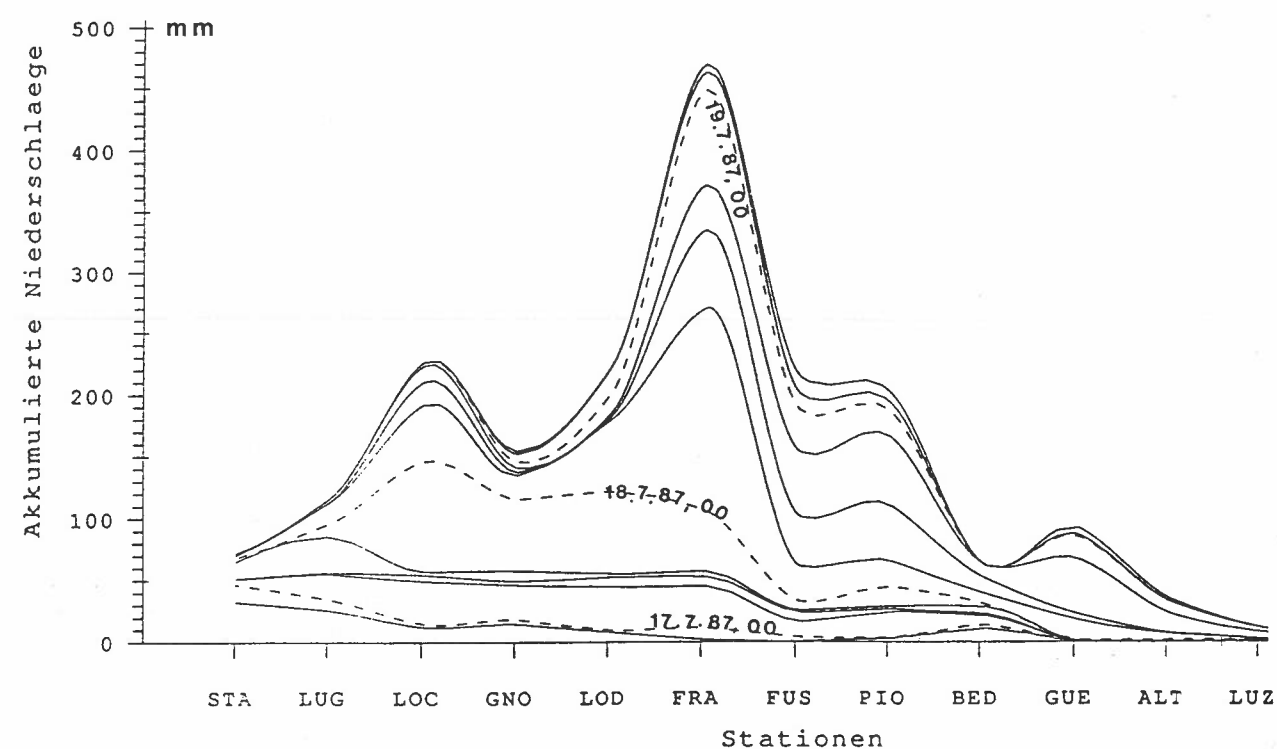


Fig. 8: Profil des précipitations cumulées sur 6 heures du 16 juillet (12 h TU) au 19 juillet (12 h TU) 1987 sur un axe Sud-Nord passant par le St-Gothard. STA = Stabio, LUG = Lugano, LOC = Locarno, GNO = Gnosca, LOD = Lodrino, FRA = Frasco, FUS = Fusio, PIO = Piotta, BED = Bedretto, GUE = Guetsch, ALT = Altdorf, LUZ = Lucerne.

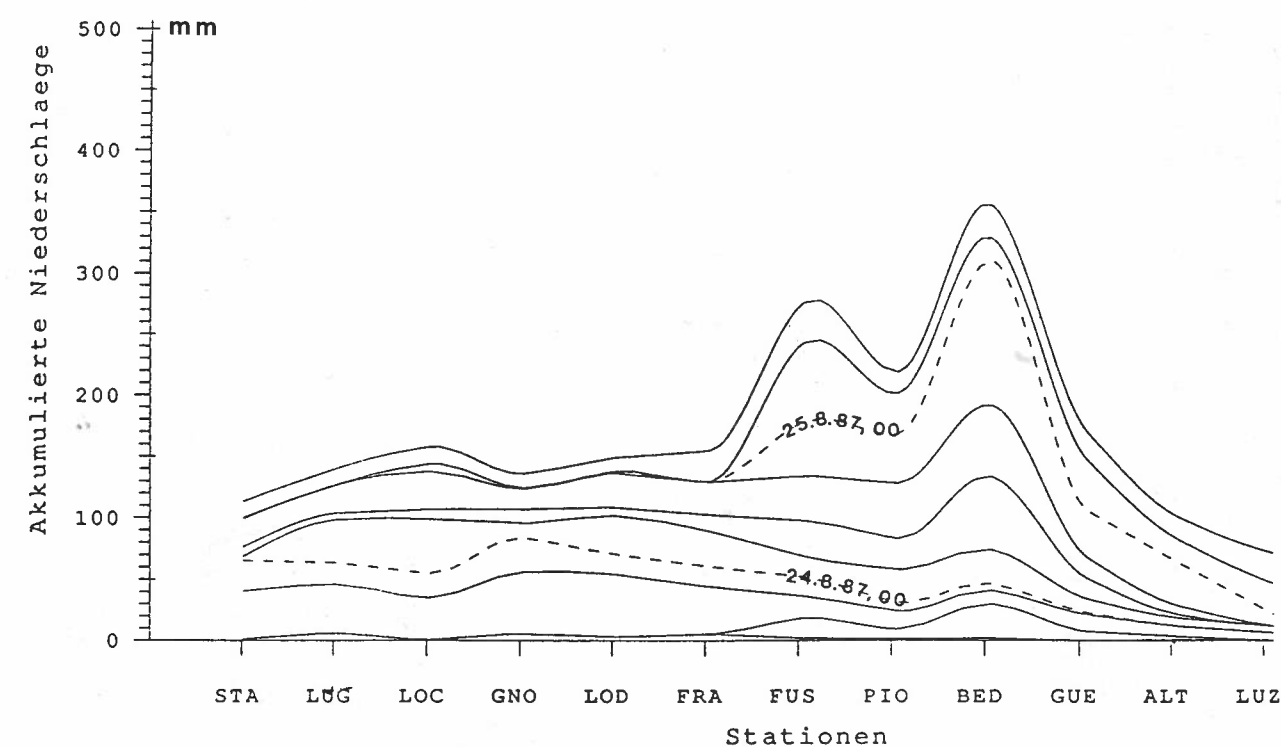


Fig. 10: Précipitations cumulées du 24 août (12 h TU) au 25 août (12 h TU) 1987 sur un axe Sud-Nord passant par le St-Gothard. STA = Stabio, LUG = Lugano, LOC = Locarno, GNO = Gnosca, LOD = Lodrino, FRA = Frasco, FUS = Fusio, PIO = Piotta, BED = Bedretto, GUE = Guetsch, ALT = Altdorf, LUZ = Lucerne.

Tableau 1: Précipitations régionales et probabilité d'occurrence

Durée de l'événement en heures	Quantité en mm	16-19 juillet Période de retour en années	Quantité en mm	24/25 août Période de retour en années
6 h	58	5	45	2
12 h	95	2	65	2
24 h	160	25	115	25
36 h	200	50	160	25
48 h	210	25	170	25
60 h	230	100	170	20
72 h	240	100		

gure 8 montre la distribution, selon une coupe nord-sud, de la somme cumulée des précipitations par tranches de 6 heures. Des valeurs extrêmes ont été enregistrées à Frasco (55 mm en 1 heure, 173 mm en 4 h et 392 mm en 24 h). De nouveaux records pour la somme des précipitations tombées en deux jours ont été relevés à Trun (240 mm), Panix (145 mm), Vrin (182 mm), Vals (226 mm), Flims (152 mm), Safien (140 mm), Andeer (167 mm), Weisstannen (143 mm), Elm (154 mm) et Frasco (440 mm). Il est intéressant de noter qu'au Tessin, où la lame d'eau totale mesurée fut comprise entre 300 et 450 mm, seul Frasco apparaît dans la liste des records. Aux autres stations pluviométriques, des valeurs plus élevées avaient déjà été relevées antérieurement. Dans la vallée du Rhin antérieur, le total des précipitations n'a atteint qu'environ la moitié de celui relevé dans la vallée de la Maggia. Malgré cela, les dégâts y furent beaucoup plus importants (fig. 2). La quantité de pluie tombée ne permet pas à elle seule de prévoir les débits et encore moins les dégâts qui se produiront, comme nous le verrons encore à plusieurs reprises.

Les précipitations des 24 et 25 août furent inférieures à celles de juillet, tant en ce qui concerne leur durée que leur somme (fig. 9 et fig. 10). Des sommes journalières record ne furent enregistrées qu'à Göschener Alp (150 mm), Binn (200 mm) et Airolo (190 mm).

La hauteur de la lame d'eau tombée ne suffit pas à caractériser un événement pluvieux, surtout si l'on veut estimer les écoulements qu'elle provoquera. Il faut aussi tenir compte de la durée et de la surface réceptrice. On trouvera au tableau 1 la probabilité d'occurrence, exprimée par la période de retour, d'un événement donné, pour une surface de 800 km². La probabilité d'une quantité de précipitations donnée ne sera pas étudiée ici plus en détail. Une situation météorologique susceptible de provoquer des crues se caractérise avant tout par son extension et par sa durée. Une

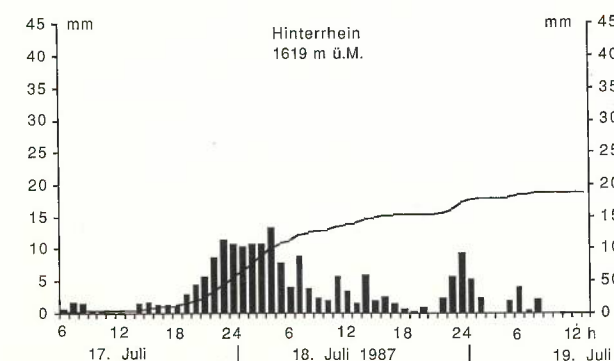


Fig. 12: Précipitations horaires (ordonnée de gauche) et précipitations cumulées (ordonnée de droite) à la station Hinterrhein du 17 au 19 juillet 1987. En comparaison avec la pluie du mois d'août (fig. 13), les plus fortes intensités se sont produites plutôt au début de l'événement pluvieux.

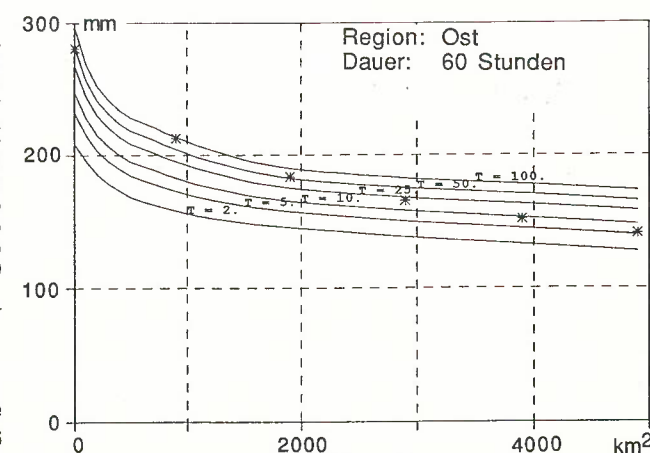


Fig. 11: Diagramme des précipitations d'une durée de 60 heures ayant des périodes de retour de 2, 5, 10, 50 et 100 ans pour la Suisse orientale (période de référence 1969-1988). C'est pour cette durée de précipitations que l'événement du 16 juillet (22 h TU) au 19 juillet (10 h TU) présente la plus grande intensité.

telle situation conçoit mieux en terme de surface qu'en termes de données ponctuelles.

La figure 11 montre la relation entre la somme des précipitations, la surface touchée par l'averse et la période de retour pour une pluie de 60 heures.

La période de retour, exprimée habituellement en années, est le laps de temps durant lequel, statistiquement, un événement particulier peut se produire une fois. Les périodes de retour supérieures à 50 ans doivent être considérées avec une grande prudence. Pour de tels événements, relativement rares, les données sont en général insuffisantes pour permettre un calcul statistique valable. Dans le présent rapport, les événements dont la période de retour est comprise entre 10 et 25 ans seront qualifiés de «rares»; si la période de retour est de 25 à 80 ans, on dira que ces événements sont «très rares» et si elle est encore plus longue, on parlera d'événements «extrêmes».

Le tableau 1 montre que le qualificatif «très rare» n'est ici applicable qu'aux précipitations d'une durée supérieure à 24 heures. Du point de vue statistique, les intempéries de juillet furent les plus importantes. Les quantités de pluie ne sont pourtant pas suffisantes pour expliquer à elles seules les dégâts constatés.

L'étude du déroulement dans le temps d'un épisode de mauvais temps est nécessaire à sa compréhension. On trouvera dans les fig. 12 et 13 une représentation de la répartition horaire des précipitations aux stations d'Hinter-rhein (juillet) et de Bedretto (août). On remarque que:

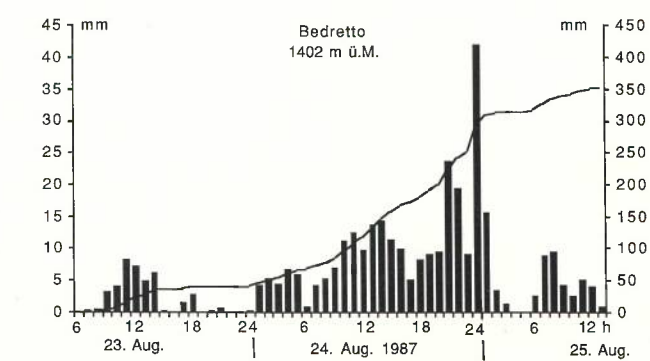


Fig. 13: Précipitations horaires (ordonnée de gauche) et précipitations cumulées (ordonnée de droite) à la station de Bedretto du 23 au 25 août 1987. La forte intensité de précipitations le 24 vers minuit s'est avérée déterminante pour la crue.



Photo 1: La Zarvragia en crue le 18 juillet 1987 à 16 h.



Photo 2: Le front de la lave torrentielle de la Zarvragia le 18 juillet 1987, 15 minutes seulement après la photo 1. Cette photo exceptionnelle met en évidence la force destructrice d'un tel événement. Le débit est estimé à 600 m³/s et la vitesse du front à 8 m/s.

- les intempéries de juillet débutèrent par de fortes intensités de pluie alors qu'en août ces intensités sont allées en augmentant et qu'une valeur très élevée, atypique, de 40 mm/h est relevée vers la fin de l'épisode;
- les intensités semblent, de façon générale, légèrement plus faibles en juillet qu'en août.

La station de Bedretto paraît aussi être représentative pour la vallée d'Urseren. Les quantités de précipitations de la nuit du 24 au 25 août y sont vraiment exceptionnelles. Après une pluviosité de 160 mm dans la journée du 24, l'intensité des précipitations augmente vers 20 heures, atteint environ 20 mm/h et s'élève encore pour atteindre 40 mm/h peu avant minuit. De telles intensités ne sont normalement pas atteintes lorsque se produisent des courants ascensionnels régionaux; dans le cas qui nous occupe, de l'air froid ayant passé par dessus la crête des Alpes et arrivant dans la vallée de Bedretto provoqua un mouvement vers le haut de l'air chaud qui s'y trouvait.

En soi, une intensité de pluie de 40 mm/h n'est pas très rare: elle peut se produire tous les 2 ans à Andermatt et tous les 20 ans à Airolo. Son apparition après une longue période de pluie a cependant été déterminante pour la formation de la crue d'août.

En bref: La pluviosité pendant un laps de temps de 48 à 60 heures sur 800 km², tant en juillet qu'en août, peut être qualifiée de rare ou même de très rare. Du point de vue statistique, les intempéries de juillet furent le phénomène le plus rare. En août, l'intensité horaire maximale des précipitations se produisant à la fin de l'épisode pluvieux s'est révélée être une circonstance extrêmement défavorable dans la région du Gothard.

4.2 Les écoulements

4.2.1 Les écoulements extrêmes observés

L'analyse des valeurs mesurées en 1987 montre que la somme des précipitations sur plusieurs jours ainsi que les surfaces affectées furent inhabituellement grandes. On pouvait donc s'attendre à des crues exceptionnelles jusque sur les cours d'eau importants. Ce ne fut cependant le cas que sur le Rhin à la station de Diepoldsau et sur la Reuss à Seedorf. Pour d'autres bassins versants relativement grands (le Rhin à Felsberg, le Tessin à Bellinzzone, la Maggia à Locarno, l'Inn à Martinsbruck et le Rhône à Sion), les débits furent élevés, mais n'atteignirent pas des records.

Les forts débits du Rhin sont la conséquence d'une pluviosité exceptionnelle, très rarement atteinte dans ce bassin. Sur la liste des records de précipitations donnée dans 4.1.3, on trouve presque exclusivement des stations du bassin du Rhin. Le débit maximal du Rhin mesuré à Ilanz en 1987 a cependant été dépassé deux fois depuis 1900 (fig. 14). Si les débits du Rhône et de l'Inn n'ont pas atteint de record, c'est

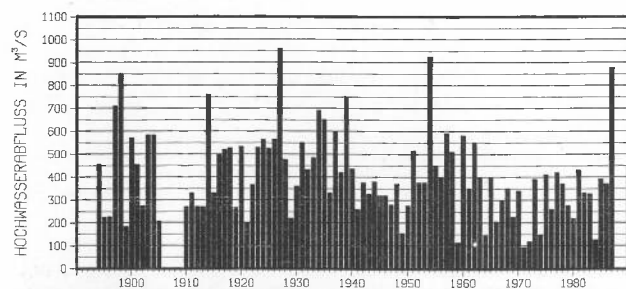


Fig. 14: La plus grande crue annuelle observée à la station d'Illanz-Vorderrhein. Sans l'effet de rétention des eaux dans les barrages alpins, un nouveau débit maximal aurait sans doute été atteint.

qu'une partie seulement de leur bassin a figuré parmi les régions les plus arrosées.

Il est surprenant de constater que les valeurs des débits de pointe du Tessin à Bellinzzone (bassin versant de 1515 km²) et de la Maggia à Locarno (592 km²) restèrent relativement modestes. Ces deux bassins se trouvaient pourtant dans la zone centrale des précipitations (fig. 7, fig. 9). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce phénomène:

- des précipitations importantes, de forte intensité sont fréquentes au Tessin. Il s'y produit donc souvent des crues, et celles de juillet 1987 n'eurent rien d'exceptionnel;
- les intensités horaires des précipitations furent relativement faibles et la répartition des pluies dans le temps favorable. Le Tessin à Bellinzzone atteignit son niveau maximal dans la matinée du 8 juillet. Dans les 24 heures suivantes, alors que l'intensité des pluies diminuait, les débits restèrent élevés (entre 1000 et 1400 m³/s).

Ces explications ne sont pas vraiment satisfaisantes, vu que dans certaines parties du bassin, la vallée du Brenno par exemple (fig. 15), des crues absolument exceptionnelles étaient observées. Ceci montre que la formation des crues ne peut pas être expliquée complètement à l'aide de paramètres simples.

Les débits de la Reuss à Seedorf ainsi que ceux de quelques affluents du Rhin, du Rhône et du Tessin peuvent être considérés comme des débits extrêmes. La liste des stations hydrométriques, où des débits extrêmes furent enregistrés, est donnée au tableau 2 (débits supérieurs de 20% au maximum observé jusque-là). Non seulement bien sûr les stations ayant été détruites par les eaux (Witenwasserrennuss et Furkareuss à Realp, Tessin à Bedretto) ont connu des débits exceptionnels, mais aussi celles permettant le jaugeage des affluents aux lacs de Lucendro, d'Orden et d'Albigna.

Tableau 2: Valeurs extrêmes de crues de 1987

Rivière/station HHQ	Date de l'événement	Surface moyenne km ²	Altitude m s. m.	HQ 87 m ³ /s	avant 1987 m ³ /s
Somvixerrhein/Somvix*	19 juillet	21,8	2450	89	68
Ferrerabach/Trun	19 juillet	12,5	2451	25	14
Hinterrhein/Hinterrhein	19 juillet	53,7	2360	168	121
Brenno/Loderio*	19 juillet	397	1820	510	320
Berninabach/Pontresina	19 juillet	107	2617	166	120
Poschiavino/La Rösä	19 juillet	14,1	2283	15	10
Ticino/Piotta*	25 août	158	2060	210	130
R. d. Calneggia	25 août	24	1996	104	70
Reuss/Seedorf*	25 août	832	2010	735	560
Rhône/Reckingen*	25 août	215	2306	182	144

* Stations avec période d'observation supérieure à 50 ans. HQ 87 est le débit constaté en 1987. A titre de comparaison on a également indiqué le plus grand débit observé avant 1987.

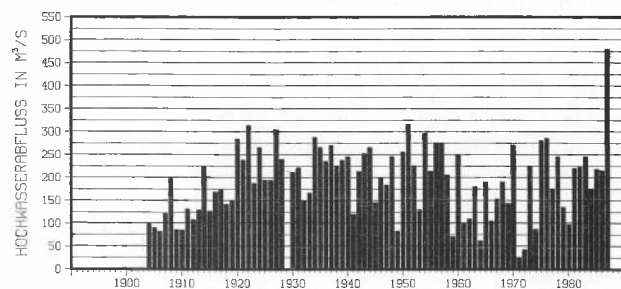


Fig. 15: La plus grande crue annuelle observée à la station de Loderio-Brenno. Le débit de crue de 1987 dépasse ici de loin toutes les valeurs précédentes.

Le point commun entre ces bassins est leur altitude élevée et, sauf pour la Reuss à Seedorf et le Brenno à Loderio, leur surface réduite. Notons que l'on s'attend normalement à observer des débits extrêmes dans des petits bassins lors d'orages et non pas, comme en 1987, lors de précipitations de longue durée.

Les débits extrêmes du mois d'août ont tous été observés dans le voisinage du col du St-Gothard. L'anomalie dans le déroulement des précipitations décrite plus haut en est la raison principale.

Les crues extrêmes n'ont pas forcément lieu simultanément dans des bassins versants pourtant contigus. La crue du Rosegbach est la plus forte jamais observée alors que celle du Berninabach se classe en troisième position (tableau 3). De telles différences sont normales lors d'orages à caractère local, mais on s'attendrait à des différences moins marquées dans une situation météorologique telle que celle de 1987.

Tableau 3: Les crues du Berninabach et du Rosseggbach classées selon leur importance

Berninabach Bassin versant année	107 km ² débit de pointe	Rosseggbach Bassin versant année	66,5 km ² débit de pointe
1954	115 m ³ /s	1987	166 m ³ /s
1956	67 m ³ /s	1954	130 m ³ /s
1987	55 m ³ /s	1956	92 m ³ /s

Dans la vallée de Poschiavo, durement touchée, les dommages sont moins à attribuer aux débits des cours d'eau qu'aux grandes quantités de matériel charrié par les eaux, qui ont fait sortir le Poschiavino de son lit, provoquant ainsi de graves inondations.

En bref: Les événements qui se sont produits au mois d'août ont provoqué dans la région du Gothard des crues extrêmes dépassant toutes celles mesurées jusque-là. Etant donné que pratiquement toutes les stations de la région ont enregistré des débits record, les conditions météorologiques locales doivent avoir joué un rôle prépondérant dans la formation des crues. En juillet, la situation est moins claire. Des débits extrêmes ont été observés dans le Val Blenio, le Val Sumvitg, dans la vallée du Rhin postérieur et dans la région de la Bernina. Dans les autres régions atteintes par les fortes précipitations, des débits élevés à très élevés furent relevés, mais ils ne dépassèrent pas les observations faites précédemment.

4.2.2 La formation des écoulements – exemple de la Witenwasserrennuss

Les facteurs déterminant la formation des écoulements à des altitudes élevées seront décrits pour la Witenwasserrennuss (canton d'Uri). L'altitude élevée du bassin versant implique:

- un écoulement rapide vers les cours d'eau, une part importante de la surface du bassin étant constituée de rochers et de glaciers;
- des pentes abruptes présentant une faible capacité de rétention de l'eau;
- des températures relativement basses, une couverture végétale clairsemée avec peu d'évapotranspiration;
- le stockage des précipitations sous forme de neige pendant une grande partie de l'année;
- des débits élevés et un sol saturé d'eau pendant la période de fonte des neiges.

Ces facteurs dépendent largement de l'altitude. Le bassin de la Witenwasserrennuss (altitude moyenne 2430 m) reçoit annuellement 2100 mm de précipitations, l'évaporation an-

nuelle y étant seulement de l'ordre de 100 mm. Entre 1450 et 1800 m d'altitude, soit entre le fond de la vallée d'Urseren et la limite potentielle des forêts, la lame d'eau tombant annuellement n'est plus que de 1730 mm, alors que l'évapotranspiration s'y élève à 310 mm (pelouse alpine). Dans une forêt de sapins, à cette altitude, la transpiration peut s'élever jusqu'à 560 mm.

Cette comparaison chiffrée montre qu'à des altitudes élevées, les précipitations s'écoulent presque totalement en surface. La rétention s'opère essentiellement par stockage de l'eau sous forme de neige. Par conséquent, pendant la longue période de l'année où la température reste inférieure à 0°, les crues sont pratiquement inexistantes.

Le bassin versant de la Witenwasserrennuss a une surface de 30,7 km² dont 14 % sont couverts de glaciers, 6 % sont des parois rocheuses, 25 % des éboulis et 55 % des moraines en général recouvertes de pelouse alpine.

A partir d'une certaine altitude, les sols ne sont que faiblement développés. L'étude des sols de la vallée d'Urseren a révélé qu'il s'agissait de sols morainiques pouvant atteindre une épaisseur de 80 à 100 cm. Une partie de ces derniers peuvent être attribués à des paléosols forestiers, ceci bien que la vallée soit déboisée depuis 200 ans et très vraisemblablement même depuis 500 ans. Ces sols sont caractérisés par une bonne perméabilité et une grande capacité de rétention (environ 300 mm).

Malheureusement, ces terrains ne sont présents que sur quelque 20 % de la surface du bassin versant. En dépit de l'altitude, la capacité naturelle de rétention d'eau dans ce bassin peut être qualifiée de bonne. A noter cependant la rareté de la végétation, qui pourrait aussi retenir une partie des précipitations.

Entre le 23 et le 25 août, une lame de 270 mm d'eau est tombée sur le bassin. On a représenté à la figure 17 les précipitations horaires ainsi que l'hydrogramme simulé de cet épisode. La station hydrométrique ayant été détruite par la crue, aucune mesure n'est disponible. Le modèle a quand même pu être calé à l'aide des mesures des 10 années précédentes. On remarque que la courbe de l'hydrogramme suit plus ou moins les variations du hyétogramme, avec un léger retard. Après environ 40 heures, donc peu avant le milieu de la nuit du 24 au 25 août, les pluies deviennent plus intenses et les débits augmentent de façon impressionnante. La raison de cette augmentation est simple: quand les pluies ont commencé, le sol a pu absorber de l'eau et seule

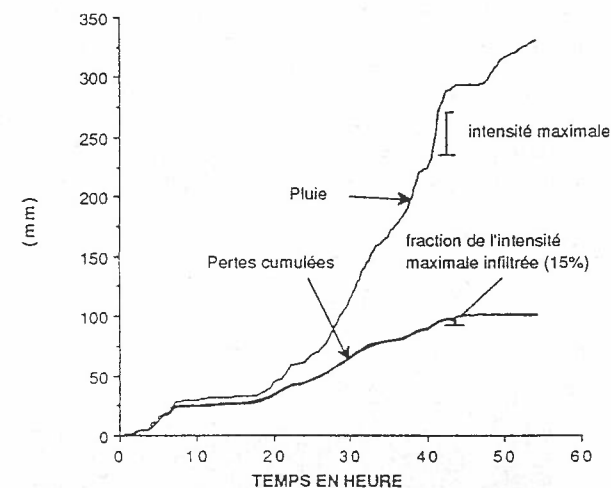


Fig. 16: Courbes cumulées des précipitations et des infiltrations pour l'événement du 24/25 août 1987 de la Witenwasserrennuss. On remarque que la quasi-totalité des précipitations s'infiltra au début de l'épisode pluvieux, alors qu'à la fin les possibilités de stockage du sol sont pratiquement épuisées.



Photo 3: Poschiavo, le pont de Cimavilla. Le ponceau a été obstrué par les matériaux charriés. La rivière déborda et chercha un nouveau chemin.



Photo 4: Poschiavo-La Rasiga. Une fois que la rivière a quitté son lit, le cheminement des eaux est imprévisible. Ici, l'eau coule sur la route et emprunte même le pont sur la rivière Poschiavino.



Photo 5: Val Viale dans la vallée de Poschiavo. La boue et les pierres des laves torrentielles se sont déposées en divers endroits sur le cône de déjection. Cela s'est produit ici entre deux ponts, où de toute évidence la totalité des matériaux a pu passer sous le premier pont.



Photo 6: Poschiavo, «La Piazza comunale» le lendemain. La lave torrentielle n'a pas atteint la localité (comme ce fut le cas à Münster); ici, les grandes quantités de matériaux ont été transportées dans la localité à la suite du débordement du Poschiavino.

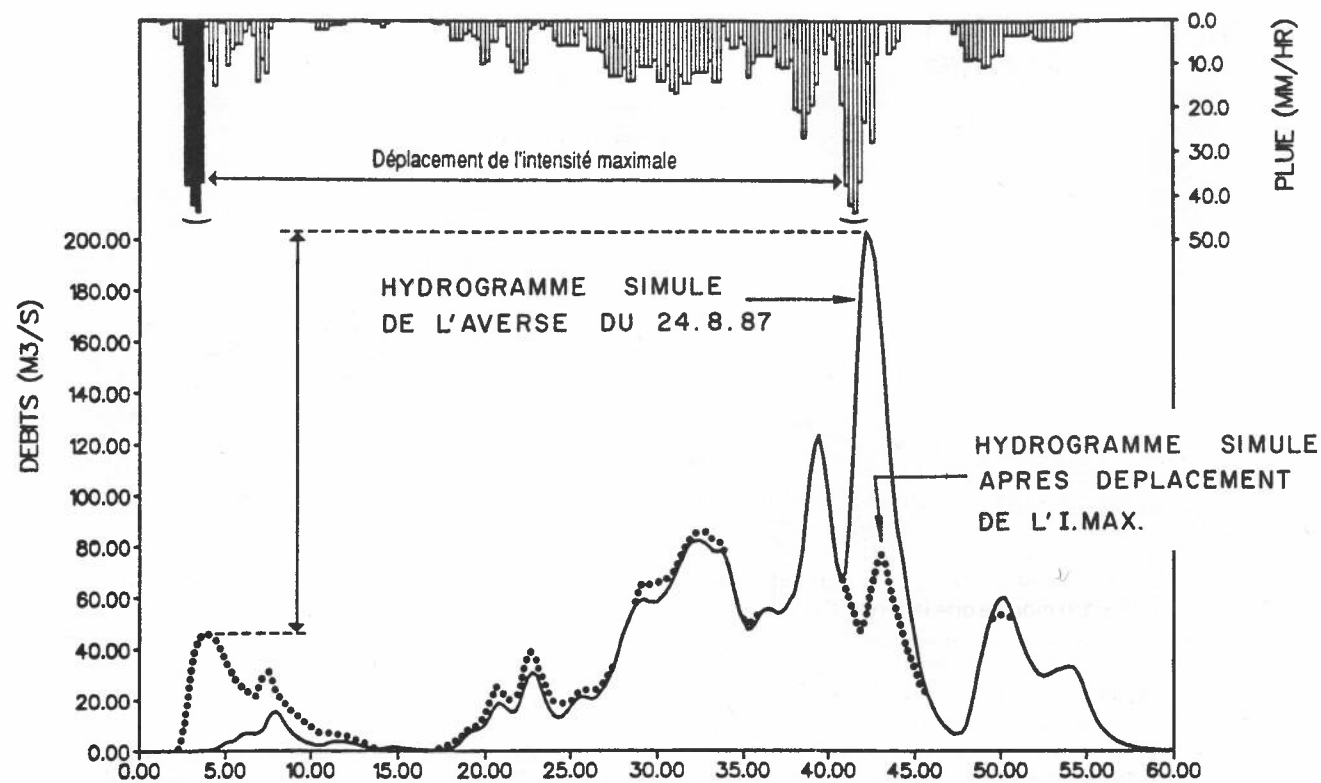


Fig. 17: Simulation de l'événement pluvieux du 24/25 août 1987 de la Witenwasserenreuss. Si l'intensité maximale était tombée au début de la période plutôt qu'à la fin, elle n'aurait produit qu'un débit de 50 m³/s, au lieu des 200 m³/s observés.

une partie des précipitations atteignait les cours d'eau. Quand la somme des précipitations a atteint 200 mm, la capacité de stockage a été dépassée et chaque mm supplémentaire de pluie s'est traduit par une augmentation des débits, suivant en cela la loi de la «goutte qui fait déborder le vase». Dans ces conditions, même la bonne capacité de rétention des sols de la vallée s'est trouvée dépassée. On remarque sur la fig. 16, que les 50 premiers mm de pluie n'ont provoqué qu'une légère augmentation du débit. Par la suite, les précipitations continuant, la quantité d'eau retenue par les sols diminue.

Si la plus forte intensité de précipitations avait été observée au début de l'épisode pluvieux et non pas à la fin, celles-ci n'auraient pas provoqué un débit de 200 m³/s mais de quelque 50 m³/s seulement (courbe pointillée de la figure 17).

La réaction rapide des petits bassins versants montagneux aux variations d'intensité des précipitations et l'importance des conditions météorologiques antérieures sont des notions bien connues. Leur aspect quantitatif est ici surprenant. Des pluies de 40 mm/h sont enregistrées en moyenne tous les deux ans au St-Gothard (tous les 20 ans à Airolo): qu'une telle intensité, somme toute assez fréquente, provoque une crue aussi brutale ne correspond pas aux modèles connus. Cela montre l'inadéquation des modèles paramétriques trop spécialisés en cas d'événements extrêmes. Seule la simultanéité des fortes intensités de pluie, de l'abondance des précipitations antérieures et des températures élevées a pu provoquer les débits exceptionnels des 24 et 25 août 1987. Même si aucun de ces 3 paramètres pris isolément ne peut être qualifié de rare, leur apparition simultanée, elle, est très rare.

La figure 17 montre que, suite à une intensité horaire de pluie de 10 à 20 mm/h, fréquente lors de précipitations régionales d'une certaine durée, le débit aurait atteint environ 80 à 110 m³/s. Il aurait donc été de 45 à 60% inférieur au maximum effectivement atteint. Si l'intensité de la pluie avait

été de 20 mm/h avant minuit au lieu de 40, le débit aurait été de 50 à 60% moins élevé, et ceci même si la quantité totale d'eau tombée était restée la même (fig. 18).

En bref: La grande quantité de pluie tombée sur le bassin de la Witenwasserenreuss a conduit à la saturation du sol. Avant que les précipitations ne cessent, leur intensité s'est élevée à 40 mm/h; toutes les capacités de stockage étant alors épuisées, ces pluies se sont presque immédiatement traduites par une augmentation équivalente des débits. Des précipitations caractérisées par un total élevé et par une répartition dans le temps très défavorable ainsi que par une isotherme de 0° à haute altitude, sont à l'origine des débits de pointe observés.

4.2.3 Les autres bassins versants

La description de la situation dans le bassin de la Witenwasserenreuss est valable pour toute la région du Gothard. L'altération des roches cristallines du massif produit des sols en général bien perméables, à faible teneur en argile et en silt. Leur capacité de rétention d'eau détermine la quantité de pluie qu'ils peuvent emmagasiner.

L'étude des sols du Val Bedretto a montré leur grande ressemblance avec ceux de la vallée de la Witenwasserenreuss. Le comportement des deux bassins est très semblable du point de vue hydrologique. La forêt de mélèzes et de sapins du Val Bedretto a formé une couche d'humus moins épaisse que celle que l'on trouve dans des forêts de sapins séculaires, comme par exemple celle qui protège Andermatt (Bannwald) dans le val d'Urseren. L'altitude étant moins élevée à Airolo qu'à Andermatt, l'évaporation y est un peu plus forte. Des simulations ont montré que des quantités importantes de pluie étaient nécessaires pour saturer le sol. Après la saturation, les débits de pointe augmentent brusquement si la pluie redouble, comme ce fut le cas en août.

Aucune simulation des écoulements dus aux pluies de juillet

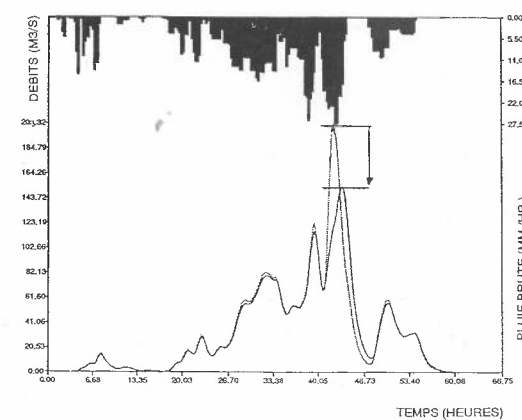


Fig. 18: Simulation de l'événement du 24/25 août de la Witenwasserenreuss. Si les 40 mm de précipitations tombés en une heure juste après minuit avaient été étalés sur deux heures, le débit de pointe aurait atteint 150 m³/s, au lieu de 200 m³/s.

n'a été effectuée. Le hyétogramme d'Hinterrein à pas de temps horaire (fig. 12) montre que la répartition des pluies y a été plus favorable qu'à Bedretto (fig. 13), ce qui explique pourquoi, même si la somme des précipitations fut plus grande à Hinterrein et les sols plus saturés (immédiatement après la fonte des neiges), peu de débits extrêmes aient été observés dans la vaste région touchée par ces pluies. Dans la région de Trun-Somvix, où des débits extrêmes ont été observés, il est possible que, comme dans le bassin de la Witenwasserenreuss, une pluie locale violente se soit produite, mais le réseau de stations pluviographiques n'est pas assez dense dans la région pour que cette hypothèse puisse être contrôlée.

On ne peut que faire des suppositions sur ce qui s'est passé dans le Val Blenio. Le flanc est de la vallée montre de nombreuses traces de coulées torrentielles et l'érosion due aux torrents y est très active. Le débit du Brenno à Loderio a atteint un record (fig. 15), dépassant largement celui enregistré en 1978 qui provoqua déjà de graves inondations. On peut supposer, comme on le constate généralement, que les précipitations ont été plus abondantes sur le versant ouest que sur le versant est. Or on observe peu de traces d'érosion sur les pentes ouest et aucune coulée torrentielle n'y est visible. Une inspection des torrents a permis de constater la présence d'une grande abondance de matériel meuble facile à mettre en mouvement, mais aucun signe de débits extrêmes n'a pu être mis en évidence. Faute de mesures de précipitations sur les deux versants de la vallée, toutes les hypothèses sont permises.

Quelques remarques s'imposent à propos de la crue de la Reuss à Seedorf. La situation dans les bassins situés à l'amont d'Andermatt et à Göscheneralp a été décrite plus haut. La crue extrême de la Reuss à Seedorf résulte de l'addition des débits élevés de ses affluents: bien qu'aucun d'entre eux n'ait été extrême, leur somme provoqua à Seedorf un débit supérieur d'environ 45% du record précédent (1917: 550 m³/s). Dans la plaine, des ruptures de digues permirent rapidement à l'eau de s'écouler hors du lit de la rivière (jusqu'à 400 m³/s), diminuant d'autant le volume d'eau mesuré à la station hydrométrique (où le débit de pointe passa de 800 m³/s à 735 m³/s). Les bassins d'accumulation de Göscheneralp et, dans une moindre mesure, celui de Lucendo ont contribué à réduire la crue de quelque 100 à 150 m³/s en retenant 7,3 millions de m³ d'eau.

En bref: Dans la région du St-Gothard, le déroulement des précipitations a été déterminant pour les crues des 24 et 25 août. Les données disponibles ne permettent pas une ana-

lyse aussi fine de cet événement que celle qui a été faite pour les crues de juillet. On peut cependant supposer que les mêmes processus ont joué. Des facteurs locaux peuvent aisément transformer un événement rare en un événement extrême.

4.2.4 Que se serait-il passé si...?

4.2.4.1 Que se serait-il passé s'il y avait eu une plus grande couverture sylvoicole sur les bassins versants?

Dans les hautes vallées des Alpes telles que celle d'Urseren, la surface de la forêt ne peut pas dépasser un modeste pourcentage de la surface totale, pour des raisons climatiques. En altitude, la quantité d'eau retenue par la végétation est faible, vu que la transpiration y est très réduite. Même si le boisement était maximal, seul 5 mm supplémentaires de pluie pourraient être retenus (la lame d'eau écoulee aurait passé de 132 mm à 127 mm lors de la crue d'août 1987). Dans le Val Bedretto, si la forêt couvrait 15% du bassin (contre 5% actuellement), ce qui est le maximum possible, l'écoulement aurait passé de 167 mm à 160 mm. A ces altitudes, la surface boisée étant restreinte, la forêt ne peut pas influencer notablement le processus de formation des crues. Toute discussion sur le dépérissement des forêts est donc superflue ici.

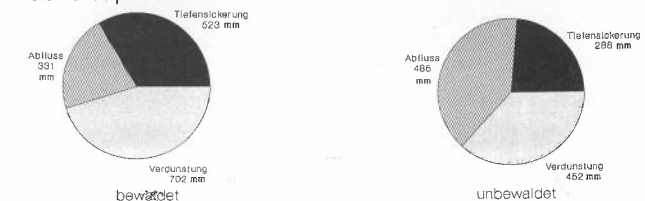


Fig. 19: Composantes du bilan hydrique moyen annuel (1978-1989) pour des surfaces boisées et non boisées dans la vallée du Biembach.

On peut s'attendre à ce que le rôle joué par la forêt dans les Préalpes et sur le Plateau soit plus important, c'est pourquoi une étude a été entreprise dans le bassin du Biembach (Emmental, BE). Le 1^{er} juillet 1987, un orage provoqua dans cette région une crue qui causa la mort d'une personne. Dans ce bassin situé à une altitude moyenne de 788 m, le bilan hydrique (fig. 19) est modifié de façon significative par l'évapotranspiration due à la forêt (702 mm) et aux prairies (452 mm). La pluie, l'évaporation et l'infiltration dans le sol déterminent l'évolution du déficit de saturation (fig. 20). Ce déficit exprime le volume des pores insaturés du sol. Plus il est grand, plus le sol peut emmagasiner d'eau. Le 1^{er} juillet, quelque 80 mm de pluie furent enregistrés, dont environ 60 mm entre 13 et 14 heures. Les calculs ont montré que les écoulements provenant des surfaces boisées représentaient 18 mm et ceux des prairies 21 mm. Si la même pluie était tombée après une période sèche, la forêt aurait pu retenir toute l'eau reçue; l'écoulement provenant des prairies n'aurait été que de 7 mm (en raison de la forte intensité des averses, pendant de courtes durées, il y aurait tout de même eu des écoulements, ce que le pas de temps utilisé sur cette figure ne peut pas mettre en évidence).

Dans tous les cas étudiés, la forêt produit des écoulements plus faibles que les prairies, mais le taux d'humidité du sol résultant des conditions ayant régné les jours précédents joue un rôle bien plus important que les différents types de végétation.

La perméabilité des sols aussi bien au Biembach que dans la vallée d'Urseren et le Val Bedretto est élevée. Les études ont par conséquent été étendues à un bassin versant présentant des sols peu perméables. Le bassin de l'Erlenbach (Alpthal, SZ), situé dans une zone de flysch, a été choisi. On



Photo 7: Les digues du Rhône ont été gravement menacées par les niveaux élevés, mais aussi par l'érosion du pied aval des talus à la suite des percolations.



Photo 8: L'inondation de la plaine uranaise par la Reuss. Ce qui a pu être évité de justesse sur le Rhône s'est produit dans le canton d'Uri: les digues se sont rompues.



Photo 9: La lave torrentielle de la Zarvagia a eu pour conséquence une surélévation du niveau de l'eau dans le Rhin, consécutive aux dépôts de matériaux. Le Rhin coula momentanément dans le tunnel des Chemins de fer rhétiques. Ces dégâts sont typiques des laves torrentielles qui atteignent le cours d'eau principal.



Photo 10: Les phénomènes de reflux ne sont pas seulement engendrés par des matériaux qui se déposent, mais aussi par des voutages obstrués. Les embâcles peuvent être provoquées par des bois ou par des matériaux charriés; on assiste la plupart du temps à une combinaison des deux.

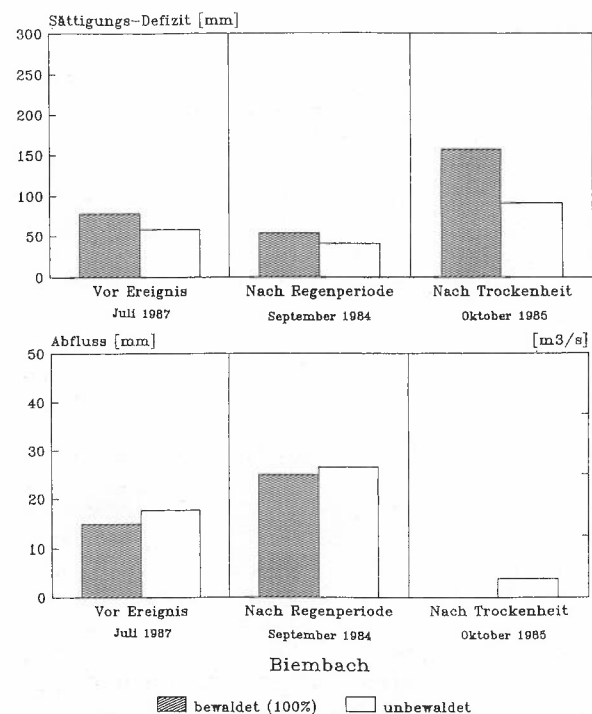


Fig. 20: Comparaison du déficit de saturation et du débit journalier pour l'événement du 1^{er} juillet 1987 dans la vallée du Biembach pour différentes conditions atmosphériques antérieures.

a supposé, pour les 4 bassins, les mêmes conditions antérieures et un total de précipitations de 267 mm en trois jours (comme dans la vallée d'Urseren en août 1987). Dans ces conditions, les trois premiers bassins cités retiennent environ 130 à 160 mm de pluie, le bassin de l'Erlenbach 40 mm seulement, malgré son taux de boisement important (fig. 21). Les écoulements élevés dans l'Erlenbach sont dus aux caractéristiques du sol, qui contrebalancent le rôle régulateur de la forêt. Comme les meilleurs sols sont en général cultivés et les endroits moins favorables à l'agriculture recouverts de forêts, il est difficile de prouver l'effet positif de la forêt dans ce cas, sur la base des observations effectuées. La relation écoulement – forêt n'est valable que si les autres paramètres (pluie, topographie, géologie du sous-sol, etc.) restent les mêmes.

Ce qui a été dit plus haut est valable pour le total des écoulements et repose sur des simulations à pas de temps de 24 heures. Des pas de temps plus courts doivent être utilisés pour l'étude des débits de pointe. Comme nous l'avons vu

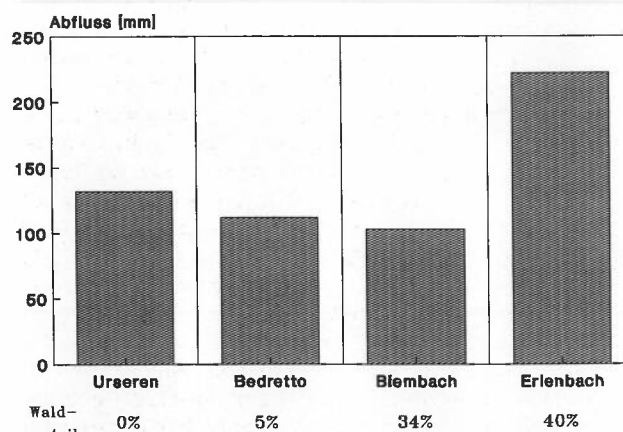


Fig. 21: Part d'une précipitation de 267 mm (correspondant à la pluie d'août 1987 dans la vallée d'Urseren) qui, dans les bassins versants étudiés, se serait écoulee en 3 jours vers les rivières.

dans le cas de la Witenwasserenreuss (chap. 4.2.2), en juillet, les plus fortes intensités de pluie ont été relevées à la fin de l'épisode pluvieux, au moment où tous les sols étaient saturés. Dans ces conditions, on ne peut pas s'attendre à ce que la forêt réduise les débits de pointe, comme l'ont montré les calculs effectués.

En bref: Dans les régions particulièrement touchées par les intempéries de 1987, situées à des altitudes élevées, seules de petites surfaces peuvent être boisées en raison du climat. Par conséquent, même si la forêt occupait toutes les surfaces où elle est susceptible de prospérer, les écoulements n'auraient pas diminué de façon appréciable. Moins l'altitude est élevée, plus l'influence de la forêt sur les écoulements devient prépondérante par rapport aux prairies. Le rôle des précipitations des jours précédant les crues et celui du substratum géologique donc du sol sont cependant beaucoup plus importants que celui de la végétation.

4.2.4.2 Que se serait-il passé si moins de surfaces avaient été rendues imperméables, moins de routes construites et moins de cours d'eau corrigés?

Dans les régions atteintes par les intempéries de juillet et août 1987, les surfaces profondément modifiées par l'homme sont si peu étendues que la question devrait plutôt être posée dans l'autre sens. On a donc cherché à savoir quelle serait l'augmentation des débits résultant de l'implantation d'un domaine skiable nouveau ou de tout autre genre d'aménagement touristique analogue. Il s'est avéré que des interventions de ce type n'avaient pratiquement aucun effet global sur des crues comme celles de 1987 car:

- de grandes surfaces des bassins versants sont déjà naturellement imperméables (rochers, glaciers), une augmentation des écoulements n'y est pas possible;
- une grande partie de la surface des bassins versants est inutilisable, les pentes étant trop fortes ou recouvertes d'éboulis. Les surfaces restantes, éventuellement aménagées par l'homme, ne peuvent pas avoir une influence notable sur les écoulements;
- les pentes abruptes n'ont, de par leur nature, qu'une faible capacité de rétention. Une accélération des écoulements n'y est possible que dans une très faible mesure;
- l'apparition de très fortes intensités de précipitations après une période prolongée de pluie (comme cela s'est produit en 1987) mène très rapidement au remplissage de tous les réservoirs naturels pouvant retenir l'eau.

Les influences anthropogènes sur le milieu naturel étant plus importantes sur le Plateau que dans les Alpes, une simulation des crues de la Petite Glâne (bassin de 43,3 km²) a été effectuée. Afin de pouvoir étudier en détail les conséquences de certains aménagements, le bassin a été divisé en 7 sous-bassins ayant des surfaces comprises entre 3,9 et 7,8 km². Les données relatives à l'épisode pluvieux des 25 et 26 septembre 1987 ont été utilisées (170 mm de pluie en 48 heures). Plusieurs types d'interventions dans le bassin ont été simulées: reboisement, déboisement, étanchéisation du sol, construction de routes, extension des surfaces bâties, améliorations foncières et corrections de rivières. L'augmentation des débits de pointe à l'exutoire du bassin, due à ces différentes interventions, n'a jamais dépassé 10%. Dans les sous-bassins, des pourcentages plus élevés ont été obtenus en introduisant des modifications très importantes affectant 30 à 50% de leur surface. L'intervention provoquant le plus grand effet est la modification de l'étanchéité du lit du cours d'eau (fig. 22). Les raisons de la faible réaction des

débits de pointe aux modifications simulées sont à rechercher dans la nature même des événements extrêmes. Une pluie extrême provoque dans tous les cas une crue. Pour qu'une augmentation significative des pointes de crue se produise, des modifications très importantes doivent intervenir dans le système d'écoulement. Il est à prévoir que les modifications apportées par l'homme auront un effet sensible sur les crues moyennes, plus fréquentes. Leur étude n'entre cependant pas dans le cadre du présent rapport. Les activités humaines semblent avoir eu peu, voire pas d'influence sur les crues extrêmes étudiées ici. Cette conclusion ne doit cependant pas faire penser que la grandeur ou la fréquence des crues ne soient pas influençables. Les processus déterminants peuvent être décrits comme suit:

- Pour remplir les réservoirs naturels, des pluies abondantes sont nécessaires; ces pluies sont rares;
- Il faut que des précipitations supplémentaires tombent sur un sol saturé pour que des crues importantes se produisent. Il est rare que ces deux conditions soient réunies;
- Si la capacité de stockage du bassin est diminuée artificiellement et de façon significative par déboisement, imperméabilisation de surfaces importantes ou corrections de cours d'eau, l'état de saturation est atteint plus rapidement et les précipitations contribuent plus vite aux crues. En conséquence, la fréquence des crues moyennes augmente. Etant donné que les intensités de pluie déterminantes sont indépendantes de l'état du sol, les valeurs absolues des débits de pointe ne doivent pas absolument devenir plus grandes. Reprenons la comparaison utilisée plus haut: la quantité d'eau qui s'écoule d'un récipient plein ne dépend pas de la grandeur du récipient, mais de la quantité d'eau qu'on lui fournit. L'apport d'eau détermine l'écoulement et la grandeur du récipient détermine le moment où cet écoulement peut commencer.

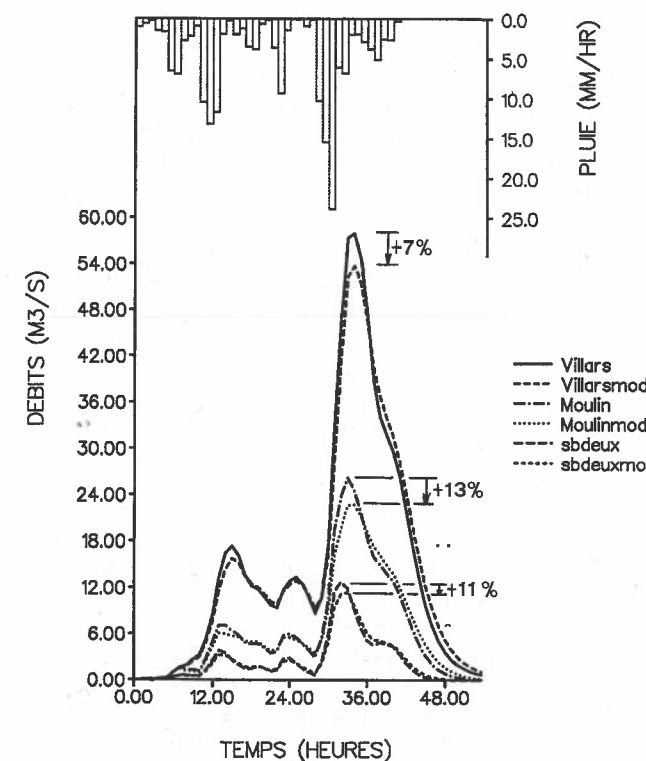


Fig. 22: Influence des corrections de cours d'eau, exécutées depuis le début du siècle à la Petite Glâne.

En bref: La formation des crues de 1987 a peu été influencée par les interventions de l'homme dans la nature, d'une part, parce que les régions touchées excluent toute intervention importante dans le régime des cours d'eau et d'autre part, parce que les précipitations se sont déroulées de façon tellement défavorable que les effets des activités humaines n'ont pu jouer qu'un rôle tout à fait insignifiant. Les interventions de l'homme conduisant à une diminution notable de la capacité de rétention peuvent cependant augmenter la fréquence des crues de moyenne importance.

4.2.4.3 Que se serait-il passé si les bassins d'accumulation des usines hydro-électriques avaient été pleins, ou s'ils n'avaient pas existés?

Le contenu effectif total de l'ensemble des lacs de barrages hydro-électriques dans le bassin du Rhin alpin (Alpenrhein) s'élève à environ 620 millions de m³. La figure 23 montre la variation type annuelle de la courbe de remplissage. La fonte des neiges retardée a eu pour conséquence, jusqu'au début juin 1987, un niveau d'eau légèrement en-dessous de la norme. Un rapide montée du niveau a fait suite aux précipitations et au début de la fonte des neiges, en juin. Quand les fortes précipitations sont entrées en jeu le 17 juillet 1987, les bassins d'accumulation ont pu, la plupart du temps, stocker l'ensemble des débits de leurs affluents. Globalement, environ 50 millions de m³ ont été ainsi retenus en 48 heures, ce qui correspond à un débit d'environ 300 m³/s. Sans ce stockage, le débit de pointe du Rhin à Diepoldsau (en amont du lac de Constance) aurait atteint près de 3000 m³/s au lieu des 2660 m³/s observés. De gros dégâts ont aussi pu être évités dans la Vallée de Vals et dans le Val Bregaglia grâce à cette forme de stockage. Le tableau 4 donne une vue d'ensemble de l'effet de rétention de quelques bassins.

Tableau 4: Effet de la rétention d'eau dans les retenues alpines du 17 au 19 juillet 1987

Barrages	Volumes retenus en mio de m ³	Réduction du débit en m ³ /s moyenne sur 48 h	Réduction possible des débits de pointe
Albigna	8,2	50	120
Orden	1,7	10	80
Lago Bianco	2,5	15	35
Livigno	8	45	
Marmorera	1	6	40
Valle di Lei/Sufers	17	100	
Santa Maria	6,4	35	80
Nalps	5,2	30	70
Zervreila	15	86	120

Les 24 et 25 août, des débits importants ont aussi pu être stockés par les barrages. Douze millions de m³ ont été retenus dans l'Oberhasli et le débit de pointe de l'Aar près de Brienzwiler a ainsi été réduit d'au moins 70 m³/s. Le rôle des barrages dans le bassin du Rhône a été d'une importance capitale. Dix millions de m³ ont pu être emmagasinés dans les lacs de Mattmark, de Gries et de la Dixence, ce qui correspond à une réduction moyenne du débit sur 48 heures de 60 m³/s. La réduction de la pointe doit avoir été de plus de 100 m³/s. Si on considère que le débit de pointe du Rhône près de Brigue se chiffrait à 490 m³/s et que le niveau de l'eau arrivait par endroit à seulement quelques décimètres de la crête des digues de protection contre les crues, il est facilement imaginable que, sans l'accumulation dans les ouvrages hydro-électriques, un débordement aurait eu lieu avec, comme suite probable, des inondations et même des ruptures de digues (photo 7). L'efficacité des bassins d'accumulation dans la vallée de la Reuss a été étudiée en détail. Les lacs du Lucendro et de

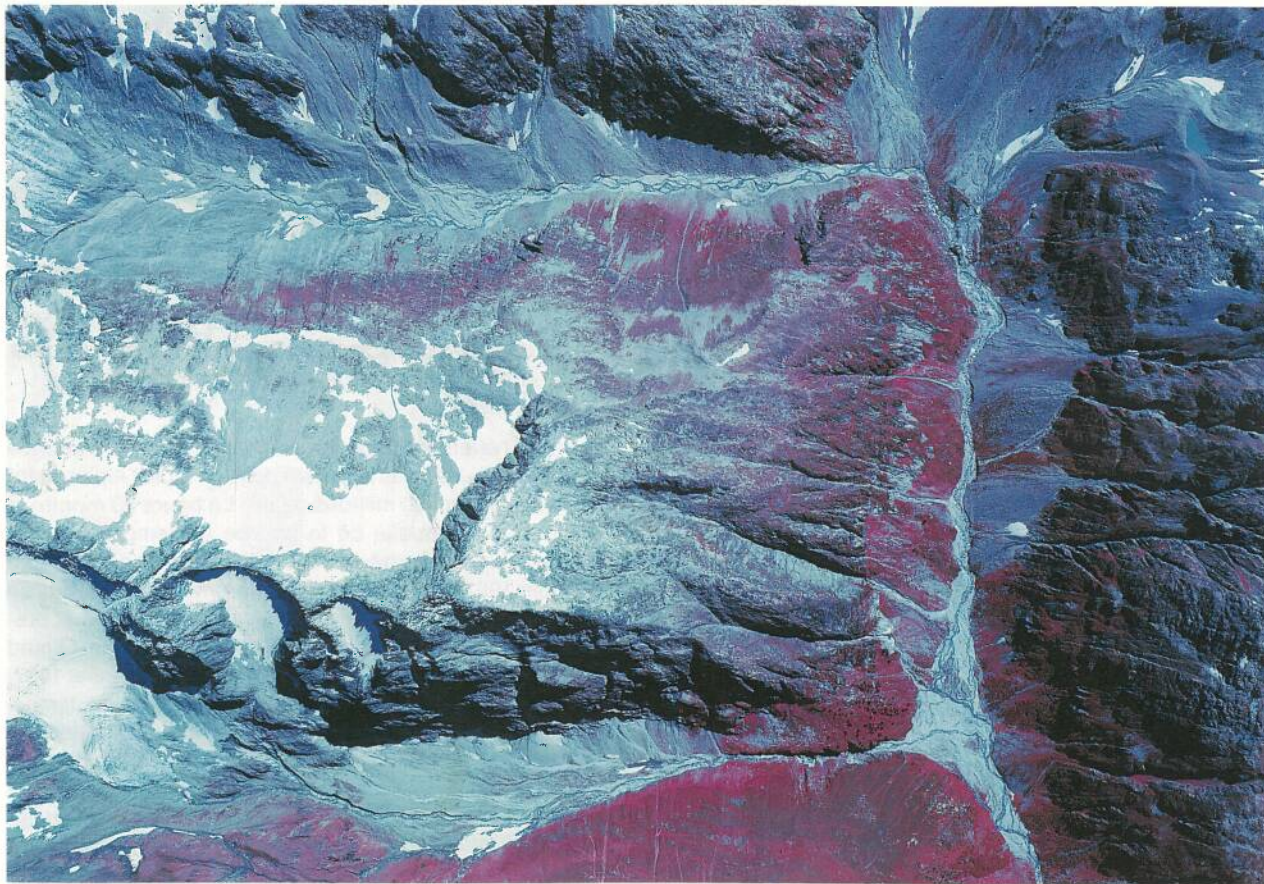


Photo 11: Partie du Gerental (Obergoms VS) d'après une photo infrarouge. On reconnaît les traces des coulées de boue et de pierres dans le fond du Gerental ainsi que dans le Saastal, petite vallée latérale.

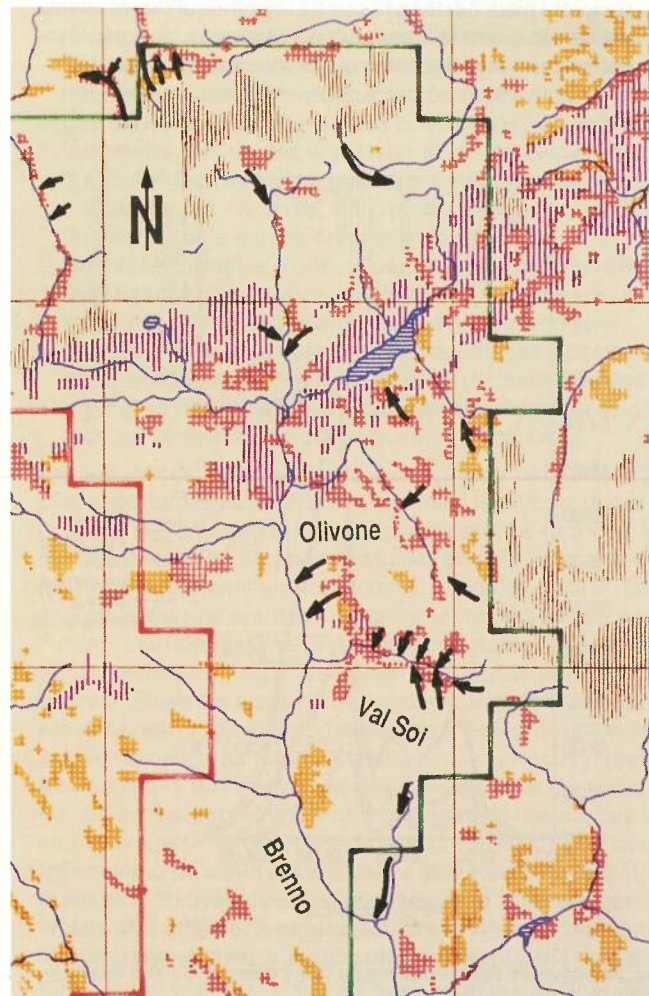


Photo 12: Carte couleur résultant de l'analyse de la banque de données; elle fut tracée par recoupement des régions à pentes variant entre 26° et 45° avec différentes unités géotechniques. La section montre le Val Blenio dans les environs d'Olivone.

Explication des signes:

Flèche noire = lave torrentielle des 18/19 juillet 1987

Démarcation des intensités de précipitations: à l'ouest de la ligne verte: > 25 mm/3 h à l'ouest de la ligne rouge: > 35 mm/3 h

Hachures: bleu = cours d'eaux;

noir = glaciers;

orange = moraines;

rouge = éboulis/débris de rochers/argiles de désagrégation (matériaux meubles);

violet = phyllites/ schistes (rochers).



Photo 13: Zone de rupture de la coulée de boue et de pierres de la Varunash (de type couloir). On reconnaît sur le bord de l'image les traces d'anciennes coulées. Le phénomène de liquéfaction est fréquent, mais la quantité de matériaux déplacés en 1987 est exceptionnelle. Le déclenchement s'est produit dans la partie supérieure de la zone d'éboulis.



Photo 14: Zone d'arrachement de la coulée torrentielle dans la Witenwas-serenreuss (de type conchoïdal). A la différence de la figure 13, le déclenchement est supposé avoir débuté à l'extrémité inférieure de la zone d'éboulis. Des ruptures subséquentes ont mis en mouvement d'importantes masses.



Photo 15: La lave torrentielle de Münster. Cette lave est l'une des rares à ne pas avoir d'antécédent historique.

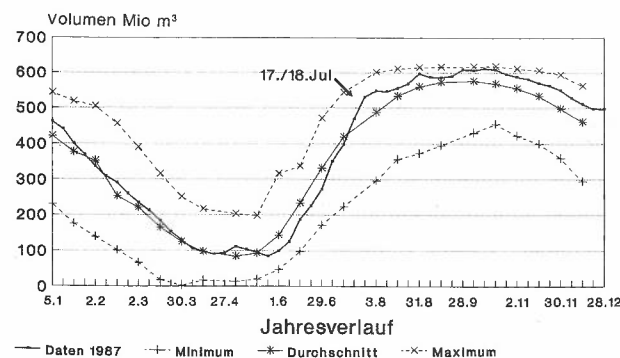


Fig. 23: Evolution du remplissage des barrages alpins dans le bassin du Rhin. Sont indiquées la courbe moyenne de remplissage et les courbes extrêmes pour la période 1971-1989, de même que les valeurs hebdomadaires de l'année 1987. Le volume de l'ensemble des réservoirs en amont de Coire est représenté en ordonnée.

Göschener Alp ont retenu ensemble 7,3 millions de m^3 , ce qui représente une moyenne horaire sur 48 heures de $42 m^3/s$. Sur la base des indices connus et d'un calcul hydrodynamique, il a été démontré que sans la retenue, le débit de pointe à l'aval de Göschener Alp aurait été de 100 à $150 m^3/s$ supérieur. Si l'on considère que le viaduc de l'autoroute près de Wassen a évité de justesse l'effondrement, le débit aurait pu, sans l'effet de rétention par les barrages, conduire à une interruption du trafic routier de plusieurs

années sur la route nationale et à un isolement momentané complet de la Vallée d'Urseren.

Mais il faut savoir que l'effet d'un barrage est fortement dépendant du taux de remplissage de sa retenue. Des crues précoces en juin ou juillet rencontreront certainement des bassins vides qui pourront stocker les excédents d'eau. En septembre et octobre, le volume libre est faible, car un maximum d'énergie doit être accumulée pour l'hiver. Dans les hautes Alpes, les crues extrêmes arrivent en général plutôt en début d'automne qu'en début d'été. Cependant, même des bassins pleins contribuent à diminuer le débit de pointe à court terme, car un certain volume peut tout de même être retenu sur une courte durée (quelques heures). L'influence de cette rétention à court terme disparaît pourtant si le tronçon d'écoulement est long.

En bref: La rétention d'eau dans les bassins des ouvrages hydro-électriques a contribué d'une façon décisive à la diminution du débit de pointe et a évité des dégâts encore plus grands, aussi bien pendant l'événement de juillet que pendant celui d'août 1987. Cet effet de protection peut être important au printemps et en été, mais il diminue vers la fin de l'automne, à cause du taux de remplissage élevé des retenues, pour autant qu'on ne préserve pas spécialement un certain volume à la protection contre les crues.



Fig. 24: Emplacement des coulées torrentielles au Lukmanier (événement de juillet) et dans la région du Gothard (événement d'août). Les flèches représentent de grandes coulées ou un certain nombre de coulées plus petites. Il convient de remarquer que les coulées sont très fréquentes dans quelques vallées, alors que des bassins versants voisins n'ont pratiquement pas été touchés.

4.3 Les causes de l'entraînement des matériaux

4.3.1 Les laves torrentielles

4.3.1.1 Généralités

Les coulées de lave torrentielle – appelées aussi coulées de boue et de pierres ou coulées torrentielles – sont connues en Suisse alémanique sous le nom de Murgang ou Rüfen et sont, en quelque sorte, des avalanches de boue et de pierres. Elles sont constituées d'un mélange de sable, de cailloux et d'eau. La proportion de matériaux solides varie entre 30 et 60%. Il n'en existe pas de définition plus précise. A l'image des avalanches, les coulées de lave torrentielle sont un phénomène typique des pentes raides. De même que les plaques de neige se détachent en hiver, les laves torrentielles forment chaque été des coulées plus ou moins importantes le long des pentes d'éboulis dans les Alpes. Tout comme les grandes avalanches, les coulées de lave torrentielle importantes ne se produisent que rarement et presque toujours dans les mêmes régions. Les intempéries de 1987 ont été marquées par un grand nombre de ces coulées. Ce phénomène d'habitude isolé a pu être étudié à grande échelle par les méthodes statistiques. La figure 24 montre les régions où les coulées de lave ont été les plus fréquentes en 1987. On note que la Suisse orientale (Rhin et Val Blenio) a été atteinte par les événements de juillet et la région du Gothard par ceux d'août.

La distinction entre coulée de lave torrentielle et charriage lors des crues est difficile à faire, car en règle générale les deux phénomènes apparaissent en alternance. On a pu ainsi observer le plus souvent plusieurs coulées de lave torrentielle entre lesquelles les atterrissements étaient déplacés par le débit important. Les traits communs aux coulées de lave sont:

- une proportion de matériaux solides exceptionnellement élevée et des dépôts en forme de bourrelets comportant de grands blocs tant sur les côtés que sur le front de la coulée (Murkopf);
- une croissance extrêmement rapide du débit, parfois même avec la formation d'une sorte de mascaret;
- des débits de pointe très élevés qui peuvent de beaucoup dépasser les débits des crues.

Les valeurs limites typiques suivantes ont été mises en évidence suite à l'analyse des événements:

vitesse d'écoulement	2-15 m/s (55 km/h)
profondeur de l'écoulement	1-6 m
débit maximal	10-900 m^3/s
volume des matériaux solides	100-200 000 m^3
profondeur maximale de l'érosion	17 m (Plaunca)
capacité maximale d'érosion	650 m^3/m (Varunash)
chemin parcouru par la coulée de lave	100-800 m (mesuré au cône de déjection lors d'événements ayant déposé plus de 1000 m^3)
durée du phénomène	de quelques secondes à quelques minutes

La formation de coulées de lave torrentielle est liée à la conjonction de matériaux meubles, d'eau et de pentes raides. L'altération produit continuellement le dépôt de nouveaux matériaux sur les éboulis, les moraines frontales et le long des cours d'eau. Les pentes qui se forment sont à la limite de la stabilité naturelle. De telles sources de matériaux sont nombreuses dans les Alpes. Selon la source, on distingue deux cas principaux de formation de coulées:

4.3.1.2 Coulées de lave torrentielle provenant d'éboulis

Lorsqu'une pente d'éboulis à la limite de la stabilité se sature, elle peut se liquéfier et un mélange d'eau et de matériaux solides peut se mettre brusquement en mouvement. Pour atteindre cet état limite, un volume et une intensité de précipitation élevés sont nécessaires. Ces deux caractéristiques – volume et intensité – dépendent des propriétés des matériaux. Les éboulis, d'où les coulées torrentielles se sont détachées, présentaient une faible proportion de limon, mais beaucoup de sable. La pente des zones d'arrachement se situait entre 50 et 80% (fig. 25). Aucun horizon aquifère n'a pu être mis en évidence dans la zone de rupture, abstraction faite de quelques lentilles de permafrost. Il est cependant tout à fait probable que des variations locales, de l'ordre du mètre ou du décimètre, aient pu conduire à une accumulation temporaire d'eau. Il en est résulté une saturation des couches superficielles, créant des conditions favorables au déclenchement de la coulée torrentielle.

Lors des événements de juillet, la fonte des neiges a assuré l'humidification de la masse d'éboulis. En analysant le volume et l'intensité des précipitations, on constate que les coulées torrentielles ne sont survenues que dans les régions où une hauteur de pluie totale de 120 à 170 mm et une intensité de 25 à 35 mm/h ont été dépassées (photo 12). Une corrélation entre le déclenchement de la coulée et une intensité critique ou même la hauteur des précipitations antérieures n'a pas pu être établie.

Pendant les événements d'août (région du Gothard), la hauteur des précipitations a atteint 150 à 300 mm. Les coulées se sont produites à la fin de l'épisode pluvieux – d'une durée de 40 heures – alors que l'intensité des précipitations s'élevait à 40 mm/h et ceci pendant une heure. Le fait que des précipitations plus élevées aient été nécessaires au déclenchement des coulées de lave du mois d'août peut s'expliquer par la période sèche précédant l'événement.

L'observation de nombreux sillons dans la plupart des zones d'éboulis, sillons formés par de petites coulées qui ne sortent pratiquement pas de ces zones, montre que les conditions de saturation, suivies de liquéfaction, sont atteintes assez souvent. De grandes coulées de lave torrentielle ne se forment que si un volume important de précipitations peut saturer une couche épaisse d'éboulis. Le volume de pluie semble donc s'avérer plus important que l'intensité en tant que facteur de déclenchement.

Deux formes de ruptures ont pu être mises en évidence:

- Les ruptures en forme de couloir, fréquentes au pied d'une paroi rocheuse (photo 13), d'un volume initial re-

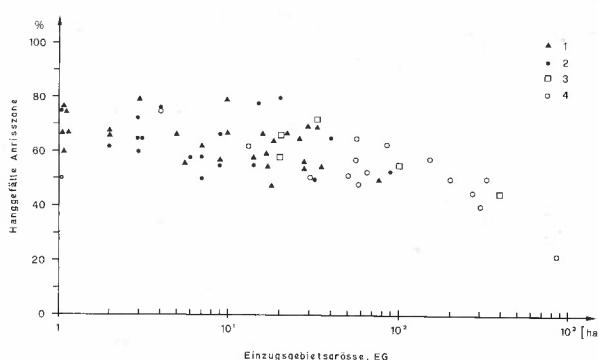


Fig. 25: Etendue des bassins versants et pentes des zones de rupture. Si on considère les laves partant du lit même des rivières (symboles creux), on constate que si la surface du bassin versant augmente (le débit devenant plus important) la pente à l'endroit du décrochement de la lave devient plus faible. Pour les laves dans des zones d'éboulis (symboles pleins), on ne remarque qu'une faible tendance de cet ordre.

Photo 16: La Reuss à Göschenen. L'élargissement du lit à plus du double de son ancien profil a provoqué de nombreux éboulements de berges et entraîné un apport important de matériaux dans le lit de la Reuss. Cet élargissement et les matériaux emportés ont créé des méandres provoquant une concentration de l'érosion sur l'extérieur des courbes.



Photo 17: Erosion latérale de la rive de la Reuss à Gurnellen. On a tendance à considérer comme équivalents les dangers liés aux crues et ceux dus aux inondations. La cure de Gurnellen s'est effondrée dans la rivière à cause de l'affouillement de ses fondations.



lativement faible et avec la formation de bourrelets sur les côtés. La saturation relativement uniforme de la couche supérieure devrait en être l'origine. Le déclenchement dépend de facteurs locaux.

- Des ruptures conchoïdales avec un volume initial important (photo 14). Des discontinuités plus profondes conduisant à la formation d'une accumulation souterraine et ensuite à une niche d'arrachement de plusieurs mètres de hauteur pourraient en être la cause. Des lentilles de permafrost, ayant fonctionné comme aquiclude et ayant pu retenir l'eau souterraine, ont été observées dans quelques cas (Witenwasserrenreuss, Gerental).

4.3.1.3 Coulées de lave torrentielle ayant leur origine dans le lit des cours d'eau

La chasse d'atterrissements importants (Zavruggia, Plaunca, Rabiusa, ruisseaux latéraux de l'Urserental) ou la purge de couloirs rocheux encombrés de dépôts (Münster, Saastal, Val Plattas, Cambrena) ont été la cause de nombreuses coulées de lave torrentielle. Les coulées issues de cours d'eau ont été souvent très liquides, puisque l'apport d'eau est assuré non seulement par les précipitations mais aussi par l'écoulement provenant du bassin versant amont (photo 2). Plus il y a d'eau, moins la pente nécessaire au déclenchement doit être marquée. La figure 25 montre que la pente dans la zone de rupture diminue avec l'augmentation de la taille du bassin versant; la plus petite déclivité observée a été de 23 %. La pente globale dépend également de la grandeur du bassin versant (fig. 26).

Une estimation des conditions de déclenchement est encore plus difficile à effectuer que dans le cas des coulées provenant des éboulis, à cause de la forte variabilité des propriétés des matériaux meubles et de la quantité d'eau. Il n'est pas rare qu'un blocage de l'écoulement de courte durée, par un glissement de terrain latéral ou une coulée torrentielle, s'avère être l'élément déclencheur. Plus fréquemment, l'érosion massive du fond du lit (Plaunca, Sinzera) provoque un glissement des rives et ainsi un apport abondant de matériaux.

Des cas particuliers doivent également être pris en considération pour l'appréciation du risque de coulée. Au Minstigerbach par exemple, la déviation de l'eau s'écoulant du glacier dans un couloir rocheux, normalement à sec, a provoqué une coulée torrentielle.

Les deux événements les plus importants du point de vue des volumes en jeu, celui du val Plaunca et celui de la Varunasch, ne se sont pas produits dans des matériaux meubles, mais dans des affleurements rocheux très friables et affaissés. Dans les deux cas, le volume initial de matériaux meubles était relativement faible. L'accroissement du volume charrié a été dû à une forte érosion du fond du lit dans

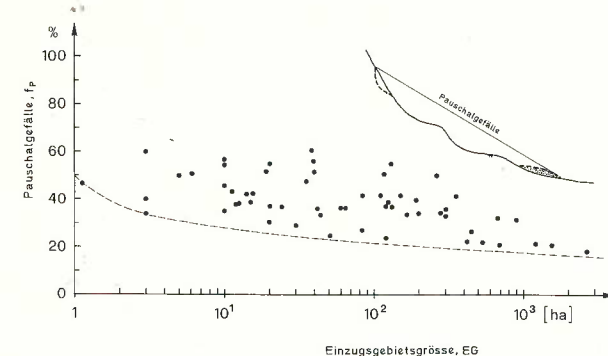


Fig. 26: Pente globale en fonction de l'étendue du bassin versant dans les cônes d'éboulis. La pente globale correspond à la pente entre le point de décrochement le plus haut et le point de dépôt le plus bas.

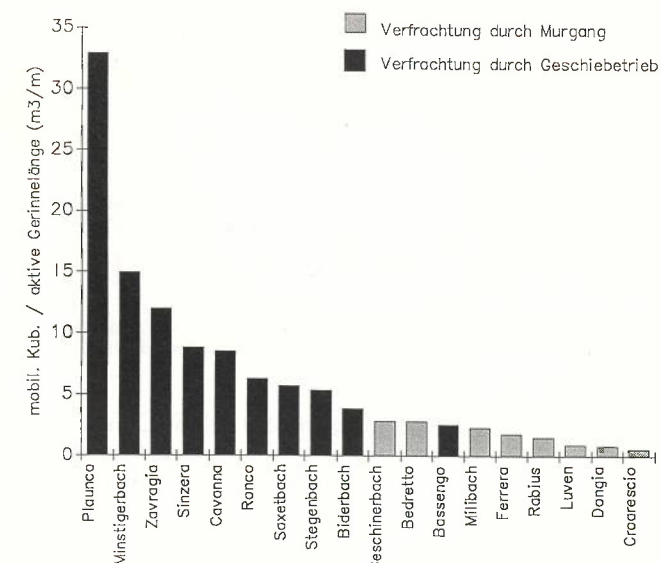


Fig. 27: Nature des principaux transports solides dans les torrents étudiés.

le tronçon en forme de gorge. L'estimation du risque de coulées de lave torrentielle ne doit donc pas être seulement basée sur les conditions de déclenchement dans la partie amont du bassin, mais avant tout sur les possibilités d'érosion dans la gorge en aval.

En bref: Les nombreux dépôts de matériaux de charriage dans les hautes Alpes ont été saturés superficiellement par des précipitations importantes. Un mélange de matériaux solides et d'eau s'est mis tout à coup en mouvement dans les endroits où la limite d'équilibre a été dépassée. L'érosion le long du cours d'eau a encore fourni des matériaux à la coulée. A l'exception du Minstigerbach et de la Plaunca, des événements analogues ont déjà été observés dans toutes les régions touchées. Comme souvent plusieurs décennies s'écoulent entre les grands événements atteignant le fond des vallées, l'homme est à chaque fois surpris par ces phénomènes entraînant des dégâts exceptionnels.

4.3.2 Formes d'érosion dans les bassins versants

4.3.2.1 Erosion de surface

Les intempéries de 1977 dans le Schächental et celles de 1990 au Gantrisch ont provoqué dans certaines zones un déchirement de la couverture végétale et de nombreux petits glissements de terrain. Il est surprenant de constater que lors des événements de 1987 ces phénomènes ne se sont pas produits, malgré l'ampleur de la surface touchée. Un relevé détaillé du Val Bedretto a indiqué que les zones d'érosion actives se limitaient le plus souvent à des surfaces découvertes qui existaient depuis des années déjà. La raison de la stabilité des rives réside très vraisemblablement dans la perméabilité élevée des sols formés sur les roches cristallines des Alpes centrales.

4.3.2.2 Erosion dans les torrents

Les plus importants déplacements de matériaux solides dans les torrents se sont produits sous forme de coulées torrentielles. Rapportés à la longueur active d'écoulement, les transports des matériaux par le courant sont comparativement plus petits (fig. 27). Cette constatation doit cependant être limitée à certains torrents puisque le transport fluvial a déplacé des volumes considérables dans les grands bassins versants. Les atterrissements dans la plaine de la Reuss en aval d'Amsteg et dans le lac d'Uri sont de l'ordre de 700 000 à 1 000 000 m³. Dans le bassin d'accumulation

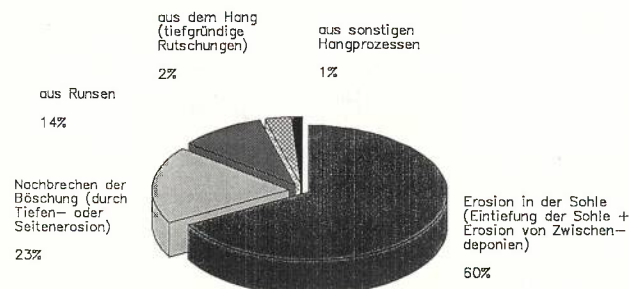


Fig. 28: Origine et nature des matériaux mis en mouvement, pondérés par le volume charrié de chaque torrent lors des intempéries de 1987 (sans Plaunca).

de Solis (Hinterrhein), ils atteignent 250 000 m³. Les coulées dans les différents torrents prennent surtout de l'importance par la quantité extrême de matériaux qu'elles entraînent et déversent ensuite çà et là dans le cours d'eau principal. Le relevé détaillé des sources de matériaux charriés par les différents torrents montre que ceux-là étaient composés pour 83 % de produits de l'érosion du fond du lit ou des talus (fig. 28). L'apport des ravines et d'autres phénomènes de surface n'a pas joué un rôle essentiel. Pour les torrents traversant des dépôts anciens (moraines, anciens dépôts fluviaux), cette observation correspond au modèle usuel qui veut que les dépôts anciens soient érodés principalement pendant les événements extrêmes. Pour les torrents traversant des dépôts récents où l'apport de matériaux est assuré par une altération lente, on s'attendait à une plus grande contribution des pentes latérales et des innombrables petites ravines dans lesquelles l'altération, en tant que phénomène de surface, se produit principalement. Une sous-estimation de cet apport n'est pas exclue, car l'érosion diffuse est difficilement cartographiable.

Un à deux ans après l'événement, il a été surprenant de trouver dans les torrents traversant des dépôts récents une quantité de matériaux de charriage égale à celle érodée au cours des crues de 1987 (fig. 29). Ceci contredit – tout au moins à première vue – la théorie usuelle du «Jackpot» qui veut que les lits se remplissent lentement d'éboulis au fil des ans, entre deux crues, et soient purgés périodiquement plus ou moins complètement en fonction de la quantité de matériaux et de l'importance de la crue. Suivant cette représentation, les torrents, tout au moins ceux traversant des dépôts récents, auraient dû être débarrassés des atterrissements, ce qui n'a pas été le cas. Cela signifie que le danger potentiel n'a pas été réduit de façon significative même

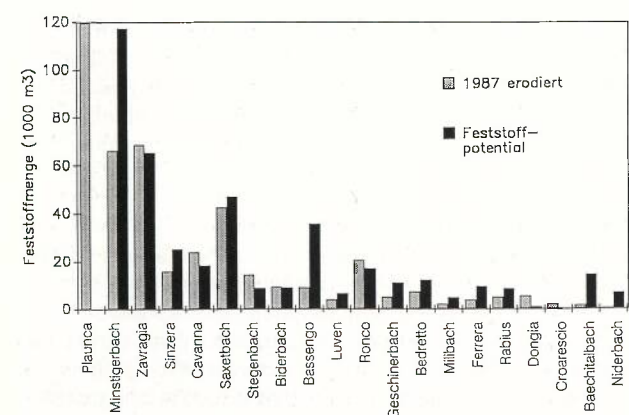


Fig. 29: Les érosions en 1987 (barres pointillées) et les matériaux solides (barres noires) encore présents dans les cours d'eau après les crues. Un événement semblable pourrait se reproduire demain déjà dans la plupart des vallées.

temporairement, malgré un important charriage. La contradiction apparente, entre l'apport lent de matériaux, leur transport par phases et les atterrissements demeurant malgré tout, se dissipe si l'on ne considère pas le torrent dans son ensemble, mais par tronçons. Il a été montré en effet que 30 à 70 % (dans des cas extrêmes de 0 à 100 %, fig. 30) du volume charrié n'atteignent pas le cône de déjection, mais se déposent le long de tronçons en pente faible. Ces masses déplacées sur de courtes distances peuvent à nouveau être mises en mouvement lors d'une prochaine crue. L'importance de l'érosion du lit et des berges ne doit donc pas être expliquée par la formation de matériaux de charriage nouveaux, même pour les torrents traversant des dépôts récents, mais résulte plutôt de multiples déplacements des atterrissements.

En bref: Les plus grands transports de matériaux ont été l'œuvre des coulées de lave torrentielle. Le charriage dans les torrents est dû pour plus de 80 % à l'érosion en profondeur du lit et aux ruptures de berges qui s'ensuivent. L'érosion a déplacé des volumes importants, mais les torrents n'ont pas été purgés complètement en règle générale, si bien qu'un risque considérable subsiste même après les crues de 1987.

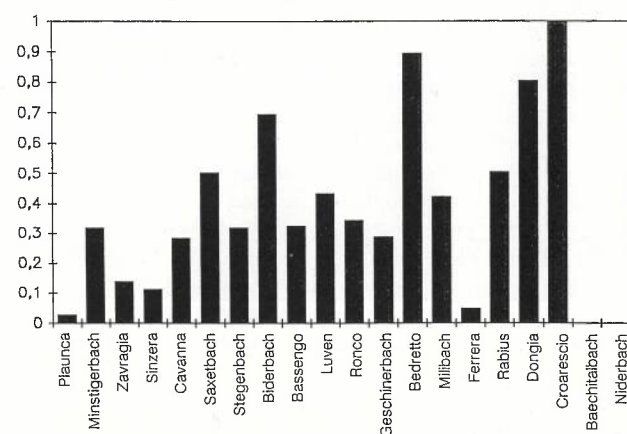


Fig. 30: Proportion des matériaux solides accumulés dans la partie supérieure du cône de déjection par rapport au volume total de matériaux mis en mouvement.

4.3.3 Morphologie des cours d'eau

La capacité de charriage d'un cours d'eau dépend du débit, de la pente et de la géométrie du lit. Le fond du lit des torrents de montagne à forte pente est souvent pavé de blocs abandonnés par les crues antérieures et peut rester stable pendant des décennies. Si lors d'une crue exceptionnelle le débit dépasse les valeurs historiques, le lit peut se remettre en mouvement. Le cours d'eau augmente alors sa largeur active et tend à former des méandres. Ce phénomène est illustré de manière frappante par la Reuss entre Göschenen et Amsteg (photo 16).

Les modifications du lit dépendent de la relation entre l'apport de matériaux et la capacité de charriage. Si localement une importante quantité de matériaux est amenée dans un cours d'eau par une coulée de lave par exemple, la capacité de charriage s'en trouve dépassée. Un barrage se forme, suivi de débordements et d'un écoulement non contrôlé. Un tel phénomène s'est produit à Poschiavo (photo 3) où la coulée de lave de la Varunasch a déversé tant de matériaux dans le Poschiavino que celui-ci a débordé au pont de Cimavilla et s'est écoulé à travers Poschiavo, bien que du point de vue hydraulique la capacité du lit eut été suffisante. Si l'apport en matériaux est insuffisant, l'eau érode le fond

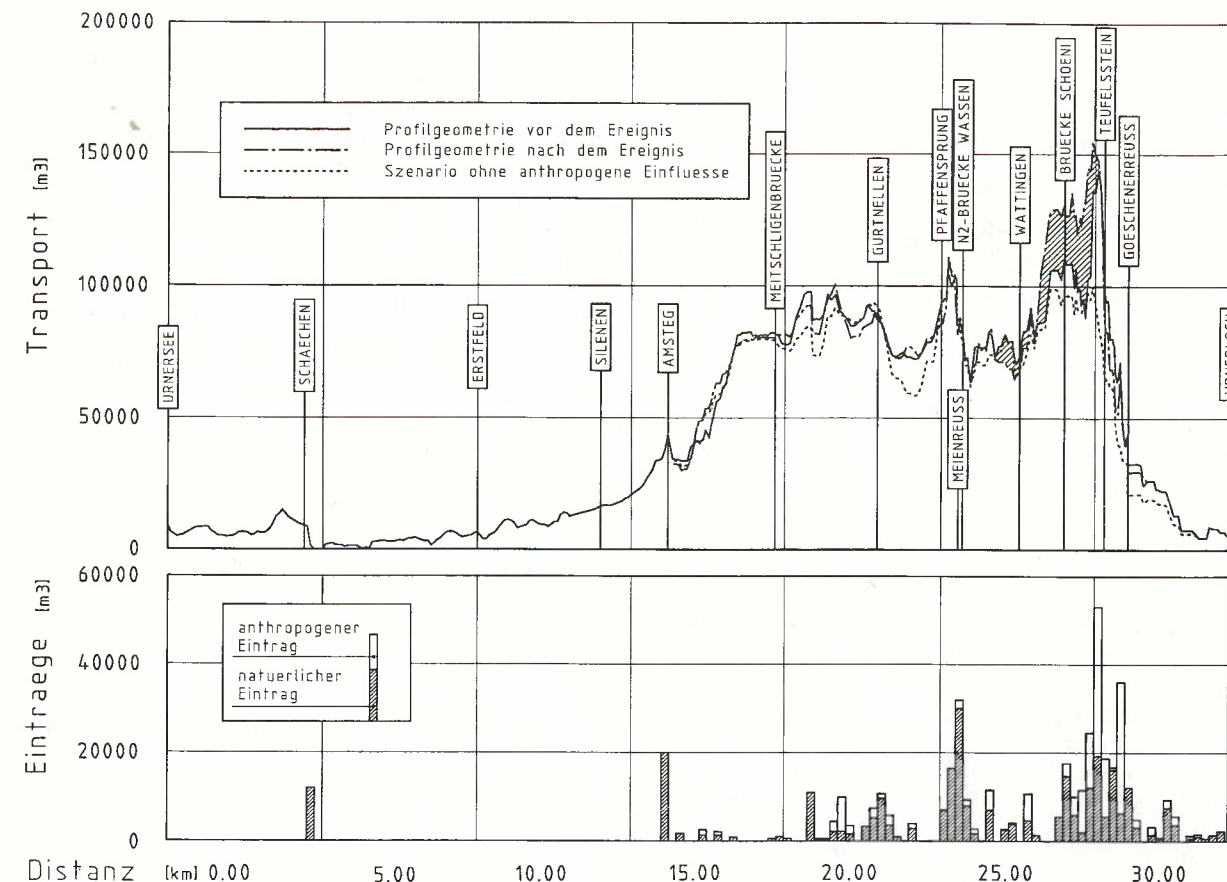


Fig. 31: Diagramme du charriage dans la Reuss entre Urnerloch et Seedorf pour la période du 24 août à 1h au 25 août à 6h30. Les volumes provenant de l'érosion des talus de routes et de la ligne ferroviaire ont été considérés comme étant d'origine anthropique.

du lit et les berges. L'érosion des berges est elle-même particulièrement dangereuse si le cours d'eau, par modification ou rectification de son tracé, ne peut méandrer. L'érosion des talus de l'autoroute près de Göschenen doit être attribuée à ce phénomène. De ce fait 150 000 m³ de matériaux ont été apportés localement, entraînant un dépassement massif de la capacité de charriage et donc la formation immédiate de dépôts. Comme la géométrie du lit le long du profil longitudinal varie constamment, érosion et dépôts alternent sans cesse (fig. 31).

Ce déplacement de matériaux est cependant un phénomène lent. Des estimations effectuées pour la Reuss entre l'Urnerloch et Amsteg ont montré que sur un volume total d'environ 400 000 m³ d'atterrissements (matériaux de diamètre supérieur à 5 mm), seuls 10 % ont quitté ce tronçon lorsque le débit était le plus élevé, soit en l'espace de 30 heures. La quantité de matériaux transportés dans la plaine de la Reuss est pratiquement indépendante du volume total, aussi longtemps que l'apport dépasse la capacité de charriage de la Reuss dans la zone d'Amsteg. Cela signifie que même lorsque le volume des matériaux disponibles dans la Reuss a passé de 255 000 à 406 000 m³ par suite de l'érosion des talus des routes et du chemin de fer, le charriage dans la plaine de la Reuss n'a pas augmenté.

Comme cependant 25 à 45 % des matériaux érodés ont une taille inférieure à 5 mm et en tant que matière en suspension ne se déposent que rarement, le volume total érodé revêt une importance déterminante pour les dépôts de sable et de limon. Ramené à une densité comparable à celle des sédiments compactés naturellement, le volume des atterrissements dans la plaine de la Reuss, le delta et le lac devrait être de l'ordre de 700 000 à 1 000 000 m³.

Des phénomènes identiques à ceux de la Reuss ont été observés dans d'autres cours d'eau, comme par exemple le Poschiavino, l'Inn, le Brenno et la Rovana.

En bref: Les débits exceptionnels ont transformé profondément les lits des torrents. En ce qui concerne le charriage, il s'agissait surtout de déplacements sur des distances relativement courtes. Le volume des matières en suspension déposées dans les lacs et fonds de vallées inondés a été considérable.

4.4 Les causes des dégâts

4.4.1 Risques de dégâts

Les crues font partie de l'écosystème; elles ont contribué et contribuent encore de façon substantielle au modelage du paysage. Elles n'engendrent des dommages que quand elles entrent en contact avec l'espace utilisé par l'homme. Généralement, nous prenons conscience de ce phénomène que lorsqu'il provoque des dégâts, nous assimilons donc souvent – de façon erronée – grandeur et fréquence des dommages avec grandeur et fréquence des crues. Une différence rigoureuse doit être observée entre les causes des crues, leurs processus géomorphologiques et les causes des dommages.

Les crues se développent, comme décrit dans les chapitres 4.1 à 4.3, à la suite de précipitations tombant sur un relief donné qui est caractérisé par une capacité d'absorption bien déterminée. L'occupation du sol et les dégâts qui en découlent sont concentrés au fond des vallées. Des surfaces ont été rendues étanches par la construction d'habitations, de routes et de voies ferroviaires. Ces emprises cons-

Tableau 5: Dommages dus aux crues de 1987 (5 cantons et toute la Suisse).

	Uri	Tessin	Valais	Grisons	St-Gall	Suisse
Victimes		1		4		8
Dommages matériels en mio de francs						
Secteur public	419	246	61	150	5	1010
Secteur privé	61	20	14	50	1	200
Total	480	266	75	200	6	1210
Constructions en rivières	64	66	29	52	5	296
Routes et ponts	250	117	0	48	0	422
Terrains et surfaces agricoles	10	27	17	31	0	114
Chédail.	61	20	14	50	1	211
Voies ferrées, PTT etc.	95	36	15	19	0	167
Total	480	266	75	200	6	1210
Dommages par habitant en francs	14166*	1004	343	1215	15	188

* Si l'on déduit les frais de remise en état de la route nationale et de la ligne CFF, on arrive au total de 4000 francs/habitant pour le Canton d'Uri.

tituent les causes des dégâts, non pas celles des crues, tout au moins pas de celles de 1987.

Les dégâts matériels ont été estimés immédiatement après les crues, au mois d'octobre 1987 (tableau 5). Cette appréciation fut rendue plus difficile encore, parce que les infrastructures (routes, voies ferroviaires et constructions fluviales) ont presque toutes nécessité une reconstruction complète, afin de répondre aux exigences de sécurité accrues. Ces nouvelles constructions, consécutives aux dommages, ne représentent pas un dégât direct en terme d'assurance. Leur distinction avec de simples remises en état est extrêmement difficile. Cette différenciation a toutefois peu d'importance dans l'estimation du coût de financement, qui était prioritaire.

La comparaison avec des dégâts antérieurs ou qui se sont produits dans d'autres régions est problématique, à cause des disparités des régions touchées et de la rapidité du développement de l'utilisation du sol. Quand par exemple en 1977, la crue du Schächen a inondé la vallée uranaise, il n'existait pas encore d'autoroute susceptible d'être endommagée. Comme le montre la comparaison entre les dommages de 1987 et ceux causés par une crue de même importance en 1868 (fig. 32), les fluctuations de la valeur de l'argent, de l'utilisation du sol ou des goûts de la société ainsi que leurs évaluations compliquent la tâche.

La population suisse a plus que doublé durant le siècle dernier. Cette croissance varie cependant selon les régions,

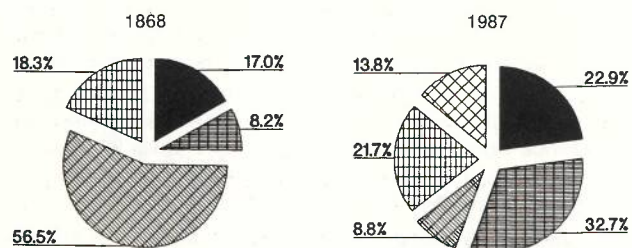


Fig. 32: En 1987, 70% des dégâts ont concernés des ouvrages en rivières, des routes, des voies de chemin de fer ou d'autres infrastructures. Lors de la crue comparable de 1868, les dégâts à de telles installations ne représentaient que 25% des dommages. Cela montre le lien entre les dommages et la structure économique de la région touchée.

même à l'intérieur d'un petit canton comme celui d'Uri. La figure 33 indique que la population a tendance à se concentrer dans la vallée de la Reuss, alors que la population dans l'Urserental et le Schächental est restée stable. Entre 1947 et 1980, le nombre d'habitations a passé de 3500 à 6800. Près de 2000 bâtiments ont été construits dans les communes d'Altdorf, d'Attinghausen, d'Erstfeld, de Flüelen, de Seedorf et de Schattdorf – situées dans la plaine de la Reuss. La figure 34 montre l'évolution des surfaces destinées aux routes: entre 1960 et 1980, l'augmentation est principalement due à l'implantation de l'autoroute. Le développement des constructions à proximité immédiate de la Reuss (dans un rayon de 50 m des rives) et au fond de la vallée, donc dans des endroits menacés, est particulièrement marquant. Ces nouvelles formes d'activité augmentent sans aucun doute le risque de dégâts. Les fonds de vallées représentent 3% de la surface totale du canton. 45% de la surface totale des routes, soit 36% des longueurs totales, sont compris dans ces 3%.

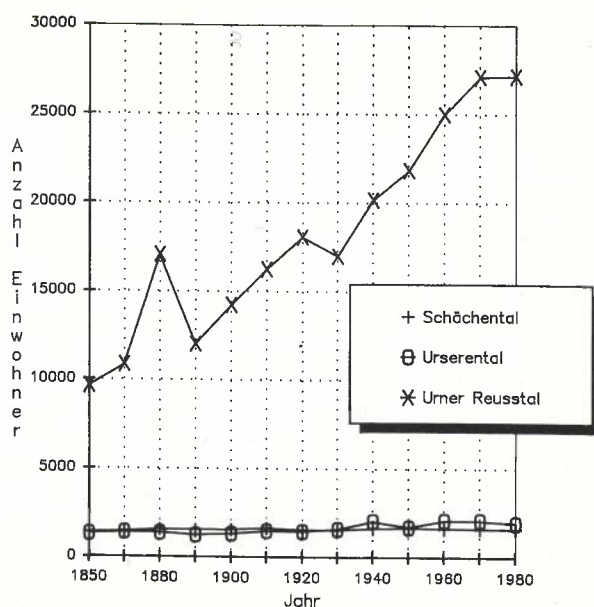


Fig. 33: Alors que la population des vallées de Schächen et d'Urseren n'a presque pas changé pendant les 100 dernières années, celle de la vallée de la Reuss a pratiquement triplé. Les conséquences d'une inondation en sont d'autant plus graves aujourd'hui.

L'emprise humaine dans les autres régions du canton d'Uri est moins visible. La séparation entre forêts et pâturages voulue par la loi depuis le tournant du siècle et l'intensification du reboisement ne doivent pas être sous-estimées systématiquement. Les différentes réflexions que l'on peut énoncer à propos de l'influence de l'exploitation de l'espace alpin sur le régime des eaux ne peuvent être démontrées ni dans le temps ni dans l'espace. L'essentiel des dégâts dans ces régions provient de la destruction des routes forestières et de celles desservant les alpages.

L'importance des dommages dépend de la grandeur de la crue. La figure 35 montre l'évolution des dommages depuis 1975: environ deux tiers des dégâts évalués à près de 3 milliards de francs proviennent des événements de 1977, 1978 et 1987. La grande proportion des infrastructures touchées par les dégâts de 1987 est surprenante (fig. 32). Les routes nationales, les voies de chemin de fer et les ouvrages hydrauliques sont en principe protégés contre les crues fréquentes. Par contre, si ces infrastructures sont endommagées par des crues extrêmes, l'ampleur des dommages augmente fortement.

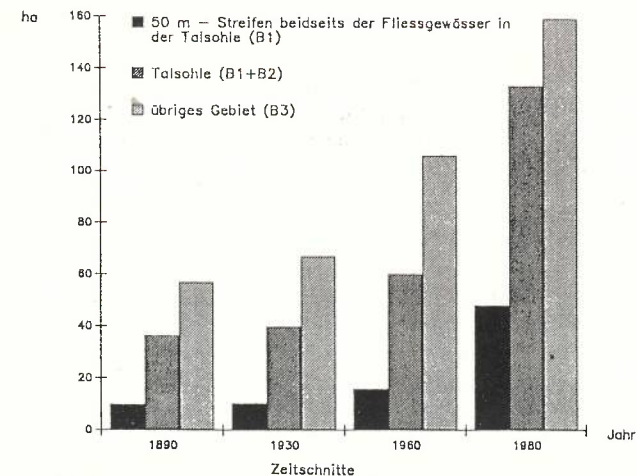


Fig. 34: Augmentation de la surface des routes dans le canton d'Uri. Plus de 50% de ces routes se trouvent dans les vallées, c'est-à-dire dans les zones menacées par les cours d'eau.

On affirme souvent que les constructions actuelles sont bâties imprudemment dans des zones à risques et qu'ainsi le risque de dommages augmente de façon démesurée. Cela se vérifie dans bien des cas particuliers. Cependant, les dommages les plus importants des crues de 1987 se sont produits dans d'anciennes agglomérations comme Poschiavo et Münster. Une analyse effectuée sur 500 maisons touchées dans le canton d'Uri a indiqué qu'environ 45% d'entre elles dataient d'après 1950, et environ 20% d'avant 1900. Cette distribution correspond assez bien à la répartition moyenne de l'ancienneté des bâtiments des communes touchées. Ainsi, les nouvelles constructions n'ont subi aucun dommage disproportionné. Cela semble plausible pour des événements extrêmes, car ces endroits ont déjà été éprouvés dans le passé par des crues. Le risque de dommages dus aux crues ayant une période de retour de 100 ans ou plus était généralement accepté jadis. Ceci parce que d'autres endroits étaient soumis à des risques naturels plus grands encore ou parce que le risque d'une telle crue paraissait supportable face aux autres menaces quotidiennes. Etant donné la concentration actuelle des valeurs immobilières et les risques de dommages – risque physique de

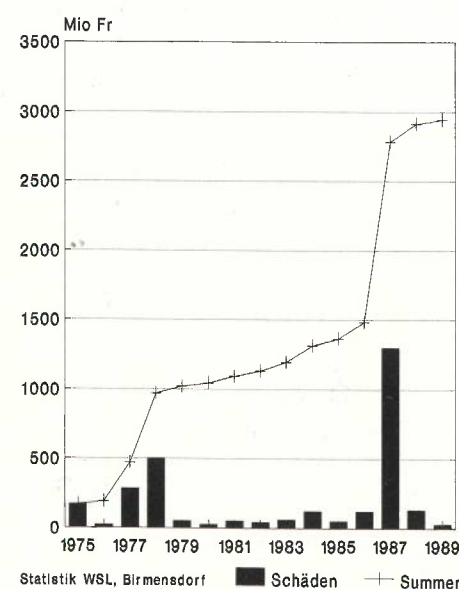


Fig. 35: Dégâts annuels et dégâts cumulés dus aux crues selon les statistiques de l'IFRF, Birmensdorf. La moyenne des dégâts est influencée par quelques événements majeurs.

l'eau ou dommages d'ordre économique suite à une rupture d'infrastructures (routes, chemins de fer, approvisionnement en énergie) – on peut se demander si une telle façon de voir reste justifiée aujourd'hui.

Mentionnons surtout qu'aucune victime ne fut à déplorer dans le canton d'Uri, malgré l'importance de la crue et les conditions défavorables (pointe de la crue vers minuit). Les organisations de secours locales se sont comportées de manière exemplaire.

En bref: Le niveau de vie croissant et les investissements dans les infrastructures ont augmenté le risque de dommages. Celui-ci s'accroît même si la menace naturelle demeure identique. Les dégâts les plus importants de 1987 ont touché les infrastructures (routes, chemins de fer). Dans les régions habitées, les nouvelles constructions n'ont subi aucun dommage disproportionné.

4.4.2 Processus à l'origine des dégâts

Les dangers auxquels on est exposé lors d'une crue proviennent généralement des débordements et des inondations importantes (en étendue et en profondeur) qui peuvent survenir. Ceci n'est valable que pour des cours d'eau de fond de vallées.

Le cas classique d'une inondation de grande étendue s'est produit dans l'Urserental ainsi que dans la plaine de la Reuss entre Attinghausen et Seedorf à la suite de ruptures de digues (photo 8). L'insuffisance de la capacité d'écoulement des cours d'eau en fut la cause. Vu l'état des digues à cette époque, on pouvait s'attendre à des ruptures sans qu'un long débordement soit nécessaire. Dans le Haut-Valais, le niveau d'eau maximal du Rhône n'a juste pas atteint le couronnement de la digue; une catastrophe a ainsi été évitée de justesse. On a constaté d'autre part des percolations au travers des digues (photo 7).

D'autres causes majeures ont été à l'origine des importants dégâts consécutifs à la crue de 1987:

A Poschiavo s'est produite une inondation dont la lame d'eau était faible, mais la vitesse d'écoulement forte; il en fut de même lors de divers orages en juillet (par exemple le Biembach, BE). Dans l'agglomération de Poschiavo, les fondations de quelques maisons ont été affouillées, ce qui a rendu leur démolition ultérieure nécessaire.

Les quantités et la granulométrie des matières solides transportées sont fortement dépendantes de la vitesse du courant. Le dépôt de celles-ci dans les caves et les rez-de-chaussée ont rendu les travaux de remise en état particulièrement difficiles. Les graviers et les pierres causèrent des dommages dans les terrains agricoles et durent être déblayés. Les dépôts de sable et de limon ont, par contre, pu être enherbés avec des moyens simples.

Des coulées de boue et de pierres atteignirent de nombreuses routes et apportèrent sur les cônes de déjection des dépôts graveleux de plusieurs mètres (photos 15, 6, 3, 5). Ce phénomène se révéla être le plus dangereux à cause de la rapidité de son déroulement et de l'importance des masses impliquées. Lorsque la lave de boue et de pierres atteignit le cours d'eau principal, elle provoqua un réhaussement du lit, des débordements et donc des dégâts supplémentaires (Poschiavo, Zavruggia [photo 9], Plaunca).

L'érosion des berges provoqua l'interruption du trafic sur la ligne CFF du Gothard et sur de nombreuses routes (photo 17). Elle fut responsable de l'effondrement de quelques maisons (Gurnellen, Aquarossa) et de l'affouillement d'un pilier du viaduc de la route nationale à Wassen, qui fut le dégât ponctuel vraisemblablement le plus coûteux. Le phé-

nomène le plus important du point de vue de la fréquence et de l'étendue des dégâts a été incontestablement l'érosion des berges.

L'obstruction de nombreux ponceaux, canalisations ou voûtages par des bois flottants, a provoqué chaque fois des dégâts bien localisés. Parmi les plus importants, citons ceux du pont CFF sur la Reuss de Göschenen (photo 10), les barrages-déversoirs à Airolo, Fiesch et Mörel, et le pont près d'Oberwald.

La végétation se développant dans le lit des rivières étroites et profondes diminue la capacité d'écoulement. Cette diminution a souvent été surestimée dans le cas de lits à profil large. Ce n'est pas la végétation en soi qui est déterminante, mais bien la part qu'elle représente dans la surface du profil d'écoulement et l'endroit où elle se situe dans la section. L'influence de la végétation sur les dommages revêt plusieurs aspects: d'un côté, la végétation protège les rives et retient les bois flottants, mais d'un autre côté la capacité d'écoulement s'en trouve réduite. Pourtant, les bois flottants sont produits par les éboulements de rives et la végétation réduit la stabilité des digues. On ne peut cependant pas dire que lors des crues de 1987 une végétation excessive dans le lit des rivières a provoqué des dégâts importants.

Au printemps 1987, il y eut, du fait d'une saturation prolongée du sol, de nombreux glissements profonds à cause d'instabilités géologiques (Turbachtal, Läuflingen, Zug, Balsthal et autres). Ces événements n'ont cependant pas été étudiés dans la présente analyse.

En bref: Les débordements dus à la capacité hydraulique insuffisante des cours d'eau ont été la cause des inondations dans la plaine de la Reuss. Cependant, la plupart des dommages ont été dus soit à des processus d'érosion, soit à une charge excessive de matériaux, soit à des coulées de boue et de pierres.

5 Les crues de 1987 dans leur contexte historique

Les dommages dus aux crues ont été et sont toujours fréquents. Depuis le XVI^e siècle, quatre cantons (GR, UR, VS, TI) ont été particulièrement touchés (fig. 36). Les dommages les concernant ont fait l'objet de rapports qui couvrent 680 ans. Le XIX^e siècle apparaît comme le siècle le plus touché. Ces deux derniers siècles, la population plus dense et des sources d'information moins incertaines ont permis d'augmenter le nombre de déclarations de dommages: s'il est donc possible d'affirmer que la fréquence des dégâts augmente, on ne peut pas en dire autant de la fréquence des événements naturels. Les plus grands désastres ont de tout temps été décrits avec force détails, ce qui permet de disposer de nombreuses sources sur des crues catastrophiques. La probabilité que l'une d'entre elles n'ait pas été relevée est très faible. Sur la base d'interprétations des rapports rendant compte des dommages, il apparaît que des crues similaires se sont produites dans les années 1342, 1480, 1511, 1566, 1570, 1640, 1834, 1839, 1868 et 1987 (fig. 37).

La crue de 1342 doit être considérée comme la plus grande de ce millénaire. A Zurich, l'eau arrivait jusqu'au portail du Frauenmünster et, dans la Barfüsserkirche de Lucerne, l'eau atteignait l'autel. Au dôme de Mayence, les flots auraient atteint trois mètres. Dans les sédiments du lac d'Uri, on a trouvé des dépôts datant de la première moitié du XIV^e siècle, qui sont quatre fois plus importants que ceux des crues de 1987. La granulométrie de ces dépôts est nettement supérieure, ce qui indique de très forts écoulements. Dès le XIX^e siècle, les rapports sur les crues sont suffisamment détaillés pour permettre des estimations sur les débits. La crue de 1868 est ainsi estimée, dans la vallée du Rhin saint-galloise, entre 2500 et 3000 m³/s, soit égale ou supérieure à celle de 1987. Les débits de pointe des crues de la vallée de la Reuss uranaise au XIX^e siècle (1834, 1839, 1868) donnent par contre des valeurs inférieures (fig. 38). En considérant les évaluations faites à Uri, la crue de 1987 présente une période de retour de 200 ans environ; mais si on se fonde sur les données historiques, celle-ci tombe à 70 voire 100 ans. Ceci n'est pas une contradiction, car l'analyse présentée à la figure 38 se réfère à l'emplacement bien déterminé du limnimètre de Seedorf sur la Reuss et au débit de pointe. Le calcul de la période de retour au moyen des données historiques se réfère en premier lieu aux dégâts (parce qu'ils sont décrits dans les comptes rendus) et à leur répartition spatiale. Les périodes de retour d'événements extrêmes ont une valeur relative dans la mesure où, aussi bien au

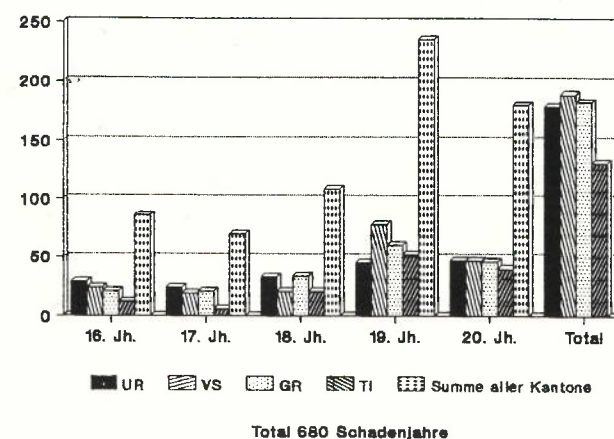


Fig. 36: Inventaire des années où des dégâts ont été annoncés dans les cantons d'Uri, du Valais, du Tessin et des Grisons.

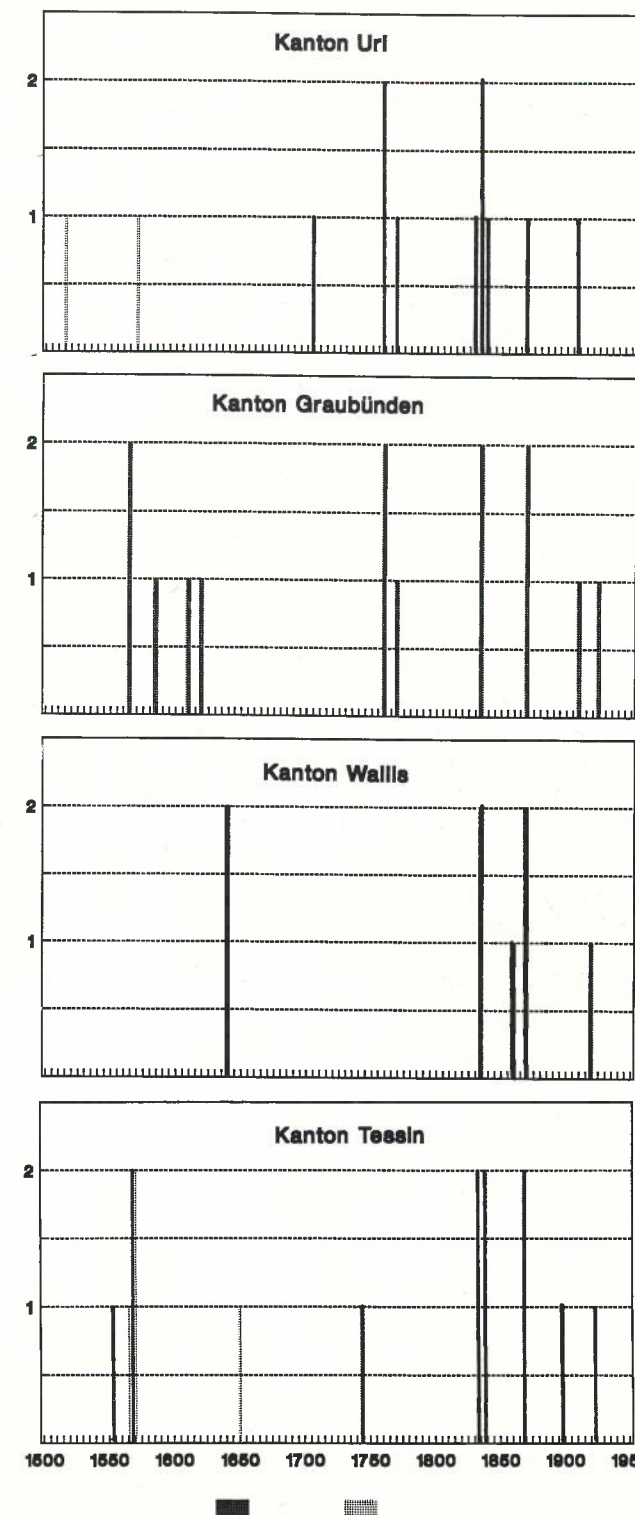


Fig. 37: Crues importantes et catastrophiques de 1500 à 1950.

XVI^e qu'au XIX^e siècle, trois de ces événements séculaires sont apparus, dont deux en l'espace de 5 ans. Par contre, la période d'environ 200 ans entre les événements de 1640 et 1834 fut relativement calme.

La répartition saisonnière des crues catastrophiques montre qu'elles se produisent le plus fréquemment dans les mois d'août et de septembre (fig. 39). Ceci correspond aux réflexions sur le processus présenté au chapitre 4.1, qui montrent qu'un apport de chaleur de longue durée est nécessaire à la fonte des importantes couches de neige, condition

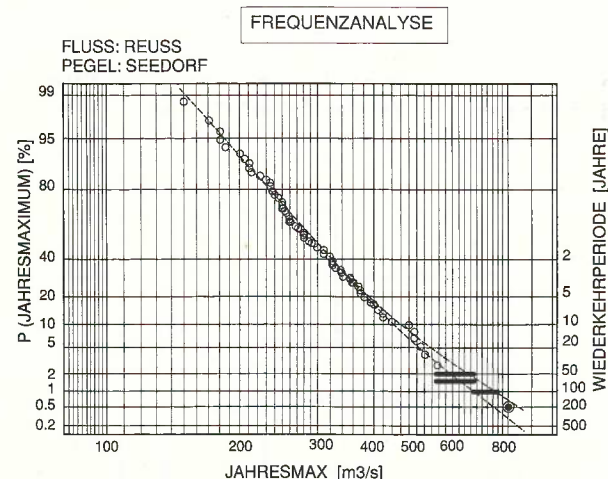


Fig. 38: Diagramme des fréquences des débits de pointe pour la Reuss à Seedorf. Les crues historiques reconstituées y sont reportées. On a indiqué deux ajustements possibles. On voit que la crue de 1987 a une période de retour comprise entre 150 et 300 ans.

qui n'est souvent réalisée dans les hautes Alpes qu'à partir du mois d'août.

Les crues catastrophiques mentionnées ci-dessus se sont produites avant la révolution industrielle. En outre, de nombreuses régions n'ont connu de forte densité de population qu'à partir du XIX^e siècle. Toute modification du régime des crues dues à des interventions humaines est donc à exclure. Le taux de sédimentation moyen du lac d'Uri pendant ce dernier millénaire ne montre pas non plus de changements significatifs. Rien n'indique que des modifications importantes se sont produites dans le processus d'érosion et dans le régime des crues qui lui est lié.

Par contre, la mise à contribution de l'espace vital s'est modifiée dans les Alpes. Deux processus opposés sont à mentionner:

- Une augmentation de la densité des constructions – et donc des risques de dégâts – qui aggravent la vulnérabilité des régions touchées (voir chapitre 4.4.1).
- Le reboisement intense entrepris depuis le milieu du siècle dernier et la construction d'ouvrages de protection contre les crues qui atténuent la menace.

Selon la région considérée, ces deux processus s'équilibrent plus ou moins. Il est certain que des ouvrages de protection ont contribué à empêcher de lourds dommages

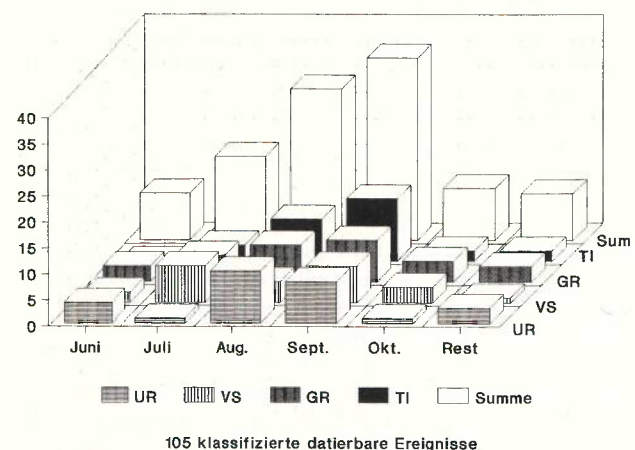


Fig. 39: Répartition saisonnière des crues moyennes et catastrophiques dans les 4 cantons étudiés, entre 1500 et 1950.

dans les vallées. Il est peu probable cependant que les mesures actuelles puissent remplir leur rôle de protection lors d'une crue encore plus grande, comme par exemple celle de 1342. Dans les bassins versants situés en altitude, le risque de dommages est malgré tout encore considérable.

En bref: Des études historiques prouvent que l'espace alpin a été très lourdement touché par des crues catastrophiques semblables dans les années 1987, 1868, 1839, 1834, 1640, 1570, 1566, 1511, 1480 et 1342. La crue de 1342 en particulier, qui a touché toute l'Europe centrale, a été sensiblement plus forte que celle de l'année 1987. Une augmentation du risque de crue depuis la révolution industrielle ne peut donc pas être prouvée.

6 Développements possibles

6.1 Croissance économique

Les transformations du paysage dues aux activités humaines proviennent des mutations de notre société. L'évolution des risques de dégâts déjà mentionné au chapitre 4.4.1, se poursuivra. On distingue les tendances suivantes:

- La population, en faible augmentation, exige toujours davantage de confort en matière d'habitat. Cela crée une augmentation des surfaces nécessaires aux habitations et aux infrastructures (chemins d'accès, approvisionnement en eau et énergie, réseaux d'égouts). Les concepts actuels d'aménagement du territoire visent à concentrer l'espace habitable. La forte tendance actuelle consistant à habiter dans les zones tranquilles hors des villes a conduit, ces dernières décennies, à faire diminuer la population des grands centres et à accroître les surfaces habitées.
- La mobilité croissante exige un développement des voies de communication. Routes et chemins de fer doivent obligatoirement, en tant que structures linéaires, traverser des régions à risques. La concentration du trafic sur des axes principaux (routes nationales, Rail 2000, NEAT) augmente le risque de coûts en cas de dommages. Ainsi, le seul détournement de la circulation et la création d'un axe de remplacement pendant les 3 semaines d'interruption de la ligne CFF du Gothard a coûté 50 millions de francs. Dans une économie qui compte sur un approvisionnement sûr et qui cherche en même temps à limiter au maximum les coûts des stocks – ce qui sous-entend des infrastructures de transport relativement denses –, les dégâts indirects peuvent s'élever à un multiple des dégâts directs.
- Les risques ponctuels augmentent. Le viaduc de la route nationale près de Wassen prêt à s'effondrer en 1987, et l'autoroute de l'Inn près de Kufstein (Autriche) coupée en 1990 à la suite de l'affaissement d'un pilier, montrent qu'il existe en de nombreux endroits des risques pouvant se développer en cascade. Un même événement peut donc menacer plusieurs voies principales de circulation indépendantes l'une de l'autre, sans que nous en soyons suffisamment conscients. Des risques ponctuels existent en particulier pour les installations industrielles, les centrales nucléaires et les barrages. Dans de tels cas pourtant, on connaît en règle générale le risque. Une protection efficace de ces installations n'est possible que si le danger peut être quantifié de façon exacte. Les concepts de sécurité doivent être périodiquement réexaminés. Un site mal choisi, comme ce peut être le cas lorsque des entreprises industrielles se développent lentement, est souvent difficile à protéger contre les grandes crues.

- La tendance à construire toujours plus de routes forestières et alpêtres dans des régions difficilement accessibles mène à une augmentation plus que proportionnelle du risque de dommages les concernant. Les dommages à craindre vont certainement faire augmenter le coût moyen des dégâts, mais ne prendront certainement pas de proportions catastrophiques. La même remarque s'applique à l'utilisation intensive des surfaces agricoles.

En bref: Dans notre environnement, les investissements continus contribuent à faire augmenter la moyenne des dommages. La dépendance de la société vis-à-vis des infrastructures qui l'approvisionnent, implique une augmen-

tation des exigences de sécurité pour les artères vitales pour l'économie (circulation, approvisionnement en énergie). En tant que structures linéaires, ces artères doivent obligatoirement traverser des zones à risques et sont donc particulièrement vulnérables.

6.2 Modifications climatiques

Récemment encore, notre espace naturel était considéré comme un système stationnaire. Cela signifiait que les observations faites par le passé étaient valables pour l'avenir. Seules exceptions, les interventions humaines dans le régime des eaux – comme les prélèvements d'eau ou l'exploitation des retenues alpines – étaient prises en compte dans les prévisions. Le système était considéré comme étant en équilibre naturel. Mais on oubliait trop souvent que la notion d'équilibre correspond à un désir humain plus qu'à la réalité, car il est plus facile de vivre dans un environnement connu et analysable. La nature est depuis toujours un système dynamique, qui se modifie en principe lentement, mais parfois rapidement et même brusquement. On réalise ce qu'est la notion d'équilibre quand on a constaté que lors de transformations soudaines s'instaurent des processus inverses qui contrent ces transformations. La mémoire humaine, habituellement courte, interprète ce fait comme un équilibre. Notre paysage est le résultat d'une lente évolution de la lithosphère et de l'influence des processus atmosphériques. La rapide et préoccupante augmentation de l'effet de serre peut entraîner une modification substantielle de notre climat, et par là de l'ensemble de nos conditions de vie. Même si le climat n'a jamais été stationnaire, la crainte d'un changement se justifie pour deux raisons:

- Nous nous trouvons aujourd'hui dans la période relativement la plus chaude depuis dix mille ans. Un réchauffement supplémentaire nous conduirait à des conditions de vie nouvelles et inconnues aujourd'hui, puisque le passé ne nous fournit aucune indication sur une situation de cette nature. L'avenir comporte donc des incertitudes;
- Les changements peuvent s'avérer si rapides que l'homme pourrait ne pas avoir le temps de s'adapter. La nature survivra, mais on ne peut pas prévoir de quelle façon, ni si la nouvelle forme de vie sera supportable pour l'homme.

La tendance de la nature à retarder et à atténuer les changements donne cependant une raison d'espérer.

D'après nos connaissances actuelles, on peut s'attendre à un réchauffement d'environ 2 à 5 °C au siècle prochain. Celui-ci se fera sentir davantage dans les hautes latitudes que près de l'équateur. Cela met actuellement un terme aux prévisions fondées sur des notions de physique. D'autres hypothèses, en particulier celles ayant trait aux conséquences régionales, se basent sur une évaluation des processus liés à la hausse des températures.

Si l'évaporation et les précipitations dans l'espace alpin suisse augmentaient dans de mêmes proportions, l'écoulement resterait en moyenne identique. La position plus élevée de l'isotherme 0°C rallongerait la durée pendant laquelle les précipitations tombent sous forme de pluies dans les hautes Alpes et augmenteraient ainsi la probabilité des crues dans l'année. On ne sait pas si les événements pluvieux augmenteraient en intensité et en volume. Une augmentation du débit de pointe n'est donc pas certaine, mais il semble justifié de supposer que des combinaisons de facteurs exceptionnels puissent se présenter à la suite du rallongement de la saison des crues.

L'élévation de l'isotherme 0°C contribuera bien entendu à la fonte des glaciers et au recul des zones du permafrost. Des matériaux morainiques non consolidés seront libérés, et l'intensité des laves torrentielles pourrait ainsi augmenter. L'évolution des sols et l'adaptation de la végétation à ces nouvelles conditions seront déterminantes. Une élévation de la limite des forêts et un reboisement plus intensif des régions situées en altitude pourraient compenser divers facteurs négatifs. Mais le contraire – soit une accélération du dépérissement des forêts faute d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques – est aussi envisageable. Comme la formation de la forêt et du sol sont des processus lents, la vitesse des changements climatiques attendus sera déterminante pour le développement de nouvelles formes de végétation.

En bref: Une augmentation du risque de crue et de l'importance des laves torrentielles suite au réchauffement de l'atmosphère est possible. Les changements de climat et l'augmentation du risque des dommages dus aux activités humaines vont dans le même sens et accroissent la nécessité de prendre des mesures de sécurité.

7 Leçons et conséquences

7.1 Planification de la sécurité

Vivre sans risques n'est pas pensable. Le désir de les limiter au maximum fait partie de l'instinct de l'homme. L'aversion face au risque se fait particulièrement sentir quand le danger devient invisible (par exemple les radiations) ou non influençable (par exemple les risques naturels). D'autres risques (par exemple la conduite automobile et la pratique de l'alpinisme) sont affrontés en connaissance de cause, même si le danger de mort, objectivement parlant, est souvent nettement plus grand que lors des risques naturels qu'on estime pourtant inacceptables. La sécurité, surtout face aux dangers inhabituels, est donc avant tout une impression.

Or la sécurité est une question de coûts. Le prix qu'il faut payer ne se mesure pas seulement en argent, mais aussi en terrains, paysage et nature. La décision d'adopter une sécurité appropriée doit être prise par ceux qui se trouvent exposés au danger et qui ont à en payer le prix. Elle incombe donc en premier lieu à la population concernée. La Confédération et les cantons peuvent alléger ces charges financières par des subventions, mais la population ne doit pas non plus être exposée à de trop grands risques, même si l'intérêt de la conservation du paysage naturel est en jeu. Etant donné que, lors de l'élaboration des décisions, il n'y a pas que des valeurs matérielles à protéger (coût et dommages), mais aussi et surtout des valeurs éthiques (protection de la vie humaine) ou encore des valeurs immatérielles difficilement évaluables (protection de la nature) à respecter et qu'il est d'autre part toujours plus difficile de trouver un consensus, il est devenu nécessaire de définir les objectifs des protections à mettre en place.

Parmi les mesures envisageables, nous faisons les distinctions suivantes:

des mesures actives: ce sont celles qui interviennent directement sur les phénomènes naturels pour diminuer la menace. Elles peuvent être divisées en mesures techniques (par exemple barrages en torrents, digues de protection contre les crues) et en mesures biologiques (par exemple reboisements, aménagements des talus respectueux de la nature).

des mesures passives: elles doivent permettre une réduction des dommages sans influencer activement le déroulement de l'événement naturel. Elles peuvent être prises à titre préventif avant l'événement (par exemple interdictions de construire et plans d'affectation pour les zones menacées, protection ponctuelle d'ouvrages particuliers) ou alors, pendant ou après l'événement, en contribuant à diminuer les dommages (opérations de secours ou assurances).

Chaque projet doit être analysé individuellement en fonction des dangers et des mesures de protection à prendre. Ainsi la question d'une protection adéquate contre les crues peut être résolue uniquement de cas en cas, car le terme adéquat implique qu'on confronte le gain de sécurité obtenu et le prix à payer pour y aboutir. Cette planification doit considérer tous les risques dans leur intégralité et ne doit pas se limiter aux dangers naturels, encore moins aux seuls risques de crue. Ces différentes mesures doivent être évaluées d'une façon uniforme.

En bref: La protection contre les crues doit être planifiée d'une façon intégrale. En plus des mesures techniques, il faudrait faire intervenir plus fréquemment des mesures passives.

7.2 Objectifs de la protection

Une protection contre les inondations fréquentes dans le but de préserver des terrains agricoles a longtemps été l'objectif de la protection contre les crues; elle a marqué de son empreinte la correction des cours d'eau et ses critères de dimensionnement. Parmi les leçons que nous devons tirer des événements de 1987, il ressort que ce sont les crues peu fréquentes et extrêmes qui menacent notre existence.

La protection contre les catastrophes exige donc une autre approche que celle utilisée pour la prévention des dommages moins importants.

De faibles dommages, et parfois aussi des dommages de moyenne importance, devraient être tolérés. Des mesures de protection ne seront prises que si elles peuvent être économiquement justifiées. Les efforts doivent se concentrer sur la réduction des dommages causés par les événements extrêmes.

Comme chaque projet doit être jugé de façon indépendante selon les risques et les possibilités de protection, les objectifs de la protection ne doivent servir que d'éléments de base. Leur réalisation sera examinée sur la base de différents projets, en collaboration avec les cantons, et des lignes directrices seront conjointement élaborées.

Le but des mesures de protection est d'assurer une sécurité élevée à un prix acceptable. Si des vies humaines se trouvent menacées, il faut dans la mesure du possible que cette protection ait un effet maximal.

Son coût ne s'exprime pas seulement en francs et centimes, mais aussi en perte de terrains et en valeur esthétique du paysage. Lorsque des vies humaines ou des biens matériels de grande valeur sont menacés, les objectifs minimaux de la protection devraient être définis. Dans le cas où une protection de plus grande efficacité peut être réalisée à faibles frais, il vaut la peine de faire cet investissement supplémentaire.

Une évaluation des intérêts en présence est nécessaire. Les objectifs de la protection recherchée doivent être justifiés en regard des effets sur l'environnement et des frais qu'ils entraînent.

La protection contre les crues n'a pas simplement pour but d'empêcher un débordement du cours d'eau, mais aussi de se prémunir contre des dommages importants qu'il peut occasionner. Un équilibre conforme à la sécurité doit s'établir entre le degré de sécurité obtenue et les effets sur l'environnement ainsi que les frais de construction.

Les agglomérations doivent être protégées contre la crue centennale ou la plus grande crue observée.

Au sens de la pratique actuelle, les agglomérations doivent être protégées contre une crue se produisant une fois en 100 ans en moyenne. Il faut chercher à obtenir une sécurité plus élevée, là où c'est possible financièrement.

Si un événement survenait, plus exceptionnel encore que celui envisagé pour le dimensionnement des ouvrages de protection, il ne devrait pas mettre en danger pour autant d'autres zones habitées.

La rupture d'une digue ou d'un bassin de rétention ne devrait pas, en dépassant la crue de projet, provoquer des dommages sensiblement plus importants que si un tel ouvrage n'existait pas. L'étude ne doit pas s'arrêter à la crue de projet, mais doit encore tenir compte des dommages possibles lors de crues supérieures.

Il convient d'éviter tout transfert du risque dans des zones extérieures à celle du projet.

La protection d'une zone conduit souvent à la disparition des surfaces de rétention existantes (pour les eaux et les sédiments) et peut aussi impliquer un report du risque de crues vers l'aval. Les mesures de protection ont des répercussions à l'aval qu'il convient d'examiner.

Des zones inondables doivent absolument être conservées.

Dans la mesure du possible, des débordements qui se produisent en moyenne tous les 2 à 5 ans devraient être tolérés, non seulement pour éviter une augmentation des crues en aval, mais aussi pour conserver des endroits pouvant servir de zones-tampons pour des crues fréquentes (par exemple prairies marécageuses, forêts en bordure de cours d'eau).

En bref: Il faut se départir de la pratique de dimensionnement qui ne vise qu'à exclure tout dégât pour la crue de projet et qui ne tient pas compte de cas plus importants. Il faut tolérer des petits dégâts dans l'intérêt d'une réduction des dommages lors d'événements extrêmes.

7.3 Utilisation du sol et aménagement du territoire

Le moyen le plus rationnel pour éviter les dangers occasionnés par les crues est de ne pas occuper les zones menacées. Il est cependant illusoire de croire que cela est toujours possible. Avec une superficie de 41 293 km² pour 6 400 000 habitants, il reste par personne 6600 m², soit à peu près l'équivalent d'un terrain de football. Il faut de plus déduire les zones non utilisables: les lacs et cours d'eaux (4%), les terres incultes (18%), la forêt (25%) et les prés (21%). Il reste donc 28% de sols cultivables et 4% de surface à bâtir. Notre espace vital se réduit en définitive au tiers de la superficie d'un terrain de football par habitant. Il faut donc savoir gérer dans cet espace restreint les conflits d'intérêts entre les zones d'habitation, les surfaces d'assolement, les voies de communication, les zones de détente et les autres utilisations.

L'identification d'un danger est nécessaire pour pouvoir maîtriser un risque. Une cartographie des risques en cas de crues, comme il en existe d'ailleurs pour les avalanches, doit être entreprise sans retard.

Le rapport du Conseil fédéral sur la politique d'aménagement prévoit l'élaboration d'une recommandation concernant la prise en compte des risques potentiels dus à l'eau.

La transposition des dangers identifiés en mesures concrètes à prendre est une des tâches les plus exigeantes de l'aménagement du territoire, car tous les risques et éventualités sont à soupeser les uns par rapport aux autres dans un espace où les possibilités sont limitées.

Il faut se méfier de schémas trop simplistes – zone de danger égale interdiction de construire – aussi souhaitables qu'ils puissent paraître. Les antagonismes en présence dans l'environnement naturel sont trop divers. L'espace vital ne doit pas seulement être si possible libre de tout danger, mais il doit aussi offrir un cadre pour les activités humaines tant avant qu'après une catastrophe naturelle. Il faut également éviter d'évaluer les risques de façon subjective, comme Walter, le fils de Tell, le dit dans le Guillaume Tell de Schiller (traduction libre):

«Père, je me sens à l'étroit dans le grand pays.
J'habiterais plus volontiers sous les avalanches.»

On montre ici que, pour différentes raisons, un risque peut être accepté et que l'ensemble des possibilités et risques doit être évalué. A côté des dangers présents dans la nature, l'homme côtoie d'autres dangers dans son espace vital, surtout dans les grandes villes, qui peuvent s'avérer plus graves que des risques naturels contre lesquels nous voulons être protégés. Mais en choisissant une certaine liberté, nous acceptons sciemment un risque et perdons par là même notre droit d'exiger une aide en cas de dommages.

Comme les personnes non spécialisées ne peuvent pas identifier un risque, on ne peut pas interdire de construire dans des zones menacées sans faire état d'une carte de risques. Il est alors difficile de décliner les demandes d'indemnités, car dans la plupart des cas le permis d'exploiter a déjà été donné. La mise en évidence du danger est nécessaire pour toutes les sortes de mesures à prendre, et permet de se décharger de la responsabilité.

Un autre genre de problèmes se présente lors de la réalisation des mesures de protection active. Pendant des décennies, on a rétréci le profil d'écoulement des cours d'eau, dans l'idée de gagner des terres cultivables, du terrain à bâtir; très souvent, les cours d'eau ont été déplacés en vue de la construction de routes. Mais dans le cas d'événements extrêmes, le cours d'eau a besoin de place pour le transit des eaux et du charriage. Sous cet aspect, les exigences de la protection des eaux et celles des constructions hydrauliques concordent, car un cours d'eau d'origine naturelle a lui aussi besoin d'espace. Les ouvrages actuels de protection sont planifiés de manière à minimiser leur emprise sur les sols et les frais d'entretien. Les mesures de protection actuellement réalisées engendrent à proximité des cours d'eaux des plus-values en maints endroits, qui nécessitent à leur tour une plus grande protection. Pour briser ce cercle vicieux, des limitations d'exploitation dans les zones proches des cours d'eau semblent nécessaires.

Les questions d'aménagement du territoire et de la propriété foncière sont politiquement parlant les plus sensibles de la protection contre les crues. Leur solution doit se traiter à deux niveaux:

- au niveau légal, pour éviter une accumulation d'états reconnus comme défavorables et pour donner aux services responsables la possibilité de prendre des mesures appropriées.
- au niveau du projet, la pratique montre que les problèmes sur ce plan trouvent plus rapidement une solution, car les mesures planifiées servent à la fois aux propriétaires voisins et à la population locale, ce qui fournit une bonne base de compromis. Cependant, trop souvent des intérêts personnels rendent difficile la recherche d'une solution globale; la solution finalement adoptée ne peut plus alors être considérée comme idéale. Des projets d'endiguement ne sont conçus que si une menace existe. Le mieux serait d'interdire toute construction pouvant être menacée, mais ceci impliquerait une base légale. Dans une région fortement peuplée, il n'est pas envisageable de laisser des sols inoccupés à titre préventif.

En bref: L'élaboration de cartes pour tous les dangers – naturels ou techniques – est une condition nécessaire pour une réduction des mesures techniques à prendre et de leur remplacement par des mesures d'aménagement du territoire. Un espace vital conçu aussi pour les cours d'eaux rend possible une réalisation proche de la nature, et crée des conditions favorables aux mesures de protection contre les crues en vue d'un événement extrême.

7.4 Mesures constructives

Les Directives 1982 de l'Office fédéral de l'économie des eaux en matière de la protection contre les crues sont déjà basées sur des constructions hydrauliques proches de la nature. Le nouveau projet de loi sur l'aménagement des cours d'eau prévoit que la protection contre les crues doit être autant que possible assurée par de l'entretien des cours d'eau et des mesures d'aménagement du territoire. Des mesures actives ne doivent être envisagées que si les autres possibilités s'avèrent insuffisantes. Les options fondamentales ont été définies dans le projet de loi qui est actuellement en consultation.

Il reste malgré tout encore des problèmes à résoudre. Le dimensionnement traditionnel selon des critères hydrauliques n'est pas suffisant. L'analyse des dégâts subis par les ouvrages hydrauliques en 1987 a montré que l'érosion des rives et les laves torrentielles sont en grande partie responsables des dégâts.

Nous sommes conscients de l'insuffisance de nos connaissances – surtout dans le domaine des laves torrentielles – et des limites de notre savoir concernant les problèmes de résistance à l'érosion et les processus de morphologie fluviale. Mais nous ne devons pas nous contenter de dimensionner ce que nous sommes capables de maîtriser et d'éviter ainsi le vrai problème. Les inondations, les érosions et les laves torrentielles sont des processus différents qui exigent des mesures différentes. Cette réflexion conduit à énoncer la condition suivante:

Le dimensionnement des mesures de protection doit être adapté au type de processus de dégât.

Les grandes corrections des cours d'eau du siècle dernier devaient empêcher la tendance à l'atterrissement, et donc les débordements incontrôlés. En ces temps-là, on s'occupait intensivement des aspects théoriques du charriage. Entre-temps, de nombreux torrents ont été corrigés et des bassins de rétention de sédiments aménagés. Il existe aujourd'hui un risque de creusement du lit de nos cours d'eau; la capacité de charriage doit donc être examinée sur la totalité du cours d'eau, afin d'empêcher des dépôts et des érosions non souhaitables, car les plus grands problèmes se manifestent là où le cours d'eau modifie son lit. C'est pourquoi, la condition suivante doit donc être remplie:

La question du charriage doit être soigneusement examinée afin de garantir une protection durable.

Considérant le charriage sur le plan technique, on a remarqué qu'il s'agissait souvent d'importants volumes qui étaient entraînés sur de relativement courtes distances. On admet la plupart du temps que des débordements à l'amont ont pour conséquence de protéger l'aval. Si on se réfère à un point particulier traité dans le cadre de ce projet, il apparaît qu'une extension des dégâts peut concerner des régions intensivement cultivées situées à l'aval. Ainsi:

Des zones de rétention existantes pour l'eau et les sédiments doivent dans la mesure du possible être maintenues.

Il faut encore souligner ici que les ouvrages de protection nécessitent une certaine emprise. Il n'est pas possible, même avec les moyens techniques les plus coûteux, de dériver sans dommages des grandes quantités de sédiments et d'eau dans un passage trop étroit. Un aménagement assez large du bief permet un développement naturel de la faune et de la flore pendant les périodes de débits normaux, et offre une bonne sécurité en cas d'événements extrêmes.

En bref: Dans les concepts relatifs aux mesures à prendre, l'érosion et les laves torrentielles doivent être traitées de la même façon que les crues. La planification doit se faire de façon intégrale et ne pas simplement viser à rétablir l'état antérieur, c'est-à-dire conforme au registre foncier.

7.5 Autres mesures de protection

Le facteur essentiel de ces autres mesures consiste à réduire les dégâts, et non à les empêcher.

Les mesures les plus importantes sont inévitablement les secours apportés par la police, les pompiers, la protection civile et l'armée. De même que toutes les mesures de protection-incendie ne peuvent remplacer les pompiers, les mesures de protection contre les crues ne peuvent remplacer l'aide en cas de catastrophe. Cette assistance entre en jeu lorsqu'une catastrophe se produit malgré toutes les mesures préventives. Au niveau fédéral, on s'efforce actuellement d'améliorer l'aide en cas de catastrophe, en particulier par un engagement plus prononcé de la protection civile. Mais une catastrophe doit avant tout être maîtrisée de l'intérieur, c'est-à-dire par la population concernée. Cette dernière seule connaît suffisamment les lieux et les conditions antérieures, de plus, elle se trouve sur place. Une préparation est toutefois indispensable. Les points sensibles doivent être identifiés, et un dispositif d'engagement doit être développé. Par deux fois, en 1977 et 1987, le modèle du canton d'Uri s'est déjà révélé très performant. Généralement, la Confédération n'a pas d'autres possibilités que de mettre à disposition les moyens financiers et d'établir les concepts généraux d'intervention, car la responsabilité se trouve au niveau local.

L'aide en cas de catastrophe est nécessaire. Elle doit être préparée.

Un système d'alarme déclenché à temps constitue une autre possibilité importante pour diminuer les dégâts. Cependant ce système n'a de sens que s'il existe une organisation capable de prendre des mesures concrètes en cas d'alerte et qui connaisse les temps d'alerte possibles et le degré de fiabilité des prévisions. Comme ces systèmes restent inutilisés pendant de longues périodes, le risque existe qu'ils deviennent inopérants ou qu'ils déclenchent une alarme de manière intempestive. La réaction de la population à une alarme reste imprévisible. De plus, il arrive souvent que des curieux se rendent sur les zones dangereuses suite à une alarme et ralentissent ainsi les opérations de secours.

Un système d'alarme peut faciliter les opérations de secours.

La protection d'objets particuliers est en soi un moyen sûr, car elle essaie d'empêcher des dégâts là où le potentiel est le plus élevé. De plus, les processus naturels ne sont que peu ou pas influencés. La cause de son utilisation modérée doit être cherchée d'une part dans notre perfectionnisme (qui préfère empêcher l'ensemble des dégâts plutôt que de se contenter de les restreindre), et d'autre part dans des problèmes d'ordre financier. Il existe ici une liaison étroite avec les conditions des assurances, car aussi longtemps que les dégâts sont couverts, la motivation fait défaut dans la recherche de prévention. La protection d'objets particuliers doit aussi être considérée en relation étroite avec les mesures d'aménagement du territoire qui permettent de réduire un risque existant. Cela suppose également de connaître la menace existante.

La protection d'objets particuliers devrait être envisagée plus souvent.

Les **assurances** sont un moyen important pour couvrir un dégât matériel et pour permettre ainsi un nouveau départ suite à un événement. Le calcul des primes pour un bien foncier pourrait se faire en fonction de la valeur utile et du danger présent. Ce calcul aurait comme avantage sur d'autres modèles possibles de gestion du sol que la source potentielle de dégâts soit directement considérée. Il reste toutefois les problèmes du calcul des primes, des fortes sommes à assurer et du danger de pertes en vies humaines. Le bien public n'est normalement pas assuré et on cherche à le protéger par des ouvrages situés près des cours d'eau ou par des constructions idoines.

Il convient d'examiner si les assurances doivent participer à l'élaboration des plans de protection et d'affectation.

Des **dons et des aides financières** ont massivement été alloués lors des crues de 1987 et ont permis de payer les dégâts qui n'étaient ni couverts par une assurance, ni au bénéfice d'une aide légale. Grâce à une décision du Conseil fédéral concernant les mesures extraordinaires pour les réparations suite aux intempéries de 1987, la Confédération a aussi fourni une aide immédiate en raison de l'ampleur des dégâts. Cette aide unique a un caractère exceptionnel et ne devrait pas devenir une règle dans ce sens que la Confédération joue le rôle d'une assurance du type fonds spécial pour les dégâts dus aux forces majeures.

L'aide spontanée est souvent la seule possibilité pour apporter un soutien dans les cas de détresse.

En bref: En plus des mesures d'aménagement du territoire et des normes de constructions hydrauliques, l'aide en cas de catastrophe, les systèmes d'alarme, la protection d'objets particuliers et les assurances procurent des possibilités d'assistance supplémentaires pour atténuer les effets des dégâts.

7.6 Etablissement des données de base

Si les dégâts matériels ont pu être recensés de manière exhaustive, il n'en a pas été de même pour les événements naturels, à savoir l'évolution des précipitations, les niveaux d'eau et l'érosion. Les photographies aériennes effectuées après l'événement se sont limitées aux régions dévastées et n'ont pas inclus les bassins versants situés plus haut. Cette lacune est compréhensible, car au moment des événements, les autorités se sont trouvées entièrement accaparées par les opérations de sauvetage. Cette lacune a cependant été comblée par la suite par la mise en place d'un service qui a eu la possibilité de commander des prises de vues aériennes, de mener à bien une campagne de mesures et un inventaire de l'état des lieux.

La documentation relative aux événements doit être améliorée.

Les connaissances acquises lors de ces travaux se révèlent particulièrement importantes en ce qui concerne la formation des laves torrentielles, des crues et des bois flottants, la morphologie des rivières, ainsi que l'histoire de l'environnement et du climat. Le but de l'analyse des causes n'était pas d'entreprendre une recherche fondamentale; il s'agissait plutôt de vérifier si les théories actuelles pouvaient expliquer les phénomènes observés. Force est de constater que dans des domaines comme la répartition des précipi-

tations ou la formation et la dynamique des laves torrentielles, la théorie actuelle ne permet pas d'investigations assez précises. Le programme national de recherche «Changements climatiques et catastrophes naturelles» (PNR 31), en cours, offre une possibilité de mener à bien les recherches fondamentales qui ont fait défaut jusqu'ici.

Les recherches nécessaires dans le domaine des processus de base doivent être encouragées dans le cadre du Fonds National.

En plus de la recherche fondamentale, une recherche appliquée s'avère nécessaire, en particulier pour le recensement systématique des zones à risques, la construction d'ouvrages de protection ou l'établissement de méthodes de dimensionnement adéquates. Ce dernier point implique en particulier:

- une amélioration des relations entre l'étendue, la durée et la probabilité des précipitations;
- la méthodologie pour l'estimation des volumes d'eau aux fins de dimensionnement;
- l'élaboration de méthodes de dimensionnement contre le risque des laves torrentielles;
- la définition de concepts en vue de diminuer l'érosion des rives (morphologie des rivières);

Un renforcement de la recherche spécifique est nécessaire pour la réalisation des mesures de protection adéquates.

La mise en pratique des connaissances acquises représente un domaine d'étude supplémentaire. Cette application doit se réaliser dans le cadre de l'enseignement dispensé dans les hautes écoles et surtout par une postformation des ingénieurs-praticiens et des naturalistes.

Sans postformation des praticiens, tous les résultats des recherches seront sans effet.

Il faut susciter l'intérêt du public pour une meilleure compréhension des problèmes liés aux processus naturels et à leurs effets. L'apparition de dégâts de faible gravité devrait ainsi ne pas provoquer la demande immédiate de mesures de protection. Ceci contredit certes notre sentiment d'ordre parfait, mais traduit la soumission aux lois de la nature. La nécessité de protection se justifie seulement pour des lieux où des intérêts essentiels sont menacés.

L'information publique est nécessaire.

En bref: La recherche fondamentale et interdisciplinaire peut s'effectuer dans le cadre du PNR 31. La documentation concernant des événements qui se sont produits, la recherche spécifique et l'application des résultats dans le domaine de la pratique doivent être renforcées.

8 Conclusions finales

8.1 Réponses aux questions

Sur la base de ce qui a été dit, les réponses suivantes peuvent être apportées aux questions posées au début du mandat:

Question 1:

Les pluies, en terme de volume et d'intensité, ont-elles été assez rares pour que l'on puisse considérer les crues et les glissements de terrains qui en sont résultés comme des phénomènes naturels?

Il faut surtout admettre comme un élément très rare, la combinaison de plusieurs caractéristiques de ces précipitations (conditions antérieures, évolution de la température, instant d'apparition de l'intensité maximale, surface concernée). Aucun de ces facteurs en soi ne peut être considéré comme exceptionnel. La disposition du milieu naturel touché est sensible par nature. Des améliorations par reboisement ou par des ouvrages de protection ne sont possibles que dans une certaine mesure, et il faudra donc encore compter dans le futur avec d'autres événements du même ordre de grandeur, malgré tous les efforts entrepris.

Question 2:

Si l'effet de serre implique un changement de climat comme on le suppose, doit-on s'attendre à subir des crues semblables – ou même plus fortes avec une fréquence plus grande?

Les prévisions que l'on peut énoncer aujourd'hui ne pourront être vérifiées qu'à posteriori et, dans l'état actuel des connaissances, aucune réponse univoque ne peut être formulée. Mais les modifications prévisibles semblent logiques, et l'inquiétude de voir notre espace vital atteint plus fréquemment par des crues est compréhensible.

Question 3:

Est-il possible que des modifications naturelles et/ou humaines augmentent la prédisposition aux crues de telle sorte que leurs volumes puissent dépasser les relations pluie-débit connues à ce jour?

Dans les régions où se sont produites les crues, aucune activité humaine significative ayant pu avoir une incidence négative sur le déroulement des crues n'a pu être mise en évidence.

Question 4:

La mobilisation de matières solides a-t-elle été provoquée par des modifications naturelles et/ou humaines?

Les travaux ayant amené un rétrécissement ou un élargissement des rivières sont à l'origine de l'érosion des berges en de nombreux endroits. Le transport solide a également été augmenté par l'érosion de talus artificiels. Par contre, les bassins de rétention ont diminué la quantité de sédiments apportés au cours d'eau principal. Comme les rivières entraînent ou déposent des matériaux selon leur capacité de charriage, ces modifications anthropogènes n'ont qu'une influence locale. Cependant, les masses de matières en suspension ont certainement été augmentées par l'érosion des talus artificiels.

Question 5:

Notre espace vital a-t-il été modifié par une utilisation intensive à tel point que des crues rares mais non extrêmes puissent provoquer des dégâts disproportionnés?

Les crues extrêmes ont toujours menacé les agglomérations. En 1987, aussi bien des bâtiments récents que d'anciens centres de localités (à l'exemple de Poschiavo ou

de Münster) ont été touchés. L'utilisation du sol est de plus en plus intensive en Suisse. Il faut donc s'attendre à des dégâts toujours plus graves même lors de crues de faible à moyenne importance. Les crues de 1987 ont provoqué des dégâts infiniment plus importants que les grandes crues du passé, tout particulièrement aux infrastructures (rail et routes), vu les investissements réalisés dans ce domaine ces dernières années.

8.2 Résumé

Après les crues de 1987, la population, sensibilisée aux problèmes d'environnement, s'est demandée si la cause de tels événements était à rechercher dans l'utilisation par l'homme de son milieu naturel (par exemple l'imperméabilisation du sol, création de pistes de ski). Les premiers commentaires allaient dans ce sens. Il est en effet assez normal d'expliquer des phénomènes naturels nouveaux (de telles crues ne se sont pas reproduites depuis quelque 120 ans) par les modifications apportées à la nature par l'homme, lesquelles peuvent susciter une certaine inquiétude.

Une recherche dans les archives a cependant montré que le milieu alpin a déjà été sévèrement atteint par des crues catastrophiques comparables en 1868, 1839, 1834, 1640, 1570, 1566, 1511, 1480 et 1342.

Les documents d'archives consultés indiquent en particulier que la crue de 1342 a dû être plus importante que celle de 1987. Avant le XIX^e siècle, la densité de population dans nos campagnes était peu élevée; il est donc exclu que ces catastrophes historiques aient une origine anthropogène. Les causes physiques des crues de 1987 reposent dans les grands volumes de précipitations, la limite élevée de l'isotherme 0°C au moment des événements, dans la forte énergie de pente et dans le potentiel de charriage important. Ces crues comptent parmi les événements extrêmes et peu fréquents, mais elles pourraient bien être dépassées dans le futur.

Les causes des dégâts sont à rechercher dans l'utilisation intensive de notre espace vital, en particulier dans les vallées. Des dégâts d'une telle importance n'ont jamais entraîné de dommages matériels aussi considérables. Mais si l'on compare ces dommages au revenu par habitant, alors la crue de 1868 par exemple s'avère encore plus catastrophique que celle de 1987.

L'extension des agglomérations, et donc des dégâts potentiels, ont rendu les zones construites des Alpes plus vulnérables aux crues. Le reboisement et la construction d'ouvrages de protection contre les crues entrepris depuis le milieu du siècle dernier atténuent les risques de dommages.

Les commentaires émis par le géologue Albert Heim en 1931 à propos des éboulements peuvent être adoptés pour les crues catastrophiques:

«Notre vie est éphémère. La mémoire de l'homme est courte. Les rares éboulements en montagne que nous avons vécus donnent l'impression que ce sont des événements inhabituels, extraordinaires. Ce n'est pourtant pas le cas. Le milieu alpin, spécialement de haute montagne, est la patrie des éboulements. Ceux-ci participent à l'érosion et au modelage des montagnes dont le processus de formation se poursuit de façon brutale, immuable et ininterrompue. En montagne, il faudra toujours s'attendre à des éboulements qui peuvent survenir n'importe quand et n'importe où.»

En bref: Le processus du modelage du paysage n'est pas achevé. L'homme n'est qu'un hôte du milieu alpin et doit se plier à ses lois.

9 Références

9.1 Références bibliographiques

Aschwanden H., Schädler B.; 1988; Les crues de 1987 en Suisse; Service hydrologique et géologique national. Communication n° 10a, Berne OCFIM.

Götz A., Petrascheck A., Zeller J.; 1988; Vorläufige Analyse der Elementarkatastrophen des Jahres 1987 in der Schweiz; Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 40, Nr. 5/6, S. 141–149.

Kafur; 1989; Die Hilfeleistungen anlässlich der Hochwasserkatastrophe in Uri vom 24./25. August 1987; Bericht des zivilen Führungsstabes des Kantons Uri (Kafur); Gamma Druck + Verlag AG, 6420 Altdorf.

Petrascheck A.; 1989; Die Hochwasser 1868 und 1987, ein Vergleich; Wasser, Energie, Luft; 81. Jg., H. 1–3, S. 1–8.

Schweizerisches Bundesblatt; 1869; Berichte der Expertenkommissionen über die Ursachen und den Betrag der durch die Überschwemmungen im Jahre 1868 angerichteten Schäden; Bundesblatt 21. Jg., H. 9, S. 277–403.

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich; 1989; Capacité du Rhône; Etude mandatée par le Conseil d'Etat du Canton du Valais.

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich; 1990; Schnee, Eis und Wasser in einer wärmeren Atmosphäre, Mitt. Nr. 108 der VAW ETH Zürich.

Zanetti B.; Valle di Poschiavo, L'alluvione 1987, la Solidarietà Poschiavina; Tipografia Menghini, Poschiavo.

Zeller J., Röthlisberger G.; 1988; Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987; Wasser, Energie, Luft; 80. Jg., H. 1/2, S. 29–42.

Bundesamt für Wasserwirtschaft; 1990; Ursachenanalyse der Hochwasser 1987; Ergebnisse der Untersuchungen; Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4, Bern, EDMZ, avec des contributions établies par:

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf – Institut de l'aménagement des terres et eaux, EPFL Lausanne – Abteilung Hydrologie des Geographischen Instituts der ETH Zürich – Geologisches Institut der ETH Zürich, Ingenieurgeologie – Geographisches Institut der Universität Bern – Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich – Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern – Laboratoire de recherches hydrauliques, EPFL Lausanne – Ingenieurbüro Basler und Hoffmann, Ingenieure und Planer, Zürich – Büro GEO 7, Bern – Historisches Institut der Universität Bern – Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Dübendorf – Landeshydrologie und -geologie, Bern – Proclim, Bern – Ingenieurbüro Maggia, Locarno – Ingenieurbüro Kissling und Zbinden, Bern.

9.2 Références photographiques

T. Venzin, Truns; photos n° 1, 2, 9.

B. Zanetti, R. Pedrussio, A. Riedo, Poschiavo; photos n° 3, 4, 5, 6 (ces photographies ont été mises à disposition par les éditions Menghini, Poschiavo).

Commune de Fully; photo n° 7.

Kantonales Bauamt Uri; photos n° 8, 10, 16, 17.

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie; photos n° 13, 14, 15.

Nota: La version originale des textes et légendes des figures a été maintenue.