



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



sc | nat 

Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP

u^b

UNIVERSITÄT BERN | Mobilair Lab
OESCHGER CENTRE | for Natural Risks

^b
UNIVERSITÄT
BERN

OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH



1868 – Les inondations qui changèrent la Suisse :

Causes, conséquences et leçons pour le futur



GEOGRAPHICA BERNENSIA

1868 – Les inondations qui changèrent la Suisse :

Causes, conséquences et leçons pour le futur

Avant-propos

Le présent cahier est le résultat d'une idée née au Centre Oeschger pour la recherche sur le climat de l'université de Berne. Il poursuit une longue tradition bernoise : l'étude des crues historiques et de leur pertinence pour le présent. Au cours des deux dernières années, cette idée est devenue un véritable projet de recherche mené conjointement par plusieurs groupes de recherche du Centre Oeschger et du Mobilier Lab for Natural Risks, et qui ont également collaboré avec MétéoSuisse, l'entreprise Meteotest, et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage.

L'approche de base du projet a été de déterminer comment représenter au mieux les fortes précipitations et les crues du passé, ainsi que leurs répercussions, afin d'en tirer des enseignements pour le futur. Il est rapidement apparu que les interactions entre environnement et société étaient primordiales. Du point de vue des sciences de l'atmosphère, il a d'abord fallu reproduire les situations météorologiques et les fortes précipitations de la façon la plus détaillée possible à l'aide d'un modèle météorologique. Les fortes précipitations ainsi reconstituées ont ensuite été introduites dans un modèle hydrologique-hydraulique, grâce auquel il a été possible d'évaluer les facteurs-clés occasionnant des crues. La contribution des historiens a été de réunir et d'évaluer des informations sur les dommages et les conséquences sociales de ces crues. La contribution de la recherche sur les risques, quant à elle, permet d'esquisser la gestion actuelle des crues et de déterminer comment elle s'inspire des événements historiques. Il en résulte un échange extrêmement fructueux entre scientifiques de disciplines très diverses qui a finalement permis la rédaction de ce cahier.

Le fait de remonter loin dans le XIX^e siècle permet d'analyser de nombreux événements et de fournir ainsi des résultats plus solides que si l'on n'avait examiné uniquement les trente dernières années. L'étude

explore une époque passée qui imprègne néanmoins aujourd'hui encore la façon de gérer les crues. Certaines mesures prises jadis ont toujours un impact sur le territoire. En même temps, le regard rétrospectif sur le XIX^e siècle est confronté à une énigme scientifique : les crues étaient manifestement plus fréquentes en ce temps-là que durant la majorité du XX^e siècle. Pourquoi ? Et d'ailleurs, pourquoi la fréquence des crues varie-t-elle ? Répondre à ces questions constituait l'un des objectifs du projet.

La priorité a été donnée à un événement particulier : la crue catastrophique de 1868 (fig. 1) – un événement qui a modifié la Suisse jusqu'à présent. Nous n'avons réalisé que tardivement qu'en septembre 2018, il y aurait exactement 150 ans que cet événement s'était produit ; nous avons alors choisi cette date pour la publication du présent rapport. Traditionnellement, les jours anniversaires d'événements extrêmes du passé ont joué un rôle important dans la maîtrise et la prévention de tels événements. Dans ce sens, le présent cahier s'inscrit dans la tradition de la « culture de la commémoration », que nous abordons cependant d'une façon bien différente – avec une approche interdisciplinaire, scientifique et quantitative (pour une mémoire collective des inondations basée sur des photographies, voir le site du Mobilier Lab for Natural Risks de l'Université de Berne : www.ueberschwemmungs-gedaechtnis.ch).

Les travaux présentés dans ce cahier se basent notamment sur plusieurs projets subventionnés par le Fonds National Suisse (FNS) et l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).² L'impression a été soutenue par le Centre Oeschger pour la recherche sur le climat, l'OFEV et la Commission chimie et physique de l'atmosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT).

Traduction :

Monique Baud

Agencement :

Alexander Hermann

Données bibliographiques :

Brönnimann, S., C. Rohr, P. Stucki, S. Summermatter, M. Bandhauer, Y. Barton, A. Fischer, P. Froidevaux, U. Germann, M. Grosjean, F. Hupfer, K. Ingold, F. Isotta, M. Keiler, O. Martius, M. Messmer, R. Mülchi, L. Panziera, L. Pfister, C. C. Raible, T. Reist, O. Rössler, V. Röthlisberger, S. Scherrer, R. Weingartner, M. Zappa, M. Zimmermann, A. P. Zischg (2018) 1868 – Les inondations qui changèrent la Suisse : Causes, conséquences et leçons pour le futur. *Geographica Bernensia*, G94, 52 S., doi :10.4480/GB2018.G94.03

Traduction :

Allemand (doi:10.4480/GB2018.G94.01)

Italien (doi:10.4480/GB2018.G94.02)

Anglais (doi:10.4480/GB2018.G94.04)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2018
Institut de géographie de l'Université de Berne, Suisse



Fig. 1 : La crue de 1868 à Lustenau, Vorarlberg (cf carte¹ en annexe). La photo est typique des prises de vue de crues d'avant 1900 : en raison des longs temps d'exposition, les gens devaient prendre la pose comme dans un atelier photo et rester sans bouger. La représentation de flots impétueux n'était alors techniquement pas encore possible. Les bateaux dans les rues accentuent en outre le côté dramatique de l'événement. En réalité, les eaux n'étaient pas assez profondes pour permettre aux bateaux de naviguer car la photo montre qu'elles n'atteignent même pas les genoux des enfants. Le photographe se trouvait certainement déjà sur un sol sec avec son appareil (cf aussi fig. 5).

Table des matières

Introduction	6
Stefan Brönnimann, Christian Rohr	
Types de temps liés aux inondations en région Alpine	8
Peter Stucki, Moritz Bandhauer, Martina Messmer, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Olivia Martius	
Fortes précipitations, rivières atmosphériques et inondations en Suisse	10
Olivia Martius, Regula Mülchi, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Peter Stucki	
Précipitations orographiques et convection	12
Paul Froidevaux, Olivia Martius, Peter Stucki, Tom Reist, Luca Panziera	
Formation des crues – Prédiposition de fond	14
Rolf Weingartner, Ole Rössler	
Formation des crues – Prédiposition variable et déclenchement	16
Rolf Weingartner, Ole Rössler, Peter Stucki	
Données documentaires sur 1868 et d'autres crues historiques	18
Christian Rohr	
Longues séries de mesures	20
Stefan Brönnimann, Peter Stucki, Rolf Weingartner, Francesco Isotta	
De l'image radar à l'alerte de crue	22
Urs Germann, Olivia Martius, Yannick Barton, Massimiliano Zappa, Franziska Hupfer	
Reconstruction des conditions météorologiques	24
Stefan Brönnimann, Moritz Bandhauer, Peter Stucki	
« Downscaling »: Reconstruction de la météorologie locale	26
Paul Froidevaux, Peter Stucki, Lucas Pfister	
Modélisation hydrologique	28
Ole Rössler, Rolf Weingartner	
Reconstruction de crues historiques à l'aide de modèles hydrologiques et hydrauliques	30
Andreas Zischg, Ole Rössler, Massimiliano Zappa	
Torrent et crue: recherche de traces sur le terrain	32
Markus Zimmermann, Margreth Keiler	
Dégâts causés par les crues	34
Veronika Röthlisberger, Andreas Zischg, Margreth Keiler, Moritz Bandhauer, Stephanie Summermatter, Peter Stucki	
Répercussions sociales: maîtrise et prévention	36
Andreas Zischg, Stephanie Summermatter, Veronika Röthlisberger	
La protection suisse contre les crues en évolution	38
Christian Rohr, Stephanie Summermatter, Karin Ingold	
Dynamique à long terme: les sédiments lacustres, archives des crues	40
Martin Grosjean	
Fortes précipitations et crues depuis le début des mesures	42
Stefan Brönnimann, Christoph Raible, Simon C. Scherrer	
Crues à la fin du XXI^e siècle	44
Stefan Brönnimann, Ole Rössler, Martina Messmer, Christoph Raible, Andreas Fischer	
Conclusion	46
Stefan Brönnimann	
Notes	47
Crédit photo	51

Introduction

Lorsqu'un membre aimé d'une famille prend le chemin de la tombe, ses proches veillent à l'honorer de leur mémoire. (...) La catastrophe de 1868, dont ont été victimes tant d'êtres humains, avec tous leurs biens, porte certainement la marque d'une tombe. Des milliers et des milliers de victimes s'y rassemblent. Planter une fleur « Vergissmeinnicht » (« ne-m'oublie-pas ») sur cette tombe, comme souvenir pour les vivants et pour l'édification des descendants: tel est le but de ces pages. (Kaiser et Killias, 1870)³

Cet avant-propos d'un texte contemporain de l'événement et relatant la crue de 1868 témoigne de la souffrance des personnes concernées, mais incite également à regarder vers l'avenir. Aujourd'hui, 150 ans après, nous pouvons jeter un regard rétrospectif, reconstituer les événements et les réévaluer. Nous pouvons nous demander comment la nature, le paysage et la société ont changé depuis lors et ce que nous pouvons en apprendre sur les crues actuelles. Les auteurs de l'avant-propos ne pouvaient pas savoir que cette crue allait modifier la Suisse jusqu'au XXI^e siècle.⁴ Alors que les traces de la crue ont disparu depuis longtemps, les mesures prises à l'époque et les changements dans la manière de percevoir les crues imprègnent encore aujourd'hui le paysage de la Suisse – forêts de montagne, cours d'eau, surfaces habitées. La crue est devenue une force contribuant à façonner le paysage et la société. Cette crue n'a pas été la seule dans ce cas. Les événements de 1978, 1987, 1999 et 2005 ont à nouveau conduit à une modification de la façon de penser en matière de protection contre les crues – à nouveau avec des incidences sur le paysage.

Les événements actuels et futurs, ainsi que la réaction de la société, vont continuer à marquer le paysage de leur empreinte. Ainsi, la crue de 1868 n'est pas seulement l'exemple type d'une crue qui nous aide à mieux comprendre les processus à l'œuvre dans l'atmosphère et à mieux modéliser les écoulements, mais elle nous relie, à la manière d'un miroir, les interactions entre société et environnement.

Le présent cahier concerne surtout le présent. Il met en lumière les processus qui génèrent des crues, montre les conséquences pour la société et débat de plusieurs stratégies possibles pour les maîtriser. Plusieurs facteurs sont impliqués dans une crue (cf fig. 2). Il faut d'abord de fortes précipitations, en lien avec des situations météorologiques déterminées. Les fortes précipitations peuvent provoquer des débits élevés – mais seulement lorsque des conditions sont remplies, comme par exemple lorsque les sols sont saturés d'eau, que le niveau d'un lac est déjà haut ou qu'une couche de neige est en train de fondre. Un fort débit peut occasionner une inondation. Cela dépend du lit du cours d'eau et des processus qui s'y déroulent: digues, berges, corrections existantes, mais aussi arbres bloqués. Les fortes précipitations peuvent aussi provoquer des laves torrentielles qui modifient

les tracés d'écoulement et l'apport de sédiments. Les crues causent des dommages aux populations, aux bâtiments, aux infrastructures et aux terres cultivées. Les dégâts dépendent de la façon dont l'homme utilise les zones à risques et donc aussi de décisions antérieures. Un événement extrême peut conduire à des décisions qui ont un impact sur notre avenir. C'est ainsi que la crue de 2005 a modifié le système d'alerte en Suisse, amélioré les processus de l'administration et conduit à la réalisation de mesures de protection contre les crues.

Le présent cahier couvre tous ces aspects. Une double page est consacrée à chaque thème, avec comme priorité l'état actuel des connaissances sur chacun d'entre eux. L'événement de 1868, quant à lui, apparaît à chaque fois dans une ou deux colonnes à droite et en bleu. Il montre comment les processus décrits se sont déroulés concrètement en 1868. Si l'on réussit à reconstituer et modéliser les événements de 1868, on peut évaluer les facteurs déterminants et les conditions préalables – des connaissances qui peuvent aujourd'hui encore nous servir de base de décisions.

La première partie du cahier présente les processus relatifs aux sciences naturelles, en commençant par ceux qui concernent l'atmosphère. Les crues sont le plus souvent dues à un événement de fortes précipitations qui nécessite trois ingrédients principaux: humidité, convergence et élévation (soit à grande échelle et en lien avec les systèmes météorologiques, soit à plus petite échelle sous forme de convection). Trois chapitres consacrés à l'atmosphère traitent des conditions météorologiques, de l'origine de la vapeur d'eau et de la convection. Deux chapitres expliquent la formation des crues en abordant d'abord la prédisposition du bassin versant, puis les facteurs déclencheurs.

Mais comment pouvons-nous aboutir à ces connaissances? La deuxième partie du cahier décrit les méthodes grâce auxquelles nous pouvons étudier les fortes précipitations et les crues aujourd'hui et dans le passé. Les recherches sur le passé sont d'une part basées sur des documents historiques ponctuels qui fournissent de précieuses informations grâce au travail sur leurs sources, et d'autre part sur les longues séries continues de mesures météorologiques et hydrologiques. Un chapitre décrit le système actuel de mesure, de prévision et d'alerte. Pour reproduire aujourd'hui quantitativement un

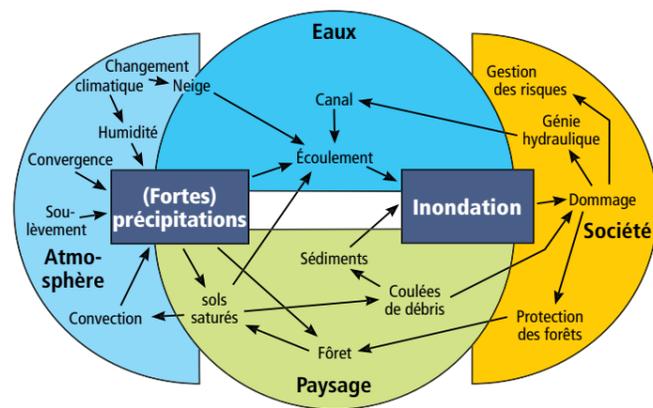


Fig. 2: Les fortes précipitations et les crues dépendent, de diverses manières, de processus météorologiques, hydrologiques, géomorphologiques et sociétaux.

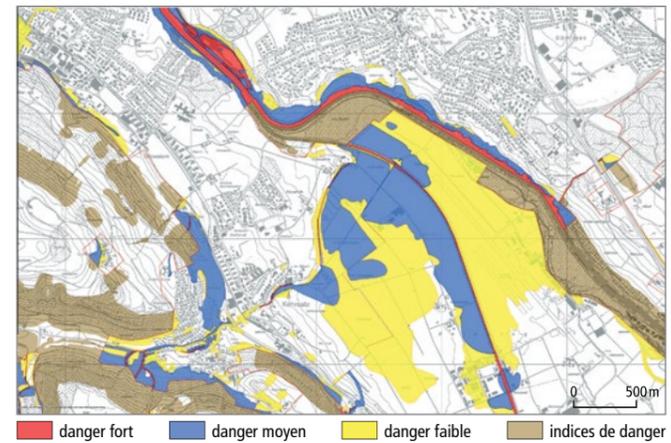


Fig. 3: Détail de la carte des dangers naturels du canton de Berne, région de Kehrsatz-Belpmoos.

événement tel que celui de 1868, il faut toute une chaîne de méthodes de lesquelles les mesures et documents historiques constituent la base. Pour reconstituer une situation météorologique à partir de données de mesure passées, la science utilise des « réanalyses » (données météorologiques provenant de la combinaison de données de mesures et de modèles de prévisions météorologiques), celles-ci sont présentées dans un chapitre. Quelques chapitres spécifiques présentent l'affinement spatial des réanalyses grâce au « downscaling », ainsi que la modélisation hydrologique et finalement la modélisation hydraulique qui calcule à très petite échelle la probabilité d'inondation. Ce sont les outils grâce auxquels on peut comprendre, évaluer, analyser et représenter les processus qui se déroulent dans la nature.

La troisième partie du cahier aborde le thème des effets des crues. Comment les fortes précipitations et les crues modifient-elles le terrain? Quels dégâts subissent les constructions et les infrastructures? Mais aussi: Que se passe-t-il après? Comment la société maîtrise-t-elle les crues? Quelles sont les mesures de prévention possibles et judicieuses (cf fig. 3)? Et comment les crues modifient-elles à long terme notre société?



Fig. 4: Déblayage après une crue.

La quatrième et dernière partie du cahier s'intéresse aux modifications de la fréquence des crues. On étudie d'abord les modifications sur le très long terme, en se demandant s'il y a plus ou moins de crues pendant les périodes chaudes. On examine ensuite plus précisément les modifications intervenues au cours des 200 dernières années. Cette période est particulièrement pertinente, non seulement pour la société d'aujourd'hui, mais aussi pour l'avenir: en effet, si la fréquence des crues a varié sur plusieurs décennies comme le montre l'analyse, elle le fera probablement aussi au futur. Enfin, le dernier chapitre étudie les modifications dans les cinquante prochaines années: à quoi devons-nous nous préparer? Les fortes précipitations deviendront-elles encore plus intenses à l'avenir? Quels effets ces modifications auront-elles sur la fréquence et la force des crues?

La grave crue de 1868

En 1868, après un mois de septembre déjà très pluvieux (et donc des niveaux de lacs élevés), deux phénomènes de très fortes précipitations eurent lieu en une semaine. La première phase de précipitations, les 27 et 28 septembre, concerna surtout les cantons du Tessin, des Grisons et de Saint-Gall. La deuxième phase, du 1^{er} au 5 octobre, toucha le Tessin, le Valais et Uri. La quantité de précipitations accumulée en huit jours au col du San Bernardino (1118 mm) constitue toujours un record pour la Suisse.

Ces précipitations provoquèrent des inondations de part et d'autre de la crête des Alpes. De nombreux cours d'eau débordèrent. La vallée du Rhin et la plaine de Magadino furent envahies par les eaux. Le 4 octobre 1868, le lac Majeur atteignit son niveau le plus élevé jamais mesuré (199,98 m, fig. 5).

Les dégâts causés par cet événement furent énormes. On dénombra 51 morts. De nombreux ponts furent emportés, des parties du village de Vals furent recouvertes d'un mètre de matériaux charriés. Selon une évaluation de Christian Pfister, cet événement aurait causé des dégâts pour env. un milliard de francs (extrapolation pour l'année 2000), ce qui en fait la catastrophe la plus chère depuis 1800 et jusqu'à la crue de 1978.⁵

Les dégâts dépassaient les capacités des localités et cantons concernés. Des dons importants de communes moins affectées, et même de l'étranger, permirent aux communes de reconstruire.^{3,4} Mais les répercussions de la crue allèrent bien au-delà: réalisation de mesures d'aménagements fluviaux⁵ (mesures déjà discutées auparavant), changement de paradigmes dans la gestion politique des inondations et débat sur le rôle de la déforestation qui contribua finalement à faire passer la loi sur les forêts.^{4,7}

Les colonnes de droite en bleu (encadrés) comme celle-ci discutent concrètement de l'événement de 1868. Les processus discutés à gauche dans le texte principal sont commentés pour de l'exemple de 1868. Les encadrés nous conduisent ainsi à travers les processus pertinents de l'atmosphère, de l'écoulement des eaux et relatifs à la société. Ils conduisent à travers les sources historiques et donnent aussi la parole à des voix contemporaines. Ils discutent de la situation météo à large échelle, des débits et des niveaux des lacs. Ils montrent des reconstructions quantitatives des processus atmosphériques, des débits et des inondations de 1868. Ils évaluent les dommages et leur maîtrise par la société ainsi que leurs répercussions à long terme. Enfin, les encadrés intègrent la crue de 1868 dans les variations climatiques sur le long terme.



Fig. 5: Crue du lac Majeur en 1868 à Verbania¹ (à gauche). Au moment du niveau le plus haut, l'eau montait jusqu'au-dessus des arcades des maisons de la vieille ville (repère de la crue sur la photo de droite).

Types de temps liés aux inondations en région Alpine

La météo en région alpine dépend de la disposition des hautes et basses pressions sur l'Atlantique-est et l'Europe. Les champs de pression déterminent la circulation à large échelle et ainsi la distribution des températures, la direction du vent ou l'humidité de l'air en région alpine. Trois types de temps sont particulièrement responsables des inondations en région alpine : type Vb, PV-streamer et blocage.

Types de temps

En météorologie, les champs de pression typiques et récurrents sont souvent classifiés en « types de temps ». Les exemples familiers pour la Suisse sont la Bise, le vent d'ouest ou le Föhn. Comme les Alpes forment une sorte de barrière météo, un type de temps particulier peut avoir des effets régionaux très variés : nuages et pluie d'un côté des Alpes, soleil et temps sec de l'autre côté.^{10,11}

Pour des prévisions détaillées et fiables de la précipitation, des modèles météo modernes sont requis (cf p. 22). Néanmoins, une représentation simplifiée des situations météo par les types de temps présente certains avantages : Premièrement les systèmes météo à large échelle déterminent souvent l'intensité et la distribution régionales des précipitations sur plusieurs jours. Ainsi, les types de temps permettent de représenter le lien entre la circulation atmosphérique à large échelle et la précipitation régionale en région alpine. Deuxièmement, les évolutions atmosphériques et hydrologiques typiques comme par exemple les événements extrêmes peuvent être plus facilement analysés en les catégorisant par type de temps plutôt qu'en considérant chaque situation météo individuellement. Troisièmement, les inondations extrêmes des 150 dernières années en région alpine sont souvent liées aux mêmes types de temps.^{12,13} L'étude combinée des cas analogues permet de cerner les constellations typiquement liées aux inondations et ainsi de les reconnaître en avance.

Par le passé, les types de temps étaient déterminés par l'analyse subjective de cartes météo au sol et en altitude, ainsi que des fronts dessinés. Aujourd'hui plusieurs méthodes statistiques et objectives sont utilisées qui peuvent être également appliquées aux données de stations météo.^{14,15} Pour décrire les types de temps liés aux inondations en région alpine, certaines termes objectives et subjectives resurgissent souvent. Ci-après, nous considérons trois appellations familières plus en détail.

Type Vb, PV-Streamer et blocage

Le nom « Vb » remonte à une classification subjective datant de 1891¹⁶ qui déterminait les types de temps en fonction des trajectoires des dépressions (fig. 6). Seul le nom Vb subsiste encore, par exemple pour parler des inondations dans les Alpes en août 2002 ou en août 2005.¹⁷⁻¹⁹ Les cyclones Vb se forment typiquement au-dessus de la Méditerranée au sud de la France et s'intensifient aux environs de

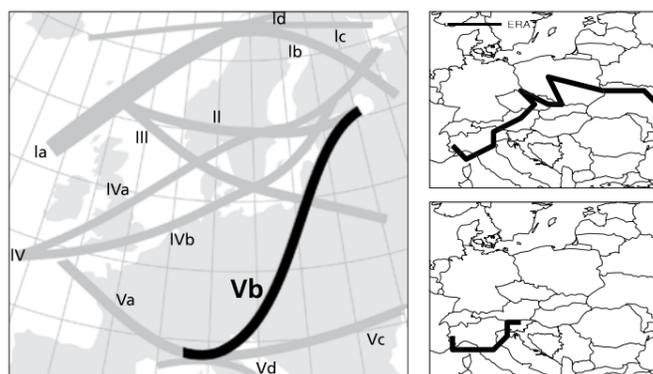


Fig. 6: Gauche: classification et dénomination des trajectoires des minima barométriques (basses pressions) par W.J. van Bebbber.¹⁶ Droite: trajectoires des dépressions pendant les inondations du 10 au 13 août 2002 (en haut) et du 20 au 24 août 2005 (en bas).^{17,18}

Gênes (dépressions de Gênes). Emmenés par un flux d'altitude venant du sud, ils suivent une trajectoire en arc autour de l'est des Alpes puis partent vers le nord. Au-devant du flux d'altitude, une masse d'air très chaude et de plus en plus humide est emmenée vers le nord au-dessus de la Méditerranée. En fonction de la trajectoire exacte et de la vitesse de déplacement du cyclone Vb, la masse d'air humide peut finalement être emmenée contre la face nord des Alpes depuis le nord-est, comme par exemple pendant les inondations d'août 2005.^{12,17-19} Les effets combinés d'un glissement au-dessus d'une masse d'air froid, de soulèvement forcé de l'air humide par les Alpes, et de convection peut donner lieu à des précipitations à la fois très fortes et très persistantes au nord des Alpes.

Les « PV-streamers » (PV pour Vorticité Potentielle ou tourbillon potentiel) sont des précurseurs météorologiques pour les précipitations extrêmes au sud des Alpes. Un streamer décrit une structure longue (env. 2000–3000 km) et étroite (100–500 km) d'air stratosphérique, qui s'étire depuis les régions polaires vers le sud à travers l'ouest de l'Europe et jusque en région Méditerranéenne²⁰⁻²² (fig. 7, voir aussi fig. 44). En général, les streamers se déplacent lentement vers l'est. Sur leur face avant (souvent au-dessus de l'ouest des Alpes), les vents s'orientent vers le nord ou nord-est. En-dessous, dans la moyenne et basse troposphère, la stabilité des masses d'air décroît et un soulèvement à large échelle s'amorce. De plus, un flux soutenu amène de l'air chaud et humide depuis le sud de la Méditerranée contre les Alpes. En conséquence de cette situation météo quasi-stationnaire, les masses d'air humide convergent au sud de l'arc alpin,

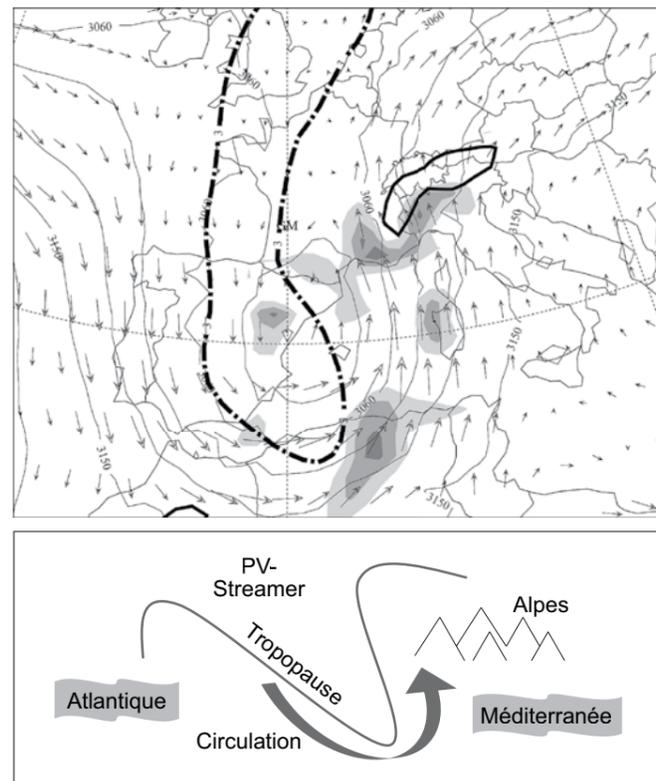


Fig. 7: Situation météo pendant l'inondation de septembre 1993. En haut: tropopause (trait tillé en gars), hauteur de l'isobare 200 hPa (lignes continues), soulèvement des masses d'air (zones grises, en Pa/s) et vent (flèches) dans la haute troposphère. En bas: représentation schématique de la situation.²⁰

s'élevant et déversent de fortes précipitations, souvent répétées pendant plusieurs jours au-dessus de la même région.

Les situations de « blocage » peuvent aussi donner lieu à des précipitations extrêmes étendues et soutenues. Les blocs sont des hautes pressions stationnaires et persistantes (au moins 3–5 jours), qui bloquent le déplacement d'ouest en est des dépressions. Une dépression peut ainsi être bloquée, ou une succession de perturbations peuvent voir leur trajectoire déviée. Les blocs peuvent survenir en aval (à l'est) ou en amont (à l'ouest) des dépressions, voire des deux côtés (fig. 8). Un bloc Omega peut survenir entre deux dépressions (les isobares ressemblent alors à la lettre Ω). Les situations de blocage peuvent aussi permettre la formation de PV-streamers. Le blocage a joué un rôle pour diverses phases des inondations de 1993 et 2000 au sud des Alpes²³ et de 2005 et 2011 au nord des Alpes.^{12,24}

La figure 8 montre l'inondation d'août 2005 en exemple pour discuter les différents types de temps. La dépression de Gênes quasi-stationnaire se trouve ici dans la première phase d'une trajectoire Vb (fig. 6). Cette définition est ici subjective et pas toujours claire: dans ce cas, le cyclone va s'éloigner de la trajectoire Vb après avoir passé les Alpes car il ne continuera pas vers le nord. Plusieurs experts ne considèrent pas non plus la situation d'août 2005 comme un blocage à proprement parler (voir colonne de droite).

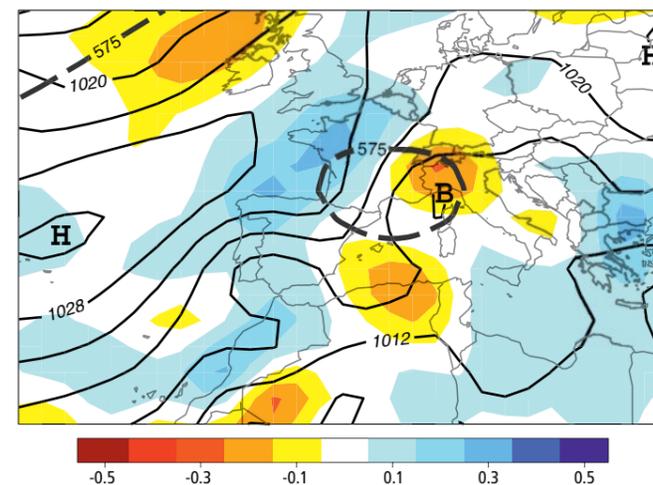


Fig. 8: Situation météo pendant l'inondation le 21 août 2005.²⁵ En dessous d'une goutte froide à 500 hPa (env. 5 km d'altitude, en gras¹²), une dépression de Gênes se développe (« B »), des lignes continues montrent la pression au sol en hPa qui est bloquée entre deux hautes pressions (« H »). Les couleurs montrent les vents verticaux à 500 hPa (Pa/s, couleurs rouges pour les vents ascendants).

Types de temps lors de l'automne 1868

En septembre et octobre 1868, il n'existait pas encore les cartes météo (cf p. 23) qui auraient pu nous permettre de définir des types de temps subjectifs. Par contre, les types de temps peuvent être identifiés soit par les données de stations météo¹⁴, soit par les données de réanalyse (cf p. 24). Malgré qu'il n'y ait pas eu beaucoup de mesures de pression en 1868, nous reconstruisons avec les deux méthodes des types de temps très plausibles pendant l'événement d'inondation.

L'événement a été marqué par la succession de quatre dépressions d'altitude plus ou moins bloquées à partir desquelles deux PV-streamers se sont développés, avançant lentement vers l'est et s'étirant loin vers le sud. Ils étaient accompagnés de vents d'altitude venant du sud voire du sud-est au-dessus des Alpes. Un tel retournement des vents d'altitude est souvent décrit comme critère pour un blocage (voir le texte à gauche). Pour l'épisode du 3 octobre 1868 (fig. 9), les données montrent clairement un soulèvement des masses d'air à large échelle au-dessus de la Méditerranée et le long de l'ouest des Alpes. Le flux d'air proche du sol (cf p. 10) a apparemment emmagasiné de l'humidité provenant de la chaude mer Méditerranée avant de collisionner les Alpes. Le premier PV-streamer a ainsi donné lieu à de fortes précipitations soutenues au sud des Alpes qui ont fait monter le niveau du lac Majeur d'environ 2 mètres; le deuxième PV-streamer l'a ensuite fait grimper de 3 mètres supplémentaires (cf p. 21).

Les situations météo avant et pendant l'inondation ont donc été très typiques pour les précipitations au sud des Alpes. D'un point de vue météorologique, le caractère exceptionnel de l'événement provient de la combinaison successive de quatre situations météo marquées par des PV-streamers et liées à des précipitations très intenses et persistantes. Grâce à ses caractéristiques météorologiques très claires, cette inondation extrême pourrait être aujourd'hui prédite bien en avance. Cet aspect est détaillé dans plusieurs des chapitres ci-après.

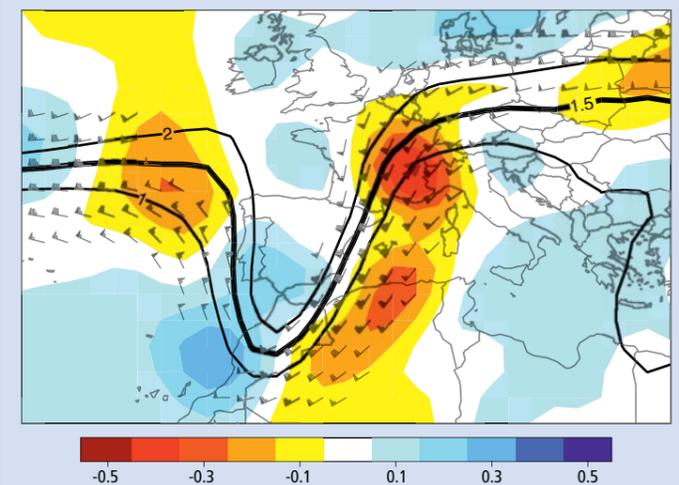


Fig. 9: Situation météo avec PV-streamer le 3 octobre 1868 à midi.²⁵ Des lignes continues montrent les unités de PV (1.5 PVU en gras pour la tropopause). Les flèches avec barbules indiquent la bande de forts vents dans la haute troposphère (à 250 hPa, seules les vitesses de plus de 50 nœuds sont montrées). Les couleurs montrent les vents verticaux (Pa/s, couleurs rouges pour les vents ascendants) dans la moyenne troposphère (500 hPa).

Fortes précipitations, rivières atmosphériques et inondations en Suisse

Les fortes précipitations qui peuvent tomber pendant plusieurs jours au même endroit requièrent un grand approvisionnement en humidité, sous la forme de vapeur d'eau qui peut être transformée en précipitation. Les mécanismes de transport et l'origine de cette vapeur d'eau sont décrits ci-après.

Les précipitations requièrent un approvisionnement suffisant et maintenu en humidité atmosphérique. Cette humidité provient de l'évaporation locale ou est transportée par les vents depuis des sources lointaines. L'évaporation locale provient des plantes, du sol, ou directement des surfaces d'eau. Les sources lointaines pour l'humidité en Suisse sont diverses et comprennent en ordre décroissant d'importance l'Atlantique Nord, la mer Méditerranée, le continent européen, la mer du Nord et la mer Baltique.²⁶ Au nord des Alpes l'humidité est issue principalement de l'océan Atlantique alors qu'au sud des Alpes elle provient essentiellement de la Méditerranée.²⁶ En hiver l'humidité atmosphérique est essentiellement d'origine océanique alors qu'en été l'humidité évaporée depuis la surface terrestre apporte aussi une contribution importante.

Les fortes précipitations qui peuvent donner lieu aux inondations requièrent un approvisionnement en humidité plus intense et, selon leur durée, plus persistant que les précipitations normales. Dans les faits, les épisodes de transport d'humidité particulièrement forts et soutenus sont des indicateurs importants pour les fortes précipitations et les inondations en Suisse.^{27,28} Lors de tels épisodes, l'air humide collisionne contre les Alpes, est forcé de monter en altitude, de condenser, et finalement de générer des précipitations.

Le transport d'humidité dans l'atmosphère n'est pas constant ni chaotique. Il s'effectue souvent de manière organisée le long de structures étroites longeant les fronts froids associés aux basses pressions. Ces structures sont appelées « rivières atmosphériques ». Un exemple d'une telle rivière atmosphérique sur l'Atlantique est présenté en figure 10. Le transport atmosphérique d'humidité intégré verticalement y est montré pour le 10 octobre 2011 à 6UTC (7h en Suisse). Ce transport se calcule en combinant (multipliant) la vitesse du vent avec le contenu en vapeur d'eau pour chaque couche de l'atmosphère et en prenant la somme vectorielle de toutes les couches. Les unités représentent combien de kilogrammes de vapeur d'eau sont transportés

par seconde au-dessus d'une largeur d'un mètre et sur toute la colonne atmosphérique. Le nom de rivière atmosphérique est justifié car la quantité d'eau qui est transportée dans ces bandes étroites au-dessus de l'Atlantique Nord correspond au débit des plus grandes rivières de la terre (par ex. l'Amazone ou le Gange).

À la différence des rivières, l'eau transportée par les rivières atmosphériques est continuellement renouvelée durant le transport par des épisodes répétés d'évaporation et de précipitation.²⁹ Ce renouvellement s'effectue principalement au-dessus des mers car l'évaporation est significativement réduite sur terre. Ainsi la majeure partie de l'humidité des rivières atmosphériques provient des mers. Typiquement, le transport d'humidité diminue aussitôt qu'une rivière atmosphérique rejoint un continent car, à partir de ce moment, plus d'humidité va précipiter que s'évaporer (fig. 10). Les rivières atmosphériques peuvent néanmoins transporter de grandes quantités de vapeur d'eau jusque vers l'intérieur des continents et y générer de fortes précipitations.

Ceci est clairement illustré dans l'événement du 10 octobre 2011. La rivière atmosphérique a été succédée par des inondations créant de forts dommages dans le Kandertal et le Lötschental.²⁴ L'eau des précipitations qui sont finalement tombées sur l'Oberland Bernois et le Valais s'est évaporée partiellement au-dessus de l'Atlantique nord-est et partiellement au-dessus de l'Atlantique subtropical.²⁴ Le transport d'humidité dirigé contre les Alpes le 10 octobre 2011 était extraordinairement fort. Lors des 30 dernières années au nord des Alpes, seuls quelques rares épisodes de transport d'humidité d'une intensité similaire ont eu lieu. Tous ont donné lieu à d'importantes inondations.²⁸ Pour le nord-ouest de la Suisse, les transports intenses d'humidité provenant du nord-ouest au nord sont particulièrement dangereux. Pour le nord-est de la Suisse, les transports intenses d'humidité du nord-est sont particulièrement dangereux. Sur la face sud des Alpes, l'air humide atteint la Suisse depuis le sud. Les valeurs absolues de transport d'humidité sont en général légèrement plus hautes au sud des Alpes

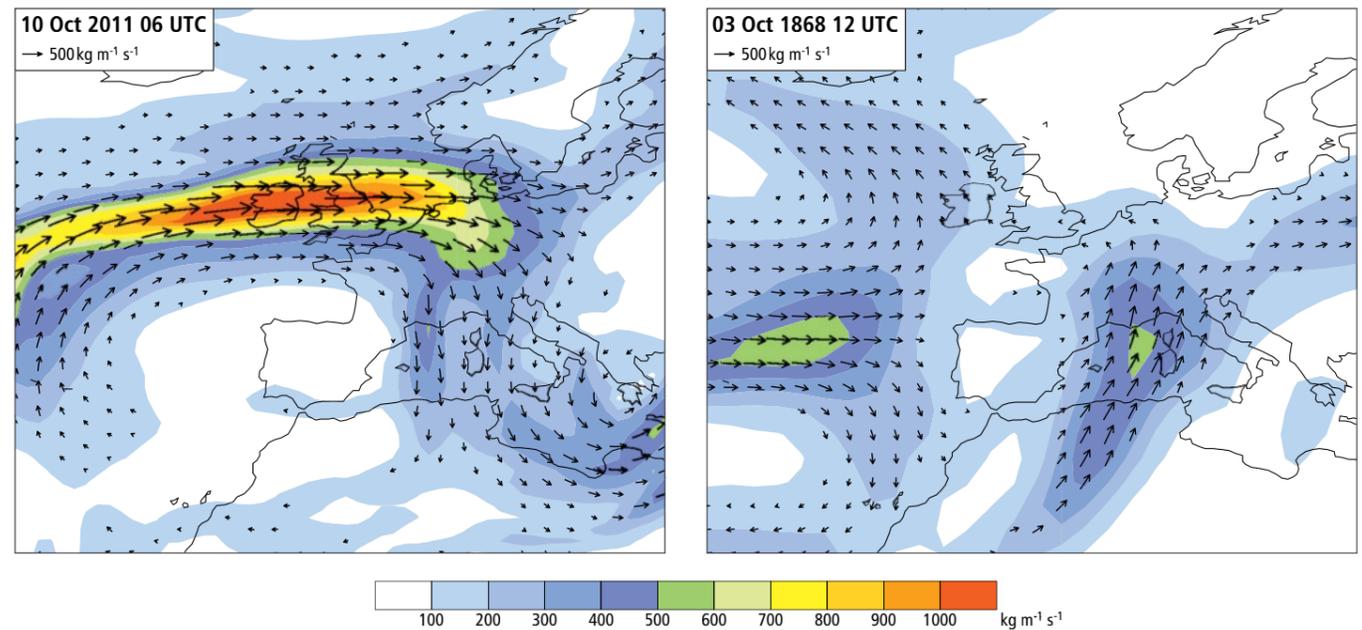


Fig. 10: Transport d'humidité atmosphérique intégré verticalement ($\text{kmm}^{-1} \text{s}^{-1}$, en couleurs) pour le 10 octobre 2011 à 6UTC (gauche) et le 3 octobre 1868 à 12UTC (droite). Les flèches montrent la direction du transport. La rivière atmosphérique est reconnaissable à gauche par une longue structure allongée. L'air humide a atteint les Alpes par le nord le 10 octobre 2011 et par le sud le 3 octobre 1868.²⁵

qu'au nord des Alpes parce que la Méditerranée est plus chaude que l'Atlantique Nord et qu'ainsi plus d'eau peut s'évaporer. Ceci se reflète aussi dans les plus grandes accumulations de précipitation qu'on peut trouver au sud des Alpes.

À part l'intensité du transport d'humidité, la durée du transport intense d'humidité peut aussi jouer un rôle important pour l'accumulation totale de précipitations. Alors que les épisodes de transport d'humidité extrêmement intense durent rarement plus de 12 heures, de larges quantités d'humidité peuvent aussi être transportées contre les Alpes pendant plusieurs jours.²⁸ Ceci a notamment été le cas en automne 1868 (cf la colonne de droite).

Les flux d'humidité prédits peuvent être à leur tour utilisés pour prédire les inondations. Actuellement, les modèles de prévision du temps sont capables de prédire les flux d'humidité plus en avance et plus précisément que les précipitations.³⁰ Les informations sur la direction et l'intensité des rivières atmosphériques, ainsi que sur le transport de vapeur d'eau dans l'atmosphère, sont particulièrement intéressantes pour les prévisions à moyen terme (5 à 10 jours en avance) des fortes précipitations et des possibles inondations. Les très forts flux d'humidité dirigés contre les Alpes représentent ainsi des signaux d'alarme précoces pour les inondations potentielles.

Des analyses préliminaires indiquent que le transport atmosphérique d'humidité va s'intensifier avec le changement climatique. La figure 11 montre le changement de l'intensité du transport d'humidité extrême (percentile 99) d'ici à la moitié et à la fin du 21^e siècle et pour trois modèles climatiques globaux différents. Les modèles climatiques assument une augmentation continue de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sans mesure de réduction particulière. Les changements diffèrent en fonction du modèle. Toutefois, les trois modèles montrent une augmentation claire du transport extrême d'humidité pour la direction du vent qui est importante pour les inondations. De plus, cette augmentation va s'intensifier d'ici à la fin du 21^e siècle.

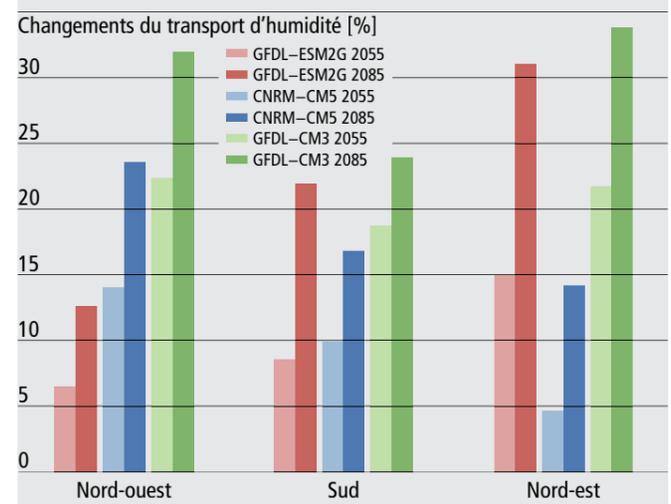


Fig. 11: Changements (en pourcents) de l'intensité des épisodes extrêmes de transport d'humidité pour le nord-est de la Suisse, le nord-ouest de la Suisse et le sud des Alpes, tels que calculés par trois modèles climatiques globaux différents. Les couleurs claires montrent les changements d'ici à la moitié du 21^{ème} siècle, les couleurs foncées d'ici à la fin du 21^{ème} siècle. Les trois modèles montrent une augmentation claire de l'intensité des épisodes extrêmes de transport d'humidité.

D'où est venue l'eau des inondations de 1868?

Il y a différentes approches pour répondre à cette question d'un point de vue météorologique. Nous pouvons par exemple considérer le transport atmosphérique d'humidité intégré verticalement au-dessus d'un domaine donné et pour une période donnée. La figure 10 montre, pour l'événement de 1868, un fort transport d'humidité au-dessus de la Méditerranée ouest qui est dirigé contre la face sud des Alpes (voir les flèches). C'est une indication que la vapeur d'eau provient partiellement de la Méditerranée.

Une deuxième approche est basée sur les trajectoires. Cette approche part du principe qu'une parcelle d'air (un « morceau » d'air) est transportée par le vent comme une sorte de ballon. La figure 12 montre ainsi les trajectoires de vol de parcelles d'air qui, en 3 jours, ont atteint le sud des Alpes en même temps que les très fortes précipitations (le 27 septembre et le 3 octobre 1868). À basse altitude, les parcelles d'air se sont déplacées lentement vers le nord au-dessus de la Mer Tyrrhénienne. Plus haut, les trajectoires passent par la Méditerranée ouest voire même par l'Atlantique subtropical. À la fin, toutes les parcelles d'air ont été soulevées lorsqu'elles ont atteint la face sud des Alpes. Beaucoup de vapeur d'eau a ainsi pu être assimilée pendant plusieurs jours au-dessus de la mer Méditerranée et a ensuite condensé pendant le soulèvement.

La troisième approche n'est pas applicable à l'inondation de 1868. Elle est basée sur l'analyse de l'eau de pluie qui montre différents rapports isotopiques selon son origine. Il n'existe évidemment aucun échantillon d'eau de pluie provenant de l'événement de 1868. L'étude d'événements récents analogues nous indique cependant qu'une partie de l'eau de pluie provient de l'évaporation depuis la surface terrestre saturée. Ceci implique que l'eau est recyclée régionalement par des épisodes répétés de convection atmosphérique.³¹

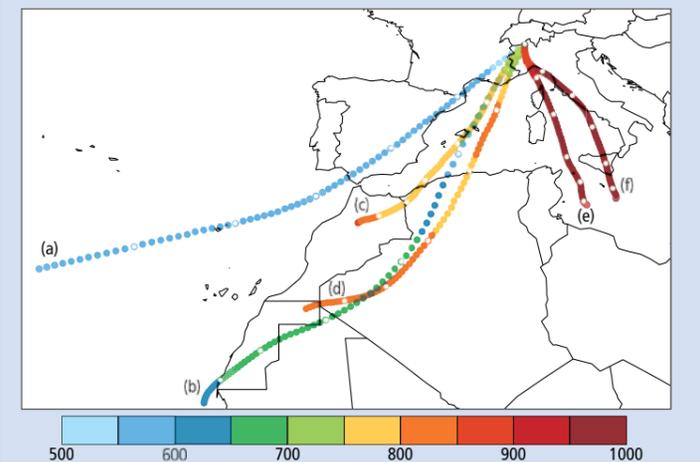


Fig. 12: Trajectoires de parcelles d'air sur une période de 3 jours dans la réanalyse 20CR (cf p. 24). Les trajectoires se terminent à l'endroit 46°E 8°N le 27 septembre 1868 à 12UTC pour les lignes (a), (c) et (e) et le 3 octobre 1868 à 12UTC pour les lignes (b), (d) et (f). Les trajectoires se terminent à différentes altitudes, à savoir environ 5.5 km d'altitude (correspondant à 500hPa) pour les lignes (a) et (b), 3 km (700hPa) pour les lignes (c) et (d) et 1,5 km (850hPa) pour les lignes (e) et (f). Les couleurs montrent la pression en hPa le long des trajectoires. Une pression haute indique qu'une parcelle d'air est proche du sol, une pression plus basse indique que cette parcelle se trouve à une altitude plus élevée. Un point blanc est ajouté chaque 12 heures.³²

Précipitations orographiques et convection

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les situations météorologiques à large échelle peuvent donner lieu à de forts flux d'humidité contre les Alpes centrales. Lorsque de l'air humide rencontre une barrière orographique comme les Alpes centrales, il peut soit être bloqué par la barrière, soit passer autour, soit passer par-dessus. Si l'air passe par-dessus, il monte, se dilate, et refroidit. Comme l'air froid peut contenir moins de vapeur d'eau que l'air chaud, l'air qui monte peut atteindre 100% d'humidité relative. À partir de là, de la vapeur d'eau condense, des gouttelettes de nuage se forment, et peuvent éventuellement produire des précipitations.

L'air passera-t-il autour ou au-dessus ?

La trajectoire d'un flux d'air rencontrant une chaîne de montagne peut être caractérisée par le nombre de Froude. Si le vent contre la montagne est faible, que la montagne est haute et que l'atmosphère est stable, le nombre de Froude est plus petit que un et l'air est soit bloqué par la montagne, soit dévié autour. Au contraire, si le vent est fort, la montagne basse et la stabilité faible, le flux passe au-dessus de la chaîne de montagnes. Nous avons donc une situation de Föhn (fig. 13). L'air saturé monte également plus facilement que l'air non saturé. La capacité d'un flux d'air à passer au-dessus d'une montagne dépend donc de ses caractéristiques verticales de vent, d'humidité et de son gradient vertical de température (sa stabilité).

La stabilité joue un rôle prépondérant. Si l'atmosphère est « stable », l'air qui tente de passer au-dessus d'une montagne va avoir tendance à retomber vers le bas. Le vent horizontal contre la montagne doit donc être particulièrement fort pour permettre à la masse d'air de contrebalancer la stabilité et de passer quand-même par-dessus. Si l'atmosphère est « neutre » l'air passera sans résistance par-dessus la montagne. Si l'atmosphère est conditionnellement instable, l'air qui monte sur le flanc d'une montagne peut (après avoir atteint sa saturation) continuer de monter par lui-même comme un ensemble de bulles chaudes (les cellules convectives). Cette convection atmosphérique est entre-autres responsable des orages. L'air convectif peut atteindre rapidement des altitudes plus hautes que les sommets des montagnes. Ainsi la convection peut augmenter significativement l'intensité et la quantité locales de précipitations.



Fig. 13: Un « mur de Föhn » au-dessus de la Jungfrau. Le flux d'air venant du sud condense alors qu'il passe au-dessus des Alpes et un nuage se forme. Lorsque que l'air redescend de l'autre côté, le nuage s'évapore. Il en résulte un nuage stationnaire ressemblant à un mur.

Les caractéristiques verticales des flux d'air liés aux fortes précipitations dans la région du lac Majeur ont été investiguées pour des événements récents. Les informations proviennent des ballons sonde de l'aéroport de Milano Linate, du radar du Monte Lema au Tessin, ainsi que d'une campagne de mesure du Mesoscale Alpine Programm.³³ Pendant la campagne, des avions et différents instruments au sol ont été utilisés simultanément pour observer l'atmosphère en détail au-dessus des Alpes. Les caractéristiques suivantes sont typiquement associées aux événements de précipitations intenses aux alentours du lac Majeur³⁴ (voir aussi la fig. 14): (1) Des vents du sud-est dans la plaine du Pô au-dessous d'environ 1000m d'altitude et des vents du sud-ouest au-dessus (2) une humidité relative proche de 100% entre environ 500m et 3-4km au-dessus du sol signifiant que les vents du sud transportent de l'humidité contre le sud des Alpes centrales et (3) une atmosphère qui est neutre, voire conditionnellement instable.

Convection et grêle

C'est en effet la présence d'instabilité conditionnelle, et donc de convection, qui fait souvent la différence entre des précipitations « extrêmes » ou seulement « intenses ».³⁴ En cas de fortes précipitations en Suisse, le flux d'air arrivant est souvent nuageux et les nuages locaux formés par la convection ou par une ascension forcée de l'air au-dessus d'une montagne sont souvent cachés dans la couverture nuageuse générale. Les nuages locaux peuvent cependant influencer la précipitation de plusieurs manières. Typiquement, les cellules convectives n'existent que pour quelques heures et ne s'étendent que sur quelques kilomètres carrés. Si plusieurs cellules se succèdent au même endroit, elles peuvent néanmoins donner lieu localement à une forte accumulation de précipitations (fig. 14).

La convection est également nécessaire pour la grêle. La grêle se forme par des températures négatives dans des nuages dits « à phase mixte ». Les flocons de neige collectent des gouttelettes et ensuite regèlent. Des boulettes de glace se forment qui collectent d'autres gouttelettes et fusionnent avec d'autres boulettes puis regèlent, et ainsi de suite. Le facteur limitant pour la taille des grêlons est la force des courants ascendants qui doivent maintenir en l'air des boulettes de glace ou des grêlons de plus en plus gros. Des courants ascendants suffisamment forts pour obtenir de gros grêlons ne se trouvent que dans les nuages convectifs.

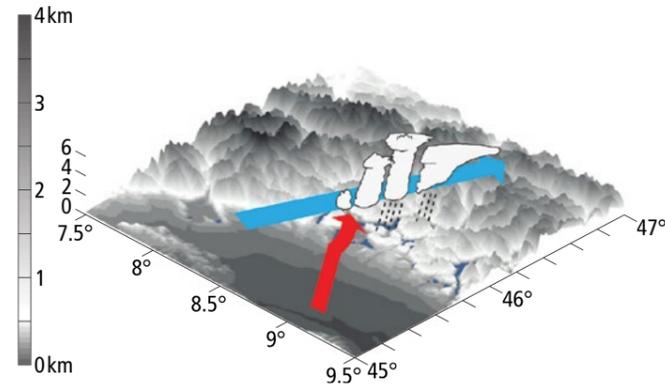


Fig. 14: Schéma conceptuel de la convection au-dessus de la région du lac Majeur.³⁴ L'air des basses couches en rouge, humide et conditionnellement instable, est forcé à monter lorsqu'il rencontre les Alpes. Des cellules convectives sont alors initiées, puis transportées par le flux des couches moyennes (en bleu). Les cellules convectives suivent des trajectoires similaires et produisent des précipitations au même endroit. Cette succession de cellules résulte localement en une forte accumulation de précipitation.

Inondation destructrice dans l'Emmental en 1837

Le 13 août 1837, un orage dans une vallée latérale a généré la plus grande inondation connue de l'Emme. L'événement est connu grâce à un document de Jeremias Gotthelf: « Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837 ». Gotthelf, qui a écrit le document sur la base d'impressions et de discussions collectées alors qu'il visitait la vallée directement après la catastrophe, décrit comment l'inondation dévastatrice a été générée par une succession d'orages. En 2002, des études ont montré sur la base de modèles, qu'à côté de l'intensité et de la quantité de précipitations, la prédisposition du bassin versant a également été cruciale: sans les orages des jours d'avant il n'y aurait pas eu de grande inondation.

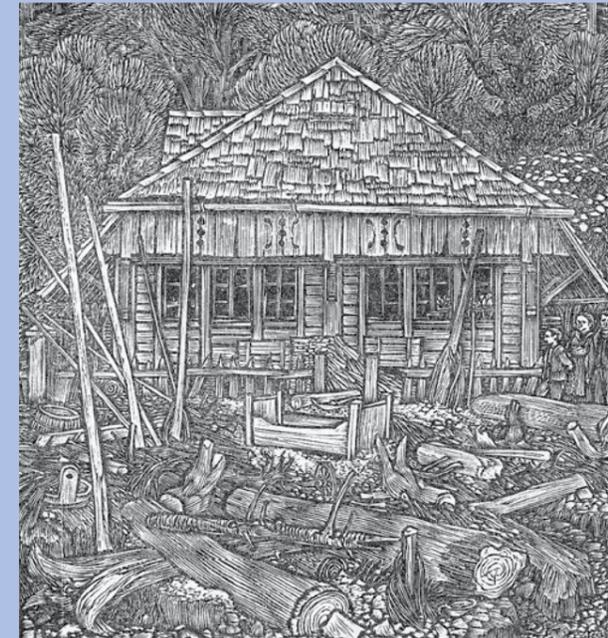


Fig. 15: Gravure sur bois d'Emil Zbinden; illustration pour édition par la Büchergilde Gutenberg (1951).

Quel rôle a joué la convection pour l'événement de 1868 ?

Les processus décrits dans ce chapitre se sont déroulés d'une manière similaire pour l'inondation de 1868. Ceci est documenté dans différentes sources et confirmé par les simulations.³² Durant les deux phases principales de précipitation entre le 26 septembre et le 4 octobre 1868, diverses sources historiques font rapport de pluie persistante, d'orages violents et d'événements de grêle isolés.^{3,35} Les accumulations journalières de précipitation pendant cette période (par exemple pour le 3 octobre 1868, fig. 33) indiquent une activité orageuse car elles sont relativement indépendantes de l'altitude et varient fortement sur une courte distance.³²

La figure 16 illustre l'importance de la convection pour l'événement de 1868 tel qu'il est reconstruit par le modèle WRF (cf p. 26). Le flux d'air se déplace vers le nord (de gauche à droite le long de la figure) à moins de 4km d'altitude (au-dessous de 600hPa). Au-dessus, le flux d'air se déplace vers l'est (il vient vers le lecteur). Les couleurs gris clair indiquent que le flux d'air n'est pas saturé au-dessus de 900hPa sur Gênes (Genoa). Lorsque ce flux traverse la plaine du Pô et rencontre le sud des Alpes centrales, il est soulevé et atteint sa saturation en humidité. Une épaisse couverture nuageuse se forme au-dessus des Alpes et y produit de la pluie. La couleur vert-gris correspond plus ou moins à la couverture nuageuse, la pluie n'est pas montrée. Les multiples contours rouges entre Locarno et Gênes représentent les courants ascendants d'un orage convectif approchant Locarno. L'orage humidifie les hautes couches et génère un cumulonimbus très épais: l'air est saturé entre le niveau du sol et 300hPa (env. 9km d'altitude) à l'endroit de l'orage. Dans le modèle, l'orage continue ensuite de se déplacer vers le nord et produit de fortes précipitations quatre heures plus tard au-dessus du lac Majeur (cf p. 27).

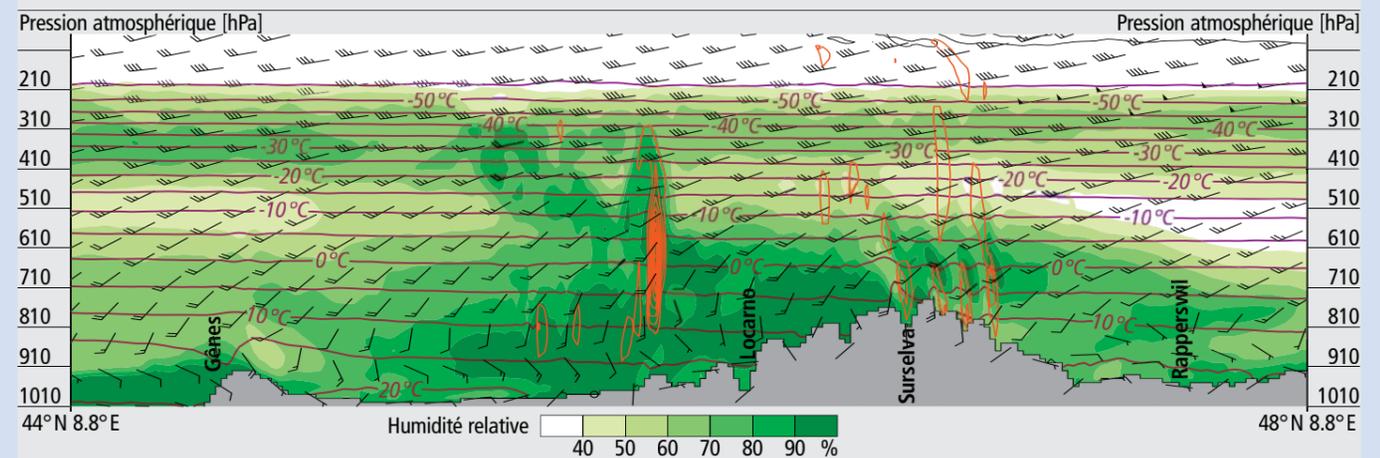


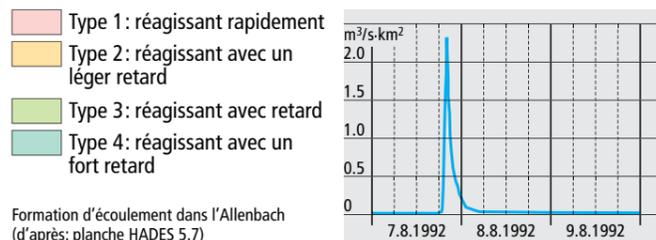
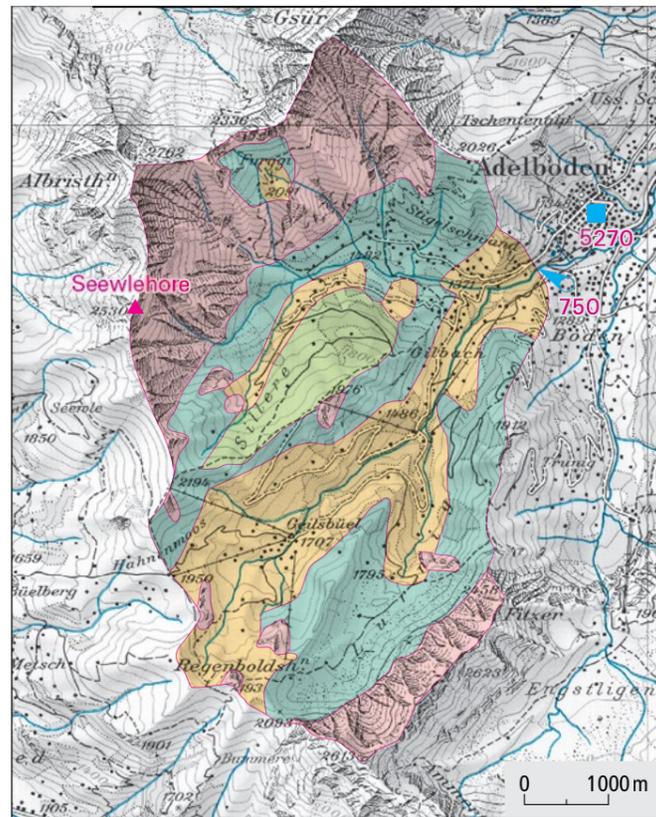
Fig. 16: Coupe verticale sud-nord (sud à gauche, nord à droite) au-dessus des Alpes pour le 26 septembre 1868 à 21 UTC. Les données proviennent d'une simulation avec le modèle météo WRF (cf p. 26) sur une grille de 2km de côté et comprenant 40 couches. La topographie en gris foncé correspond à la topographie du modèle. Les couleurs montrent l'humidité relative. Le vent horizontal est représenté par des flèches à barboles: pointant vers le haut pour un vent du sud (vent venant du sud) pointant à droite pour un vent d'ouest, etc. Plus les flèches contiennent de barboles (traits obliques), plus il y a de vent (10 nœuds, soit environ 20km/h pour un barbole). Les contours rouges indiquent les courants ascendants. La limite du 0 degré se situe aux alentours de 630hPa (environ 4km au-dessus de la mer).

Formation des crues – Prédiposition de fond

Les crues proviennent de l'interaction complexe entre la prédiposition de fond, la prédiposition variable et les précipitations déclencheuses. Le sol, la géologie, l'utilisation des terres et la topographie déterminent la prédiposition de fond d'un bassin versant. Celle-ci définit comment un bassin versant réagit à de fortes précipitations, quelle proportion des précipitations parvient jusqu'à l'écoulement et comment l'onde de crue s'écoule. Pour comprendre l'ensemble de la prédiposition aux crues d'un bassin versant, il faut tenir compte de la quantité, de la durée et de l'intensité des précipitations déclencheuses ainsi que d'autres paramètres variables.

Formation des écoulements – La crue s'amorce

Ce qui est déterminant pour l'empreinte d'une crue, c'est la proportion de précipitations qui parvient à l'écoulement. C'est très différent si ce sont 10 ou 70 % des précipitations qui s'écoulent directement. Dans ce contexte, on parle de processus de formation des écoulements. Dans un bassin versant, ceux-ci varient selon le type de sol et les conditions géologiques. On distingue essentiellement quatre types. (1) Si le sol est peu perméable, la précipitation ne peut pas s'infiltrer et s'écoule en surface. (2) Si le sol est saturé (p. ex. prairie humide), l'eau de la précipitation ne peut pas non plus s'infiltrer. Dans ces cas, une grande partie de la précipitation s'écoule donc directement et avec peu de retard. (3) Si la précipitation s'infiltré dans le sol, que ce soit à travers le substrat ou des macropores, il faut alors se demander s'il y a des couches imperméables dans le sol. Si c'est le cas, l'eau s'écoule de côté et la précipitation ne contribue que dans une faible mesure et avec retard à la crue. (4) Du point de vue de la protection contre les crues, la situation



Formation d'écoulement dans l'Allenbach (d'après: planche HADES 5.7)
Fig. 17: Formation d'écoulement dans l'Allenbach à Adelboden: 1 évaluation de la prédiposition de fond.³⁶

est particulièrement favorable lorsque l'eau de la précipitation s'écoule à travers le sol et s'infiltré dans un sous-sol géologique perméable. La précipitation n'arrive alors dans l'écoulement qu'après plusieurs jours, voire plusieurs semaines et, ainsi, ne contribue pas à la crue.

La prédiposition de fond à une crue d'un bassin versant peut être évaluée en fonction de la répartition et de l'extension spatiale de ces quatre types. Dans le cas de l'Allenbach à Adelboden (fig. 17), les types (1) et (2) occupent non seulement une grande partie de la superficie, mais ils se trouvent aussi dans des zones raides et proches du ruisseau. En été, de grandes crues surviennent après des précipitations orageuses intenses.

Outre le rôle prédominant du sol et de la géologie, d'autres facteurs, comme l'utilisation des terres et la déclivité exercent une influence sur la formation des écoulements. Le rôle de la forêt est sujet à de nombreuses discussions et controverses. Grâce à la canopée, qui retient les précipitations, et aux propriétés d'infiltration, souvent favorables, du sol forestier, la forêt permet d'atténuer les crues, surtout lors d'événements mineurs. Lors de grosses précipitations cependant, ces facteurs n'ont plus qu'une importance secondaire.

Concentration des écoulements – La crue s'écoule

La concentration des écoulements décrit comment l'écoulement formé sur place se déverse dans le réseau hydrographique. Des facteurs comme la pente, la densité du réseau hydrographique et les propriétés du lit fluvial sont déterminants. La forme du bassin versant influence aussi le type et le déroulement de la crue. S'il pleut sur un bassin versant de forme arrondie, l'eau conflue simultanément en raison de chemins d'écoulement de longueurs comparables. Il en résulte des pointes de crue plus hautes que dans les bassins versants allongés.

En Suisse, les bassins versants des Préalpes, au nord des Alpes, et ceux du sud des Alpes, situés à plus haute altitude, présentent une prédiposition de fond qui provoque de fortes et rapides réactions aux crues. Ces bassins sont raides et ont un réseau hydrographique dense. En cas de précipitations intenses ou de longue durée, il en résulte les plus hauts volumes de crues par km² dans ces deux régions (débit d'écoulement; cf fig. 18)

Au cours des 200 dernières années, la plupart des cours d'eau ont été endigués et corrigés. Ces aménagements ont amélioré la protection contre les crues jusqu'à une certaine importance. En même temps, ils

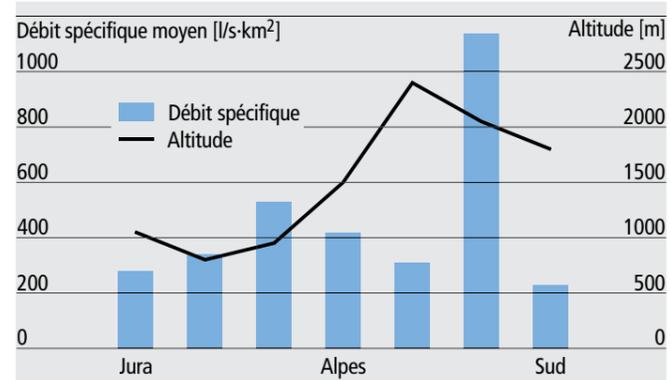


Fig. 18: Apport de débit [l/s.km²] d'une crue moyenne le long d'un profil nord-sud à travers la Suisse.³⁷

ont contribué à accentuer les pointes de crues, pour deux raisons: (1) dans des lits corrigés, les crues se propagent nettement plus rapidement que dans des lits naturels et ramifiés, ce qui produit des pointes de crue plus élevées. (2) Les surfaces bordant les cours d'eau, autrefois régulièrement inondées, sont actuellement protégées par des digues et comprennent des habitations, des industries et des transports. De précieux espaces de retenue, dans lesquels les crues étaient temporairement stockées (réservoir d'accumulation) et qui diminuaient les pointes de crues, ont ainsi été perdus.

Un lac peut aussi atténuer les pointes de crue en fonction de sa capacité de retenue (son effet tampon, cf fig. 19). Celle-ci varie selon les lacs (cf tableau 1). Le rapport entre la capacité de retenue et le débit des affluents est déterminant pour le degré de l'effet atténuant. Les lacs dans lesquels la retenue est faible par rapport au débit des affluents, ont un faible effet atténuant. C'est en particulier le cas des lacs de Thoune et de Sarnen. Mais pour le lac de Thoune, la construction en 2009 d'une galerie d'évacuation des crues a permis de créer un espace supplémentaire de rétention.

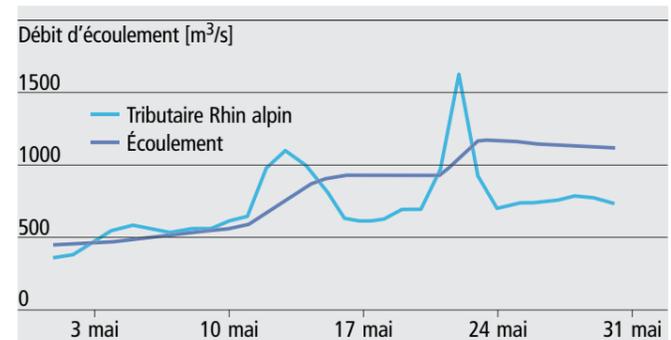


Fig. 19: L'effet atténuant du lac de Constance lors des deux crues de mai 1999 (données: OFEV).

Ces exemples montrent comment l'homme peut contribuer, dans une certaine mesure, à déterminer la prédiposition de fond – p. ex. par l'aménagement des eaux ou la délimitation d'espaces de rétention (espaces dans lesquels l'eau peut être retenue). Mais ce n'est pas le cas pour d'autres facteurs déterminants comme les pentes ou les propriétés du sous-sol.

Nom du lac	Superficie bassin versant [km ²]	Superficie du lac [km ²]	Retenue [mm] ¹⁾	Apport lors d'un événement centennal [mm/d]	Rapport retenue/apport [jours]
Lac de Constance	11 887	541,2	69	24	2,88
Lac de Zurich	1 840	90,1	32	30	1,07
Lac des Quatre Cantons	2 251	113,6	44	43	1,02
Lac de Sarnen	267	7,5	30	60	0,50
Lac de Zoug	259	38,3	151	49	3,08
Lac de Brienz	1 129	29,8	40	35	1,14
Lac de Thoune	2 490	48,4	12	24	0,50
Lacs du pied du Jura	8 217	280,7	41	19	2,16

1) Volume du lac entre la limite de régulation (niveau moyen du lac) et la limite des crues, normé par la surface du bassin versant

Tab. 1: Valeurs-clés significatives des lacs suisses relatives aux crues.³⁸

Prédiposition de fond en 1868

Dans le bassin versant du lac Majeur, la prédiposition aux crues est nettement plus élevée que dans d'autres régions de Suisse. La fig. 20 compare trois dimensions importantes de prédiposition de fond dans les principaux bassins fluviaux de Suisse. Le bassin fluvial du Tessin – bassin versant du lac Majeur – présente une topographie escarpée. Le sous-sol géologique se compose en outre de roches cristallines qui ne peuvent pas retenir l'eau et provoquent donc la formation d'écoulements. Enfin, la zone se trouve dans une région hydro-climatique dans laquelle se produisent les plus fortes intensités de précipitations de Suisse. Face à ces facteurs favorables aux écoulements, on trouve l'une des plus grandes surfaces boisées de Suisse et l'effet de rétention du lac Majeur. Le volume de retenue de celui-ci, par rapport à son bassin versant (6386 km²), est d'environ 50 mm.

Contrairement à la géologie et à la topographie, la couverture des sols varie dans le temps. En 1868, la surface de forêts était plus petite qu'aujourd'hui. Ginzler et al.³⁹ parlent d'une surface de forêt environ deux fois plus restreinte. La rétention du lac était plus élevée en raison d'un rapport différent entre le niveau du lac et l'écoulement (cf p. 31).⁴⁰

Si l'on rapproche ces différents facteurs, on obtient l'image d'une région propice aux crues – aujourd'hui et plus encore en 1868. En fait, les cours d'eau et les lits se sont « adaptés » à cette prédiposition de fond en intensifiant, pendant des siècles, la déclivité des écoulements, si bien que de très forts écoulements se forment, certes, mais pas forcément des crues susceptibles de quitter le lit des cours d'eau. On le constate clairement dans le cas de lits de rivières relativement larges de la région. Quant à la crue de 1868, il faut en outre retenir que la prédiposition de fond agit surtout à brève échéance sur la réaction aux précipitations du bassin versant, alors qu'en cas de pluies qui durent plusieurs jours – comme ce fut le cas en 1868 –, l'effet est plus faible.

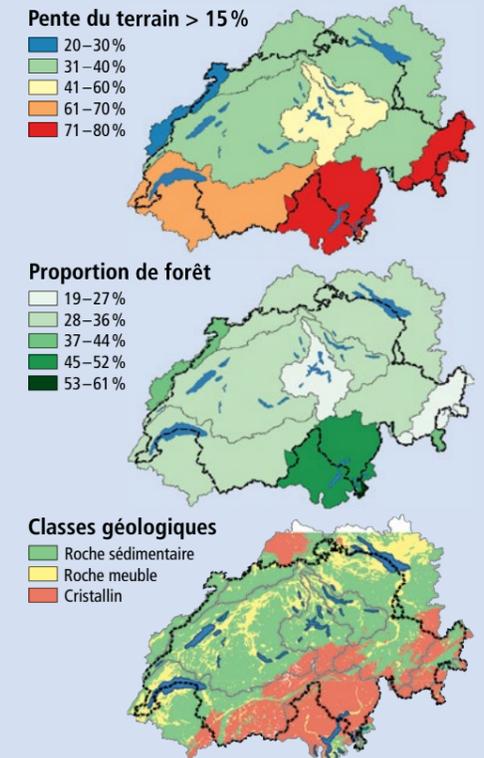


Fig. 20: Facteurs de prédiposition de fond en comparaison suisse. Fraction de surface avec des pentes de plus de 15% (en haut), des forêts (au milieu), et une géologie cristalline (en bas). Les fortes pentes et la géologie cristalline augmentent la prédiposition aux crues; la forêt la diminue.

Formation des crues – Prédiposition variable et déclenchement

À côté de la prédiposition de fond, qui ne varie pas au cours du temps, différents facteurs variables dans le temps, en particulier les précipitations déclencheuses, revêtent une importance majeure. Parmi les facteurs variables importants figurent la saturation du sol, la fonte des neiges et l'altitude de la limite du zéro degré. On peut classer les précipitations déclencheuses en fonction de leur quantité, de leur durée et de leur intensité.

Complexité des crues

Les crues surviennent dans l'interaction complexe entre prédiposition de fond, prédiposition variable et déclenchement, comme le montre l'exemple du bassin versant alpin de la Kander (Oberland bernois) : depuis 1999, on observe une multiplication des grandes crues, dont les pointes sont également plus hautes que dans la période précédente (fig. 21). On pourrait supposer spontanément que c'est la modification d'un seul facteur qui en est responsable. Mais une analyse plus précise montre que ce n'est pas le cas (cf fig. 22). Les plus grandes crues sont apparues en raison de combinaisons de paramètres les plus diverses : en 1999 (cf p. 8) et 2011 (cf p. 10), c'est la fonte des neiges qui a essentiellement contribué à l'écoulement de la crue. Lors de la crue d'août 2005 (cf p. 8) – la plus grande depuis 1903 –, la quantité de précipitations tombées en trois jours a été très importante. Lors de l'événement de 2007, également en août, les précipitations d'un seul jour ont été très fortes ; mais à cause de la limite du zéro degré relativement basse, de la neige, et non de la pluie, est tombée jusqu'à une relativement basse altitude, si bien que ce n'est pas l'ensemble du bassin versant qui a contribué directement à la crue. La crue de 1987, présentée dans la fig. 22, se distingue clairement des autres. Au début de l'événement, le sol était peu saturé et les précipitations déclencheuses nettement plus faibles. Seule la limite du zéro degré se situait à très haute altitude.

Les crues sont donc dues à l'interaction complexe entre différents facteurs. Les plus grandes crues interviennent lorsque la constellation de

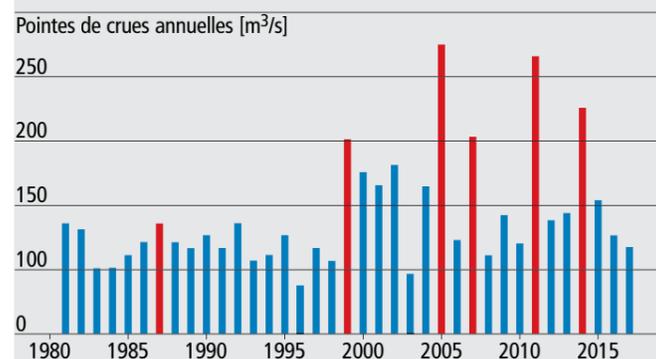


Fig. 21: Pointes de crues annuelles de la Kander. En rouge: les crues analysées dans la fig. 22.

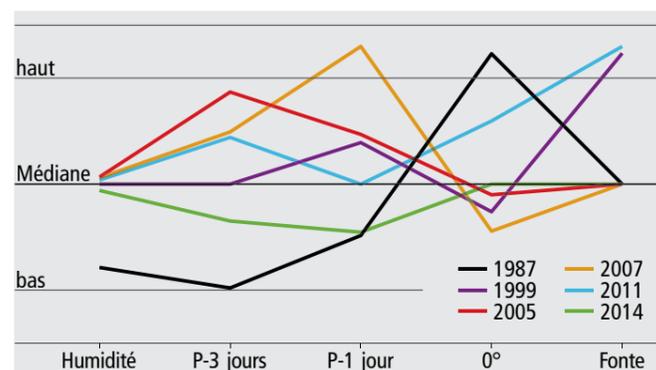


Fig. 22: Prédiposition variable et déclenchement des plus grandes crues de la Kander (cf fig. 21). Humidité: saturation du sol au début de l'événement; jours P-3, jour P-1: quantité de précipitations en 3 et 1 jour(s); 0°: altitude de la limite du zéro degré; fonte: contribution de la fonte des neiges.

ces facteurs est particulièrement défavorable, à savoir lorsque les précipitations déclencheuses tombent sur un sol déjà saturé, que la limite du zéro degré est très haute pendant l'événement et que la fonte des neiges contribue également à la crue.

Précipitations déclencheuses

Diezig⁴¹ a étudié et classé les précipitations déclencheuses des plus grandes crues dans 39 bassins versants suisses : en tout plus de mille événements entre 1974 et 2003. Un tiers environ des précipitations de déclenchement ont duré entre 12 et 24 heures et présentaient une intensité [mm de précipitations par heure] relativement forte. Ces « pluies brèves » sont ainsi très importantes pour le déclenchement d'une crue. Environ 20 % des événements ont été déclenchés par des « pluies persistantes » ou des « averses ». Les « pluies persistantes » durent deux ou plusieurs jours et sont très abondantes. Les « averses » sont le plus souvent de courte durée (de quelques minutes à quelques heures) et sont surtout liées aux orages. L'intensité des précipitations est alors forte, voire très forte.

La fig. 23 présente un aperçu de la répartition spatiale des types de précipitations. Dans l'espace préalpin, les « averses » jouent un rôle important car les orages y sont fréquents. Les « pluies persistantes » sont très importantes dans la partie centrale de l'arc alpin, mais aussi au Tessin. Il est à relever que dans la région des Alpes, le type le plus fréquent – « pluie brève » – n'a qu'une faible importance. Dans le Jura, on trouve des événements « pluie sur neige » : la chaleur de la pluie peut faire fondre une partie de la neige qui apporte ainsi une contribution supplémentaire à l'écoulement. En mai 1999, la combinaison de « précipitations déclencheuses » et de fonte des neiges a provoqué de très grandes crues dans la zone alpine (fig. 24) qui ne sont toutefois apparues qu'en raison d'une combinaison inhabituelle de différents facteurs variables : les basses températures de l'air jusqu'en avril ont empêché la fonte de la neige, dont la quantité était supérieure à la moyenne ; une hausse subite des températures a ensuite provoqué une fonte intensive, causant une saturation des sols. Cette combinaison de facteurs n'aurait pourtant pas suffi à générer de très grandes crues, comme l'atteste l'année 2018. En mai 1999, ce sont des pluies persistantes relativement intenses qui ont provoqué des pointes de

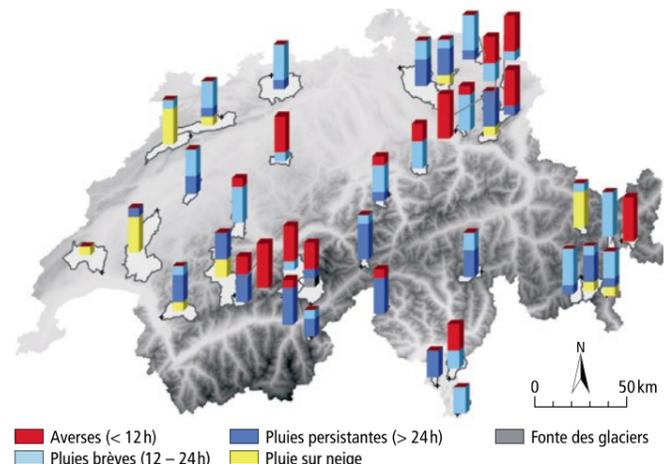


Fig. 23: Fréquence pondérée des types de précipitations déclencheuses dans quelques bassins versants choisis. La pondération donne une plus grande importance à un type de précipitation qui provoque une grande crue qu'à un type qui ne génère qu'une petite crue.

(p. ex. au lac de Thoune). Selon le bassin versant, la contribution de la fonte des neiges à l'ensemble de l'écoulement était de 15 à 30 %.⁴²

Rôle de la limite du zéro degré

En région alpine, de bonnes connaissances de la prédiposition de fond et de l'intensité des précipitations déclencheuses ne suffisent que partiellement à pouvoir évaluer ou prédire une crue. En fait, l'altitude de la limite du zéro degré joue un rôle majeur. Elle détermine dans quelles zones les précipitations tombent sous forme de pluie et ont donc un impact sur l'écoulement. Dans le cas de la Kander, p. ex., les très grandes crues n'apparaissent que lorsque la pluie se déverse sur 80 % minimum du bassin versant. C'est le cas lorsque la limite du zéro degré se trouve à environ 2400m d'altitude.

En Suisse, entre 1961 et 2016, la limite du zéro degré s'est élevée de façon significative à toutes les saisons. L'élévation générale est de 200m en automne et de 400m au printemps et en été.⁴³ La prédiposition variable aux crues s'est donc accentuée de manière générale. Si la température continue à augmenter, la limite du zéro degré va non seulement s'élever, mais l'intensité des précipitations va aussi augmenter (cf p. 44). Avec le réchauffement climatique, des facteurs importants liés aux crues se modifient dans une direction défavorable. C'est pourquoi la thématique des crues va continuer à nous occuper à l'avenir.



Fig. 24: La crue de mai 1999 à Berne.

Prédiposition variable en 1868

La crue de 1868 a été précédée par un mois de septembre pluvieux³⁵, qui a épuisé la capacité des sols à stocker l'eau et fait monter nettement le niveau des lacs dès mi-septembre (fig. 34). En septembre 1868, le niveau des lacs affichait ainsi la sixième valeur la plus importante jamais mesurée à cette période de l'année. Pour la saturation des sols, il n'existe pas de données comparables, mais les modélisations³² hydrologiques confirment l'hypothèse évidente de stockage épuisé (sols saturés) dès fin septembre 1868.

S'ajoutant à ces prédipositions déjà très humides, une énorme quantité de pluie est tombée par deux fois entre fin septembre et début octobre, avec des hauteurs cumulées sur plusieurs jours supérieures aux maxima enregistrés de longue date pour cette saison (cf p. 21). Ces précipitations ont pu directement contribuer à la crue, étant donné que la limite du zéro degré est alors restée constamment haute (fig. 25). Le faible rôle joué par la fonte des neiges peut être considéré comme positif pour la situation de crue de 1868. Malgré les températures positives jusqu'en haute altitude, elle n'a joué qu'un rôle marginal puisqu'il n'y avait pas resté de neige importante de l'hiver précédent et qu'aucune chute de neige significative n'avait eu lieu avant l'événement.

La fig. 26 résume les facteurs variables pour l'événement de crue de 1868.

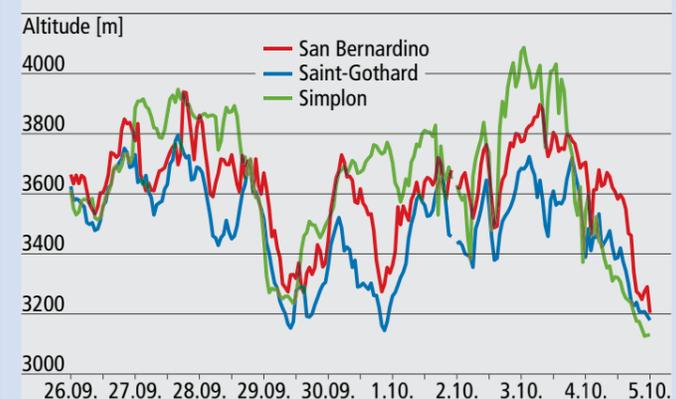


Fig. 25: La limite du zéro degré sur trois sites choisis,¹ reconstituée à l'aide d'un modèle météo régional (cf p. 26), montre que cette limite était à haute altitude de fin septembre à début octobre 1868.³²

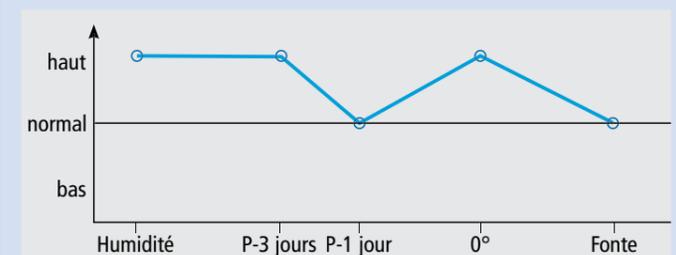


Fig. 26: Représentation schématique de l'impact des facteurs variables sur l'événement de crue de 1868 (voir fig. 22 pour les facteurs).

Données documentaires sur 1868 et d'autres crues historiques

Les sources écrites et iconographiques, y compris les plans, ainsi que les inscriptions telles que les repères de crues, font partie des témoignages les plus détaillés des crues historiques. Ils renseignent surtout sur les perceptions de la population concernée ainsi que sur les mesures d'aide et de prévention.

Ce sont surtout les données documentaires historiques qui permettent de reconstituer les principaux événements de crue de Suisse depuis la fin du Moyen Âge. Il s'agit de sources qui ont été consignées par des personnes qui ne se servaient pas d'instruments de mesure. Les données documentaires peuvent être subdivisées en plusieurs groupes en fonction du contexte de leur création, de leur support de publication et de leur intention.

On trouve d'une part des sources ponctuelles ou continues. Le premier groupe comprend des informations ponctuelles dans des chroniques, des journaux, des documents personnels tels que lettres et cartes postales qui ont été rédigées par un seul individu, soit sur la base de sa propre expérience, soit d'après les récits d'autres personnes. Selon les cas, il peut s'agir de très courtes informations sur l'ampleur ou les conséquences de l'événement, mais aussi de rapports très détaillés, véritables présentations générales contemporaines de l'événement sous forme de livres.^{3,35} Les indications particulièrement pertinentes de ce type de sources pour la recherche sur les crues sont celles qui rapportent jusqu'à quel point de référence la crue est montée, quels dégâts ont été causés, quelles mesures de prévention et de maîtrise ont été prises, mais aussi de quelle manière on a cherché à connaître les causes de l'événement.

Les sources continues sont des documents, souvent techniques ou administratifs, rédigés sur une longue période et qui ont gardé leur structure et leur caractère pendant des décennies, voire des siècles. Les auteurs en étaient des employés de l'administration qui rédigeaient des registres comptables pendant plusieurs années avant de les transmettre à un successeur. Dans les cahiers de dépenses hebdomadaires de Bâle ou les comptes du trésorier de Fribourg et Soleure, on a méticuleusement noté, chaque semaine, quelles dépenses étaient effectuées par exemple pour la réparation de ponts et d'ouvrages de protection.⁴⁴

Mais les sources se différencient aussi selon le support de publication : alors que les chroniques manuscrites (principalement dans les couvents ou dans les villes) servaient jadis surtout à la mémoire individuelle des groupes restreints qui avaient accès à ces écrits, les feuilles volantes de l'époque moderne d'abord, puis plus tard les comptes-rendus des journaux – toujours plus fréquents depuis le XVIII^e siècle – furent destinés dès le début à un plus large public. Plus un événement a été spectaculaire, exceptionnel ou même catastrophique, plus les journaux en ont parlé tôt et en détail. Au cours du XIX^e siècle, les journaux ne furent plus seulement des moyens de diffusion évoquant les événements eux-mêmes, parfois en y incluant des destins personnels, mais ils devinrent aussi l'une des principales plateformes pour les appels aux dons (fig. 27) ; certains journaux, surtout régionaux, publièrent des listes de bienfaiteurs qui avaient contribué par leurs dons à pallier les dégâts matériels. Des politiciens remarquèrent rapidement que leur présence sur le lieu de la catastrophe pouvait accroître leur popularité et que les journaux en faisaient largement état. Pour les inondations du XIX^e siècle et surtout pour celle de 1868, les comptes-rendus des journaux figurent parmi les sources les plus importantes et les plus détaillées, même si, lorsqu'on les utilise, il faut analyser aussi le contexte de leur genèse ; les circonstances particulièrement sensationnelles y sont surreprésentées, alors que les moins spectaculaires ne sont en revanche parfois pas prises en compte ou seulement de façon marginale.

Les dispositions légales relatives à la gestion des crues ainsi qu'aux mesures de prévention, p. ex. la protection des forêts de montagne, constituent un autre groupe de sources important. Ces dispositions

n'apparaissent généralement que quelques années après des événements extrêmes, mais on peut les y rattacher directement (cf p. 38). À cela s'ajoutent des ordonnances régionales édictées pendant l'événement, qui servaient à gérer la catastrophe directement sur place, p. ex. pour réglementer un service de barges temporaire lorsque des ponts avaient été emportés, ou pour fournir de l'eau potable.

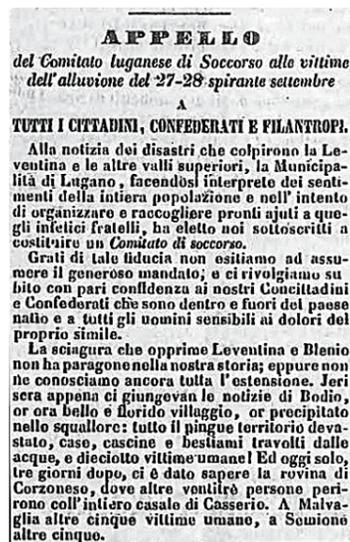


Fig. 27: Appel à l'aide du nouvellement créé « Comité luganais de secours aux victimes de l'inondation des 27 et 28 septembre » pour soutenir les victimes de la crue dans la Léventine et le val Blenio, avec rapport de situation provenant de la région la plus touchée. On constate que même trois jours après l'événement, le volume des dégâts n'est que peu à peu connu. Gazzetta Ticinese du 1^{er} octobre 1868: 897.

Les données documentaires historiques ne comprennent pas seulement des textes écrits, mais aussi des images de toutes natures. Avec le début des corrections des cours d'eau, aux XVIII^e et XIX^e siècles, ainsi que de la cartographie précise du pays sous forme de « cadastre », on se mit à répertorier les anciens et les nouveaux tracés fluviaux, à établir des profils transversaux de cours d'eau et à dessiner des plans de construction exacts pour les ponts. Pour les ponts, il était en outre important de disposer de résultats hydrologiques précis sur le débit moyen, sur le débit de pointe ou sur les matériaux charriés.⁴⁵ Les crues et les dommages causés ont aussi été représentés dans des peintures, des dessins et des gravures sur cuivre (fig. 28) qui ont été de plus en plus utilisés comme illustrations dans les journaux à la fin du XIX^e siècle.

La technique de la photographie est apparue à la fin des années 1830 bien qu'au début, en raison des longs temps d'exposition, elle ne permettait pas de restituer les mouvements des eaux impétueuses lors d'une inondation. Les premières photos de crues, en 1868 (fig. 1), sont presque arrangées comme des prises de vue en studio. Ce n'est qu'au milieu des années 1880 que le temps d'exposition fut suffisamment réduit pour représenter avec netteté de l'eau en mouvement ou des gens occupés à des travaux de déblaiement. Peu avant 1900, les processus d'impression permirent d'intégrer des photos dans les reportages des journaux.

Les repères de crues indiqués au fil des siècles par des particuliers, sur des maisons privées et publiques, des églises, des portes de villes et des ponts se combinent aux mesures instrumentales des hauteurs d'eau et

de fortes précipitations (cf p. 21). En raison des nombreuses interventions humaines sur les cours d'eau, ainsi que des changements dans l'utilisation des sols du bassin versant, ces repères n'ont aujourd'hui qu'une importance limitée pour des calculs purement hydrologiques, mais ils peuvent être interprétés comme les signes d'une culture du souvenir bien vivante. Ils rappelaient chaque jour à la population les risques potentiels de la vie près d'un cours d'eau ou d'un lac. Au XX^e siècle, ces repères ont peu à peu disparu ou n'ont pas été remplacés

lors de rénovations, notamment pour éviter que le prix des immeubles diminue. Les crues sévères intervenues en Suisse dans le dernier quart du XX^e siècle et au début du XXI^e montrent toutefois clairement que les cultures du souvenir gardent toujours leur importance. Elles revivent sous forme de blogs⁴⁶ ou sur la plateforme « Mémoire collective des inondations », créée récemment, p. 3). Les spécialistes et le grand public peuvent y télécharger des photos historiques et actuelles d'événements de crues.

1868 dans les données documentaires

La densité des données documentaires pour les inondations de 1868 est excellente même si elle n'est pas de la même qualité pour toutes les régions concernées. Pour le canton des Grisons, nous sommes très bien informés aussi bien sur les aspects techniques et hydrologiques que sur les stratégies de gestion, les mesures d'aide et les dons grâce à deux publications d'experts parues presque simultanément. Johann Coaz, inspecteur des forêts du canton des Grisons et futur spécialiste reconnu de Suisse pour les questions de reboisement et de protection contre les avalanches, rendit compte de trois voyages d'inspection dans la région du Rhin antérieur et postérieur lors de trois conférences qui furent publiées sous forme de livre en 1869.³⁵ Des planches illustrent avec précision les répercussions de la crue. Alors que Coaz traite de questions hydrologiques et de l'état des forêts de montagne (cf p. 29), Johann Arpagaus s'intéresse dans son ouvrage de 1870 davantage aux dégâts matériels dans les différentes communes.³ Il décrit en détail les mesures d'aide en mettant l'accent sur les dons effectués en provenance de la région, du reste de la Suisse et de l'étranger. Des revues scientifiques comme par ex. le « Journal forestier suisse », des brochures et des conférences imprimées se firent aussi l'écho de débats d'experts sur les événements.



Fig. 28: Inondation de 1868 près d'Au (SG)¹ (aquarelle). On aperçoit tout à gauche le pont ferroviaire endommagé. Cette peinture, jugée très fiable et contemporaine de l'évènement, rend nettement mieux compte que n'importe quelle source écrite l'importance des inondations dans la vallée du Rhin, en particulier quand on la combine avec une prise de vue détaillée telle que l'ancienne photographie de Lustenau (fig. 1, Lustenau est à l'arrière-plan gauche de l'aquarelle). Cependant, on ne sait pas si l'image représente le niveau d'eau le plus haut ou plutôt – au vu des travaux de réparation déjà entamés – un niveau déjà en train de s'abaisser.

Longues séries de mesures

Recherche, évaluation des risques, surveillance, alertes: divers champs d'application dépendent des données de mesures relatives aux fortes précipitations et aux crues. Aujourd'hui, la Suisse dispose de réseaux de mesures denses, aussi bien pour les précipitations que pour les débits. Jusqu'à quel point pouvons-nous recourir à des mesures effectuées sur le long terme pour examiner les événements historiques?

Mesures des précipitations

Les précipitations varient à petite échelle. Il est donc important de disposer d'une forte densité spatiale de stations. Actuellement, le réseau suisse de mesure des précipitations est géré par MétéoSuisse. À côté des stations météo automatiques classiques, il existe un réseau très dense de stations automatiques et manuelles de mesure des précipitations (fig. 29); à cela s'ajoutent d'autres stations de mesure des cantons et de privés, ainsi que des données radar (cf p. 22).

Autrefois, la densité des stations était plus faible. L'événement de 1868 intervient avant la mise en place d'un réseau de mesure des précipitations mais après la création d'un réseau météorologique suisse. On dispose de ce fait de mesures des stations météo classiques. La construction d'un réseau supplémentaire de stations de mesure des précipitations (venant s'ajouter aux stations météo) commença dans les années 1880 pour atteindre 247 stations en 1900. Les mesures des précipitations étaient relevées chaque jour (en général vers 6h du matin).

Pendant longtemps, il n'y eut que des instruments manuels pour mesurer les précipitations. Une mesure automatique précise n'est pas simple. La fig. 30 montre, à gauche, une station de mesure automatique. La valeur mesurée dépend fortement du champ de vent local et des tourbillons autour du récipient. Ces erreurs de mesure influencent aussi la stabilité à long terme des mesures de précipitations. De petites modifications dans l'environnement d'une station peuvent déjà influencer les mesures et entraîner p. ex. un bond dans les données. On peut corriger ces sauts, du moins sur une base mensuelle, au moyen de méthodes

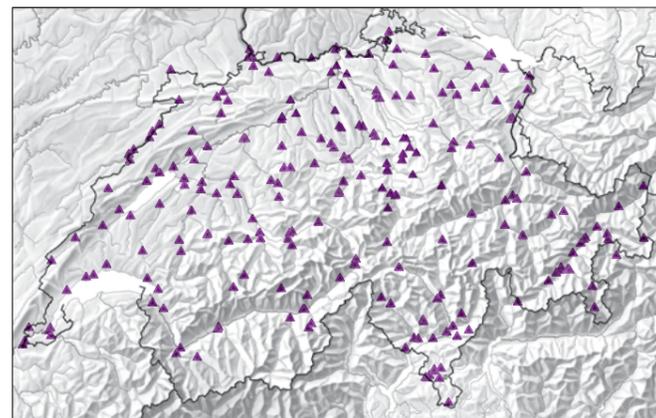
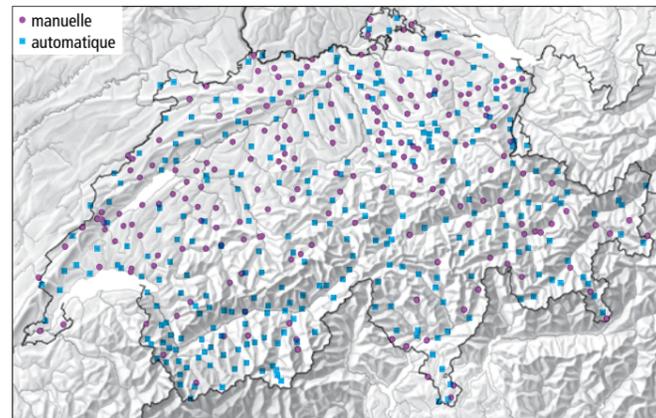


Fig. 29: Réseau de mesure suisse. En haut: stations de mesures des précipitations manuelles et automatiques de MétéoSuisse (état 2017). En bas: réseau de mesure hydrométrique de l'OFEV.



Fig. 30: À gauche: mesure des précipitations à la station météorologique de Zollikofen. À droite: station hydrométrique de Liène-Tseuzier.

statistiques, p. ex. en comparant les stations voisines. Les données mensuelles ainsi corrigées montrent, par reconstruction, la répartition spatiale des précipitations en septembre et octobre 1868 (fig. 31).

Mesures de débits

Les stations de mesure de débits sont gérées par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le débit des cours d'eau et le niveau des lacs sont aujourd'hui mesurés sur env. 260 sites. En Suisse, les mesures systématiques remontent au milieu du XIX^e siècle. Les longues séries sont particulièrement essentielles pour la protection contre les crues. Les stations de mesure de débits sont vérifiées chaque semaine et étalonnées cinq à six fois par an.

Pour déterminer le débit, on mesure le niveau de l'eau et généralement aussi la vitesse d'écoulement d'un cours d'eau. On calcule alors le débit à l'aide d'un rapport niveau/écoulement, ou directement volumétriquement à l'aide d'un déversoir triangulaire (cf fig. 30). La quantité de pluie est mesurée soit avec un pluviomètre avec enregistrement, soit avec des sondes de pression, ou encore, sans contact, avec un radar. La vitesse d'écoulement est mesurée à l'aide de moulinets hydrométriques ou de capteurs acoustiques.

Pendant longtemps, les données de précipitations et de débit ont été saisies sur un support papier et archivées (fig. 32). Ce n'est qu'au cours des dernières décennies qu'elles ont été saisies sous forme électronique – les données papier ont ensuite été partiellement numérisées, mais pas totalement, si bien que pour des périodes antérieures, de nombreuses données n'existent encore que sous forme papier. La numérisation de ces données historiques permettrait d'améliorer nettement la reconstruction d'événements extrêmes du passé. Il serait

L'Atlas hydrologique de la Suisse HADES

L'«Atlas hydrologique de la Suisse HADES» (atlashydrologique.ch) est une œuvre commune de l'hydrologie suisse qui met depuis plus de trente ans à disposition d'un grand nombre d'utilisatrices et d'utilisateurs des informations de base en hydrologie, des connaissances spécifiques et des outils didactiques. Outre l'ensemble de cartes initial avec 63 planches imprimées, l'Atlas hydrologique comprend une large palette de produits tels que des guides d'excursion et des moyens d'enseignement.

ainsi possible de les comparer aux événements actuels et de les classer. L'OFEV et MétéoSuisse mettent conjointement à disposition une plateforme accessible au public qui permet le classement de précipitations extrêmes: www.climate-extremes.ch.

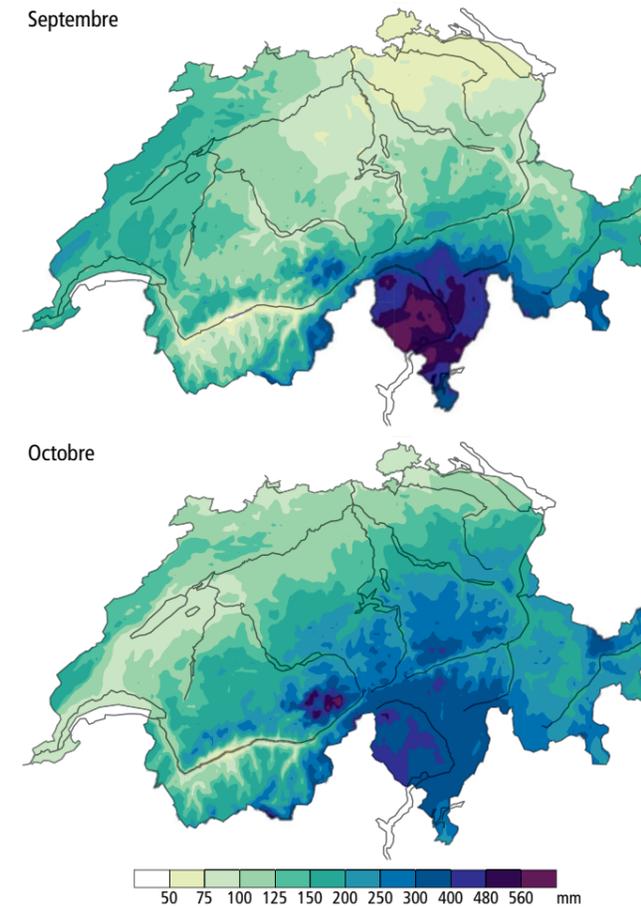


Fig. 31: Valeur mensuelle des précipitations en septembre et octobre 1868.⁴⁷

Tag	Stunde	Thermometer		Barometer		Windrichtung und Stärke	Zug der Wolken	Bewölkung	Witterungscharakter	Ombrometer	Hydrometeore	
		Trocken	Feucht	Therm.	Bar.						Natur.	Dauer.
1	1	10.4	12.2	14.5	0.81	0	11	11			Regen	
1	1	15.6	14.5	15.0	0.81	1	11	11		1.85	Regen	1.85
1	1	14.8	15.2	15.0	0.81	0	10	10	ganz bedeckt		Regen	1.85
1	1	14.6	15.0	14.5	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	15.6	15.5	15.0	0.81	10	10	10			Regen	
1	1	14.8	15.6	15.0	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	16.3	14.0	15.0	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	16.1	15.1	15.0	0.81	10	10	10			Regen	
1	1	15.0	15.1	15.0	0.81	10	10	10	ganz bedeckt		Regen	
1	1	15.2	15.1	15.0	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	15.2	15.1	15.0	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	13.9	15.0	14.5	0.81	0	10	10	ganz bedeckt		Regen	
1	1	14.8	14.9	14.4	0.81	0	10	10			Regen	
1	1	14.0	15.1	15.0	0.81	0	10	10			1.30	

Fig. 32: Mesures météorologiques en octobre 1868 à la station de Brusio¹ (la colonne «ombrometer» indique la quantité de précipitations par jour).

L'événement de 1868 mesuré

Certes, l'événement s'est déroulé dans une phase précoce des réseaux de mesure (cf p. 23) mais il y avait déjà un nombre respectable de stations de mesure des précipitations, même en comparaison internationale, si bien que certains aspects de l'événement peuvent être analysés directement à partir de ces données.¹² Il y eut deux phases marquées avec des quantités extrêmes de précipitations sur plusieurs jours (fig. 33 et 34). Le 28 septembre 1868, à la station de San Bernardino Ospizio¹, à env. 2000m d'altitude, on a mesuré une hauteur de précipitations de 254mm, la plus haute valeur jamais mesurée à cet endroit; les hauteurs cumulées sur cinq jours sont également les plus hautes jamais enregistrées à cet endroit. Le maximum de la deuxième phase – 170mm – a été mesuré le 3 octobre à Platte¹ non loin du col du Lukmanier. La quantité de précipitations tombées au col du San Bernardino au cours des deux phases (huit jours) atteint la hauteur incroyable de 1118mm – plus que les précipitations annuelles à Berne.

Le niveau du lac Majeur¹ a aussi été mesuré. La fig. 34 montre que le niveau du lac était déjà nettement monté quelques jours avant l'événement principal. Le niveau du lac resta haut durant trois semaines. La crue de 1868 correspond au plus haut niveau du lac jamais mesuré.

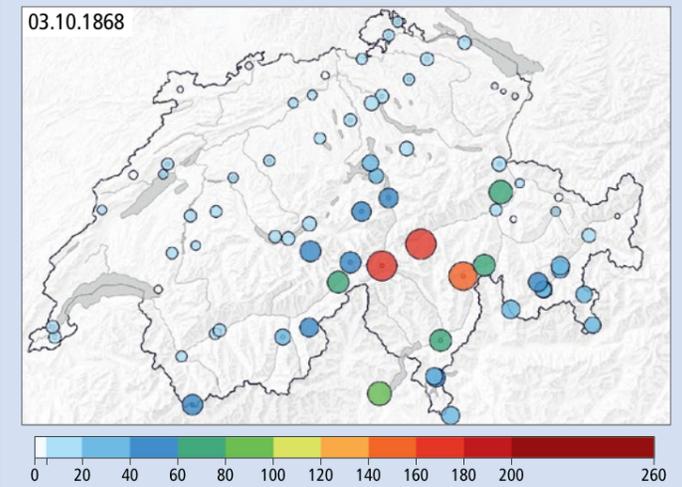


Fig. 33: Mesures de la quantité de précipitations journalière (mm ou litres par m² en 24 heures) en Suisse le 3 octobre 1868.^{12,32}

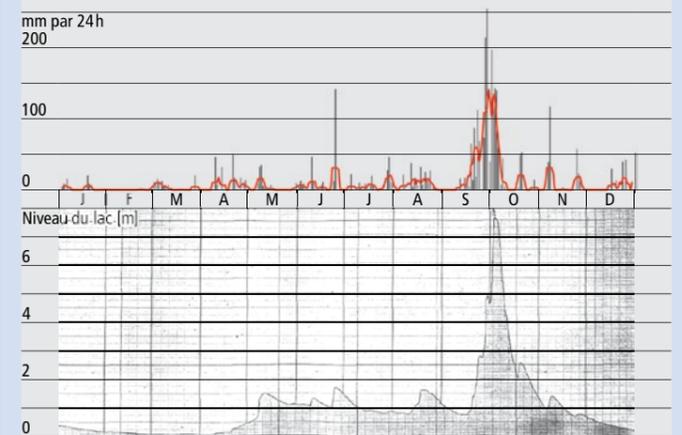


Fig. 34: (en haut) Accumulations journalières (barres noires) et accumulations sur cinq jours (ligne rouge) des précipitations à la station San Bernardino Ospizio à l'altitude du col. (en bas) Le niveau du lac Majeur à Verbania en 1868.⁴⁸

De l'image radar à l'alerte de crue

Des informations sur les précipitations en temps réel et avec la plus forte densité spatiale et temporelle possible sont cruciales pour les alertes à court terme de précipitations, d'inondations et de crues.

En Suisse, les précipitations sont mesurées en temps réel, de manière continue et automatisée par les stations météo au sol (cf p. 20), ainsi qu'au moyen de radars météo. Pour les stations météo au sol situées dans une topographie complexe, les valeurs mesurées ne sont cependant représentatives que pour les environs proches. Le réseau de radars de MétéoSuisse comprend cinq stations radar entièrement automatisés et dotés d'une technologie Doppler et double polarisation. Le radar enregistre en temps réel une image tridimensionnelle détaillée de tous les nuages générateurs de précipitations au-dessus de la Suisse et des régions limitrophes (fig. 35).^{49,50} Cette image permet d'établir une carte des valeurs de précipitations au sol.^{51,52}

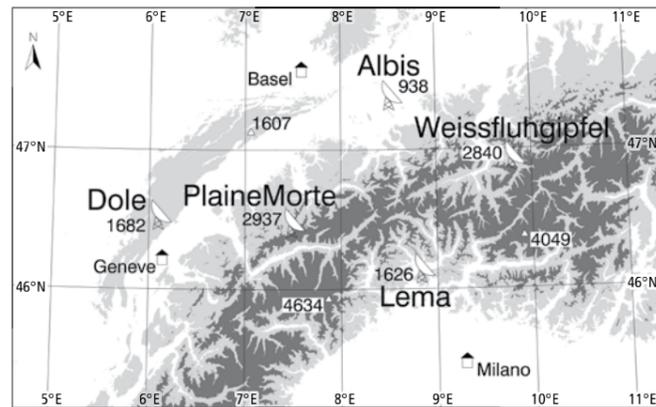


Fig. 35: Le réseau de radars météorologiques de MétéoSuisse avec ses cinq stations: La Dôle¹ (depuis 1959), l'Albis¹ (depuis 1959), le Monte Lema¹ (depuis 1993), la Pointe de la Plaine Morte¹ (depuis 2014) et le Weissfluhgipfel¹ (depuis 2016).

Un radar envoie des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère. Celles-ci sont réfléchies vers le radar, dans les nuages générateurs de précipitations; le radar mesure alors l'énergie reçue en fonction de la distance, de l'azimut et de l'angle d'élévation. Les ondes sont réfléchies par les gouttes de pluie, les flocons de neige, la grêle, le grésil et les cristaux de glace – ce que l'on appelle les hydrométéores – mais aussi par les avions, les oiseaux et les insectes. Si l'onde radar rencontre une montagne, une partie de l'énergie est également réfléchi. Il est possible de filtrer ces échos perturbateurs en utilisant des procédés de calcul complexes. Il reste alors les échos météorologiques. On détermine l'intensité des précipitations à partir du rapport entre l'énergie émise et celle qui est renvoyée. Le rayon radar émis

par l'antenne ne mesure qu'un degré de large et permet donc un enregistrement à petite échelle des systèmes de précipitations et des orages. Pour balayer l'atmosphère verticalement jusqu'à une hauteur de 18 km et horizontalement jusqu'à une distance de 246 km, l'antenne tourne selon un schéma fixe et effectue vingt rotations toutes les cinq minutes. Les données sont transmises par les cinq stations radar à l'ordinateur central, où elles sont rassemblées, puis traitées pour l'établissement de cartes de précipitations, ainsi que d'alertes de grêle et d'orage. Elles sont alors envoyées à un grand nombre d'utilisateurs parmi lesquels le contrôle aérien, la protection de la population contre les dangers naturels, l'hydrologie, les branches des assurances et de l'énergie, les loisirs et bien d'autres. Les produits radar sont actualisés toutes les 2,5 minutes et ont une résolution spatiale de 1 km. Il en résulte une image qui montre comment les systèmes de précipitations et les orages se modifient dans le temps et l'espace (fig. 36 en haut à droite). Grâce à l'utilisation de la technologie Doppler et de double polarisation, ainsi que de programmes informatiques perfectionnés, le radar peut différencier les échos de gouttes, de flocons de neige, de grêlons, de cristaux de glace, d'insectes, d'oiseaux, d'avions et de montagnes, et également estimer, dans les nuages à précipitations, non seulement l'intensité de celles-ci, mais aussi les champs de vent.

Pour déterminer de manière optimale les quantités de précipitations au sol, on combine statistiquement (fig. 36 en bas à gauche) les données du radar (fig. 36 en haut à droite) en temps réel avec les mesures des stations au sol (fig. 36 en haut à gauche).⁵³ La combinaison des données fournies par les radars, les satellites, les impacts de foudre et les modèles constitue la base pour des prévisions à très court terme de précipitations, orages et grêle; ce que l'on appelle le nowcasting (prévisions immédiates).

Les prévisions de précipitations pour des durées plus longues (quelques heures à quelques jours) se basent sur les calculs de modèles numériques de prévision météo. Ces modèles fournissent des informations à grande échelle sur les précipitations (fig. 36 en bas à droite). Les modèles numériques de prévision météo résolvent les équations physiques de base de l'atmosphère et utilisent des observations via l'assimilation de données (cf p. 24) pour garder la meilleure description possible de l'état de l'atmosphère au moment de l'initialisation du modèle. Cependant, des incertitudes subsistent car les observations comportent aussi des erreurs et ne reproduisent pas l'état de l'atmosphère dans tous ses détails. Les effets de ces incertitudes sur la prévision du modèle sont quantifiés à l'aide de ce que l'on appelle les prévisions d'ensemble. Pour une prévision d'ensemble, on calcule de nombreuses prévisions de modèle dont les conditions de bordure et de départ sont légèrement différentes. Les différences entre ces diverses prévisions d'ensemble donnent des informations sur le degré d'incertitude de la prévision.⁵⁴ Même si le calcul des prévisions de modèle est effectué par des ordinateurs très puissants, le temps de calcul nécessaire est si long que seul un nombre limité de prévisions peut être calculé.

Grâce aux observations des radars et aux informations fournies par les modèles météo, on peut lancer des alertes de fortes précipitations et de crues. Les alertes à court terme pour les fortes précipitations et les crues soudaines reposent p. ex. sur la combinaison de mesures de radar les heures écoulées et de prévisions de précipitations pour les heures suivantes.^{55,56} Pour évaluer les incertitudes, on utilise des méthodes d'ensemble.^{57,58} Ces alertes sont importantes p. ex. pour maîtriser des inondations locales dans les villes ou évaluer le risque de lave torrentielle en montagne.

Les alertes de crue pour les jours suivants se basent sur les prévisions de précipitations des modèles météo. Ces calculs sont transmis à des

modèles hydrologiques numériques (cf p. 28), qui calculent l'infiltration dans le sol, le ruissellement de surface et le débit des cours d'eau (fig. 37).^{59,60} Pour calculer les surfaces inondées, on associe les modèles hydrologiques avec des modèles hydrauliques (cf p. 30).⁶¹ Les modèles hydrologiques fournissent de meilleures prévisions de débit s'ils sont étalonnés à l'aide de mesures de débit. Pour cela, il est indispensable de disposer d'informations de très grande précision sur les précipitations (radar, CombiPrecip et mesures au sol).⁶² La fig. 37 montre comment, pour une période en mai 2016, les calculs hydrologiques varient en fonction des données de précipitations utilisées pour la simulation. Dans ce cas spécifique, CombiPrecip donne de meilleurs résultats que les mesures directes.

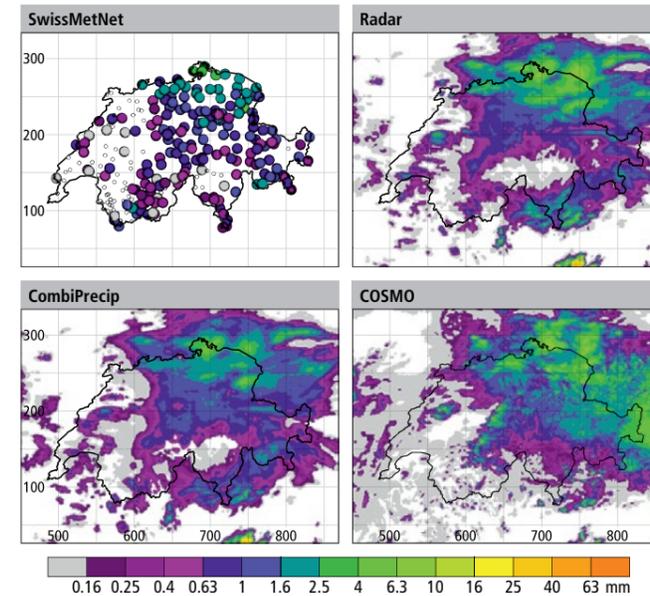


Fig. 36: Quantité de précipitations [mm] tombée entre 11 et 12 UTC le 12 mai 2016 telle que mesurée par les stations du SwissMetNet (en haut à gauche), évaluée à l'aide du radar (en haut à droite), évaluée à partir de la combinaison de données des stations et des radars (CombiPrecip, en bas à gauche) et dans l'analyse du modèle de prévision météo COSMO.

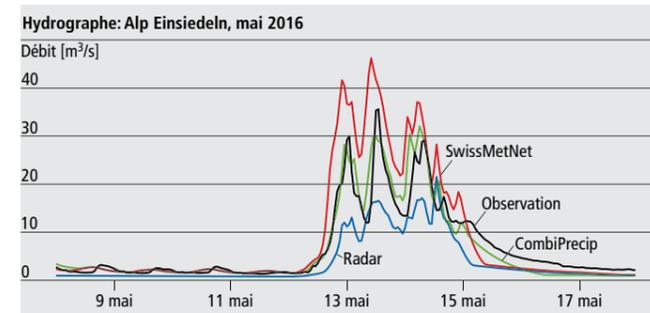


Fig. 37: Simulation de débit de la rivière Alp près d'Einsiedeln [$m^3 s^{-1}$] avec le modèle hydrologique PREVAH pour la période du 8 au 17 mai 2016. Trois données de précipitations ont été utilisées pour les simulations: données SwissMetNet interpolées (rouge), données radar (bleu) et le produit CombiPrecip (vert).

Les débuts de MétéoSuisse

L'histoire des réseaux de mesure exploités aujourd'hui en Suisse commence au début des années 1860: à cette époque, la Société helvétique des sciences naturelles organisait des observations météorologiques systématiques dans tout le pays. Dès décembre 1863, on se mit à enregistrer, sur env. 80 sites, la température et la pression trois fois par jour, ainsi que les précipitations et d'autres valeurs une fois par jour. L'idée était de pouvoir mieux décrire le climat à l'aide de moyennes et de valeurs extrêmes sur le long terme. Pour la coordination du projet, un bureau fut ouvert à Zurich: le Bureau centrale météorologique suisse, prédécesseur de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse.

Contrairement à aujourd'hui, le Bureau centrale n'avait pas encore la mission d'alerter sur les dangers météorologiques. Lors de l'événement de 1868 son activité se limitait ainsi à enregistrer les quantités de pluie. La variabilité spatiale de la pluie ne pouvait pas être représentée de manière précise. Dans ce contexte, la crue de 1868, ainsi que celle de 1876, donnèrent l'impulsion pour densifier le réseau de mesures. Alors qu'en 1868, seules 76 stations mesuraient les précipitations sur l'ensemble de la Suisse, on en comptait déjà 380 en 1900.

On se demandait de plus en plus si le Bureau centrale ne devrait pas fournir aussi des prévisions météorologiques en plus des données climatologiques. Quelques pays, en particulier les nations maritimes, disposaient déjà de services d'alarme en cas de tempête. Leurs centrales recevaient chaque matin par télégraphe les valeurs actuelles des stations. Elles reportaient sur une carte de l'Europe les zones de haute et basse pression et prévoyaient l'évolution du temps pour les heures suivantes, à l'aide de principes empiriques sur la relation entre la répartition de la pression atmosphérique et le vent.

Les prévisions établies de cette manière étaient contestées car elles ne reposaient pas sur une base scientifique assez solide. Mais les partisans argumentaient que l'agriculture et d'autres branches dépendant des conditions météorologiques avaient un grand besoin de prévisions. Le Conseil fédéral partageait cet avis, ce qui permit à au Bureau centrale d'introduire ses propres prévisions. Dès 1880, elle publia chaque jour un bulletin météo sur la situation actuelle et les « prévisions » pour le jour suivant. Ce nouveau service amena l'État fédéral à prendre en charge le Bureau centrale, gérée jusque là par la Société helvétique des sciences naturelles. En Suisse, l'observation du climat et les prévisions météorologiques furent une mission du service public dès 1881.

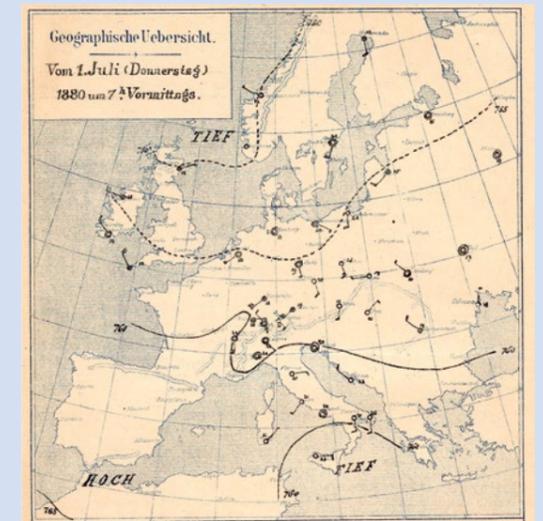


Fig. 38: Extrait du premier « Bulletin du Bureau météorologique centrale suisse » du 1^{er} juillet 1880.

Reconstruction des conditions météorologiques

Comment pouvons-nous reconstruire le temps qu'il faisait lors de l'événement de 1868? Nous disposons certes de quelques mesures météorologiques de cette période, mais insuffisantes pour permettre une interprétation complète. Des journaux météo comportent des informations complémentaires. Ceci, combiné avec les connaissances des experts, permet d'émettre quelques hypothèses sur la météo de l'événement. Mais il existe aussi une approche quantitative: la reconstruction numérique de la météo au moyen de ce que l'on appelle l'« assimilation de données ». Elle permet d'établir des données météo tridimensionnelles pour le passé.

Les réanalyses, machines à remonter le temps

L'assimilation de données est la combinaison de données de mesure avec un modèle numérique de prévision météo. Le modèle est combiné aux mesures en prenant en compte l'incertitude du modèle et celle des mesures. En même temps, le modèle conserve ses caractéristiques propres, comme la consistance physique.⁶³

On peut se représenter ce processus comme une légère correction continue du modèle, ainsi que le montre la fig. 39. On calcule d'abord, à l'aide d'un modèle, une prévision météo sur une brève durée (six heures). Pour un temps si court, la prévision est généralement bonne. La prévision est alors corrigée d'après les mesures d'époque. L'état entier du modèle tridimensionnel doit être corrigé en respectant les rapports statistiques entre toutes les variables et cellules de la grille. Dans le langage spécialisé, on appelle cela une « analyse »; toutes les cartes météorologiques sont établies de cette façon. Cette analyse sert de point de départ pour la prévision suivante et le processus se répète. Lorsque ce processus se déroule rétroactivement sur une longue période, on parle de « réanalyse ».

Les données de réanalyse sont désormais celles qui sont le plus utilisées dans les géosciences. La plupart des cartes météorologiques présentées dans le présent cahier proviennent de réanalyses. Plusieurs réanalyses, comme p. ex. ERA-Interim⁶⁴ du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, fournissent des données dès 1979, donc pour une période pendant laquelle existent aussi des données satellites.

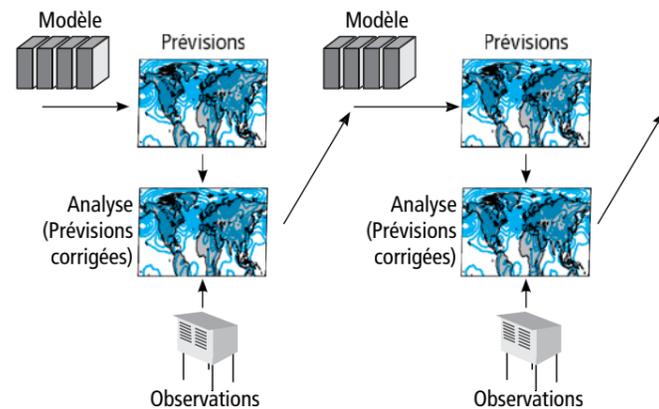


Fig. 39: Déroulement schématique d'une réanalyse.

Au cours des dernières années, l'utilisation de l'assimilation de données a été développée à tel point qu'il est possible d'obtenir une représentation utilisable de l'état de l'atmosphère en trois dimensions pour une date précise du passé, même à partir de peu de mesures.⁶³ Pour cela, on utilise presque exclusivement des mesures de la pression de l'air. Celles-ci permettent de reconstituer le temps jusqu'au XIX^e siècle car nous disposons depuis le début des services météorologiques publics vers le milieu du XIX^e siècle (cf p. 23) de données sur la pression de l'air; du moins pour l'Europe et l'Amérique du Nord. Celles-ci existent dans de nombreuses archives du monde entier bien que souvent sur papier. Il faut donc toujours de gros efforts pour numériser ces données et les rendre utilisables (cf p. 20). La réanalyse du « Twentieth Century » (20CR), qui remonte à 1851, est un exemple de réanalyse basée uniquement sur des mesures de pression de l'air.²⁵

L'exemple de l'événement de 1868 ci-contre et celui de la crue du 14 juin 1910 sur le versant nord des Alpes ci-dessous (fig. 40) montrent ce

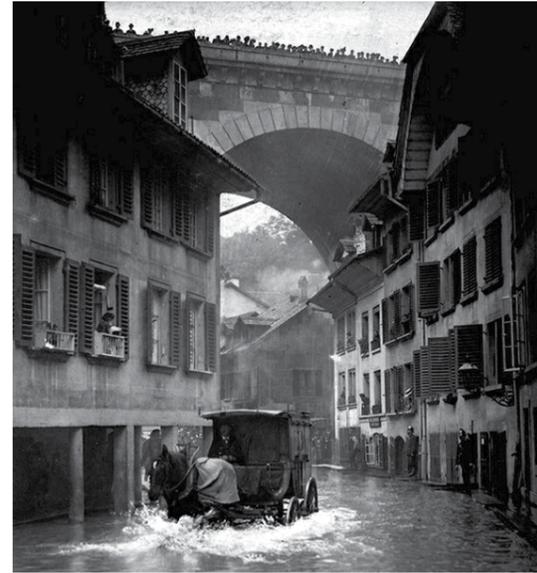


Fig. 40: Crue du 14 juin 1910 dans le quartier de la Matte à Berne.

que ces ensembles de données permettent de faire. La crue de 1910 ressemble très fortement à celle de 2005 (cf p. 8). Comme de tels événements sont rares, il est précieux de pouvoir étudier plusieurs d'entre eux.

Malgré les nombreuses mesures déjà effectuées en 1910, seule une petite partie d'entre elles sont disponibles sous forme électronique et ont ainsi pu être utilisées pour la réanalyse (fig. 41). Il serait donc possible d'obtenir une reconstruction du temps encore bien meilleure. Outre les stations météorologiques terrestres, la figure montre aussi des données provenant de bateaux qui jouent un rôle particulièrement important. Elle montre également la topographie relativement grossière du modèle qui ne permet qu'une reconstruction à grande échelle (cf p. 26).

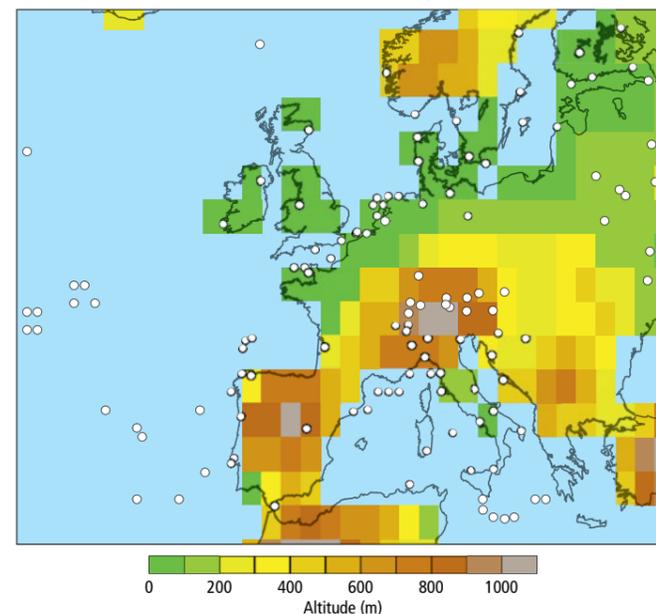


Fig. 41: Mesures de pression pour la réanalyse 20CR²⁵ du 14 juin 1910, 6–12 UTC.

Les fig. 42 (20CR) et 43 (réanalyse CERA-20C⁶⁵) présentent les cartes météorologiques obtenues grâce à ces données. La carte de la hauteur de l'isobare 500hPa montre une dépression d'altitude sur l'Italie du Nord au moment de l'événement. Au-devant de cette dépression, les données indiquent un soulèvement à grande échelle. La carte du vent au sol et de la température (fig. 43) signale une situation de type

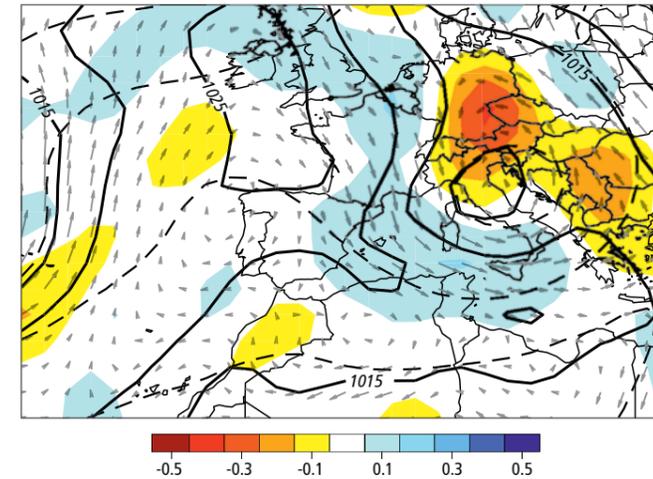


Fig. 42: Carte météorologique tirée de la ré-analyse 20CR²⁵ pour le 14 juin 1910 à midi (12 UTC): pression au sol réduite au niveau de la mer (hPa; lignes noires épaisses), champ de vent à 850 hPa (env. 1,5 km d'altitude; flèches grises), pression à 500 hPa (env. 5 km d'altitude; lignes pointillées épaisses), mouvement vertical des masses d'air à 500 hPa (les valeurs négatives signifient un mouvement ascendant).

Vb (cf p. 8) qui transporte de l'air humide autour des Alpes où il se transforme en pluie à cause du soulèvement de l'air lorsqu'il rencontre les Alpes et qu'il glisse sur de l'air plus froid.

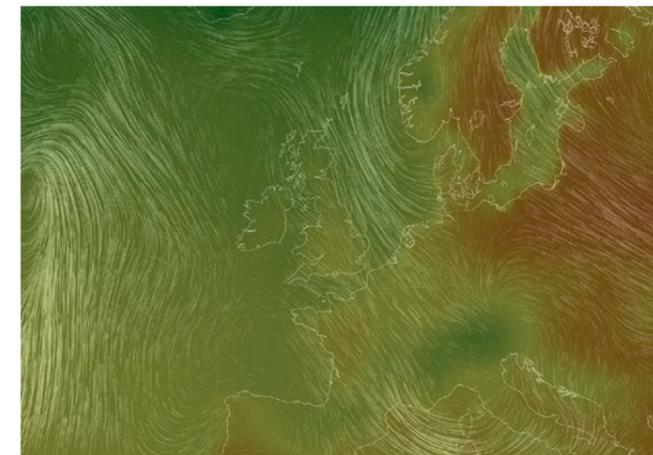


Fig. 43: Température au sol et lignes de courant le 14 juin 1910 à 12 UTC dans la réanalyse CERA-20C.

L'analyse d'événements extrêmes historiques aide à évaluer les événements actuels. Plus les ensembles de données météo reconstituées s'étendent sur une longue durée, plus les cas examinés sont nombreux. Comme les données se présentent sous forme quantitative et tridimensionnelle, elles peuvent aussi être utilisées dans la recherche sur les impacts du changement climatique: on peut p. ex. affiner les données à l'aide de modèles météorologiques régionaux (cf p. 26) et les utiliser pour la modélisation d'impacts climatiques. La qualité des bases de données n'est cependant de loin pas partout aussi bonne qu'en Europe centrale. Et même là, la prudence s'impose, en particulier pour les calculs de tendances.

Reconstruction des conditions météorologiques de 1868

Pour l'instant, il n'existe qu'une base de données de réanalyse qui couvre l'année 1868: la ré-analyse « Twentieth Century » (abrégée 20CR). 20CR se base uniquement sur des mesures de pression de l'air (cf à gauche). Certes, nous ne disposons pour 1868 jusqu'à présent que de peu de mesures de pression pour l'Europe occidentale et centrale, encore moins que pour 1910 (fig. 41), mais elles sont relativement bien réparties dans l'espace (fig. 44).

La carte météo fournie par 20CR pour le 22 septembre 1868 (fig. 44) montre une vaste zone de basse pression sur l'Europe centrale avec une extension au-dessus des Alpes et un creux barométrique jusqu'en Afrique du Nord. L'analyse 20CR a ceci de particulier qu'elle indique toute la gamme des solutions possibles résultant de l'incertitude des mesures et de la répartition des données d'assimilation. Cette gamme est calculée comme un « ensemble » de 56 variantes ayant la même vraisemblance. C'est souvent uniquement leur valeur moyenne et leur dispersion qui est représentée; la fig. 44 montre les 56 variantes pour les isobares de 1008 hPa. Celles-ci n'ont qu'une faible dispersion au-dessus de l'Europe centrale. La zone d'incertitude est donc relativement restreinte alors qu'elle devient plus grande au-dessus de l'Afrique et de l'Atlantique Nord en raison de l'absence de mesures.

20CR peut fournir des données météorologiques non seulement pour la pression au sol, mais aussi pour d'autres paramètres et d'autres altitudes. La réanalyse montre p. ex. qu'à env. 1,5 km au-dessus de la Méditerranée le vent vient du sud et est orienté contre le sud des Alpes. De plus, un creux barométrique apparaît à env. 5 km d'altitude (500 hPa) et les masses d'air sont fortement soulevées, ce qui entraîne un refroidissement et de la convection. 20CR permet même de déduire des variables météorologiques compliquées pour de hautes altitudes telles que la tropopause (cf p. 8).

En somme, la zone d'incertitude est relativement petite et la concordance étonnamment bonne entre la carte météorologique au sol et la circulation en altitude. Cela montre que 20CR est en mesure de représenter les variables physiques à grande échelle de manière consistante et plausible pour cette région du monde et pour le milieu du XIX^e siècle.

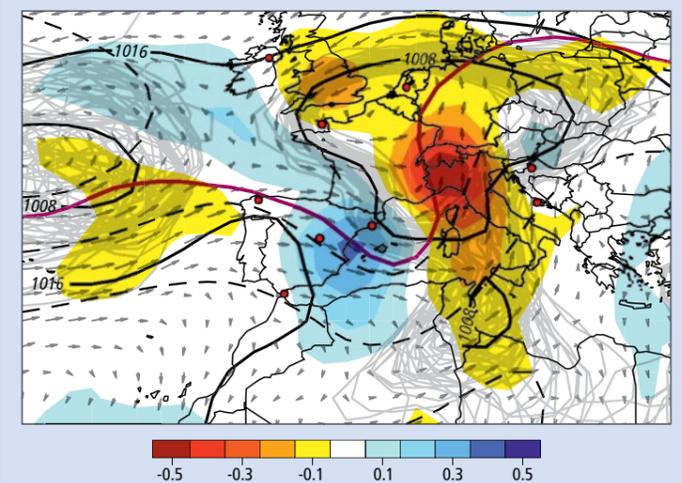


Fig. 44: Pression au sol réduite (hPa; lignes noires continues; lignes grises pour l'ensemble), vent à 850 hPa (1,5 km d'altitude; flèches grises), pression à 500 hPa (env. 5 km d'altitude; lignes noires pointillées), mouvement vertical des masses d'air à 500 hPa (les valeurs négatives signifient un mouvement ascendant) et tropopause (1,5 PVU; ligne rouge), tiré de 20CR pour le 22 septembre 1868 à 12 UTC. Les endroits des mesures utilisées pour établir 20CR sont indiquées par des points rouges.

« Downscaling » : Reconstruction de la météorologie locale

Les produits météo globaux ne sont pas capables de reproduire d'importants processus de la météorologie et du climat alpins. Ceci est particulièrement vrai pour les réanalyses historiques. Différentes techniques de « downscaling » (d'affinage) sont utilisées pour obtenir des informations locales à partir de produits globaux. Les techniques d'affinage dynamiques se basent sur des modèles numériques de prévision du temps, alors que les techniques statistiques se basent sur les mesures locales.

Affinage dynamique

Il est remarquable que la réanalyse globale puisse reconstruire de manière réaliste la situation météo de l'inondation de 1868. Cependant la réanalyse ne contient qu'une valeur chaque 200 km et les Alpes y sont représentées comme une grosse colline (fig. 41). Des phénomènes météo importants tels que les fronts, les orages, ou la canalisation du vent dans les vallées alpines se produisent à trop petite échelle pour être reconstruits par la réanalyse.

L'affinage dynamique se base sur des modèles météo tels que le modèle WRF.⁶⁶ Le WRF requiert des conditions initiales ainsi que des conditions de bordure pour chaque pas de temps. Pour prédire la météo des prochains jours, une analyse (cf p. 24) et une prévision météorologique globale sont utilisées comme conditions initiales et de bordure. De manière à affiner un événement historique, le modèle WRF tourne en utilisant une réanalyse pour cela. D'abord, le modèle WRF est calculé sur un domaine couvrant l'Atlantique-Nord et l'Europe. Ensuite, les résultats de cette première simulation sont utilisés comme conditions de départ et de bordure pour relancer le WRF sur une simulation plus fine, et ainsi de suite. La figure 45 montre, pour l'événement de 2005 en exemple, comment une haute résolution peut être atteinte grâce à quatre étapes d'affinage.

Si les observations historiques indiquent que les orages ont contribué de manière substantielle à la précipitation d'un événement historique, la résolution finale du modèle doit être suffisamment fine pour représenter les orages. La grille du modèle ne peut ainsi pas être plus grossière que quelques kilomètres.⁶⁷ Donc, en partant d'une réanalyse avec une résolution de 200 km, nous pouvons par exemple créer des simulations à 81 km, 27 km, 9 km, et finalement 3 km. La seule information à haute résolution ajoutée par le WRF est la topographie et le type de surface. Néanmoins, les résultats d'affinage sont bien meilleurs que la réanalyse globale originelle (comparer fig. 45 en bas à gauche et à droite).

Le downscaling dynamique permet de reconstruire la météorologie locale d'événements historiques à une résolution qui est comparable à celle des meilleures prévisions météorologiques modernes. Par exemple, la haute résolution de la topographie permet d'investiguer comment les masses d'air ont pénétré les vallées alpines principales (fig. 46).

Évidemment, les résultats ainsi obtenus pour un événement historique ne sont pas aussi précis que pour un événement récent. La limitation principale est la rareté des observations. Le downscaling dynamique présente plutôt une proposition de ce à quoi la météorologie locale a pu ressembler pendant un événement historique. En tous les cas, le downscaling dynamique facilite l'étude quadridimensionnelle de phénomènes météorologiques locaux qui ont probablement contribué à l'événement extrême. Les événements historiques peuvent ainsi être comparés aux événements récents.

Affinage statistique

À côté des simulations numériques compliquées, des méthodes statistiques peuvent aussi être utilisées. L'une d'elles, très simple, est la méthode des analogues. L'information à disposition pour un jour du passé est comparée à la même information pour tous les jours d'une période moderne pour laquelle des champs à haute résolution sont disponibles. Le jour passé est reconstitué d'après le jour moderne qui lui ressemble le plus. Cette méthode délivre de bons résultats si un nombre suffisant de cas analogues est à disposition. En fonction de

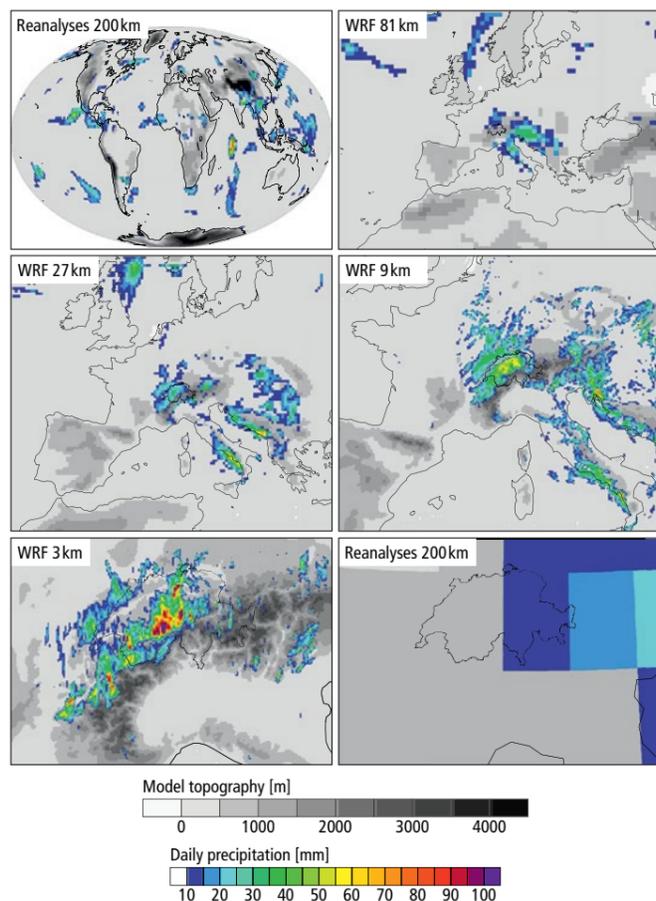


Fig. 45: À partir de la réanalyse 20CR, des simulations WRF sont effectuées sur une grille de 81, 27, 9 et finalement 3 km de côté. Les précipitations journalières simulées pour le 22 août 2005 sont montrées. La réanalyse est aussi montrée en bas à droite pour le même domaine que la simulation WRF à 3 km, pour comparaison.

la méthode, les champs reconstruits peuvent être recorrectés d'après les mesures.

D'après son réseau de stations météo, MétéoSuisse a reconstitué les champs journaliers de précipitation et de température pour la Suisse à une résolution de 2 km et depuis 1960.^{68,69} Ceci représente plus de 20 000 jours. Grâce à cette grande quantité de cas analogues possibles la méthode délivre de bons résultats pour les précipitations faibles à moyennes. La méthode sous-estime néanmoins les précipitations extrêmes car les événements extrêmes sont rares et les cas analogues sont souvent plus faibles. Les résultats sont aussi moins bons pour les régions moins bien couvertes par les mesures.

Downscaling de l'évènement de 1868

Affinage dynamique

L'événement de 1868 a été affiné dynamiquement et statistiquement. L'affinage dynamique utilise le modèle WRF. Les domaines simulés sont comparables à ceux de la fig. 45 mais pour la période du 26 septembre au 4 octobre 1868 et pour une résolution finale de 2 km.³² Pendant les 9 jours, le modèle produit des précipitations intenses, étendues, et presque ininterrompues sur le Tessin qui peuvent être expliquées par un transport persistant d'humidité depuis le sud vers les Alpes centrales, un soulèvement orographique, et le développement d'orages. Dans le modèle comme dans les observations historiques, il n'y a eu qu'une brève interruption des précipitations intenses du 29 au 30 septembre 1868.

Dans les simulations à haute résolution, des orages se développent régulièrement au-dessus de la plaine du Pô et se propagent au-dessus du Tessin (voir fig. 46 et 47). Dans les hautes couches, de l'air humide afflue au-dessus des Alpes depuis le sud-ouest (avec une couverture nuageuse étendue, voir fig. 47 en bas à gauche). À proximité du sol, de l'air humide afflue depuis le sud-est au-dessus de la plaine du Pô. Lorsque cette masse d'air atteint les premiers contreforts des Alpes, elle est soulevée par l'orographie. Des nuages bas se forment (fig. 47 en haut à gauche). Des cellules convectives sont initiées à partir desquelles des orages organisés se développent (fig. 47 en haut à droite). Les orages se déplacent vers le nord avec le flux des couches moyennes et les fortes précipitations atteignent le sud du Tessin (fig. 47 en bas à droite). Dans les heures qui suivent, le flux instable pénètre plus loin dans les vallées alpines (voir fig. 46) et les fortes précipitations atteignent le nord du Tessin. Ce développement d'orages ressemble remarquablement aux situations observées pour des événements récents dans la région du lac Majeur.³⁴ La météorologie locale reproduite par le downscaling dynamique est ainsi plausible.

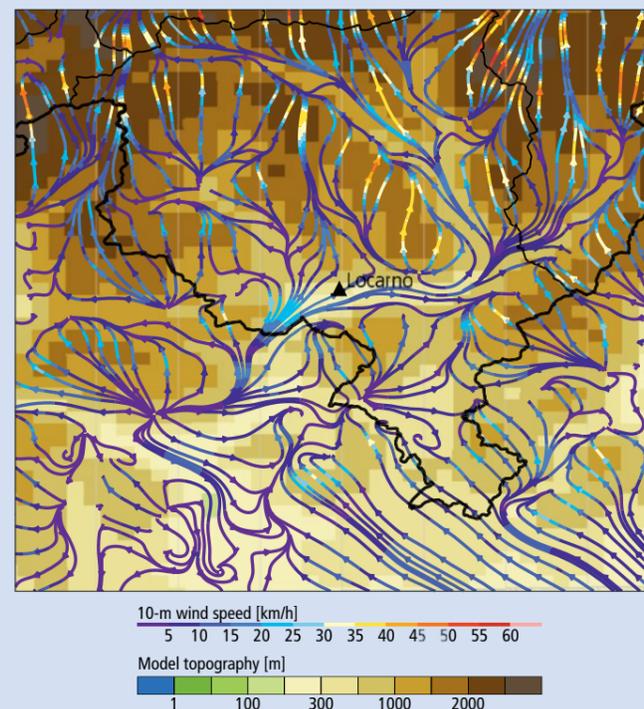


Fig. 46: Vent à 10 m du sol le dimanche 27 septembre 1868 à 12 h tel que reconstruit par le modèle WRF sur une grille de 2 km. La topographie du modèle est montrée en couleur, le vent par des flèches. La couleur des flèches représente la vitesse du vent.³²

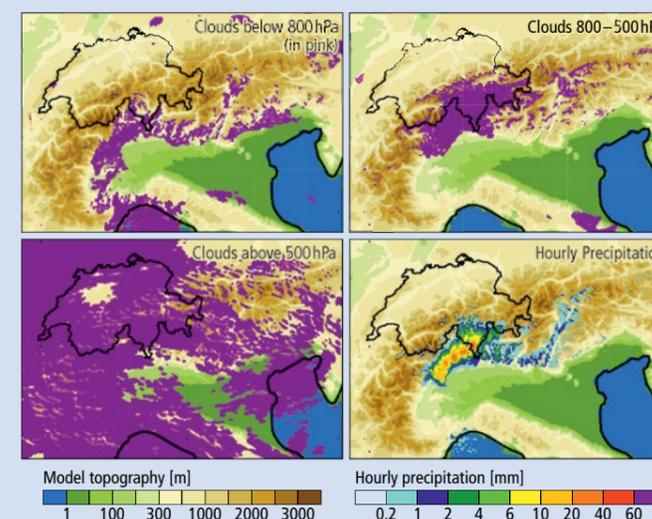


Fig. 47: Couverture nuageuse et précipitation horaire (en bas à droite) dans le modèle WRF sur une grille de 2 km pour le dimanche 27 septembre 1868 à 3 h. La couverture nuageuse en violet correspond aux basses couches (en haut à gauche), couches moyennes (en haut à droite) et hautes couches (en bas à gauche).

Affinage statistique

Le downscaling statistique a été effectué par la méthode des analogues optimisée pour les fortes précipitations (cf gauche). Comme Lugano¹ est la seule mesure située dans la région étudiée, les résultats sont plus précis au sud qu'au nord du Tessin. Les accumulations de précipitation sur 5 jours au Tessin pour les fenêtres du 26 au 30 septembre et du 1^{er} au 5 octobre 1868 sont montrées dans la figure 48.

Les accumulations de précipitation sur l'entier de l'événement sont presque identiques pour les méthodes statistique et dynamique. Le premier épisode est plus marqué dans la méthode dynamique le second dans la méthode statistique. Même les jours esseulés apparaissent similaires alors que les deux méthodes sont complètement différentes.

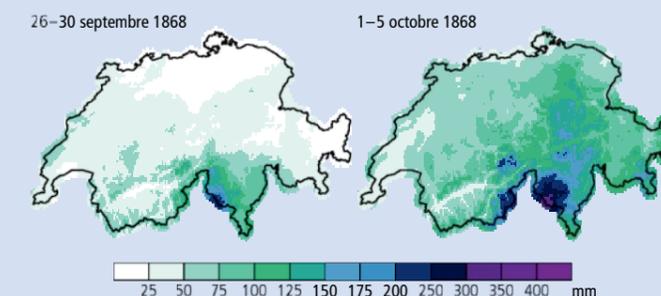


Fig. 48: Accumulations de précipitation sur 5 jours au Tessin telles que reconstruites par la méthode des analogues sur une grille de 2 km et pour les périodes suivantes: 26–30 septembre et 1–5 octobre 1868.

Modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques sont utilisés lorsqu'on ne dispose pas d'observations suffisantes, lorsque des prévisions ou des reconstructions sont requises, ou lorsque l'on souhaite mieux comprendre certains processus. Ces modèles décrivent les processus du cycle hydrologique dans son ensemble ou partiellement: précipitations, stockage de l'eau, débit et évaporation. La chaîne de cause à effet précipitations/débit est particulièrement importante. L'hydrologie dispose d'un grand nombre de modèles, de complexités diverses, qui sont utilisés en fonction de la question posée, de la disponibilité des données et des ressources informatiques existantes.

Il existe deux types de modèles différents: déterministes et stochastiques. Les premiers calculent des valeurs absolues (p. ex. un débit) alors que les seconds génèrent des probabilités. Pour les modèles déterministes, on distingue trois sous-types en fonction d'avec quel niveau de détail les processus y sont décrits⁷⁰ (fig. 49): les modèles « black-box » ne considèrent p. ex. que le rapport entre précipitations et débit, sans entrer dans le détail des facteurs qui forment le débit. Ils se servent donc surtout de relations empiriques. Les modèles « grey-box » en revanche décrivent une partie des processus du cycle de l'eau sur une base physique, même si c'est souvent de manière simplifiée, et recourent aussi parfois à des relations empiriques. Enfin les modèles « white-box » reproduisent tous les processus au moyen de lois physiques fondamentales. Ils constituent donc les modèles les plus complexes.

Plus les modèles sont complexes, plus ils exigent de données. Alors que les modèles simples précipitations/débit (« black-box ») ne nécessitent que des données de précipitations et de débit comme leur nom l'indique. Le besoin en données des modèles plus complexes est largement plus grand: il leur faut des valeurs météorologiques comme la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement global; des paramètres du sol comme la profondeur, la granulométrie et la compacité; des paramètres relatifs à l'utilisation du sol comme le type et la hauteur de végétation, la profondeur des racines et l'indice de la surface totale des feuilles.

Pour choisir un modèle, il s'agit toujours donc de bien examiner la base de données en présence. Pour le formuler de manière caricaturale: on n'équipe pas une carrosserie de Ferrari (modèle complexe) avec un moteur de tondeuse à gazon (peu de données). La résolution spatiale va de pair avec ces différences dans l'exigence par rapport aux données. Les modèles simples « black-box » se basent sur les valeurs moyennes d'une région, les modèles « white-box » utilisent des cellules ou des éléments finis qui comprennent la variabilité spatiale d'un bassin versant.

Modèles pour la reconstruction de crues historiques

Voici donc quelques recommandations pour la reconstruction d'événements de crue: a) pour l'analyse d'événements de crue extrêmes,

les modèles plus complexes sont à privilégier. Les modèles black-box ne sont pas adaptés car ils ne sont pas en mesure de saisir les processus extraordinaires; b) la base de données est habituellement limitée pour les reconstructions. Il est donc exclu d'utiliser des modèles très demandants en données. Par conséquent, les modèles qui conviennent le mieux sont ceux qui sont fondés sur des lois physiques tout en demandant relativement peu de données.

Le calibrage nécessaire d'un modèle hydrologique s'effectue pour des périodes disposant d'une bonne base de données. La qualité structurale des données d'entrée pendant le calibrage ne peut toutefois pas être trop différente de celle de la période de reconstruction. S'il faut par exemple lors de la reconstruction travailler avec des données provenant d'un modèle météo (cf p. 26), les données utilisées pendant le calibrage doivent aussi provenir d'un modèle météo – même s'il existe des observations directes pour la période de calibrage. Ce qui importe pour le succès de la reconstruction, c'est de savoir si le modèle hydrologique fournit des résultats fiables même dans les conditions extrêmes d'une crue. On peut le vérifier à l'aide de données de mesure, mais aussi avec des observations qualitatives. Les choses deviennent aussi intéressantes lorsque le modèle ne parvient pas à reproduire les observations. En effet, grâce à des scénarios « que se passerait-il si », les données d'entrée, la prédisposition du bassin versant et le déroulement des processus peuvent être modifiés artificiellement dans le modèle de manière à ce que la crue puisse être reconstituée. Les modifications nécessaires peuvent alors donner des renseignements sur la chaîne de processus qui a finalement provoqué la crue.

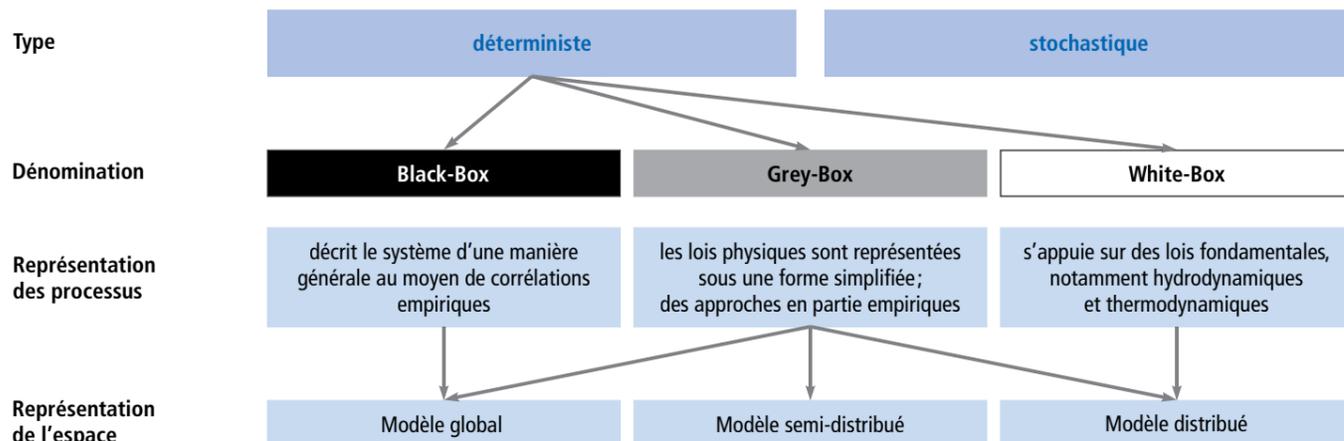


Fig. 49: Résumé des différents types de modèles en hydrologie. Pour la reconstruction d'événements de crue, les modèles grey-box constituent souvent le bon choix.⁷⁰

Modélisation hydrologique de la crue de 1868

Après avoir reconstitué les conditions météorologiques, aussi bien à grande échelle que locales, de l'événement de 1868, nous nous sommes demandé si nous serions aussi en mesure de simuler le débit et le niveau du lac. Pour la modélisation de la crue de 1868, nous avons utilisé le modèle « grey-box » PREVAH. Le bassin versant du lac Majeur (6368 km²) a été divisé en 37 sous-ensembles qui se composent en tout de 735 « hydrological response units » (HRUs). Les HRUs sont des surfaces qui se comportent de manière homogène d'un point de vue hydrologique et pour lesquelles on effectue donc une simulation commune. Le modèle utilisé a été initialement développé pour des prévisions horaires à court terme dans le bassin versant du lac Majeur.⁶² Dans cette version du modèle, le comportement actuel complexe du débit, qui subit de nombreuses influences anthropiques (énergie hydraulique) a été déterminé avec le modèle « routing » spécial RSMInerve. À l'époque de la crue de 1868 nous n'avons pas dû utiliser le modèle « routing » car ces influences anthropiques n'existaient pas.

Comme seules des données de température et de précipitations journalières – mais en haute résolution spatiale – étaient disponibles pour la reconstruction, le modèle a été adapté en conséquence. Le débit pour la période de 1961 à 2010 a été simulé à l'aide de ce modèle simplifié et comparé avec des données de mesure. On n'a constaté qu'un très faible écart par rapport au modèle initial. Finalement, on a encore calculé le rapport entre le niveau du lac et le débit, qui a été validé à l'aide de la station de mesure de débit en aval du lac Majeur. Ce rapport est nécessaire pour pouvoir simuler correctement le niveau du lac. Il indique quelle quantité d'eau s'écoule pour quel niveau de lac. Il ne permet cependant de bien saisir que les valeurs moyennes sur plusieurs semaines, à cause de la forte régulation du lac qui vise à retenir l'eau en hiver pour l'irrigation de la plaine du Pd. Comme on ne connaît pas la régulation précise, on n'a pas pu obtenir une précision élevée du modèle pour le court terme.

La fig. 50 montre la reconstruction du niveau du lac pour la crue de 1868 avec l'utilisation de deux approches différentes (affinage statistique en orange et affinage dynamique en bleu clair, cf p. 26), ainsi que le niveau observé du lac (« bleu foncé »). On voit bien les deux événements de fortes précipitations qui ont entraîné une nette montée du niveau du lac en deux étapes. Il est intéressant de constater que les deux reconstructions (statistique et dynamique) de précipitations sont presque identiques quant à la quantité totale (278 et 279 mm), mais très différentes dans le déroulement temporel. Dans la simulation hydrologique, les deux reconstructions conduisent pourtant à une nette sous-estimation du niveau du lac. Plusieurs scénarios « que se passerait-il si » ont été examinés, dont une obstruction – plutôt invraisemblable – à la sortie du lac. L'explication la plus probable pour la forte

sous-estimation s'explique est une modification du rapport entre le niveau du lac et le débit, survenue à la suite d'une érosion du fond du lac pendant la crue de 1868.⁴⁰

Un scénario, qui reprend l'état des forêts en 1868 – très réduites par rapport à aujourd'hui (-50 %) – et qui a été calculé avec les données météo issues de l'affinage dynamique (WRF), montre une différence à peine perceptible du niveau du lac. Cela s'explique par le fait que les sols étaient déjà saturés et que le stockage dans la canopée (5–8 mm) est minime par rapport aux précipitations tombées (280 mm).

Le paradigme du déboisement

Le rapport entre les déboisements en montagne et les inondations dans les vallées était déjà perçu au XVI^e siècle alors que l'exploitation minière, alors à son apogée, avait conduit à des déforestations massives dans les Alpes orientales et les moyennes montagnes allemandes. Au XVIII^e siècle, la sylviculture, qui commençait à se développer, s'intéressa de plus en plus à une utilisation durable des forêts. À la fin du siècle, des ingénieurs forestiers français établirent un rapport entre défrichements et crues dans les Pyrénées. En 1825, Alexandre Moreau de Jonnés affirma que le déboisement favorisait le réchauffement et l'assèchement du sol et donc aussi l'érosion.⁷¹ « Dès que les arbres ne protègent plus le sol des influences de l'atmosphère et que les interactions entre les deux ne sont plus entravées, alors la chaleur augmente par la réfraction des surfaces, la capacité de leurs composants minéraux à se réchauffer, ... et enfin par le fait que l'évaporation des régions boisées fait entièrement défaut; à cause de tout cela, une grande quantité de matière chaude reste libre dans l'atmosphère au lieu d'être latente. »

Ce raisonnement, d'abord répandu uniquement en France, se popularisa aussi en Europe centrale grâce à une traduction de l'étude en allemand et fut repris par la Société forestière suisse, fondée en 1843. Comme les forêts de montagne suisses étaient alors dans un état déplorable à cause du déboisement séculaire et des conflits avec la population rurale au sujet de l'exploitation, le lien avec les inondations comme celles de 1834, 1852 ou 1868 était évident pour les ingénieurs forestiers. Les promoteurs de la Société forestière, en particulier Karl Kasthofer (1777–1853) et Elias Landolt (1821–1896), tentèrent de mobiliser le public et les politiciens autour de cette question. Ceci qui ne réussit définitivement qu'après les inondations de 1868.⁷

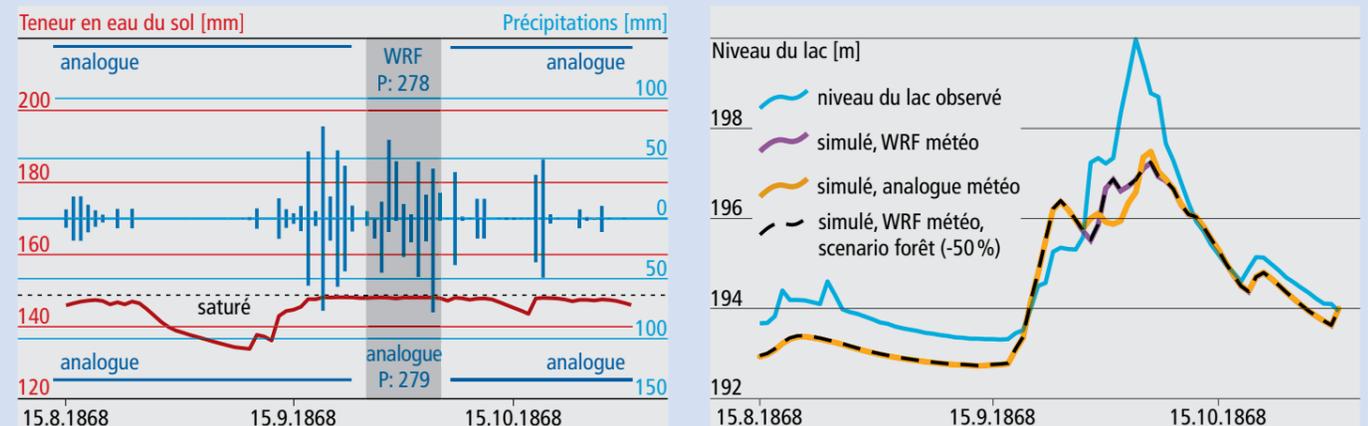


Fig. 50: Reconstruction de précipitations et de saturation du sol (valeurs moyennes régionales, à gauche), ainsi que du niveau du lac (à droite). Les barres bleues à droite dirigées vers le haut montrent les précipitations de l'affinage numérique par la simulation WRF (sur fond gris). Les barres bleues dirigées vers le bas et les barres situées à l'extérieur de la surface grise proviennent de la méthode des analogues (affinage statistique) (cf p. 27)

Reconstruction de crues historiques à l'aide de modèles hydrologiques et hydrauliques

Les hauts débits ne provoquent pas forcément des inondations. L'hydraulique est en effet déterminante. Grâce à la reconstruction précise du terrain, il est possible de simuler des événements de crue du passé avec des modèles hydrologiques et hydrauliques. Ces estimations comportent certes de nombreuses incertitudes, mais pour la gestion des risques de crue, c'est précisément cette information qui revêt une grande importance.

Reconstruction d'événements historiques extrêmes

La reconstruction d'événements de crue historiques peut compléter les relevés effectués dans les périodes de mesures instrumentales et donc fournir des bases essentielles pour l'évaluation d'événements extrêmes. C'est donc aussi une information importante pour le dimensionnement et la conception d'ouvrages de protection^{72,73} ainsi que pour la planification territoriale. D'une part, les événements extrêmes permettent d'étudier les processus qui peuvent entraîner une catastrophe. D'autre part, des événements de crue bien documentés réduisent les incertitudes dans l'évaluation des dangers et des risques.

Les événements de crue passés laissent des traces visibles sur le terrain sous forme de bordures d'érosion et de dépôts sédimentaires,^{74,75} dans les cernes des arbres,⁷⁶ dans des documents historiques (cf p. 18) ou encore sous forme de repères de niveau de crue sur des bâtiments.⁷⁷ Ces sources permettent de reconstituer d'anciens événements de crue. Ceci qui représente un grand potentiel pour l'analyse de la variabilité du climat régional et comme complément des données provenant de la période de mesure instrumentale. De ce fait, de nombreux groupes de recherche travaillent à la reconstruction d'événements de crue du passé avec des méthodes et des données très différentes.⁷⁸⁻⁸¹

En Suisse, les événements de crue historiques sont comparativement bien documentés : en plus des documents et des repères de crue, il y a eut très tôt déjà des mesures et de bonnes sources cartographiques.⁸² Au cours des grandes corrections des cours d'eau, des relevés étonnamment précis ont été effectués, comme des plans géométriques, des cartes topographiques historiques, des relevés de profils transversaux des cours d'eau et des mesures du niveau de l'eau (cf p. 20). En comparaison avec d'autres régions, cette richesse de données historiques permet une analyse très détaillée d'événements historiques.⁸³

Lorsque l'on reporte les débits, niveaux d'eau et surfaces inondées historiques reconstituées à la situation et au paysage actuels, il convient cependant de procéder avec prudence. En plus des variations climatiques et des modifications intervenues dans l'utilisation des terres dans les bassins versants⁸⁴, l'homme est intervenu très tôt déjà, et de manière directe, dans le système hydrographique : la déviation ou la correction des cours d'eau, les barrages, les ouvrages de protection contre les crues ont des répercussions directes sur la situation de l'ensemble du réseau hydrographique et surtout sur la situation locale des risques. Une situation hydrologique est typiquement modifiée par le creusement ou le réhaussement de seuils, ou la construction de digues latérales qui modifient de manière significative le profil d'un cours d'eau et donc le rapport niveau/débit.⁸⁵

Des ouvrages de protection contre les crues dans le cours supérieur peuvent accentuer les pointes de crue dans le cours inférieur.⁸⁶ Avant qu'un repère de crue ne puisse être pris en considération dans des analyses statistiques et des évaluations de risques plus approfondies, il faut donc reconstituer la situation hydraulique de l'époque.⁸⁷ En particulier lorsqu'il s'agit d'analyser sur de longues périodes l'influence du changement climatique sur la fréquence et la magnitude des événements de crue, il est impératif de tenir compte de la modification de la situation hydraulique.⁸⁸

Mise en évidence des modifications au cours du temps

Lors de travaux actuellement en cours à l'Institut de géographie de l'Université de Berne, les mesures et plans de situation du début du

XIX^e siècle figurant dans les archives historiques ont été numérisés et géo-référencés. Ces données de base, combinées avec les modèles numériques de terrain à haute résolution, disponibles depuis peu, dans lesquels on peut faire apparaître les traces d'anciennes crues, permettent une reconstruction détaillée de la surface historique du terrain. Celle-ci est représentée sous forme de modèle numérique de terrain et peut être utilisée pour des simulations hydrauliques. Grâce aux modèles de simulation disponibles aujourd'hui qui résolvent les équations de Saint Venant, des indications solides sur les débits de crue de jadis peuvent être déduites des repères de crues. Cette simulation permet de rendre plausible, de quantifier et d'interpréter les sources historiques qui sont le plus souvent qualitatives. Un autre avantage de la reconstruction des anciennes surfaces de terrain est que celles-ci permettent une comparaison avec la situation actuelle. Grâce à cette comparaison, on peut isoler l'influence de la morphologie modifiée du cours d'eau par rapport à d'autres facteurs influençant le débit et analyser ainsi son effet en particulier⁸⁹ (www.risikodynamik.ch).

Les événements de crue reconstitués ont encore un autre avantage pour la gestion des risques en général, à savoir la prise en compte intégrale de toutes les mesures destinées à éviter et réduire les risques de crue : le risque de crue peut en effet être décrit localement de manière frappante, surtout lorsque l'on dispose de documents et illustrations historiques. Cela facilite la sensibilisation de la population (www.ueberschwemmungsgedaechtnis.ch).

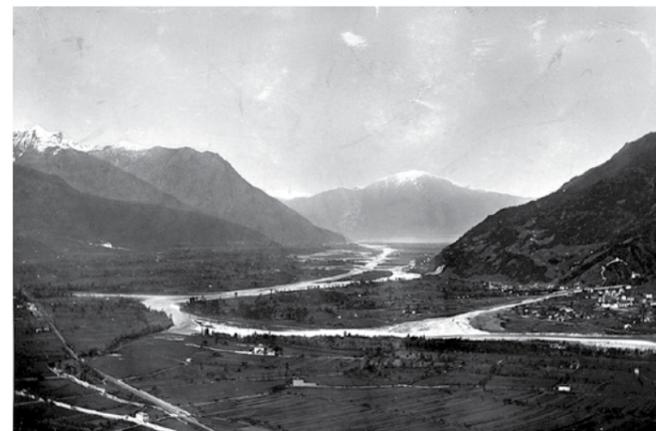


Fig. 51 : Vue sur la rivière près de Giubiasco¹ et sur la plaine de Magadino. Photographie prise dans les années 1880. Les travaux de correction avaient déjà commencé mais le cours initial est encore visible.

L'événement de crue d'octobre 1868 reconstituée par le modèle hydraulique

Sur la base de travaux préalables⁶², le niveau de la partie supérieure du lac Majeur et les débits de crue dans la plaine de Magadino reconstitués à l'aide du modèle hydrologique (cf p. 28) ont été utilisés dans un modèle hydraulique afin de simuler les surfaces inondées. Le modèle hydraulique a été utilisé dans différentes configurations : en se basant sur l'état naturel (vers 1864) ou l'état actuel (vers 2003) du terrain et en se basant sur le niveau simulé ou observé du lac.

La comparaison des résultats montre que le plus haut niveau observé autrefois ne peut plus être atteint avec le rapport actuel niveau/débit à la sortie du lac Majeur. Lors de l'événement historique, le lit de la rivière s'est en effet nettement creusé à la sortie du lac, ce qui augmente fortement le débit.⁴⁰ Cela a pour conséquence aujourd'hui que le lac ne peut plus être retenu autant que dans la situation d'autrefois. La comparaison montre aussi que les corrections des cours d'eau dans la plaine de Magadino ont fortement réduit les surfaces inondables. Cet exemple montre de manière saisissante à quel point les effets d'un même événement déclencheur peuvent être différents en fonction des modifications dans la morphologie du cours d'eau. Il est impératif d'en tenir compte lors de l'interprétation de sources historiques.

Répercussions de la crue de 1868 autrefois et aujourd'hui

Depuis 1868, ce ne sont pas seulement le cours de la rivière et l'écoulement du lac qui se sont modifiés, mais aussi l'état de l'habitat. En aval de Bellinzona¹ et à proximité des rives du lac Majeur du côté suisse, on dénombrait en octobre 1868 436 bâtiments dans la surface inondable reconstituée d'après le niveau du lac mesuré et le débit de crue simulé. Si l'on considère le nombre de bâtiments en 2016, la même surface inondable (modèle de terrain historique) concernerait 3934 bâtiments. Cela signifie que l'état de l'habitat considéré a augmenté d'un facteur 9. Si l'on considère en revanche le cours actuel de la rivière (modèle de terrain actuel, niveau de lac simulé et débit simulé à Bellinzona), ce sont 944 bâtiments qui sont concernés. Cela veut dire que la protection contre les crues et l'agrandissement de la sortie du lac par l'érosion du fond pendant l'événement de 1868 montrent leurs effets. Environ 2990 bâtiments profitent aujourd'hui de ces modifications, planifiées et non planifiées, dans le système hydrographique. Les reconstructions d'anciens événements de crue peuvent donc constituer une base importante pour l'évaluation de la fréquence et de la magnitude des crues. Elles peuvent également être une base pour l'analyse de la dynamique spatiale et temporelle dans l'évolution du risque de crue.

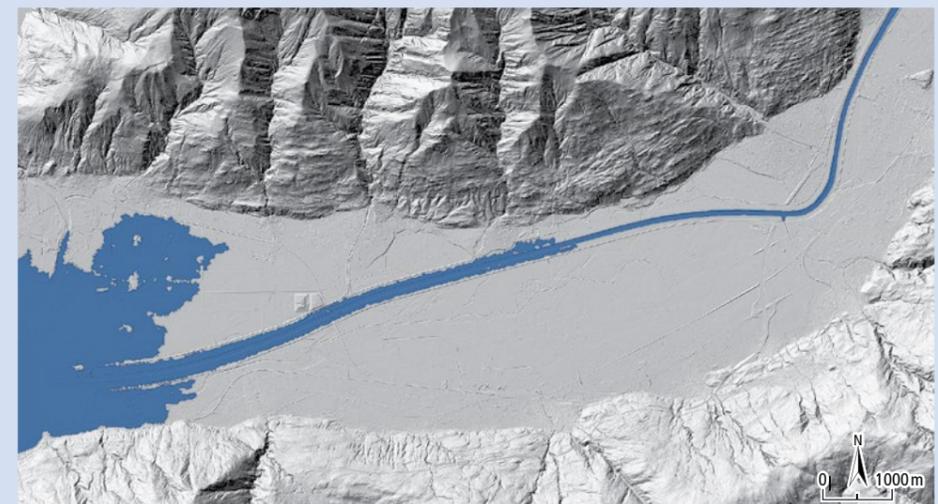
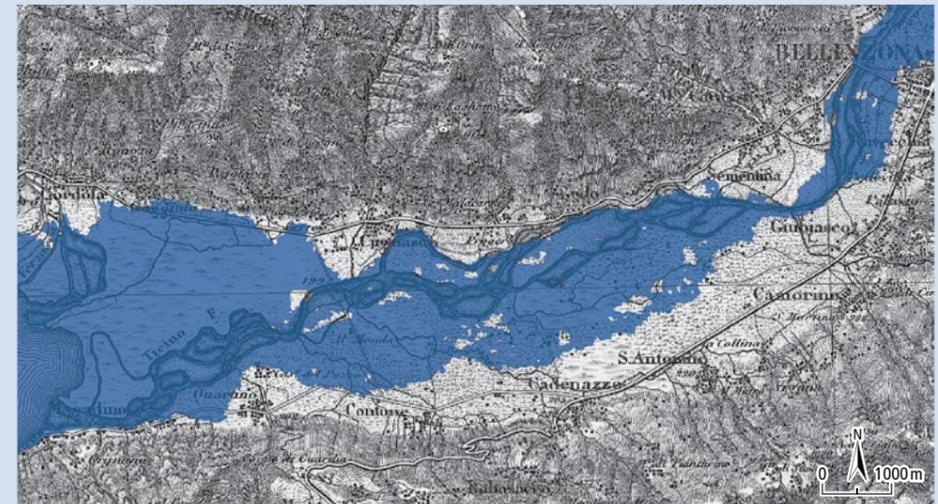


Fig. 52 : Comparaison des surfaces inondées de l'événement de crue de 1868 reconstitué par le modèle hydraulique (en haut) et les répercussions simulées du même événement sur la situation actuelle (en bas).

Torrent et crue : recherche de traces sur le terrain

Les grands événements de crue n'occasionnent pas seulement des inondations. Ils sont accompagnés de glissements de terrain, de laves torrentielles (dans les bassins versants escarpés et de petite taille) ainsi que de modifications des cours d'eau par l'érosion des rives et le dépôt de sédiments charriés. L'érosion et les dépôts de matières solides charriées, dus à différents processus, modifient ainsi le paysage et cause d'importants dommages aux bâtiments, aux infrastructures et à l'agriculture. Les événements de crue d'août 2005 ou les laves torrentielles dans le Lötschental¹ en octobre 2011 l'ont clairement démontré.

Processus

Lors de crues, les ruisseaux et les rivières transportent des galets, des graviers, du sable, de la boue et souvent également du bois. Ces matériaux arrivent dans les cours d'eau par des glissements, des laves torrentielles, des brèches dans les berges ou par l'érosion du lit. Ils se déposent ensuite dans les endroits plus plats et plus larges des cours d'eau. Après une inondation, l'eau en surplus finit par s'écouler alors que les sédiments, eux, restent dans les champs ou les localités, soit sous forme de bancs de gravier ou de dépôts d'éboulis. Dans les grandes plaines, les cours d'eau ont autrefois souvent changé de direction et creusé un nouveau lit pendant une crue en raison des alluvions. Ceci n'est plus guère possible aujourd'hui avec la canalisation des cours d'eau ; mais les anciennes transformations sont encore reconnaissables sur le terrain (fig. 53).



Fig. 53: Traces d'anciens cours d'eau au bord du Rhin alpin (près de Trübbach).

Pendant les grands événements de crue avec fortes chutes de pluie, comme en 1868, 1987, 2005 ou 2011, des bassins versants de petite taille furent aussi touchés : d'importants glissements survinrent sur des pentes saturées et des laves torrentielles ou un transport massif de matériaux de charriage se produisirent dans les torrents à forte pente. Les matériaux solides charriés se déposèrent en laissant des formations typiques : cônes d'alluvions et de déjection, rigoles, ravines, ou autres. Les laves torrentielles sont particulièrement actives dans la formation du paysage. Formées d'un mélange d'eau, de pierres et de matériaux fins⁹⁰ qui



Fig. 54: Crues et laves torrentielles à Zignau (à gauche) de 1868³⁵ et 1987 (à droite).

s'écoule rapidement, elles peuvent transporter sur une longue distance de grandes quantités de matériaux solides, dont de gros blocs de rocher. Elles comptent parmi les processus les plus dangereux liés aux torrents.

Alors que le charriage de matériaux par les cours d'eau faisait déjà l'objet d'études scientifiques et était décrit par des formules adéquates dès les années 1940, les laves torrentielles ont été quasiment ignorées par la science en Suisse jusqu'à la fin des années 1980. Les événements majeurs de l'été 1987 ont clairement révélé le besoin de recherches en la matière. La documentation et l'analyse de ces événements ont permis de lancer une intense activité de recherche.⁹¹ Les questions liées à la dynamique des coulées de boue, aux conditions de déclenchement de glissements et de laves torrentielles (également en relation avec les changements climatiques⁹²) ou à la simulation de ces processus^{93,94} devinrent prioritaires dans la recherche, en particulier dans le but de mettre à disposition des outils pour la pratique.^{95,96} Le terme de lave torrentielle est apparu dans les médias avec les événements de crue du printemps 1999 et d'août 2005 incluant de nombreux glissements et laves torrentielles dévastatrices (Sörenberg,¹ Glarus,¹ Guttannen,¹ Brienz¹). Ce terme est aujourd'hui standard et utilisé p. ex. dans les alertes. La Zavrugia (Zignau¹, GR), où des laves torrentielles s'étaient déjà produites lors de nombreuses crues dans le passé, a aussi été concernée en 1987. Des laves torrentielles particulièrement fortes ont sévi en 1868 (à droite) et 1927 (cf fig. 54).

Mesures

Les grandes crues de 1868, 1987, 1999 et 2005 ont chaque fois influencé les stratégies destinées à réduire les dangers et les risques dus aux hautes eaux ou aux matériaux solides transportés par l'eau (cf p. 36). Alors qu'après 1868, la priorité a été donnée à la stabilité des bassins versants ainsi qu'à des mesures de construction pour canaliser les ruisseaux et les rivières, la stratégie de protection s'est concentrée sur une approche globale dès 1987 avec des mesures de planification (éviter les zones à risques), de type écologique (reboisement), de construction (ouvrages de protection) et d'organisation. Après les crues de 1999 et 2005, l'accent a en outre été mis sur les avertissements à la population.

Dans la protection contre les crues, les mesures de construction destinées à maîtriser l'eau et surtout les matériaux solides se basent sur trois concepts fondamentalement différents : retenir, détourner, conduire. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, on reconnut que le comportement des torrents était décisif pour la situation de crue⁹⁷ et que ceux-ci



devaient être par conséquent maîtrisés. À l'époque, on attribuait communément la responsabilité des dommages causés par les torrents au mauvais état des forêts et au manque d'ouvrages de protection sur les cours d'eau. C'est aussi ce que firent les commissions d'experts chargées d'analyser la crue de 1868.⁹⁸ Les aménagements du torrent qu'ils proposaient avaient pour but de réduire l'érosion dans le cours supérieur et d'augmenter la capacité de charriage dans le cours inférieur. Ces idées déplaçaient la lutte contre le symptôme vers la lutte contre les causes.⁹⁹ Outre les reboisements, on entreprit aussi la construction de barrages de consolidation et de retenue, ainsi que des escaliers de barrages dans les ruisseaux à forte pente (fig. 55), p. ex. dans la Zavrugia.

Parallèlement aux mesures de stabilisation dans les petits bassins versants, on aménagea de véritables canaux ou déversoirs depuis les lits de rivière ou de ruisseaux canalisés dans les vallées et sur les cônes de déjection. Ces aménagements sont destinés à conduire les écoulements de crue ou les matériaux solides dans les secteurs aval ou à les détourner vers des zones moins exploitées. Le lit de la Zavrugia a aussi été entièrement canalisé sur le cône de déjection dans les années 1960, ce qui a probablement fait que le village de Zignau n'a pas connu d'importants dégâts lors de la crue de 1987. Au cours des dernières décennies, on a en outre construit de nombreux petits collecteurs, et même quelques très grands, pour éviter que des matériaux solides ne s'accumulent sur les cônes de déjection.

Actuellement, de nombreux ouvrages de protection arrivent en fin de vie, voire sont carrément vétustes. Pour les grands ouvrages de retenue en bassin versant (p. ex. escaliers de barrages), la question est de savoir si les ouvrages doivent être remplacés ou si d'autres stratégies ne seraient pas plus durables. Au lieu de retenir les matériaux solides dans le bassin versant, on préfère aujourd'hui les gérer sur le cône de déjection ou dans un puit d'infiltration, voire on les dirige vers des régions peu exploitées.¹⁰⁰

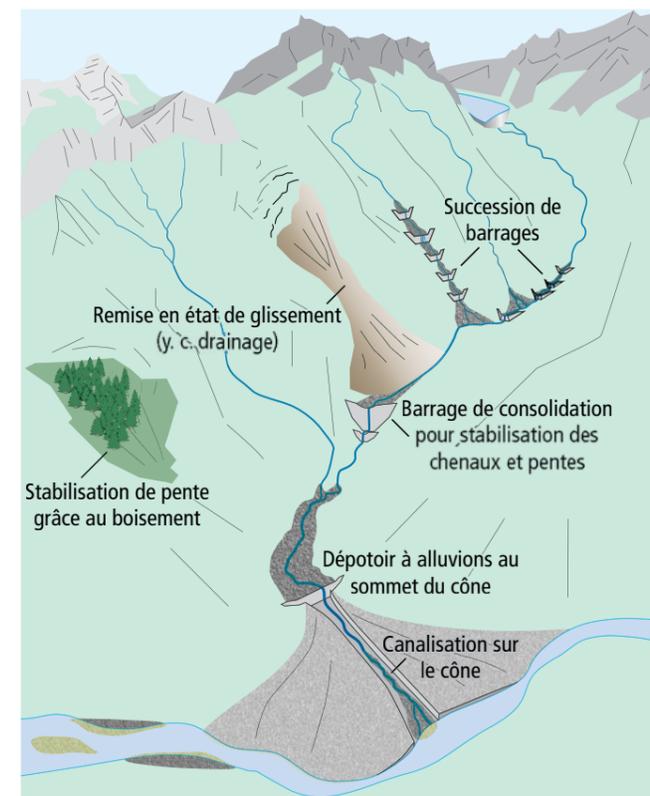


Fig. 55: Différents types de mesures préventives dans les bassins versants des torrents.¹⁰⁰

Traces de l'événement de 1868

Les précipitations de l'automne 1868 ont provoqué de fortes inondations dans les vallées du Rhin, de la Reuss et du Tessin. Des rives ont été en partie érodées et le cours des rivières s'est parfois déplacé. Selon le Bündner Tagblatt du 1^{er} octobre 1868, ce sont surtout le Rhin postérieur, le Glögn (Glenner) et la Nolla qui ont causé des dégâts importants aux berges et aux terrains avoisinants. Dans ces rivières, les eaux ont érodé les rives, emporté des digues longitudinales de protection des berges et détruit de nombreux ponts.

Ces précipitations intenses et de longue durée n'affectèrent pas seulement les grandes vallées fluviales. Elles provoquèrent aussi de nombreux glissements, laves torrentielles et débordements de torrents dans des cours d'eau plus petits et des ruisseaux. Selon le rapport des commissions d'experts⁹⁵, « les eaux des montagnes se sont transformées en flots impétueux et, comme elles n'étaient pas assez bien retenues par des barrages et les forêts, elles ont emporté de telles masses d'alluvions, d'avalanches de pierres et de rochers que des terres ont été arrachées à la montagne, des vallées ont été inondées et remplies de boue, des villages entiers ont été détruits ou ensevelis et de nombreux habitants enterrés sous les décombres. » Les experts insistent sur le rôle des matériaux solides charriés par les ruisseaux et les rivières. Le Peilerbach, près de Vals, est ainsi sorti de son lit à cause des matériaux charriés : « Toute la nuit, des blocs de terre gorgés d'eau précipitèrent dans la gorge de Vals et retinrent l'eau. La gorge rejeta par sept fois ces masses de débris au pied de la montagne dans le Glenner ».⁹⁵

L'événement le mieux documenté est la lave torrentielle (Rüfe) dans le val Zavrugia (12 km²) (cf fig. 54) : « Dans un terrible bruit de tonnerre, une montagne de boue dévala à travers la rue. Dans la nuit noire, nous nous apprêtions à peine à fuir comme d'habitude vers le nord dans les propriétés et les jardins, que déjà une partie de la coulée s'était frayé un chemin dans cette direction. »³ Johann Coaz a reproduit ces énormes ravages dans une gravure. Malgré que de grandes crues et laves torrentielles sont reportées pour 1748 et 1834 déjà, le cône de déjections était très peuplé en 1868 (fig. 56).

Les commissions d'experts convoquées à la suite des événements de septembre et octobre 1868 se sont exprimées sur la question des mesures préventives. Les experts Landolt, Culmann et Escher von der Linth étaient d'avis que le plus opportun serait d'affecter les plus gros montants possibles à des aménagements dans les vallées latérales. Ils indiquaient ainsi que les corrections des cours d'eau en plaine ne seraient pas assez sûres si l'on ne prenait pas aussi des mesures dans les zones de provenance des crues et des matériaux charriés. Les nouvelles lois (loi sur les forêts, loi sur l'aménagement des cours d'eau) exigent clairement la prévention des crues, en particulier des événements liés aux torrents.



Fig. 56: Zignau dans l'atlas Siegfried de 1881, les traces des événements sont clairement reconnaissables.

Dégâts causés par les crues

Les crues et les processus qui les accompagnent ont des impacts très divers sur les hommes et leurs espaces de vie. Dans la Suisse moderne, les effets positifs, comme l'apport de substances fertilisantes et l'irrigation, n'ont qu'une importance secondaire. Les effets négatifs, à savoir les dégâts, sont de loin plus importants.

Les statistiques des assurances et des services publics, ainsi que des articles de presse et des documents sur les événements permettent d'estimer que les crues ont causé en Suisse des dégâts pour environ 300 millions de CHF par an au cours des cinquante dernières années.¹⁰¹ Sont considérés dans ces estimations les dégâts directs et financiers aux bâtiments et leur contenu, aux véhicules, aux infrastructures et aux cultures.

Les dommages sont dus à des effets de pression statique et dynamique de l'eau et des matériaux charriés, à des modifications du terrain et des chenaux d'écoulement (cf chapitre précédent), mais aussi à l'humidité et à la saleté.^{102,103} Le montant des dégâts directs et financiers est calculé à partir des coûts de réparation ou de remplacement des objets endommagés.

On observe une augmentation de ces dommages au cours des cinquante dernières années. Cependant cette hausse est surtout due à l'extension et à la valorisation de l'environnement bâti. La fig. 57 montre de manière exemplaire l'évolution, entre 1960 et 2017, des dédommagements pour des dégâts dus aux crues et des valeurs de bâtiments assurés dans 18 établissements cantonaux d'assurance immobilière. On constate en outre qu'au cours des dernières décennies, une part de plus en plus importante de nouveaux bâtiments sont construits dans des zones potentiellement inondables (cf. fig. 58).¹⁰⁴ Parmi les 110 000 logements construits entre 1971 et 1980 et pour lesquels il existe une carte des dangers selon les directives de la Confédération, 14 % se trouvent dans des zones de danger. Pour les périodes suivantes, cette proportion est en constante augmentation et atteint 16 % pour la période étudiée la plus récente (2001 à 2012).

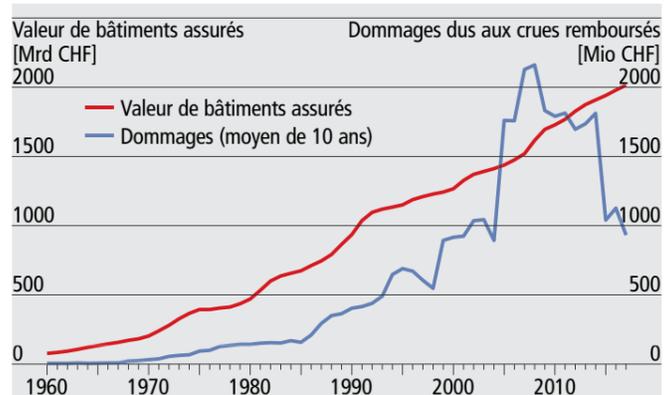


Fig. 57: Valeur de bâtiments assurés (en rouge, en milliards de CHF, axe de gauche) et dommages dus aux crues remboursés (en bleu, moyennes sur les dix dernières années en millions de CHF, axe de droite) entre 1960 et 2017 par 18 établissements cantonaux d'assurance immobilière qui assurent env. 70% du parc immobilier en Suisse.¹⁰⁵

Finalement, on constate qu'aujourd'hui les ouvrages potentiellement menacés par une inondation, en particulier les bâtiments, sont tendanciellement construits et utilisés d'une manière plus vulnérable aux crues. Des accès de maison surélevés avec deux ou trois marches conduisant à une entrée peu accessible à la saleté et à l'eau sont aujourd'hui remplacés par des passages directs, sans seuil, de la terrasse ou du jardin jusqu'au salon. Des réserves de mazout sont stockées à la cave à la place des pommes et des pommes de terre les anciens dépôts de provisions ont laissé la place à l'électricité et à l'électronique du bâtiment.

Quantifier la vulnérabilité aux crues de bâtiments et autres ouvrages menacés et rendre les résultats utilisables pour les estimations de

dommages d'événements à venir est un grand défi. Les résultats des quelques travaux scientifiques effectués dans le domaine, longtemps négligé, de la recherche sur les risques liés aux crues contiennent de grandes incertitudes^{106,107} et soulignent le besoin de nouvelles études.

Les effets négatifs d'une crue ne comprennent cependant pas que les dommages directs et financiers décrits.¹⁰⁵ Les coûts de remplacement ou de réparation ont même souvent une importance secondaire. Pour les infrastructures, les chaînes de production ou les réseaux de communication, ce sont généralement les coûts indirects d'une interruption qui prédominent. Pour l'exemple d'une boulangerie victime d'une crue, il y aura certes des frais élevés pour remplacer la farine, les fours ou les véhicules de livraison. Mais les coûts indirects dus à l'interruption de l'exploitation, en particulier les pertes de gain, sont typiquement beaucoup plus importants. Ils n'apparaissent pas seulement pendant l'événement de crue, mais aussi après, lorsque la clientèle a pris l'habitude d'acheter le pain chez la concurrence. Le montant de ces dommages indirects est souvent difficile à chiffrer. Il est encore plus difficile d'estimer les dommages qui ne peuvent pas se traduire en valeurs monétaires, tels que des personnes emportées par les flots ou alors des biens culturels détruits par l'eau.

Les crues causent des dommages financiers et non financiers, directs et indirects. La recherche actuelle travaille sur la manière de prendre en compte des dommages très différents et d'élaborer des bases de décision solides. Celles-ci contribuent à tenir compte du risque de crue de manière appropriée dans un contexte de croissance constante de notre société.

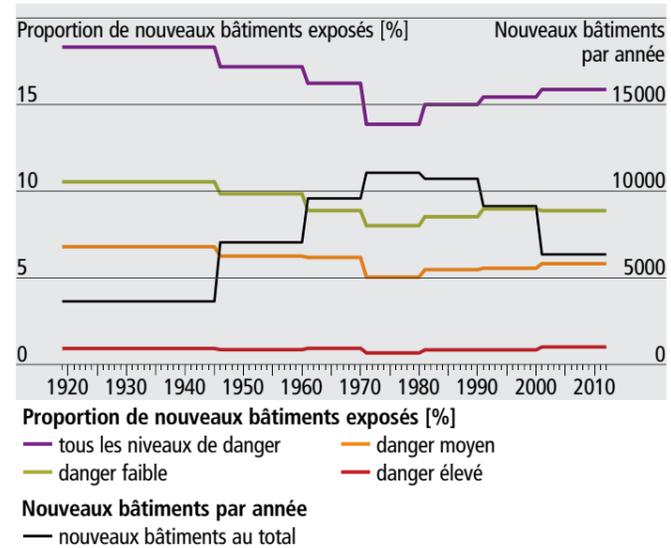


Fig. 58: Bâtiments à usage résidentiel nouvellement construits, selon l'année de construction. La proportion de nouveaux bâtiments exposés (axe de gauche, en pourcent) correspond au rapport entre les bâtiments nouvellement construits dans des zones de dangers de crue (pour différents niveaux de danger) et tous les nouveaux bâtiments nouvellement construits pour lesquels il existe une carte des dangers selon les directives de la Confédération. Ceux-ci sont présentés en chiffres absolus par année (en noir, axe de droite).¹⁰⁴

La répartition des dommages en 1868

La crue de 1868 a causé des dommages exceptionnels, surtout sur le versant sud des Alpes.^{3,32,35,108} Comme il n'y avait pas encore de procédure systématique pour les recenser, le Conseil fédéral convoqua une commission d'évaluation spécifique qui, dans les mois qui suivirent les inondations, recensa en détail les dégâts dans les cinq cantons concernés: Tessin, Grisons, Saint-Gall, Valais et Uri.⁴

L'ensemble des coûts sur le territoire suisse atteignit 14 millions de CHF, dont 6,5 millions uniquement pour le Tessin (fig. 59). Par extrapolation sur l'année 2000, cela correspondrait à 915 millions, resp. 425 millions de CHF.¹⁰⁹ De plus, les précipitations persistantes et intenses ont entraîné le plus haut niveau du lac Majeur jamais mesuré.¹⁰⁸ Il n'est pas étonnant que le canton du Tessin ait été le plus sévèrement touché. Les plus grands dégâts survinrent dans le val Blenio¹ et la Léventine¹ avec un total de 4,1 millions de CHF. Ces régions déplorèrent de plus la perte de 41 victimes sur les 51 au total.³ Dans le canton des Grisons, presque toutes les communes situées le long du Rhin furent touchées par la crue et plusieurs laves torrentielles aggravèrent considérablement les dommages. Le village de Vals¹ (fig. 59 VL), fut p. ex. recouvert par une couche de sable et d'éboulis de 45 cm d'épaisseur en moyenne (fig. 60). Un même destin frappa le village de Zignau¹ (ZI) (fig. 54).³⁵ Plus en aval, l'eau de la crue forma quatre lacs temporaires dans le canton de Saint-Gall. En Valais, les coûts élevés s'accumulèrent surtout le long du Rhône. Dans le canton d'Uri ils s'accumulèrent le long de la Reuss.^{32,108}

La commission d'évaluation mentionnée plus haut recensa les dégâts de manière très détaillée, d'une part selon le type de dommage et d'autre part selon les personnes lésées. Dans l'ensemble, la plus grande partie des dégâts concernait les privés (59%), les communes et les corporations (un tiers) et les cantons (seulement env. 8%). Le type de dommages explique cette répartition: 55 % des dégâts concernaient des surfaces agricoles (y compris des récoltes) et impacta donc la base existentielle des nombreuses personnes touchées dans ces cinq cantons, qui étaient à l'époque essentiellement agricoles. Un bon quart des dégâts concernait les ponts, les routes et surtout les aménagements fluviaux. D'un point de vue actuel, on s'étonne que les cantons n'aient pas été davantage concernés comme parties lésées. Mais contrairement à aujourd'hui, les cantons ne finançaient



Fig. 60: Photo de la vallée ensevelie sous le sable près de Vals peu après la crue et les laves torrentielles qui ont suivi³ (cf p. 32).

alors que les routes et les ponts d'importance cantonale et quelques rares projets intercantonaux d'aménagement fluvial (p. ex. sur le Rhin et le Rhône) alors que les autres infrastructures de ce type étaient assumées par les communes. Si l'on songe que beaucoup de ces travaux ont été exécutés par les habitants des communes dans le cadre de travaux communautaires, il apparaît clairement que de nombreux privés ont subi un double impact.

Les dégâts touchant les bâtiments et les « biens meubles » – qui comprennent surtout les meubles, le bétail et les provisions –, ne représentent qu'une petite partie comparé aux dommages aux terres agricoles et aux infrastructures. Ceci montre que les zones à risques n'étaient guère habitée en 1868.

La commission d'évaluation recensa un total de plus de 18 000 personnes lésées – dont plus de 8 000 au Tessin –, parmi lesquelles plus de la moitié, avec un revenu imposable inférieur à 1000 CHF, faisaient partie des « pauvres ». Un tiers des dommages privés concernait ces indigents sans qu'ils ne soient protégés par un système d'assurance tel que nous le connaissons aujourd'hui. Seule la récolte de dons, très fructueuse, parvint à partiellement soulager leur détresse (cf p. 37).

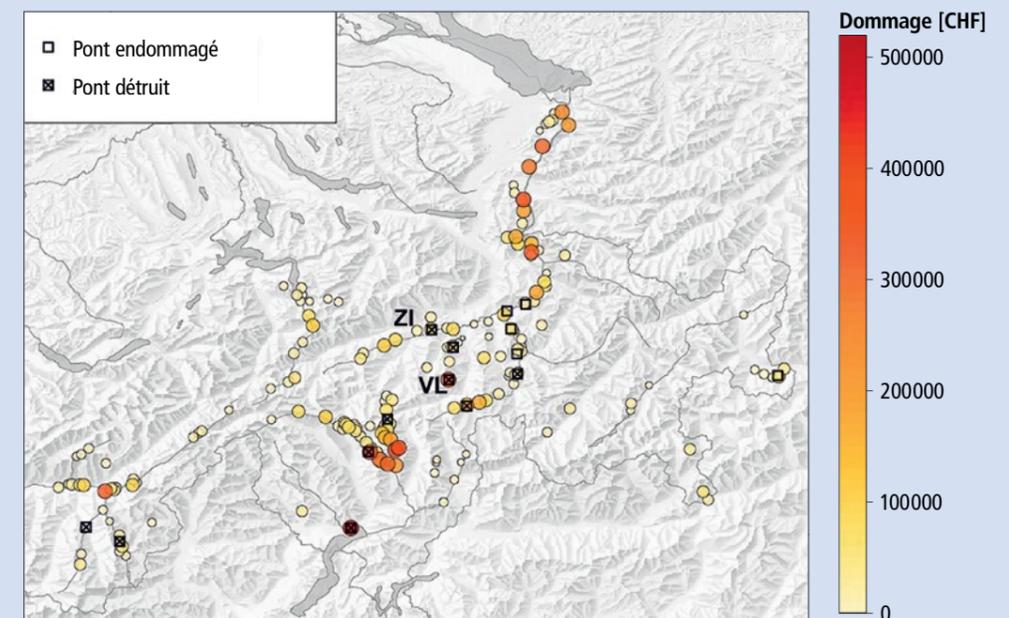


Fig. 59: Montants des dommages (en CHF) d'après des études contemporaines, par commune et dans les cinq cantons concernés du sud-est de la Suisse. Les carrés montrent des ponts en dommages, les carrés avec croix signalent les ponts détruits. VL=Vals, ZI=Zignau.

Répercussions sociales : maîtrise et prévention

Les événements de crue dépassant le cadre régional déterminent depuis toujours les processus sociaux d'adaptation et de transformation, p. ex. dans le domaine de la protection contre les crues et la gestion des risques. Ils peuvent déclencher ou accélérer les connaissances, et donc aussi l'innovation et l'optimisation dans la maîtrise et la prévention des catastrophes. Les innovations, nouvelles stratégies et nouvelles solutions sont cependant conditionnées au niveau d'expérience existant.

Le XIX^e siècle a lui aussi connu de tels événements extrêmes : leurs dimensions et leurs répercussions ont dépassé les capacités de maîtrise et de régénération des communautés locales, ainsi que celles des cantons. En 1868, le jeune État fédéral intervint pour la première fois dans la maîtrise de la catastrophe (cf ci-contre). Pour la première fois en 1868, et davantage encore en 1876 et 1910, des troupes militaires provenant des cantons intervinrent également (fig. 61).¹¹⁰ Ces efforts communs pour maîtriser la catastrophe renforcèrent alors la solidarité entre les régions de Suisse.

Ces trois événements de crue augmentèrent aussi la pression exercée localement sur les assurances immobilières, à la suite de violents orages et d'avalanches, pour qu'elles étendent leurs prestations qui étaient limitées jusque-là aux dommages dus aux incendies.

En 1926, l'assurance-choses de droit public du canton de Vaud fut le premier établissement à inclure dans sa couverture une sélection de dangers naturels.¹¹¹ En l'espace de trois décennies, toutes les assurances des bâtiments et des biens mobiliers actives en Suisse firent de même. Les systèmes d'assurance globaux fortement régulés que nous connaissons aujourd'hui se sont développés dans toute la Suisse jusqu'au milieu des années 1950, à partir des solutions ad hoc avec des dons, des contributions publiques et des prestations d'assurances volontaires.¹¹² Dans 19 cantons, tous les bâtiments sont obligatoirement assurés auprès d'un établissement cantonal monopolistique contre le feu et les dangers naturels. La couverture est presque totale dans les autres cantons car la loi fédérale exige l'inclusion des dangers naturels dans toute assurance contre l'incendie. En Suisse, ce sont les assurances qui assument les dommages causés par les crues et d'autres dangers naturels à la structure et au contenu des bâtiments. Les coûts de réparation et de remplacement sont remboursés à la valeur à neuf et la franchise des assurés est minime.^{113,114}

Aujourd'hui encore, les grands événements de crue jouent un rôle important pour l'innovation. Au niveau local, ce sont eux qui sont le plus souvent à l'origine de la mise en place de plans d'urgence et de mesures de prévention.¹¹⁵ Après la crue de 2005, on a développé les systèmes de prévision météo et d'alertes précoces, ainsi que la planification des urgences et les stratégies de communication en cas de crise. Globalement, un changement de paradigmes s'est produit dès les années 1990, passant de la protection contre les dangers naturels à une gestion de ceux-ci basée sur les risques : des mesures techniques sont combinées avec des mesures organisationnelles et d'aménagement du territoire. Dans la « gestion intégrale des risques », on vise à mettre en œuvre les mesures les plus efficaces. Au plan international, on adopte davantage une approche cherchant à renforcer la résilience contre les effets des dangers naturels et on inclut les incertitudes des prévisions de manière de plus en plus quantitative dans les processus de décision. Pour la gestion des risques liés aux dangers naturels, la nouvelle stratégie de la plate-forme PLANAT « Dangers naturels » tient aussi compte de la capacité de résistance, de régénération et d'adaptation. Cette commission extraparlamentaire coordonne en Suisse les activités de gestion des risques et favorise la mise en œuvre de nouvelles approches. Aujourd'hui encore, la solidarité et l'acquisition de connaissances à partir des événements passés continuent ainsi à jouer un rôle important.

La population suisse profite aujourd'hui des innovations des deux cents dernières années : l'aménagement du territoire permet d'éviter l'occupation de régions menacées et d'écarter ainsi de nouveaux risques (plans des zones de danger). Le règlement sur les constructions

prévoit des mesures de protection des bâtiments aptes à réduire les dégâts en cas de crue y compris dans les zones peu menacées. Dans de nombreuses régions à risques, des directives spécifiques de construction protègent les zones habitées et les infrastructures. Si un événement dépasse malgré tout la capacité des ouvrages de protection, les forces d'intervention locales, comme les pompiers et la protection civile, protègent les principaux objets avec des mesures de protection mobiles. Ils s'appuient sur un système d'alerte précoce (prévisions météorologiques et alerte aux dangers, p. ex. www.gin.admin.ch) et de communication performant. De plus, un plan d'urgence efficace, avec des stratégies adaptées à chaque situation pour maîtriser l'événement, a été élaboré en de nombreux endroits. Les dommages aux bâtiments et aux biens meubles sont remboursés par les assurances de base. La population ne supporte ainsi plus qu'une faible part des risques sous forme de responsabilité propre.



Fig. 61 : Lors de la maîtrise de la crue de 1927, les troupes fédérales apportèrent leur aide aussi au Liechtenstein qui édita ensuite une série de timbres en guise de remerciement. En haut, le pontonnier Siegrist de Schaffhouse porte deux garçons, Oskar et Martin, jusque sur la terre ferme. En bas, le timbre avec ce motif.¹¹⁶

La « récolte de dons par amour (Liebesgabensammlung) » de 1868

L'émotion fut à son comble dans le pays lorsque l'arc alpin suisse fut submergé par les flots.^{4,109} Des offres d'aide provenant de tout le pays se manifestèrent deux jours après les inondations déjà et le Conseil fédéral envoya un représentant dans les régions touchées pour montrer sa douleur dans ce « malheur national ». Le Conseil fédéral ne disposait certes pas d'un mandat constitutionnel en la matière, mais selon la devise « des situations et des conditions exceptionnelles nécessitent aussi des moyens exceptionnels pour écarter la détresse », il convoqua une conférence pour organiser les activités d'aide et leur « conférer énergie et soutien, unité et cohérence ». C'est la première fois depuis sa création, qu'il prenait l'initiative pour gérer une catastrophe, bien que l'occasion se soit déjà présentée auparavant. Le 12 octobre 1868, cette conférence chargea le Conseil fédéral de lancer un appel aux dons et constitua un comité d'aide central ainsi qu'une commission d'experts destinée à évaluer les dommages. Une procédure semblable avait déjà fait ses preuves en 1834.¹¹⁷

La récolte de dons qui suivit fit revivre « l'amour de longue date et la fidélité éternelle » des Confédérés et, avec le slogan « Un pour tous, tous pour un », devint la collecte la plus fructueuse de l'histoire suisse, dépassant même les actions actuelles de la Chaîne du bonheur : les dons se montèrent à 3,63 millions de CHF et env. 4 millions de CHF avec les dons en nature.¹¹⁸ Les dons en nature comprenaient plus de 3160 tonnes de denrées alimentaires, dont 2560 tonnes de pommes de terre.⁴ Les dons en argent provenaient de privés, de manifestations de soutien ou de collectes organisées par des entreprises, des églises, des écoles et des communes ; mais aussi de personnalités connues, comme l'empereur Napoléon III, le roi de Prusse Guillaume Ier ou le

pape Pie IX. Zurich, Berne et Bâle-Ville furent les principaux cantons donateurs et la population de Suisse romande s'engagea, surtout dans les cantons de Vaud, Genève et Neuchâtel et malgré la distance géographique et culturelle (fig. 62).

Le comité d'aide central était le point d'ancrage et de pivot de l'ensemble de l'aide. Le monopole sur l'information et le mandat fédéral dont il disposait lui assuraient la compétence de donner des instructions. Mais il dut aussi faire face à des difficultés : les masses de denrées et d'habits nécessitèrent un immense travail administratif et logistique pour l'entreposage, le transport et l'emballage ; les sacs pour les pommes de terre vinrent p. ex. rapidement à manquer. De plus, les dons en nature ne correspondaient pas aux besoins des personnes affectées, qui se préoccupaient bien plus d'assurer leur existence sur le long terme.¹¹⁷ Plus personne n'apprécia bientôt de recevoir des montagnes de pommes de terre et les cantons concernés demandèrent instamment qu'on ne les oblige plus à les prendre en charge.

Les actions d'aide actuelles connaissent les mêmes problèmes :¹¹⁹ les dons en nature ne correspondent pas toujours aux besoins locaux et constituent parfois même une gêne en raison de leur gestion complexe. Sur place, les denrées apportées par l'aide entraînent en outre souvent une chute des prix pour ces produits. Comme en 1868, les infrastructures et l'administration locales sont aujourd'hui encore souvent débordées face aux offres d'aide et les organisations caritatives gardent rarement le contrôle complet sur la distribution car, aujourd'hui comme hier, on accorde moins d'attention aux systèmes de distribution qu'à ceux de collecte.



Fig. 62 : L'image « Appel de la patrie » fut vendue en 1868 à Genève en faveur des victimes. Avec sa séparation en deux parties, elle reflète les principaux aspects de la collecte de dons : à gauche, une femme avec deux enfants tend les mains vers Helvetia dans un geste de supplication. En arrière-plan, les flots emportent arbres et habitants. À droite, un paysan et un bourgeois se hâtent vers Helvetia, l'un avec du pain et des habits, l'autre avec de l'argent. Au centre, Helvetia, couronnée de la devise « Un pour tous, tous pour un », indique déjà le chemin à la Fraternité.

La protection suisse contre les crues en évolution

Lorsque l'État fédéral suisse fut créé en 1848, la protection contre les crues n'en était déjà plus à ses débuts: depuis des siècles, les inondations sont une constante dans l'histoire du territoire de la Suisse actuelle. Vingt ans après sa création déjà, la Confédération a joué un rôle actif dans ce domaine qu'elle a peu à peu étendu depuis lors. Les événements de crue extrêmes ont toujours été une force d'impulsion politique et sont souvent à l'origine, ou du moins aux tournants, de nouvelles approches dans la protection contre les crues.

Le régime des infrastructures (1848–1877)

Jusqu'au début du XIX^e siècle, la protection contre les crues se caractérisait par des mesures purement locales. Avec la correction de la Linth (1807–1816), on entreprit pour la première fois un projet fédéral sur lequel s'appuya la Constitution fédérale de 1848 avec son article sur les infrastructures (art. 21 Cst.), base des corrections des eaux du Jura, du Rhin et du Rhône^{109,120–123} décidées dans les années 1860 (cf. fig. 63 à gauche). Ces grands projets étaient considérés comme des « ouvrages réalisés dans l'intérêt de la Confédération » et constituaient des infrastructures de prestige, grâce auxquelles le jeune État fédéral avait la haute main sur le modelage du paysage de la Suisse et s'attachait les cantons en octroyant des moyens financiers importants.

Mais la protection contre les crues elle-même restait en main des cantons. Au début, le régime des infrastructures se limitait aux grands cours d'eau sans tenir compte des affluents ni des sources. Des voix s'élevèrent dès les années 1850, qui voulaient remédier à cette lacune et ancrer la protection contre les crues comme tâche de la Confédération. Ces experts s'appuyaient sur la discussion relative aux causes qui, dès les années 1820 et davantage après les inondations catastrophiques de 1834, partait de l'idée que les déboisements en haute montagne conduisaient à des inondations en plaine (cf p. 29). Ils exigeaient comme contre-mesure des aménagements sur les torrents et des reboisements. Mais les experts – surtout des représentants de la Société forestière créée en 1843 – ne rencontrèrent d'abord que peu d'écho auprès des décideurs politiques. Les inondations de 1868 amenèrent enfin un changement de conception qui permit de transférer à la Confédération la haute surveillance de la police des eaux et des forêts (cf ci-contre). Elles contribuèrent largement à ancrer la protection contre les crues comme tâche de la Confédération d'une part, et d'autre part à élargir le régime des infrastructures en passant d'un régime sectoriel à un régime global prenant en considération l'ensemble du bassin versant d'un cours d'eau.

Le long chemin vers le régime de l'aménagement du territoire (des années 1950 jusqu'à 1991)

La loi sur l'aménagement des cours d'eau de 1877 est restée le texte de référence en Suisse jusqu'en 1991. Cela s'explique en partie par le « disaster gap », à savoir l'absence de graves événements de crue de 1882/1910 jusqu'en 1976.⁵ Mais cette thèse d'une « lacune de catastrophes » sous-estime les événements locaux (comme le montre la série d'inondations des années 1920 en Valais à l'origine de la deuxième correction du Rhône) ou les événements fréquents liés à des torrents alpins (comme la Gürbe¹ au sud de Berne).^{109,115,124} Si la protection contre les crues est restée inchangée au début du XX^e siècle et malgré de tels événements, cela tient surtout au fait que la loi sur l'aménagement des cours d'eau de 1877 était une loi-cadre très flexible. De plus, la Suisse était marquée par la crise économique et les guerres mondiales. Enfin, il manquait une discussion élargie sur les causes qui aurait préparé le terrain pour de nouvelles solutions.

Les choses changèrent dès les années 1950 avec le débat sur la protection de l'environnement, à la suite duquel la protection des eaux (1953), puis l'aménagement du territoire (1969) et la protection de l'environnement (1971) furent intégrés dans la Constitution fédérale.¹⁰⁹ Ce même contexte conduisit à la rédaction en 1975 de l'article sur le droit de l'eau qui concevait pour la première fois l'eau dans son entier comme domaine politique spécifique.¹⁰⁹

Ces développements préparaient une nouvelle pratique administrative dans l'aménagement hydraulique. La protection contre les crues devait désormais être compatible avec la protection de l'environnement. Ces idées culminèrent dans la directive « Protection contre les crues des cours d'eau » de 1982, qui préconisait une protection durable avec des éléments d'aménagement du territoire (cf fig. 63 à droite). Une nouvelle législation n'était pas nécessaire puisque la loi en vigueur offrait une large marge de manœuvre aux offices fédéraux compétents. Ce n'est que dans le cadre de la discussion politico-financière sur la nouvelle répartition des tâches entre Confédération et cantons que

l'aménagement hydraulique fut rediscuté par le législateur. Les inondations de 1987, avec un été catastrophique, survinrent au milieu de ces discussions politiques. Le Parlement suisse, celui-là même qui auparavant avait coupé régulièrement dans les crédits pour la protection contre les crues pour cause d'économies, critiqua les faibles montants accordés. La nouvelle loi sur l'aménagement des cours d'eau, présentée en 1988 et adoptée en 1991, fit l'objet d'une attention maximale en raison des événements de 1987. Ceci permit d'ancrer dans la loi le régime d'aménagement du territoire déjà utilisé dans la pratique.¹²⁵

Le régime intégré du tournant du siècle

Le passage du régime de l'aménagement du territoire au régime intégré fut peu marqué comparé au changement précédent. Les récentes inondations de 1993 qui ont induit d'importants dommages ont démontré très clairement que ce ne sont pas forcément les caractéristiques hydrologiques qui transforment un événement en catastrophe, mais plutôt l'utilisation de l'espace par l'homme. Avec la devise « Davantage d'espace pour les cours d'eau », on tente désormais de mettre en place un régime intégré qui prend également en compte un risque résiduel et accorde plus d'espace aux cours d'eau pour prendre en compte leurs multiples facettes en plus de la protection contre les crues: espace naturel, ressource en eau, espace de détente. Une étape importante a été franchie avec, d'une part la création en 1997 de la plate-forme nationale « Dangers naturels » (PLANAT), et d'autre part la nouvelle directive de 2001 sur la protection contre les crues. L'Office fédéral des eaux et de la géologie et trois autres offices fédéraux participèrent à cette directive qui donne la priorité à des objectifs de protection différenciés et au besoin d'espace des cours d'eau. Les catastrophes de 2005 ont donné nettement plus de poids à cette orientation, comme l'avaient fait en leur temps les inondations de 1868 et 1987.^{109,127}

En 2016, une étude de science politique a analysé, sur la base des douze plus grandes crues survenues entre 1868 et 2015, dans quelles conditions des inondations ont conduit à un changement politique.¹²⁶ Dans cette approche systématique, seules les crues de 1868, 1978, 1987 et 2005 ont pu être identifiées comme événements déclencheurs. Ni l'étendue des zones sinistrées, ni les dégâts, les victimes ou la présence de médias n'ont pu expliquer clairement pourquoi précisément ces crues-là ont été si marquantes. Ce n'est en effet pas seulement la gravité d'un événement qui est déterminante, mais bien plus le contexte dans lequel celui-ci survient: les nouveaux paradigmes n'apparaissent pas en une nuit, mais évoluent lentement vers de nouvelles approches au-delà de toute pression politique. S'il existe de telles approches, une crue peut être un catalyseur du changement politique et créer un espace d'attention qui permet aux différents acteurs de faire accepter politiquement leurs demandes.¹²⁷

Changement des approches politiques vers 1868

Dans leurs rapports⁹⁷ sur les forêts de haute montagne et les torrents, les experts Elias Landolt (1862) et Carl Culmann (1864) proposaient d'étendre les compétences de la Confédération pour les aménagements des torrents et les reboisements et d'harmoniser les lois cantonales. Ils estimaient alors qu'une législation nationale sur la forêt et les eaux n'était pas réaliste en raison de la souveraineté cantonale.¹⁰⁹

La situation changea après les événements de 1868: on demandait, avec de plus en plus d'insistance, une intervention énergique de la Confédération. Les propositions passèrent ainsi du niveau cantonal au niveau fédéral. Les inondations de 1868 furent instrumentalisées à cet effet et le fédéralisme cloué au pilori lorsqu'on exigea des cantons souverains qu'ils s'extirpent de leur égoïsme et contribuent à des lois nationales. Alors que, pendant des décennies, les discussions sur les causes s'étaient figées autour du paradigme de la déforestation (cf p. 29), les approches politiques changèrent radicalement après 1868: les événements de cette année catastrophique placèrent ce sujet au premier plan des préoccupations des responsables politiques. Ils confèrent aux arguments des experts l'importance et la véhémence nécessaires. Alors que les timides propositions du début des années 1860 n'avaient eu aucune chance, les inondations de 1868 contribuèrent à faire passer les nouvelles exigences, nettement plus ambitieuses.

Une étape intermédiaire fut franchie avec les débats houleux autour de l'utilisation des dons: la bonne volonté des donateurs, très souvent évoquée, était diamétralement opposée aux souhaits des cantons concernés. Ceux-ci et les experts voulaient utiliser la plus grande partie des dons pour des travaux durables de prévention, alors que les cantons donateurs insistaient sur le fait que les bienfaiteurs voulaient aider les malheureuses victimes et non décharger l'État de la construction de protections. Un compromis fut trouvé avec le « million pour les digues » (Wuhrmillion): un quart des dons au moins fut utilisé pour des ouvrages de protection. Cette discussion menée avec des représentants de tous les cantons montra cependant clairement que la prévention apparaissait dès lors comme une tâche possible de la Confédération. On comprend aisément que le « Wuhrmillion » de 1871 ait été suivi d'une décision de subvention par laquelle la Confédération mettait à disposition 100 000 CHF par an pour des aménagements de torrents et des reboisements dans l'ensemble des régions de haute montagne.

Les années 1870 furent favorables à l'ancrage de cette nouvelle tâche dans la Constitution fédérale puisque, dès 1865, centralistes et fédéralistes luttèrent pour une révision constitutionnelle. Alors que de nombreuses nouvelles compétences fédérales en discussion furent supprimées par compromis envers les opposants fédéralistes, les eaux et les forêts furent centralisées sans discussion notable dans l'article 24 de la Constitution fédérale de 1874. La loi fédérale sur les forêts (1876) et la loi fédérale sur la police des eaux (1877) suivirent de près.

Le changement de philosophie souhaité depuis longtemps par les experts qui préconisaient de passer des grandes corrections fluviales à des aménagements sur les torrents et à des reboisements parvint à s'imposer politiquement après 1868. Ce changement affecta non seulement l'importance attribuée à ce thème, mais aussi les normes légales, la structure administrative et la pratique des centres de gestion.

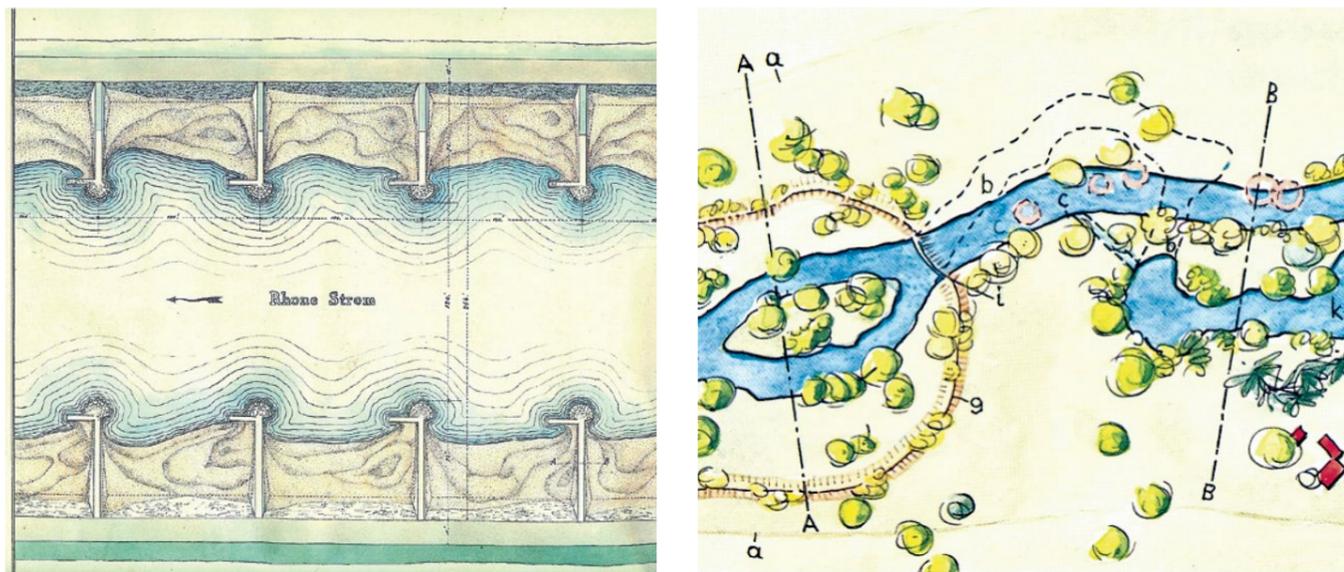


Fig. 63: La représentation du système étroit avec digues et barrières (Sporensystem), utilisé notamment sur le Rhône au XIX^e siècle (à gauche) et celle du concept « Davantage d'espace pour les cours d'eau », issu de la directive « Protection contre les crues des cours d'eau » de 1982 (à droite), montrent clairement le changement intervenu dans la protection contre les crues entre le XIX^e siècle et aujourd'hui.

Dynamique à long terme : les sédiments lacustres, archives des crues

En conséquence des crues, des « dépôts de crue » se mettent en place dans les sédiments des lacs. Comme ces dépôts peuvent être datés avec précision, ils constituent des archives naturelles du climat permettant de reconstituer la fréquence des crues sur des milliers d'années dans le passé. Les reconstructions montrent que dans l'espace alpin la fréquence des crues au cours des 10 000 dernières années est particulièrement élevée lorsque les étés sont frais et humides. Dans les Alpes du Sud et en Engadine, la crue de 1868 est très visible dans les dépôts de crue.

Les sédiments lacustres enregistrent les crues du passé

De fortes précipitations dans le bassin versant d'un lac provoquent un écoulement de surface dans les affluents, une érosion, ainsi que la mobilisation et le transport de sédiments. Lorsque l'écoulement atteint le lac, la force de transport des affluents diminue et les particules rocheuses se déposent sur le fond du lac sous forme de dépôts de crue. Les particules les plus grosses et denses s'enfoncent plus rapidement que les petites et légères. Les dépôts de crue ont typiquement une épaisseur de quelques millimètres à quelques centimètres et se déposent rapidement en quelques heures (fig. 64). Ils se reconnaissent au fait que, par rapport à la sédimentation « normale », ils présentent généralement une granulométrie plus élevée et un tri des grains selon leur taille : les grains de sable grossiers se déposent plus rapidement dans le lac que des grains de limon et d'argile, plus fins. Les dépôts de crue se distinguent aussi de la sédimentation normale (tranquille) par leur composition chimique, leur plus forte densité et souvent par une plus faible teneur en carbone organique.

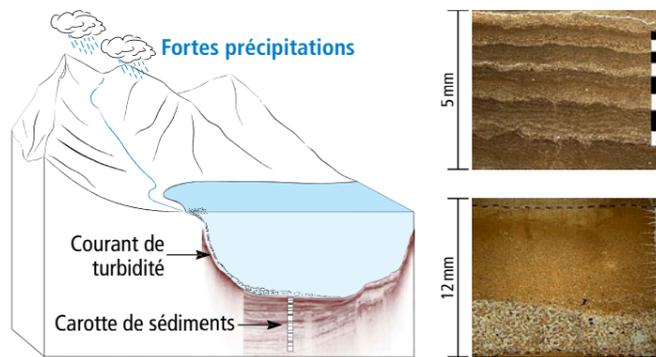


Fig. 64 : Schéma d'un bassin versant avec la sédimentation d'un dépôt de crue et la position d'une carotte de sédiments (diagramme de gauche).¹²⁹ À droite, es sédiments du lac d'Oeschinen¹ montrent (en haut) une sédimentation normale, calme, avec quatre dépôts annuels (la couche claire représente chaque fois le printemps avec la fonte des neiges) et (en bas) un dépôt de crue de 12 mm avec des grains de sable grossiers à la base et une fine couverture limon/argile.¹²⁸

Il est possible de dater précisément de longues carottes de sédiments comportant les dépôts de crue à l'aide d'isotopes radioactifs (¹⁴C, ²¹⁰Pb) ou en comptant les couches annuelles (varves). A partir des sédiments lacustres, on peut ainsi établir une chronologie des crues sur plusieurs millénaires pour chaque bassin versant et calculer leur fréquence sur de très longues périodes (fig. 65). Il faut cependant noter que les lacs situés à basse altitude (Plateau et plaine du Pô) peuvent enregistrer des crues tout au long de l'année alors que ceux de l'espace alpin ne peuvent le faire que pendant la saison chaude lorsqu'ils ne sont pas gelés. De plus, puisque les précipitations peuvent varier localement et régionalement et que la formation de crues dépend fortement des propriétés spécifiques au bassin versant de chaque lac (dimensions, géologie, topographie, couverture végétale, etc.), on peut s'attendre à ce que la chronologie des crues varie d'un lac à l'autre. Le lac Majeur, p. ex., enregistre même les petites crues ayant une période de retour d'env. 2 ans. Le lac d'Oeschinen enregistre lui des crues avec une période de retour de 5 à 10 ans. Celui de Silvaplana n'enregistre que les fortes crues avec une période de retour de 10 à 20 ans en moyenne. Les grandes crues régionales sont généralement bien représentées. Dans les lacs des Préalpes et dans les contreforts

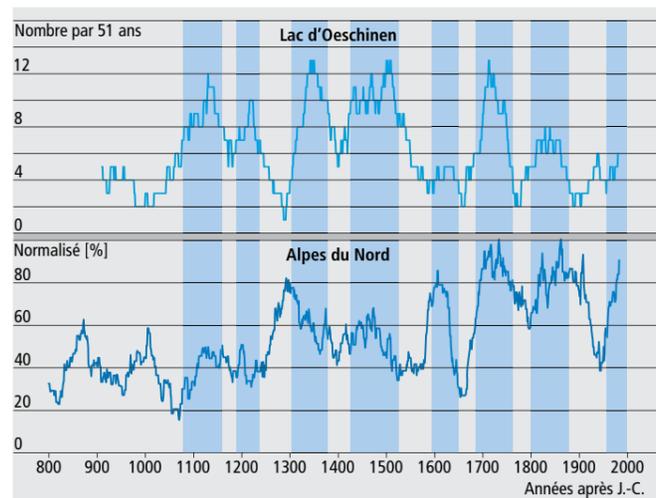


Fig. 65 : Fréquence des crues au cours des 1000 dernières années dans le lac d'Oeschinen¹²⁸ et dans les Alpes du Nord (valeur moyenne à partir de 10 lacs).¹²⁹

nord et sud des Alpes, les reconstructions de crue remontent jusqu'à 10 000 ans en arrière. Si plusieurs lacs d'une même région montrent, indépendamment les uns des autres, une augmentation de l'activité de crue, on peut en déduire que les raisons en sont d'ordre climatique. Le rapport entre l'épaisseur d'un dépôt de crue et les dimensions de la crue n'est pas toujours pertinent et souvent non significatif du point de vue statistique. D'une manière générale toutefois, des dépôts de crue de grande épaisseur signalent des crues importantes.

La dynamique à long terme des crues dans l'espace alpin

Pour l'espace alpin occidental et central, on dispose actuellement d'env. deux douzaines de reconstructions détaillées de crues, effectuées à partir de sédiments lacustres, qui remontent jusqu'à 1000, voire même 10 000 ans. La fréquence des crues (nombre de crues par tranches de 50 ou 100 ans) montre une variabilité multidécennale. Globalement, le XX^e siècle a été une période relativement calme. Les reconstructions montrent de manière très cohérente que dans l'espace alpin et dans les contreforts nord et sud, les crues ont été les plus fréquentes pendant des périodes avec des étés frais et humides. Cela se voit particulièrement bien pendant le Petit Âge glaciaire, avec des valeurs record dans l'activité de crue aux XIV^e, XV^e et XVIII^e siècles (fig. 65). Le XIX^e siècle connu aussi une très grande activité de crues. Pour les Alpes françaises, quelques données indiquent que les crues étaient certes plus rares pendant les périodes chaudes et sèches, mais qu'elles étaient plus intenses. Pour le lac d'Oeschinen, une période de la première moitié du XIII^e siècle est bien documentée : fait exceptionnel, elle présente des dépôts de crue fréquents pendant une phase comportant des étés généralement chauds et secs. Ces maxima de crues du début du XIII^e siècle ne sont pas présents dans les reconstructions faites à partir des lacs des contreforts et dans les Alpes orientales, ce qui laisse penser que pour le lac d'Oeschinen, il pourrait s'agir de crues locales occasionnées par des orages d'été dus à de la convection atmosphérique dans les hautes Alpes. Les modèles montrent que dans l'espace alpin, il faut s'attendre à des processus semblables dans de futurs scénarios climatiques.

Lorsque l'on considère les 10 000 dernières années (fig. 66), une certaine prudence est de mise car les influences anthropiques, comme le déboisement et la création de pâturages, ainsi que les modifications de l'utilisation du sol et de la couverture végétale qui en découlent, peuvent influencer la fréquence des crues.¹³⁰ Au II^e millénaire av. J.-C., des modifications profondes dans l'utilisation du sol à l'âge du Bronze sont souvent liées à des changements climatiques vers des conditions plus humides et plus fraîches, avec des progressions de glaciers. Les causes de l'augmentation des fréquences de crues sont donc complexes et difficiles à distinguer. Dans l'ensemble, on peut cependant constater qu'à l'Holocène, aussi bien au sud qu'au nord des Alpes, les crues ont été plus fréquentes pendant les périodes de refroidissement du climat.

Une étude quantitative portant sur 2000 ans de varves (de l'âge du Bronze à la fin de la période romaine) du lac de Silvaplana¹ en Engadine a montré qu'un refroidissement à long terme de 1 °C des températures estivales moyennes a eu pour conséquence de quadrupler la fréquence de dépôts de crue.¹³¹ Au sud des Alpes, on constate qu'à l'Holocène ancien et moyen la fréquence des crues était très faible et qu'elle a augmenté rapidement et de manière significative il y a env. 4000 ans (Bronze ancien). Des valeurs record ont été atteintes il y a env. 2600 ans, au X^e siècle et pendant le Petit Âge glaciaire. Dans les Alpes du Nord, la fréquence des crues a légèrement diminué à partir de l'Holocène ancien jusqu'à l'optimum de l'Holocène moyen. Les reconstructions montrent une augmentation graduelle mais nette dès le Bronze final, avec plusieurs maxima pendant le Petit Âge glaciaire. Dans la perspective des 10 000 dernières années, on observe une forte variabilité multidécennale et millénaire de l'activité de crue. Divers auteurs rattachent la première à des variations de l'activité solaire et la seconde à des variations de paramètres de l'orbite terrestre. Pour la variabilité multidécennale de la fréquence des crues au nord des Alpes, d'autres auteurs supposent plutôt un lien avec les températures de la surface de la mer dans l'Atlantique Nord (oscillation atlantique multidécennale OAM/AMO, cf p. 43) ou l'oscillation nord-atlantique ONA/NAO.

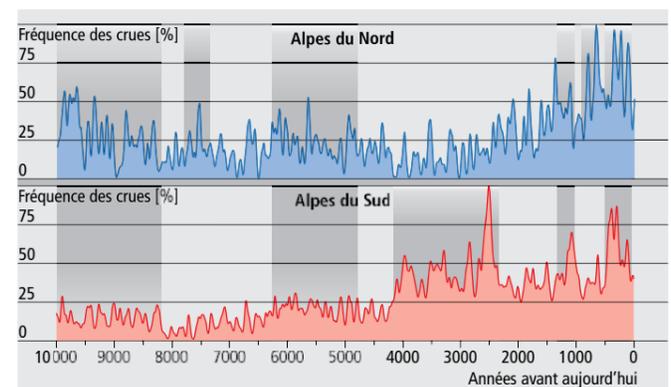
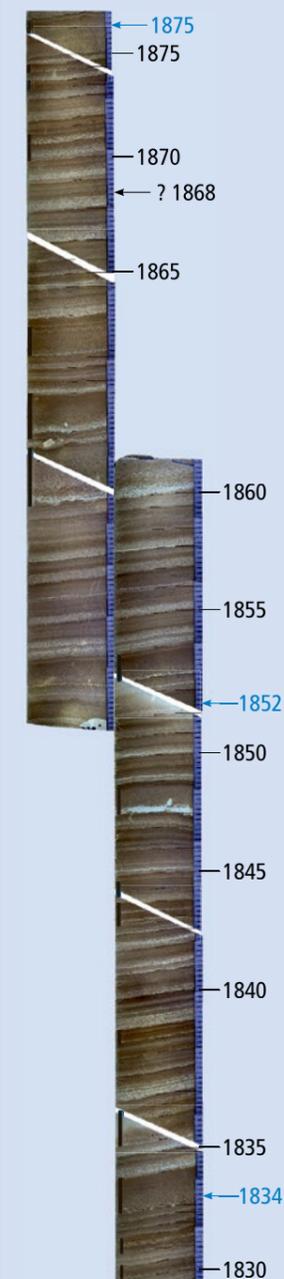


Fig. 66 : Fréquence des crues dans les Alpes du Nord (10 lacs) et les Alpes du Sud (5 lacs) au cours des 10 000 dernières années.¹³⁰

La crue de 1868 dans les sédiments lacustres

La crue d'octobre 1868 est bien représentée dans les sédiments du bassin de Pallanza (lac Majeur, fig. 5) et dans le lac de Silvaplana en Engadine. Pour le lac Majeur, le dépôt de crue de 1868, avec 12 mm d'épaisseur, est le plus important de la période de mesures instrumentales. Il se trouve à une profondeur de sédiments d'env. 71 cm. Le niveau du lac est monté à 6,94 m au-dessus de la moyenne et l'origine des sédiments indique que la crue est venue principalement de la rivière Toce (provenant du val d'Ossola).¹³² Dans le lac de Silvaplana, le dépôt de crue de 1868 n'a que 2 mm d'épaisseur ; il est donc beaucoup plus mince que ceux de la crue de 1888 (4 mm) et surtout que ceux de la forte crue suprarégionale d'août 1834 (12 mm). Les petites crues de 1850, 1860, 1871 et 1874 (9 crues au total entre 1850 et 1900) sont également enregistrées dans les sédiments du lac. Elles sont toutes attestées dans des documents historiques locaux.¹³³ Les crues suprarégionales de février et septembre 1862 manquent dans le lac de Silvaplana car, d'après les documents historiques, les précipitations sont tombées sous forme de neige en altitude et n'ont pas provoqué de crue importante dans la vallée de Fex (principal affluent du lac de Silvaplana).



Sur le versant nord des Alpes, on n'observe un dépôt de crue spécial pour 1868 dans aucune des archives investiguées : provenant du sud de l'Allemagne (Ammersee), du Toggenburg (lac de Schwendi), de l'Oberland bernois (lac d'Oeschinen) et des Alpes françaises (lac Blanc près de Grenoble). En revanche, les grandes crues de 1834, 1852 et 1860 sont bien représentées dans le lac d'Oeschinen (fig. 67).

En revanche, les grandes crues de 1834, 1852 et 1860 sont bien représentées dans le lac d'Oeschinen (fig. 67).

Fig. 67 : Dépôts de crue dans le lac d'Oeschinen de 1830 à 1875.¹²⁸

Fortes précipitations et crues depuis le début des mesures

Les facteurs susceptibles de provoquer des crues, présentés plus haut, se modifient au cours du temps. Les eaux, l'utilisation des terres, les sols et la végétation changent, les surfaces habitées s'étendent, et surtout le climat change. Au cours des 100 à 200 dernières années, soit depuis que des mesures systématiques existent, ces facteurs se sont superposés.

Modification de la fréquence des crues

La série centenaire des débits de pointe annuels (maxima annuels) de l'Aar à Berne (fig. 68) montre que les hauts débits de pointe sont concentrés dans les vingt dernières années. Les cinq plus hautes valeurs – 1999, 2005 (cf p. 8), 2015, 2007 et 2004 – proviennent toutes des vingt dernières années. Cela est-il dû au réchauffement climatique ? Ce sont en effet les cours d'eau alpins en particulier qui présentent une augmentation de leurs débits de pointe.¹³⁴ Cette augmentation peut être attribuée aux températures plus chaudes et donc à l'élévation de la limite du zéro degré. Des études européennes montrent en revanche que la saison des crues a certes changé,¹³⁵ mais qu'on ne constate pas une tendance générale à davantage de crues.¹³⁶

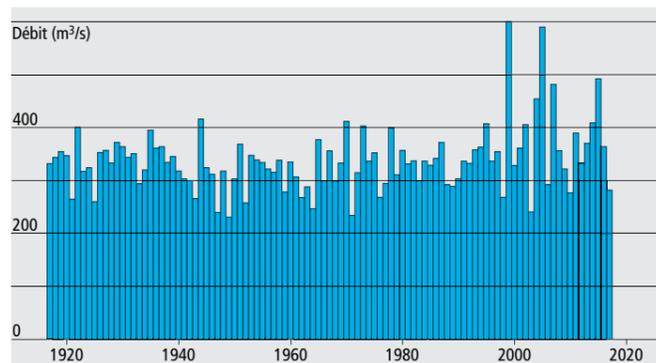


Fig. 68 : Débit annuel maximal de l'Aar à Berne (Schönau) : Y a-t-il une tendance ? (Données : OFEV).

Modification des fortes précipitations

Comment le changement climatique influence-t-il les débits de pointe ? En Suisse, la température a augmenté d'env. 1,5°C depuis 1900.¹³⁷ Cela modifie directement la fonte des neiges qui intervient maintenant plus tôt, et fait qu'il y a moins de neige et plus de pluie en hiver, si bien que, selon le régime de débit, les variations saisonnières de débit (maximum à la fonte des neiges et minimum en hiver) sont réduites.¹³⁸ Mais cela ne jouerait qu'un rôle mineur pour les crues. Ce qui importe surtout ici, c'est le fait que l'air chaud peut contenir plus de vapeur d'eau que l'air froid, à savoir env. 7 % de plus par degré Celsius de réchauffement. Si tous les autres facteurs restent inchangés, cela devrait entraîner des précipitations plus fortes. Certes les précipitations moyennes n'ont pas augmenté nettement en Suisse depuis 1901, mais les précipitations annuelles maximales ont augmenté de 5 à 20 % (fig. 70) dans plus de 90 % des stations de Suisse. Cela correspond à la proportion attendue par les calculs théoriques.¹³⁹ Entre 1901 et 2014, les fortes précipitations sont devenues non seulement plus intenses, mais aussi plus fréquentes (de 10 à 50 %, fig. 70). Cela signifie que des événements qui survenaient env. trois fois par an au début du XX^e siècle, interviennent actuellement env. quatre fois par an.

Variations décennales

À côté de modifications sur le long terme, le climat montre aussi des variations à l'échelle de la décennie (cf encadré à gauche). Celles-ci sont surtout prononcées pour la température. En Suisse, les années 1940 ont été chaudes, les années 1960 plus froides. La fréquence des crues montre aussi des variations à l'échelle de la décennie (cf p. 40). Les phases avec beaucoup d'événements de crue alternent avec celles qui en ont peu. La cause de ces accumulations n'est pas encore connue.⁸² Le XIX^e siècle a connu une accumulation de crues (cf à

Variabilité multidécennale

Pourquoi y a-t-il des variations sur plusieurs décennies dans le système climatique ? La cause est souvent recherchée dans l'océan. D'une part, c'est un gigantesque réservoir de chaleur. Il absorbe les variations de température à court terme et renvoie le signal atténué à l'atmosphère. D'autre part, l'océan est lui-même en mouvement et transporte de la chaleur. On observe que la température de la surface de la mer varie à l'échelle des décennies et influence ainsi le climat global. Les deux principales oscillations climatiques des océans à cette échelle de temps sont l'oscillation décennale du Pacifique (ODP/PDO) et l'oscillation atlantique multidécennale (OAM/AMO).

L'ODP est étroitement liée au phénomène El Niño dans le Pacifique. Si des épisodes El Niño apparaissent fréquemment sur plus d'une vingtaine d'années, cela exprime une ODP positive. L'OAM n'est rien d'autre que la température de l'Atlantique Nord présentant des variations multidécennales marquées (fig. 69). Les ODP et les OAM influencent la température globale. Une phase d'ODP négative dans les années 2000 a ainsi été en grande partie responsable du léger ralentissement du réchauffement de la terre – qui s'est ensuite accéléré vers 2015.

L'OAM a des effets sur les ouragans de l'Atlantique, sur les moussons en Inde et en Afrique, mais aussi sur les vagues de chaleur et les sécheresses en Europe.¹⁴⁰ La phase maximale de l'OAM dans les années 1940 s'est accompagnée d'étés très chauds et de sécheresses dévastatrices en Europe centrale : on a atteint des records de chaleur qui n'ont été dépassés qu'en 2003.¹⁴¹ On ignore si les OAM et les ODP agissent aussi sur les événements de fortes précipitations.

Mais de manière générale, les modes de variabilité décennale peuvent avoir un fort impact sur l'évaluation des risques. En effet, on se sert des observations des trente dernières années comme base pour évaluer les trente suivantes. Si on le faisait avec l'indice OAM, on serait systématiquement à côté (fig. 69). Cela montre qu'il faut considérer soit les variations décennales soit de longues périodes.

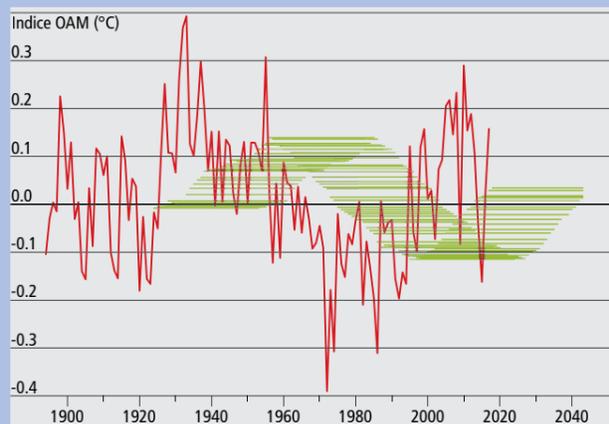


Fig. 69 : Indice OAM (température de la surface de la mer de l'Atlantique Nord après déduction de la moyenne globale, gris), et prévisions (vert) pour lesquelles la moyenne des trente dernières années a été prise comme prévision des trente années suivantes.

droite) qui suscita des débats politiques – pas seulement en Suisse.¹⁴² Par contre, la période entre env. 1920 et 1980 a plutôt été pauvre en crues.⁵ C'est dans cette période que l'économie a pris son essor après la Deuxième guerre mondiale, que les zones habitées se sont étendues et que l'on a construit les grandes infrastructures.¹⁴³ Ainsi, pendant une phase importante pour le présent, les crues sont passées à l'arrière-plan. Une nouvelle période avec des crues plus fréquentes a commencé avec les crues de 1978 et 1987 (cf p. 38).

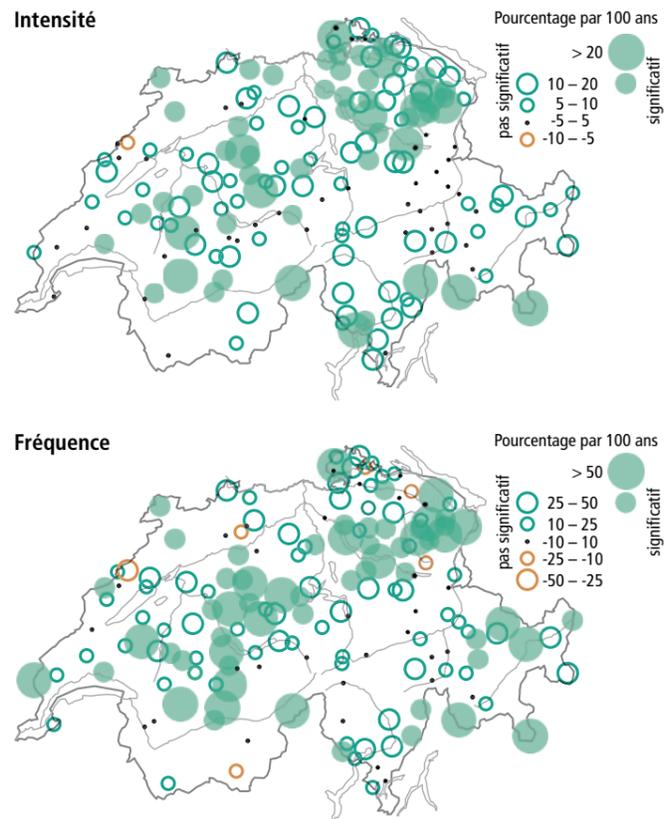


Fig. 70 : Tendance (en % par siècle) de l'intensité des fortes précipitations (en haut; précipitations journalières maximales annuelles) et de leur fréquence (en bas, nombre de jours par année au-dessus du percentile 99 de tous les jours) aux stations de MétéoSuisse, 1901–2014.¹³⁹



Fig. 71 : Les crues ont passé à l'arrière-plan pendant l'essor économique des années 1950. Un nouveau style de vie a commencé, illustré par la photo d'un camping. Des campings ont souvent été installés sur des surfaces menacées par les crues.

Accumulation de crues au XIX^e siècle

En 1834, de graves crues touchèrent le Valais, les Grisons, le Tessin, Uri et Glaris. En 1837, l'Emmental fut le théâtre d'une crue centennale (cf p. 13). En 1852, l'Aar atteignit le niveau le plus haut jamais enregistré. Après la crue de 1868, les voix se multiplièrent déjà pour affirmer que les crues étaient devenues plus fréquentes. D'autres crues suivirent en 1876 (fig. 72), 1881 et 1886.

Quel est l'état de la recherche aujourd'hui ? Y a-t-il vraiment eu une accumulation de crues ou est-ce la perception des contemporains qui le laisse penser ? Et quelle en était la cause ? Ces questions sont encore actuelles, non seulement pour interpréter les crues passées, mais aussi pour évaluer celles à venir. Car s'il y a eu des variations de la fréquence des crues dans le passé, il y en aura aussi au futur.

L'accumulation de crues au XIX^e siècle est un fait, même si elles n'ont souvent concerné que quelques bassins versants (la fig. 73 montre la série de crues du Rhin à Bâle ainsi que les niveaux maximaux du lac de Constance et du lac Majeur).³² Cela pourrait être dû, du moins en partie, à la circulation atmosphérique : les conditions météorologiques favorables aux crues (cf p. 8) ont été plus fréquentes au XIX^e qu'au XX^e siècle (fig. 73). On en ignore la cause jusqu'à présent.



Fig. 72 : Crue à Schaffhouse, 1876.

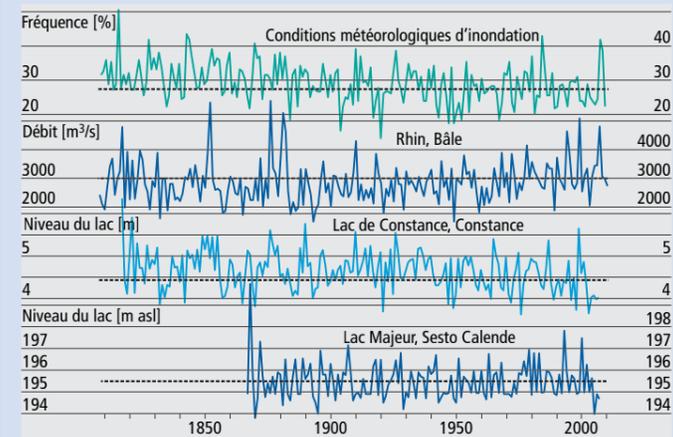


Fig. 73 : Débit annuel maximal du Rhin à Bâle, ainsi que niveau maximal du lac de Constance et du lac Majeur.³² La ligne du haut montre la fréquence des conditions météorologiques « septentrionales cycloniques » et « occidentales cycloniques » sur le sud de l'Europe (mai à octobre), typiques pour les crues sur le versant nord des Alpes (en pointillé : moyennes 1951–2000).

Crues à la fin du XXI^e siècle

Les différents facteurs agissant sur les crues vont continuer à se modifier, la fréquence et les dommages des crues vont également changer. L'importance de ces changements dépend de la manière dont l'homme va gérer à l'avenir le danger de crue et intervenir dans les cours d'eau et les lits fluviaux. Mais cela dépend aussi de la manière dont vont évoluer l'utilisation des terres, ainsi que les processus naturels comme les sols et la végétation. Ce qui est sûr, c'est que le climat va fondamentalement changer. Pouvons-nous évaluer les conséquences de ces changements ?

L'évolution des gaz à effet de serre causés par les activités humaines jouera un rôle important. En fonction des décisions politiques, le réchauffement va encore augmenter ou au contraire diminuer. À la fin du XXI^e siècle la hausse globale de la température pourrait être stabilisée autour de 1,5 à 2 °C par rapport au climat préindustriel si les efforts globaux pour protéger le climat sont importants. Si en revanche les émissions globales de gaz à effet de serre continuent à s'accroître, la température globale pourrait augmenter d'env. 3,5 °C par rapport à 1986–2005.¹⁴⁴ Dans les lignes qui suivent, nous examinons dans le détail ce dernier scénario avec de fortes modifications (RCP8.5). Nous souhaitons expliquer quels effets une telle hausse globale de la température aurait sur les précipitations et les débits en Suisse.

À l'échelle régionale, les estimations des futures évolutions climatiques comportent de grandes incertitudes, en particulier pour les précipitations dont la simulation correcte est rendue difficile par une compréhension insuffisante des processus, p. ex. ceux des nuages. La résolution des modèles climatiques avance certes vers un domaine qui permettra de représenter la convection et la formation des nuages, mais ce développement n'en est qu'à ses débuts.¹⁴⁵

Quelques changements sont en revanche plus sûrs car ils sont étroitement associés à la température. Selon la formule de Clausius-Clapeyron, l'humidité de saturation augmente fortement avec une température plus élevée. Nous avons déjà constaté (cf p. 10) que des transports d'humidité extrêmes seraient nettement plus importants à l'avenir. En même temps, la limite du zéro degré sera encore déplacée vers des altitudes plus élevées. Cela signifie premièrement qu'à l'avenir il y aura plus d'humidité pour les fortes précipitations, deuxièmement que les précipitations tomberont de plus en plus sous forme de pluie au lieu de neige, et troisièmement que la fonte des neiges interviendra plus tôt au printemps. À ces conséquences directes d'une hausse des températures s'ajoutent d'autres effets indirects du changement climatique, comme p. ex. les changements dans la circulation atmosphérique (p. ex. des situations météorologiques qui deviennent plus ou moins fréquentes) avec des conséquences pour la Suisse: à des phases sèches plus longues succéderont vraisemblablement des précipitations courtes, mais violentes.

Les précipitations les plus intenses vont continuer à augmenter. Par exemple, la fig. 74 montre les changements des précipitations maximales de cinq jours sur l'Europe, en été et en hiver, basés sur des simulations climatiques régionales actuelles. D'après elles, les précipitations hivernales maximales gagneront en intensité sur de vastes régions d'Europe. Pour les Alpes, cette augmentation sera d'env. 15%. De même, les précipitations journalières maximales d'une année augmenteront. La fig. 75 le montre pour le bassin versant de l'Aar, calculé ici à l'aide d'un affinage statistique des modèles globaux (CMIP5). Une augmentation claire des précipitations journalières maximales est visible dans toutes les simulations. En même temps, la saisonnalité des fortes précipitations se modifiera: alors que les précipitations journalières maximales interviennent souvent en plein été sous notre climat actuel, les modèles projettent un déplacement vers le début de l'été ou le début de l'automne. Les modèles qui prédisent une sécheresse estivale pour le futur montrent un plus net déplacement que les autres. Selon les simulations, les cyclones Vb qui se produisent aujourd'hui souvent en juin et juillet se déplaceront aux mois de mai et septembre vers la fin du XXI^e siècle.¹⁴⁶ Les simulations de climat montrent en outre que le nombre de tels événements Vb va diminuer à l'avenir et que la fréquence de ces conditions météorologiques en été sera réduite.

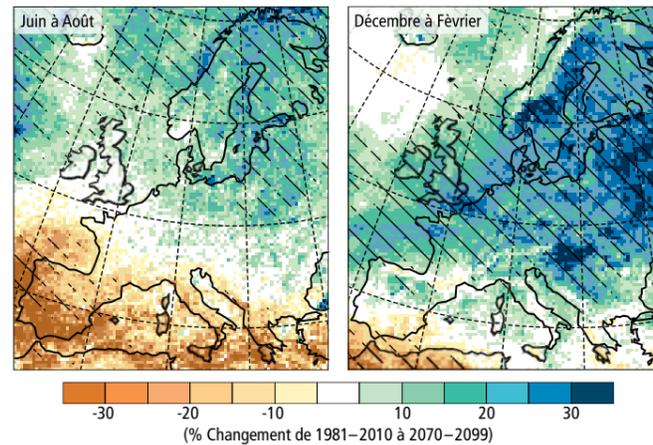


Fig. 74: Modifications des précipitations maximales de 5 jours sur l'Europe (en %) pour l'hiver et l'été vers 2070–2099, par rapport aux valeurs actuelles (1981–2010). La fig. montre les modifications de la médiane sur 15 modèles climatiques régionaux d'Euro-CORDEX avec une résolution d'env. 12 km.¹⁴⁷

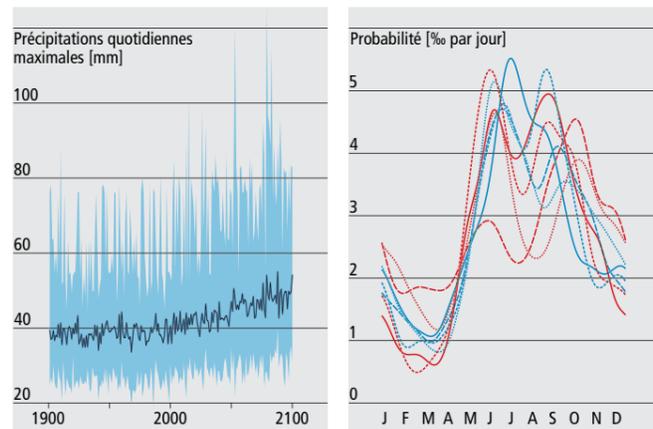


Fig. 75: (à gauche) Évolution des précipitations journalières maximales par année pour le bassin versant de l'Aar, tirée des simulations CMIP5 (bleu foncé: valeur moyenne de toutes les simulations, bleu clair: maxima et minima). (à droite) Jour calendrier des précipitations journalières maximales d'une année dans le passé (bleu, 1971–2005) et le futur (rouge, 2065–2099, différentes cotes en pointillés représentent différents ensembles de modèles).¹⁴⁸

Qu'en déduire pour les débits et les crues en Suisse? Dans le futur, le débit du Rhin à Bâle (fig. 76) sera un peu plus élevé en hiver alors qu'en été la sécheresse se fera sentir. Les débits de pointe qui s'observent souvent en juin pourraient être encore légèrement plus élevés, alors qu'en plein été les hauts débits deviendront nettement plus rares. Dans les bassins versants fortement influencés par la fonte des glaciers, la fonte croissante va provisoirement accroître le débit jusqu'à ce que les glaciers aient presque disparu et que le débit dû à leur fonte diminue.

Pour l'instant, de nouveaux scénarios climatiques sont élaborés pour la Suisse dans le cadre du National Center for Climate Services (NCCS) (CH2018, www.klimaszenarien.ch). Ils paraîtront fin 2018 et seront à la base d'une série d'études sur les conséquences climatiques. Ils permettront aussi d'élaborer de nouveaux scénarios hydrologiques (Hydro-CH2018). Ceux-ci examineront en particulier les modifications

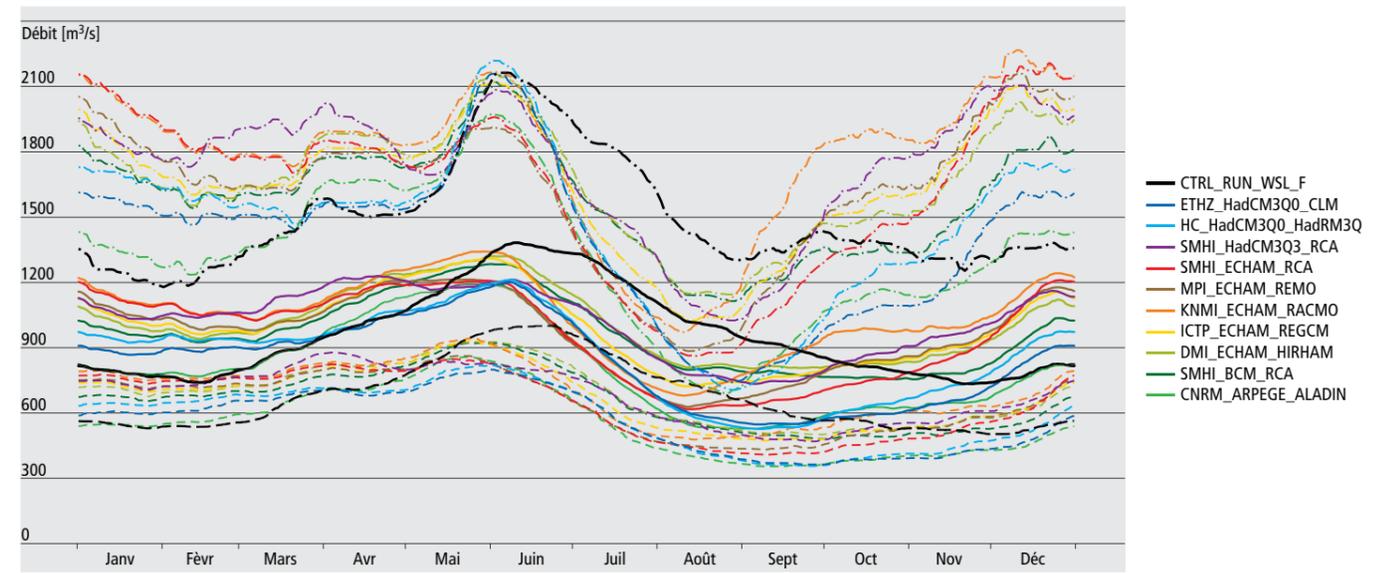


Fig. 76: Modification du débit du Rhin à Bâle. Représentation du quantile 10% (pointillé), 50% (continu) et 90% (point-trait) pour la période de contrôle (1980–2010, noir) et pour dix scénarios climatiques (diverses couleurs) vers 2085.¹⁴⁹

des crues dues au climat.

Comme nous l'avons vu dans le présent cahier, de nombreux autres facteurs contribuent aux crues et aux dommages qu'elles causent. En plus du climat, la surface des terres va aussi se modifier. Il y aura des changements dans l'utilisation du sol et vraisemblablement des interventions anthropiques dans les lits fluviaux et les écoulements des lacs. Il faut également tenir compte de la transformation des paysages ruraux traditionnels et de l'imperméabilisation des sols (p. ex. surfaces bétonnées), qui modifieront le comportement des écoulements. Enfin, le potentiel de dommages se modifiera aussi.

Comme illustration des modifications socio-économiques possibles du futur, la fig. 77 présente trois scénarios pour l'évolution de la population en Suisse. D'ici 2045, la population va augmenter jusqu'à 9,4 à 11 millions de résidents permanents, d'où un besoin croissant de surface,

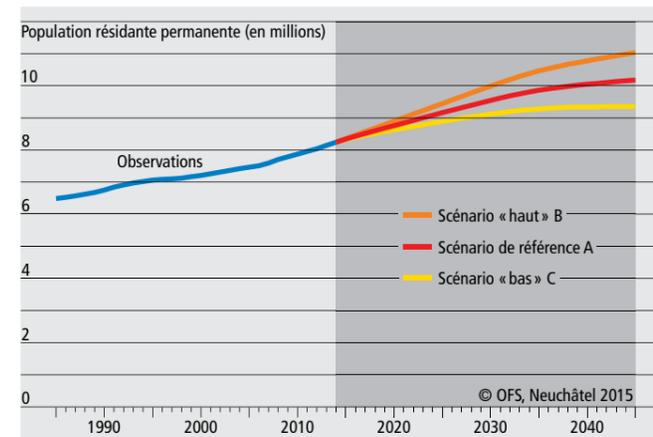


Fig. 77: Scénarios de l'évolution de la population en Suisse jusqu'en 2045.¹⁵⁰

plus ou moins fort selon la densité. La fig. 78 montre l'un des quatre scénarios pour le développement de l'habitat en Suisse élaborés dans un programme national de recherche. Dans ce scénario, la croissance des surfaces habitées dépassera la croissance de la population.

En même temps, il serait possible de lutter contre une extension de l'espace habitable dans les régions à risque (par une gestion prévisionnelle, une cartographie et la délimitation de zones de danger), ainsi que d'améliorer plusieurs situations par des mesures d'aménagement fluvial. Les dommages pourraient être réduits grâce à une meilleure prévention, des prévisions et systèmes d'alerte améliorés, et une protection plus efficace des ouvrages. Les connaissances sont là: nous avons donc nous-mêmes partiellement en mains la future situation de crues en Suisse. Peut-être que divers événements de crue à venir déclencheront ces mesures, comme en 1868.

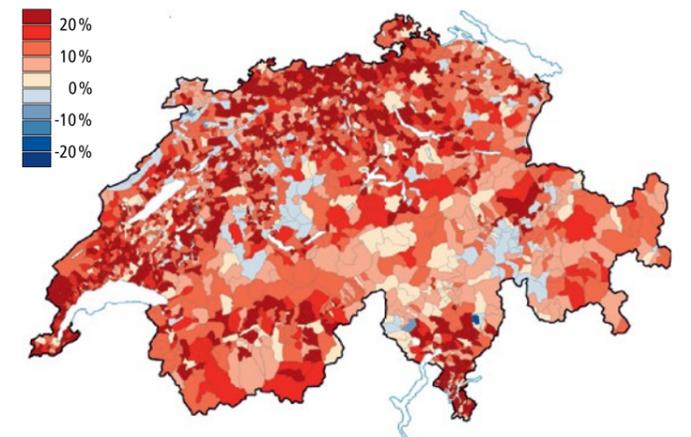


Fig. 78: Augmentation des surfaces d'habitation de 2000 à 2030 selon le scénario B (Metropolitane Expansion) du développement de l'habitat en Suisse.¹⁵¹

Conclusion

En automne 1868 – il y a exactement 150 ans – plusieurs régions de Suisse ont été touchées par de graves crues. Deux phases de fortes précipitations, les 27 et 28 septembre, ainsi que du 1^{er} au 5 octobre, ont fait déborder de nombreux cours d'eau et lacs. Le jeune État fédéral a été confronté à un grand défi : maîtriser les énormes dégâts, gérer les innombrables dons et aborder la question de la répétition de tels événements dans le futur. Ceci a posé les jalons pour la gestion des catastrophes naturelles.

Actuellement, de nouvelles méthodes permettent la reconstruction détaillée des précipitations et des inondations alors que, du point de vue historique, on peut évaluer la manière dont elles ont été maîtrisées. Au cours des deux dernières années, ces questions ont fait l'objet d'un projet de recherche interdisciplinaire du Centre Oeschger pour la recherche sur le climat, de l'université de Berne et du Mobiliar Lab for Natural Risks, en collaboration avec MétéoSuisse, l'entreprise Meteotest et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage. Le contexte météorologique de l'événement est bien compris et peut être très bien reconstitué à grande échelle. Les conditions météorologiques locales et les orages impliqués peuvent aussi être reproduits. Aujourd'hui, la recherche sur les risques naturels utilise souvent des chaînes de modèles pour représenter des événements naturels et leurs conséquences, puis étudier le rôle de divers facteurs. C'est aussi possible pour l'événement qui a eu lieu il y a 150 ans. La modélisation hydrologique montre qu'en raison de l'érosion survenue lors de l'événement, le niveau du lac Majeur ne pourrait plus atteindre aujourd'hui un niveau aussi élevé. La modélisation hydraulique indique les zones inondables et les bâtiments qui y sont menacés. Ces simulations sont importantes et instructives pour évaluer les facteurs déclencheurs et mieux comprendre l'événement de crue au moyen de scénarios « que se passerait-il si ». Pour l'évaluation des dommages, il apparaît qu'il faut aussi tenir compte d'effets à long terme. En analysant la manière dont la société a maîtrisé les répercussions de la crue, on voit comment la Confédération et les cantons ont dû s'organiser et quelles autres mesures ont été prises. Le contexte politique et social d'un événement de crue, comme celle de 1868, est particulièrement important pour initier un changement de mentalité au niveau politique et poser de nouveaux jalons à long terme.

La grave crue de 1868 a des répercussions jusqu'à nos jours. Surfaces habitées, aménagements fluviaux, forêts de montagne – sans l'événement de 1868, la Suisse n'aurait pas le même aspect aujourd'hui. Mieux connaître l'événement de 1868 nous sert aussi à mieux appréhender le futur. Avec l'augmentation de l'intensité des précipitations due au changement climatique, de nouveaux défis nous attendent. Il y aura à l'avenir de nouveaux événements qui contribueront aussi à imposer de nouvelles approches dans la protection contre les crues, et ainsi à modeler la Suisse d'après-demain.



Fig. 79: Crue au Lac des Quatre-Cantons, 2005.

Notes

¹ Carte des lieux mentionnés dans le texte.



- ² Les travaux à la base de ce rapport ont été soutenus par le Centre Oeschger pour la recherche climatique de l'Université de Berne, le Fonds national suisse de la recherche scientifique (projets EXTRA-LARGE et CHIMES) et l'Office fédéral de l'environnement (projet EXAR).
- ³ Arpagaus, J. B. (1870) Das Hochwasser des Jahres 1868 mit besonderer Berücksichtigung des Kantons Graubünden. Denkblätter. Chur, Senti & Casanova.
- ⁴ Summermatter, S. (2005) Die Überschwemmungen von 1868 in der Schweiz. Unmittelbare Reaktion und längerfristige Prävention mit näherer Betrachtung des Kantons Wallis. Nordhausen, T. Bautz.
- ⁵ Pfister, C. (2009) Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins. *GAIA* **18**, 239–246.
- ⁶ Vischer, D. (2003) Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 5, Bern.
- ⁷ Pfister, C., D. Brändli (1999) Rodungen im Gebirge – Überschwemmungen im Vorland: Ein Deutungsmuster macht Karriere, in: Sieferle, R. P. und H. Breuning (Hrsg.) *Natur-Bilder: Wahrnehmungen von Natur und Umwelt in der Geschichte*. Frankfurt/New York, Campus Verlag, 297–321.
- ⁸ Gerstengarbe, P. C., F.-W. Werner, U. Rüge (1999) *Katalog der Großwetterlagen Europas – nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Vol. 138.
- ⁹ Lamb, H. H. (1972) British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861–1971. *Geophysical Memoir* **116**, London, HMSO.
- ¹⁰ MeteoSchweiz (2015) *Typische Wetterlagen im Alpenraum*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.
- ¹¹ Schiemann R., C. Frei (2010) *Wetterlagen und Niederschlagsverteilung im europäischen Alpenraum*. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.8.
- ¹² Stucki, P., R. Rickli, S. Brönnimann, O. Martius, H. Wanner, D. Grebner, J. Luterbacher (2012) Five weather patterns and specific precursors characterize extreme floods in Switzerland. *Meteorol. Z.* **21**, 531–550.
- ¹³ Wehry, W. (1967) Hochwasser-Wetterlagen in den Alpen. In: Schram, K., J. C. Thams (Hrsg.): *Neunte Internationale Tagung für Alpine Meteorologie*, Brig und Zermatt, 14.–17. September 1966. Veröffentlichungen der SMA, Nr. 4.
- ¹⁴ Schwander, M., S. Brönnimann, G. Delaygue, M. Rohrer, R. Auchmann, Y. Brugnara (2017) Reconstruction of Central European daily weather types back to 1763. *Int. J. Climatol.* **37**, 30–44.
- ¹⁵ Giannakaki, P., O. Martius (2015) Synoptic-scale flow structures associated with extreme precipitation events in northern Switzerland. *Int. J. Climatol.* **36**, 2497–2515.
- ¹⁶ Van Bebber, W. (1891) Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890. *Meteorol. Z.* **8**, 361–366.
- ¹⁷ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2015) Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth Syst. Dyn.* **6**, 541–553.
- ¹⁸ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2017) Sensitivity experiments on the response of Vb cyclones to sea surface temperature and soil moisture changes, *Earth Syst. Dyn.* **8**, 477–493.
- ¹⁹ MeteoSchweiz (2006) Starkniederschlagsereignis August 2005. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz* **211**.
- ²⁰ Massacand, A. C., H. Wernli, H. C. Davies (1998) Heavy precipitation on the alpine southside: An upper-level precursor. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 1438.
- ²¹ Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: A climatology. *Int. J. Climatol.* **26**, 1149–1164.
- ²² Wernli, H., M. Sprenger (2007) Identification and ERA-15 Climatology of Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause. *J. Atmos. Sci.* **64**, 1569–1586.
- ²³ Barton, Y., P. Giannakaki, H. von Waldow, C. Chevalier, S. Pfahl, O. Martius (2016) Clustering of Regional-Scale Extreme Precipitation Events in Southern Switzerland. *Mon. Weather Rev.* **144**, 347–369.

- 24 Piaget, N., P. Froidevaux, P. Giannakaki, F. Gierth, O. Martius, M. Riemer, G. Wolf, C. M. Grams (2015) Dynamics of a local Alpine flooding event in October 2011: Moisture source and large-scale circulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 1922–1937.
- 25 Compo, G. P. et al. (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**, 1–28.
- 26 Sodemann, H., E. Zubler (2010) Seasonal and inter-annual variability of the moisture sources for Alpine precipitation during 1995–2002. *Int. J. Climatol.* **30**, 947–961.
- 27 Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine Heavy Precipitation with an Overlying Elongated Stratospheric Intrusion: A Climatology. *Int. J. Climatol.* **26**, 1149–1164.
- 28 Froidevaux, P., O. Martius (2016) Exceptional integrated vapour transport toward orography: an important precursor to severe floods in Switzerland. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **142**, 1997–2012.
- 29 Dacre, H. F., P. A. Clark, O. Martinez-Alvarado, M. A. Stringer, D. A. Lavers (2015) How Do Atmospheric Rivers Form? *Bull. American Meteor. Soc.* **96**, 1243–1255.
- 30 Lavers, D. A., F. Pappenberger, E. Zsoter (2014) Extending medium-range predictability of extreme hydrological events in Europe. *Nature Commun.* **5**, 5382.
- 31 Aemisegger, F., S. Pfahl, H. Sodemann, I. Lehner, S. I. Seneviratne, H. Wernli (2014) Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 4029–4054.
- 32 Stucki, P. et al. (2018) Reconstruction and simulation of an extreme flood event in the Lago Maggiore catchment in 1868. *Nat. Hazards. Earth Syst. Sci.* (accepted).
- 33 Bougeault, P. et al. (2012) The MAP Special Observing Period. *Bull. American Meteor. Soc.* **82**, 433–462.
- 34 Panziera, L., C. N. James, U. Germann (2015) Mesoscale organization and structure of orographic precipitation producing flash floods in the Lago Maggiore region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 224–248.
- 35 Coaz, J. F. (1869) Die Hochwasser im September und October 1868 im bündnerischen Rheingebiet. Vom naturwissenschaftlichen und hydrotechnisch-forstlichen Standpunkt betrachtet. Mit sechs Landschaftsbildern, zehn Bach- und Flußprofilen und einer graph. Darstellung der Wassermassen der atmosphärischen Niederschläge. Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- 36 Naef, F., S. Scherrer, C. Zurbrügg (1999) Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7, Bern.
- 37 Weingartner, R., J. Fürst, K. Schulz (in Vorbereitung) Hydrologie der europäischen Alpenflüsse. Wien.
- 38 Bezzola, G. R., C. Hegg (Hrsg.) (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2. Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern.
- 39 Ginzler, C., U.-B. Brändli, M. Hägeli (2011) Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. *Swiss Forestry Journal* **162**, 337–343.
- 40 Ambrosetti, W., L. Barbanti, R. de Bernardi, V. Libera, A. Rolla (1994) La piena del Lago Maggiore dell'autunno 1993: un evento di portata secolare. *Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* **45**.
- 41 Diezig, R. (2006) Hochwasserprozessstypen in der Schweiz – Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit, Universität Bern.
- 42 BWG (2000) Hochwasser 1999. Studienbericht Nr. 10. Bern.
- 43 MeteoSchweiz (2017) Klimareport 2016. Zürich.
- 44 Spycher, F. (2018) Witterungsbedingte Ausgaben des Basler Rates. Eine Untersuchung der Basler Wochen-Ausgabenbücher, 1600–1650. Masterarbeit, Universität Bern. Eine leicht überarbeitete Fassung soll noch 2018 im Rahmen der Online-Reihe «Berner Studien zur Geschichte» erscheinen und: Longoni, R. (2017) Saanehochwasser und kommunaler Hochwasserschutz in Freiburg i. Ü., 1387–1570, in: Freiburger Geschichtsblätter 94, 55–99. Die dieser Studie zugrundeliegende Berner Masterarbeit von 2016 wird in voller Länge 2018 im Rahmen der Online-Reihe «Berner Studien zur Geschichte» publiziert werden.
- 45 Pour l'utilisation de dessins plan historiques pour la reconstruction des inondations: Bolzern, M. (2017) Reconstruction of historical floods of the Aare River in Aarau. Masterarbeit Univ. Bern. Une version légèrement modifiée paraîtra en ligne dans «Berner Studien zur Geschichte».
- 46 Par exemple: Die Berner Matte – Archiv: Hochwasser 2005 – Aufbau-News: <https://www.matte.ch/archive-der-berner-matte/frischnotiert/1277-hochwasser-2005-aufbau-news> (19 mai 2018)
- 47 Isotta, F. A., M. Begert, C. Frei (2018) Long-term consistent monthly temperature and precipitation grid datasets for Switzerland over the past 150 years (in Vorbereitung).
- 48 Ciampittiello, M. (2017) Grafico disegnato a mano dell'andamento dei livelli del Lago Maggiore nell'anno 1868. Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ISE-CNR) (pers. comm.).
- 49 Germann, U., M. Boscacci, M. Gabella, M. Sartori (2015) Peak performance – Radar design for prediction in the Swiss Alps. *Meteorological Technology International*, April 2015, 42–45.
- 50 Germann, U., D. Nerini, I. Sideris, L. Foresti, A. Hering, B. Calpini (2017) Real-time radar – A new Alpine radar network. *Meteorological Technology International*, April 2017, 88–92.
- 51 Joss, J., R. Lee (1995) The Application of Radar-Gauge Comparisons to Operational Precipitation Profile Corrections. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 2612–2630.
- 52 Germann, U., G. Galli, M. Boscacci, M. Bolliger (2006) Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **132**, 1669–1692.
- 53 Sideris, I. V., M. Gabella, R. Erdin, U. Germann (2014) Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **140**, 1097–1111.
- 54 Montani, A., D. Cesari, C. Marsigli, T. Paccagnella (2011) Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus* **63**, 605–624.
- 55 Mandapaka, P. V., U. Germann, L. Panziera, A. Hering (2012) Can Lagrangian extrapolation of radar fields be used for precipitation nowcasting over complex Alpine orography? *Weather Forecast.* **27**, 28–49.
- 56 Panziera, L., M. Gabella, S. Zanini, A. Hering, U. Germann, A. Berne (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **20**, 2317–2332.
- 57 Zappa, M., S. Jaun, U. Germann, A. Walsler, F. Fundel (2011) Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmos. Res.* **100**, 246–262.
- 58 Germann, U., M. Berenguer, D. Sempere-Torres, M. Zappa (2009) REAL – Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **135**, 445–456.
- 59 Viviroli, D., M. Zappa, J. Gurtz, R. Weingartner (2009) An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* **24**, 1209–1222.
- 60 Romang, H. et al. (2011) IFKIS-Hydro: an early warning and information system for floods and debris flows. *Nat. Hazards* **56**, 509–527.
- 61 Addor, N., S. Jaun, F. Fundel, M. Zappa (2011) An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**, 2327–2347.
- 62 Andres, N., G. Lieberherr, I. V. Sideris, F. Jordan, M. Zappa (2016) From calibration to real-time operations: an assessment of three precipitation benchmarks for a Swiss river system. *Meteorol. Appl.* **23**, 448–461.
- 63 Brönnimann, S., O. Martius, S. Dierer (2014) Die Wetter-Zeitmaschine. *Phys. unserer Zeit* **45**, 84–89.
- 64 Dee, D. P. et al. (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. R. Roy. Meteorol. Soc.* **137**, 553–597.
- 65 Lalouaux, P. et al. (2018) CERA-20C: A coupled reanalysis of the Twentieth Century. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **10**, 1172–1195.
- 66 Skamarock, W. C. et al. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note.
- 67 Guichard F., F. Couvreur (2017) A short review of numerical cloud-resolving models. *Tellus A* **69**, 1.
- 68 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily mean, minimum and maximum temperature: TabsD, TminD, TmaxD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 69 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily precipitation (final analysis): RhiresD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 70 Nemeč, J. (1993) Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, CHR/KHR-Report No. II-7, secretariat CHR/KHR, Maerlant 16, Postbus 17, Lelystad NL.
- 71 Moreau de Jonnés, A. (1828) Untersuchungen über die Veränderungen, die durch die Ausrottung der Wälder in dem physischen Zustand der Länder entstehen. Aus dem Französischen übersetzt von W. Widenmann, Prof. der Forstwissenschaft zu Tübingen. Tübingen, C. F. Osiander.
- 72 Cook, J. L. (1987) Quantifying peak discharges for historical floods. *J. Hydrol.* **96**, 29–40.
- 73 Hosking, J. R. M., J. R. Wallis (1986) The Value of Historical Data in Flood Frequency Analysis. *Water Resour. Res.* **22**, 1606–1612.
- 74 Baker, V. R. (1987) Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *J. Hydrol.* **96**, 79–99.
- 75 Schulte, L., J. C. Peña, F. Carvalho, T. Schmidt, R. Julià, J. Llorca, H. Veit (2015) A 2600-year history of floods in the Bernese Alps, Switzerland: frequencies, mechanisms and climate forcing. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3047–3072.
- 76 Ballesteros-Cánovas, J. A., C. Rodríguez-Morata, V. Garófano-Gómez, J. M. Rubiales, R. Sánchez-Salguero, M. Stoffel (2015) Unravelling past flash flood activity in a forested mountain catchment of the Spanish Central System. *J. Hydrol.* **529**, 468–479.
- 77 Wetter, O. (2017) The potential of historical hydrology in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **21**, 5781–5803.
- 78 Benito, G., R. Brázdil, J. Herget, M. J. Machado (2015) Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3517–3539.
- 79 Bodoque, J. M., A. Díez-Herrero, M. A. Eguibar, G. Benito, V. Ruiz-Villanueva, J. A. Ballesteros-Cánovas (2015) Challenges in paleoflood hydrology applied to risk analysis in mountainous watersheds – A review. *J. Hydrol.* **529**, 449–467.
- 80 Herget, J., H. Meurs (2010) Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. *Glob. Planet. Change* **70**, 108–116.
- 81 Wilhelm, B., H. Vogel, C. Crouzet, D. Etienne, F. S. Anselmetti (2016) Frequency and intensity of palaeofloods at the interface of Atlantic and Mediterranean climate domains. *Clim. Past* **12**, 299–316.
- 82 Schmocker-Fackel, P., F. Naef (2010) Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14**, 1581–1594.
- 83 Reist, T., R. Weingartner, J. Gurtz (2002) Wege bei der Beschreibung alter Hochwasser – «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». *Wasser und Boden* **54**, 50–54.
- 84 Rogger, M. et al. (2017) Land-use change impacts on floods at the catchment scale – Challenges and opportunities for future research. *Water Resour. Res.* **53**, 5209–5219.
- 85 Bronstert, A. et al. (2007) Multi-scale modelling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine basin. *River Res. Applic.* **23**, 1102–1125.
- 86 Pinter, N., R. R. van der Ploeg, P. Schweigert, G. Hoefler (2006) Flood magnification on the River Rhine. *Hydrol. Process.* **20**, 147–164.
- 87 Vermeer, J. A. M., P. A. Finke, A. Zwertvaegher, V. Gelorini, M. Bats, M. Antrop, J. Verniers, P. Crombé (2014) Reconstructing a prehistoric topography using legacy point data in a depositional environment. *Earth Surf. Proc. Land.* **39**, 632–645.
- 88 Munoz, S. E., L. Giosan, M. D. Therrell, J. W. F. Remo, Z. Shen, R. M. Sullivan, C. Wiman, M. O'Donnell, J. P. Donnelly (2018) Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. *Nature* **556**, 95–98.
- 89 Zischg, A. P., P. Hofer, M. Mosimann, V. Röthlisberger, J. A. Ramirez, M. Keiler, R. Weingartner (2018) Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Sci. Total Environ.* **639**, 195–207.
- 90 Iverson, R. M. (2005) Debris-flow mechanics, in: Debris-flow hazards and related phenomena (Jakob, M., O. Hungr). Berlin, Springer, 105–134.
- 91 Haeberli, W., D. Rickenmann, U. Rösl, M. Zimmermann (1990) Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: General concept and geophysical soundings. *IAHS Publ.* **194**, 303–310.
- 92 Zimmermann, M., P. Mani, P. Gamma, P. Gsteiger, O. Heiniger, G. Hunziker (1997) Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. NFP31. Schlussbericht. Zürich, Vdf Verlag.
- 93 Gamma, P. (1999) dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Dissertation Universität Bern.
- 94 Christen, M. et al. (2012) Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit «RAMMS» (Rapid Mass Movements). *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz* **169**, 282–293.
- 95 Rickenmann, D. (1999) Empirical relationships for debris flows. *Nat. Hazards* **19**, 47–77.
- 96 Horton, P., M. Jaboyedoff, B. Rudaz, M. Zimmermann (2013) Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* **13**, 869–885.
- 97 voir les deux rapports: Landolt, E. (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweizerischen Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. Bern, et: Culmann, C. (1864) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Wildbäche, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863. Zürich, Zürcher und Furrer.
- 98 Berichte der Expertencommissionen über die Ursachen und den Betrag des durch die Ueberschwemmungen im Jahr 1868 in den Cantonen Uri, St. Gallen, Graubünden, Tessin und Wallis angerichteten Schadens. Bern, 1869 (Schweizerisches Bundesarchiv, Dossier BAR E 21 21724.)
- 99 Schmid, F. (2001) Politische Konsequenzen aus dem Unwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwasserschutzes.
- 100 Piton, G., S. Carladous, A. Recking, J. M. Tacnet, F. Liébault, D. Kuss, Y. Quefféléan, O. Marco (2017) Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surf. Process. Landforms* **42**, 91–108.
- 101 Bundesrat (2016) Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz – Bericht des Bundesrates, Bern.
- 102 Egli, T. (2005) Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren: Wegleitung, https://www.vkg.ch/media/1375/wegleitung_objektschutz_gegen_gravitative_naturgefahren_d_v0-0.pdf.
- 103 Suda, J., M. Holub, J. Hübl, W. Jaritz, H. Starl, F. Rudolf-Miklau (2012) Gefährdungs- und Schadensbilder für Gebäude, in: Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz (J. Suda, F. Rudolf-Miklau, Eds.). Wien/New York, Springer, 71–117.
- 104 Röthlisberger, V., A. Zischg, M. Keiler, M. Lang, F. Klijn, P. Samuels (2016) Spatiotemporal aspects of flood exposure in Switzerland. *E3S Web. Conf.* **7**, 8008
- 105 Statistiques des sinistres de l'Association cantonale des assureurs cantonaux contre l'incendie, juillet 2018.
- 106 Apel, H., G. T. Aronica, H. Kreibich, A. H. Thieken (2009) Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Nat. Hazards* **49**, 79–98.
- 107 Papatoma-Köhle, M., M. Kappes, M. Keiler, T. Glade (2011) Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Nat. Hazards* **58**, 645–680.
- 108 Bandhauer, M. (2017) Historical reconstruction and numerical simulation of an extreme flood event on Lago Maggiore in 1868. Masterarbeit der Philosophisch-historischen Fakultät der Universität Bern.
- 109 Summermatter, S. (2012) Die Prävention von Überschwemmungen durch das politische System der Schweiz von 1848 bis 1991. Dissertation, Universität Bern. <https://boris.unibe.ch/id/eprint/97587>
- 110 En 1868, l'engagement de troupes fut encore effectué de manière spontanée, sans base constitutionnelle. Ce fut le cas aussi en 1876 et 1877, après quoi cette procédure fut approuvée formellement par le Conseil fédéral en 1877. Aujourd'hui, l'engagement de l'armée en cas de catastrophe est subdivisé en aide militaire en cas de catastrophe et aide spontanée. L'aide spontanée, qui fournit des troupes qui se trouvent à proximité du lieu de l'événement, est décidée par les commandants des troupes; pour l'aide militaire en cas de catastrophe, en revanche, la décision appartient au DDPS, sur demande des cantons. Les engagements ultérieurs, p. ex. pour des travaux de déblaiement et de reconstruction, sont régis séparément (cf Summermatter 2012, p. 220–221).
- 111 Wanner, C. (2003) Ein tragbares Risiko? Naturkatastrophen als Auslöser für Lernprozesse: die Entstehung der Elementarschadenversicherung in der Schweiz. *Traverse* **10**, 100–114.
- 112 Wanner, C. (2002) 100 Jahre zeitgemäss – Meilensteine in der Brand- und Elementarschadenversicherung in der Schweiz. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungs- und Schweizerischer Pool für Erdbedeckung. Bern.
- 113 Fischer, M. (2004) Solidarität schafft Sicherheit. Die Kantonalen Gebäudeversicherungen als System. In: Pfister C., S. Summermatter (Hrsg.): Katastrophen und ihre Bewältigung, Perspektiven und Positionen. Bern, Haupt.

- 114 Von Ungern-Sternberg, T. (2004) Efficient Monopolies. The Limits of Competition in the European Property Insurance Market. Oxford University Press.
- 115 Thomi, L., A. Zischg, H. Suter (2015) Was macht Hochwasserschutzprojekte erfolgreich?: Eine Evaluation der Risikoentwicklung, des Nutzens und der Rolle privater Geldgeber, Geographisches Institut, Bern.
- 116 Photo publiée dans « Rheinnot in Liechtenstein. Zum 50. Jahrestag der Rheinüberschwemmungen von 1927 », herausgegeben von den Gemeinden Eschen, Gamprin, Mauren, Ruggell, Schaan und Schellenberg. Schaan 1977: 114.
- 117 Nienhaus, A. (2000) Naturkatastrophe und Modernisierungsprozess. Lizentiat-sarbeit, Historisches Institut, Bern.
- 118 Selon une projection basée sur un indice historique des salaires en 2009, ce montant de 3,63 à 4 millions de CHF correspond à un bon montant de 272 à 300 millions de CHF. (<http://www.swistoval.ch>, 28 avril 2018).
- 119 Knaup, H. (1996) Hilfe, die Helfer kommen. Karitative Organisationen im Wettbewerb um Spenden und Katastrophen.
- 120 Vischer, D. L. (1986) Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert (Mittellungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich 84). Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 1986;
- 121 Speich, D. (2003) Helvetische Meliorationen. Die Neuordnung der gesellschaftlichen Naturverhältnisse an der Linth (1783–1823), Zürich, Chronos.
- 122 Nast, M. (2006) Überflutet – überlebt – überlistet. Die Geschichte der Juragewässer-korrekturen. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- 123 Trottmann, J. (2017) Echte Kompromisse führen zu echten Lösungen. Der politische Entscheidungsprozess zur ersten Juragewässerkorrektion. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- 124 Salvisberg, M. (2017) Der Hochwasserschutz an der Gürbe. Eine Herausforderung für Generationen (1855–2010). Wirtschafts-, Sozial- und Umweltgeschichte 7, Basel.
- 125 Zaugg, M. (2006) Philosophiewandel im schweizerischen Wasserbau. Zur Vollzugspraxis des nachhaltigen Hochwasserschutzes. Publication series in Human Geography, 20, Zurich.
- 126 Gavilano, A., K. Ingold (2016) Under what conditions does an extreme event deploy its focal power? Paradigm change during one century of Swiss flood prevention. Presented at the Annual Conference of Swiss Political Science, Basel.
- 127 Sur la médialité de ces événements: Zemp, H. (2015) Von der Wassernot zu « SOS! Die Schweiz versinkt »: Wahrnehmung und Darstellung von Naturkatastrophen 1910–2005 in der Schweizer Presse, 2 Bde., Diss. Universität Zürich; et aussi: Burger, L. (2008) Informationsbeschaffung bei Hochwassersituationen. Dokumentation der grössten überregionalen Hochwasserkatastrophen der letzten 200 Jahre in der Schweiz. Masterarbeit, Universität Bern.
- 128 Amann, B., S. Szidat, M. Grosjean (2015) A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: implications for the future. *Quat. Sci. Rev.* **115**, 89–100.
- 129 Glur, L., S. B. Wirth, U. Büntgen, A. Gilli, G. H. Haug, C. Schär, J. Beer, F. S. Anselmetti (2013) Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years. *Sci. Rep.* **3**, 2770.
- 130 Wirth, S.B., L. Glur, A. Gilli, F.S. Anselmetti (2013) Holocene flood frequency across the Central Alps - solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. *Quat. Sci. Rev.* **80**, 112-128.
- 131 Stewart, M. M., M. Grosjean, F.G. Kuglitsch, S.U. Nussbaumer, L. von Gunten (2011) Reconstructions of late Holocene paleofloods and glacier length changes in the Upper Engadine, Switzerland (ca. 1450 BC/AD 420). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **311**, 215-223.
- 132 Kämpf, L., A. Brauer, P. Dulski, A. Lami, A. Marchetto, S. Gerli, W. Ambrosetti, P. Guilizzoni (2012) Detrital layers marking flood events in recent sediments of Lago Maggiore (N. Italy) and their comparison with instrumental data. *Freshwater Biol.* **57**, 2076–2090.
- 133 Caviezel, G. (2007) Hochwasser und ihre Bewältigung anhand des Beispiels Oberengadin 1750–1900. Masterarbeit, Universität Bern, Bern.
- 134 Castellarin, A., A. Pistocchi (2012) An analysis of change in alpine annual maximum discharges: implications for the selection of design discharges. *Hydrol. Process.* **26**, 1517–1526.
- 135 Blöschl, G. et al. (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science* **357**, 588–590.

- 136 Madsen, H. et al. (2014) Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. Hydrol.* **519**, 3634–3650.
- 137 Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016) Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports* **11**(5).
- 138 BAFU (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Bern.
- 139 Scherrer, S. C., E. M. Fischer, R. Posselt, M. A. Liniger, M. Croci-Maspoli, R. Knutti (2016) Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland, *J. Geophys. Res.* **121**, doi:10.1002/2015JD024634.
- 140 Sutton, R. T., D. L. Hodson (2005) Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* **309**, 115–118.
- 141 Schär C., P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, C. Appenzeller (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332–336.
- 142 Brückner, E. (1890) Klima-Schwankungen seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit, Wien.
- 143 Pfister, C. (1995) Das 1950er Syndrom. Der Weg in die Konsumgesellschaft. Bern, Verlag Paul Haupt.
- 144 Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 145 Ban, N., J. Schmidli, C. Schär (2015) Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophys. Res. Lett.* **42**, 1165–1172.
- 146 Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2018) The Impact of Climate Change on the Climatology of Vb-Cyclones. *Tellus*, submitted.
- 147 Rajczak, J., C. Schär (2017) Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *J. Geophys. Res.* **122**, 10773–10800.
- 148 Brönnimann, S., J. Rajczak, E. Fischer, C. C. Raible, M. Rohrer, C. Schär (2018) Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* **18**, 2047-2056.
- 149 Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt « Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz » (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217.
- 150 Bundesamt für Statistik (2015) Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2015–2045. Neuchâtel.
- 151 Perliik, M., U. Wissen, M. Schuler, J. Hofschreuder, A. Jarne, M. Keiner, D. Cavens, W. A. Schmid (2008) Szenarien für die nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung in der Schweiz (2005–2030). Abschlussbericht NFP 54. Zürich und Lausanne.

Crédit photo

Photo en page couverture : Photo: Armée suisse/Forces aériennes; aquarelle: propriété privée/reproduction Staatsarchiv St. Gallen, ZMH 05/006

Fig. 1 : Wikipedia, auteur inconnu

Fig. 3 : © Canton de Berne

Fig. 4 : Photo : Hansjörg Marbach.

Fig. 5 : Photo à gauche : Giacomo Imperatori, photo à droite : Peter Stucki

Fig. 7 : De Note 20 et des notes de cours, M. Sprenger, ETH Zurich

Fig. 13 : Photo : Ralph Rickli

Fig. 15 : Gravure sur bois de Emil Zbinden pour Jeremias Gotthelf : « Die Wassernot im Emmental » (Büchergilde Gutenberg 1951). Archive Emil Zbinden, Cabinet des estampes, Bibliothèque nationale suisse, Berne. ©Limmat Verlag et K. Zbinden, Berne

Fig. 24 : Photo : Blank

Fig. 28 : Propriété privée/reproduction St. Gallen, ZMH 05/006

Fig. 30 : Photo à gauche : Stefan Brönnimann, photo à droite : BAFU

Fig. 35 : Photos : MétéoSuisse

Fig. 38 : ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke

Fig. 40 : Hinkender Bot 1911, e-periodica

Fig. 51 : Archivio di Stato del Cantone Ticino

Fig. 53 : Office fédéral de topographie

Fig. 54 : Photo à droite : Toni Venzin

Fig. 56 : <https://map.geo.admin.ch/>

Fig. 60 : Gemeindearchiv Vals

Fig. 61 : Liechtensteinische Post AG

Fig. 62 : Bundesarchiv, Signatur E 21 21715

Fig. 63 : Expertenbericht von Leopold Blotnitzky und Friedrich Wilhelm Hartmann, Juni 1863, in Schweizerisches Bundesarchiv, Signatur E 19 1443 (gauche); Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hg.): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung 1982. Bern 1982, 18 (droite).

Fig. 71 : Interfoto / Alamy Stock Foto

Fig. 72 : Photo : Louis-Alphonse Tronel (Bruno Sternegg, <http://www.schaffhausen-foto-archiv.ch/hochwasser.html>, et Stadtarchiv Schaffhausen, Ref. Code: J 02.01.207/047)

Fig. 79 : Photo: Armée suisse/Forces aériennes

sc|nat²
Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP

u^b
UNIVERSITÄT
BERN
OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816

Klima, Mensch und Gesellschaft

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Brönnimann S, Krämer D. 2016. Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816. Klima, Mensch und Gesellschaft. Geographica Bernensia G90, 48 S., doi:10.4480/GB2016.G90.02

u^b
UNIVERSITÄT
BERN
OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

sc|nat²
Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP

Funded by the
Framework Programme
of the European Union

Dezember 1916: Weisser Tod im Ersten Weltkrieg

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Brugnara, Y., Brönnimann S., Zamuriano, M., Schild, J., Rohr, C., Segesser, D. (2016) Dezember 1916: Weisser Tod im Ersten Weltkrieg. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-48-9, doi:10.4480/GB2016.G91.02

Im Winter 1916/17 ereignete sich in den südöstlichen Alpen eine der folgenreichsten Wetterkatastrophen überhaupt. Auf ein massives Schneefallereignis folgten zahlreiche Lawinen, welche tausende von Soldaten und Zivilisten unter sich begruben. Eine anhand von Wettervorhersagemodellen erstellte, detaillierte Rekonstruktion des Ereignisses ermöglicht neue Einblicke und verdeutlicht das Potential, welches die Kombination von numerischen Techniken und historischen Dokumenten mit sich bringt. Extreme Wetterereignisse der Vergangenheit sowie in der Zukunft können damit besser verstanden werden.

Vor einem Jahrhundert befand sich Europa inmitten des Ersten Weltkriegs. An der italienischen Front standen sich die österreichisch-ungarische und die italienische Armee auf einem der rauensten Schlachtfelder der Geschichte, den Berggipfeln der südöstlichen Alpen, gegenüber (Box 1). Während eines Grossteils des Jahres ruhten die Gefechte allerdings weitgehend, denn es begann ein anderer Kampf – derjenige gegen Kälte, Eis und Schnee.^{1,2} Mit einem durchschnittlichen Niederschlag von 2 m pro Jahr gehört diese Region der Alpen zu den feuchtesten Gebieten des Kontinents. Die Soldaten wurden damals buchstäblich unter Schnee begraben. Noch heute geben die schmelzenden Gletscher jährlich Leichen dieses katastrophalen Ereignisses frei, eine traurige Erinnerung an das absurde Gemetzel des Ersten Weltkriegs.

Das Schicksal meinte es nicht gut mit jenen Männern, denn der Winter 1916/17 wurde, wie schon von Zeitgenossen bemerkt,^{3,4} zu einem der schneereichsten des Jahrhunderts (Abb. 1). Zwischen November 1916 und Januar 1917 verzeichnete ein Regenmesser, der sich heute auf der Grenze zwischen Italien und Slowenien befindet, 1432 mm Niederschlag, was rund 80 % der durchschnittlichen Jahresmenge entspricht. Zusätzlich fielen nach einem trockenen Februar nochmals 560 mm im März und April 1917.

Es war aber vor allem ein einzelner Tag, der tragischerweise in die Geschichtsbücher einging: der 13. Dezember 1916. Nach einer Woche reichlichen Schneefalls brachten an diesem Tag warme und leichte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum starken Niederschlag, was zu einem Anstieg der Schneegrenze führte. Diese Bedingungen lösten in der ganzen Region zahlreiche Lawinen aus (Box 2). Die



Foto 1: Schützengraben nahe Monte Scovizzo, Stölser Joch.

Autoren: Yuli Brugnara¹, Stefan Brönnimann², Marco Zamuriano³, Jonas Schild⁴, Christen Rohr⁴, Daniel Marc Segesser⁵
¹ Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Bern, Schweiz
² Geographisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz
³ Historisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz
Zitierempfehlung: Brugnara Y., Brönnimann S., Zamuriano M., Schild J., Rohr C., Segesser DM (2016) Dezember 1916: Weisser Tod im Ersten Weltkrieg. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-48-9, doi:10.4480/GB2016.G91.02