RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne

INRAE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE,
DE LA BIODIVERSITÉ,
DE LA FORÊT, DE LA MER
ET DE LA PÊCHE
Liberté
Égalité
Fraternité

Changement climatique et crues torrentielles : Note de synthèse sur l'état des connaissances

Avril 2025

Historique de la diffusion

Version	Date	Commentaires
V1	23/05/2025	Version initiale

Rédacteur(s) et relecteur(s)

Rédacteurs du rapport	Relecteurs
Antoine Blanc (Référent CC, RTM 38) Clément Misset (Référent hydraulique, Département Risques Naturels, pôle RTM) Guillaume Piton (INRAE) Nicolas Eckert (INRAE) Robin Mainieri (RTM 38)	Yann Quefféléan (Responsable technique national RTM, DRN-Pôle RTM) Pierre Verry (chef de service RTM 38)

Avant-propos

Ce travail a été financé par le ministère en charge de l'écologie, DGPR/SRN/SDAOH/BRNT (Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels, Sous-Direction des Aléas et des Ouvrages Hydrauliques, Bureau des Risques Naturels Terrestres) dans le cadre du programme de travail 2024.

Photo en couverture : Engravement du lit et habitation ensevelie en amont du pont de la RM2565 lors de la tempête Alex, octobre 2020 (ONF-RTM).

1. Cadre

Cette note de synthèse a été produite par l'ONF-RTM et l'INRAE dans le cadre du programme de travail 2024 financé par la DGPR. Elle synthétise les connaissances disponibles sur l'évolution des crues torrentielles dans le contexte du changement climatique en cours. D'autres notes ont été produites pour d'autres phénomènes naturels en montagne générateurs de risque (phénomènes rocheux, avalanches, glissements de terrain). **Une note générale présente le contexte dans lequel s'inscrit cette action ainsi que la méthodologie utilisée.**

La Partie 2 ci-dessous présente les spécificités des crues torrentielles, mais il convient ici de préciser les choix effectués sur le cadrage de la bibliographie. L'analyse bibliographique s'est concentrée sur les évolutions aux échelles torrentielles, c'est-à-dire sur des bassins versants <100 - 1000 km² **pour lesquels le transport solide (charriage, lave torrentielle) joue un rôle prépondérant vis-à-vis des dommages associés aux crues.** L'évolution de l'hydrologie et des crues des grandes rivières sur les secteurs les plus en aval, y compris en zone de montagne (Isère, Arve ou Durance par exemple) n'a pas été traitée et pourrait faire l'objet d'une note spécifique.

Bien que la bibliographie sur l'évolution des crues torrentielles dans le contexte du changement climatique puisse être considérée comme limitée, elle apparaît plus exhaustive que pour d'autres phénomènes (chutes de blocs par exemple).

2. Les crues torrentielles

Les crues torrentielles en montagne sont, par bien des aspects, différentes des crues observées dans les plaines. En montagne, les fortes pentes des terrains et la présence de matériaux solides facilement mobilisables (sédiments, arbres, etc.) mènent à des évolutions morphologiques majeures à l'échelle d'une crue (érosions de berges, divagations, engravements, etc.). Les crues torrentielles atteignent les enjeux de manière très différente des crues non chargées : les bâtiments et infrastructures peuvent être détruits par l'érosion des terrains, par des dépôts de plusieurs mètres de haut de matériaux ou par des chocs (gros blocs, flottants). Contrairement aux crues de plaine, les débordements liquides ne sont ainsi pas la seule cause des dommages. Les crues torrentielles peuvent être très soudaines du fait de la petite taille des bassins versants. Ainsi, au regard de ces spécificités, **la caractérisation des crues torrentielles, ainsi que leur évolution avec le changement climatique, doivent être traités de manière spécifique.**

Les cours d'eau de montagne sont généralement classifiés en deux grandes catégories :

- **Les torrents**, définis par une pente longitudinale généralement supérieure à 6%. Leurs bassins versants sont relativement petits et sujets à des problèmes d'érosion, et un cône de déjection est présent au niveau du débouché du cours d'eau dans la vallée de la rivière réceptrice ;
- **Les rivières torrentielles**, définies par une pente longitudinale souvent supérieure à 1%, drainant un bassin versant de taille intermédiaire comprenant généralement plusieurs torrents. Les rivières torrentielles charrient d'importantes quantités de sédiments et sont ainsi mobiles dans les zones où elles ont de l'espace pour divaguer.

Par ailleurs, différents processus torrentiels peuvent prendre place dans ces cours d'eau, qui diffèrent fondamentalement du point de vue des mécanismes de propagation :

- **Crues de charriage :** l'écoulement est biphasique, avec une partie liquide (eau turbide) charriant une partie solide transportée au niveau du fond du lit (sédiments grossiers). Le transport de cette partie solide peut mener à des évolutions de la topographie du lit (berge, fond, etc.) très rapides au cours d'une crue. Les crues par charriage sont observées sur les torrents et les rivières torrentielles.

- **Laves torrentielles :** l'écoulement est monophasique, généralement sous forme de bouffées, avec une matrice homogène constituée d'eau, de blocs et de sédiments plus fins. La concentration en matériaux solides dans ce mélange est très élevée (supérieure à 40%). Des conditions de forte pente et une forte disponibilité en matériaux sont nécessaires à la production de laves torrentielles. Celles-ci ne sont observées que sur les torrents.

De manière simplifiée, les processus torrentiels de lave et charriage résultent **d'un forçage hydrologique (apports en eau)** et d'une **disponibilité sédimentaire** (Figure 1). **Les aléas torrentiels associés sont alors multifactoriels**. Ils vont dépendre, sans être exhaustif : de la durée et de l'intensité des précipitations, de l'état hygrométrique préalable des sols, de la présence de neige et de son éventuelle fonte, des volumes d'eau écoulés et du pic de débit, des stocks de matériaux présents au préalable dans le lit et de leur état de stabilité (pente, taille des matériaux, morphologie du lit, etc.), de l'activation de processus de versants au cours de la crue (glissement de terrain, apports par des affluents, érosion de berge), de l'occupation des sols dans le bassin versant (présence de forêt notamment), de la présence éventuelle d'ouvrages de protection/correction, etc.

Cet aspect multifactoriel s'accompagne d'une autre complexité : les mesures sur le long terme permettant de décrire statistiquement ces crues et d'évaluer leur « rareté » dans un but de prévention (cartographie d'aléa, dimensionnement d'ouvrage, etc.) sont très peu nombreuses car très difficiles à réaliser en contexte torrentiel (on ne dispose pas de nombreuses stations de mesures de débit comme sur les cours d'eau fluviaux, en particulier sur les torrents et à l'amont des bassins des rivières torrentielles). Ainsi, les connaissances actuelles de ces processus complexes sont très parcellaires. **La caractérisation des crues torrentielles est donc associée à de fortes incertitudes, ceci même en dehors de toute considération du changement climatique**. Un large recours à l'expérience/expertise et l'analyse de la géomorphologie est encore aujourd'hui nécessaire en plus d'approches statistiques et calculatoires pour les caractériser.

Figure 1: Schéma simplifié montrant les précurseurs des crues torrentielles.

Ayant acté ces spécificités torrentielles, l'aspect multifactoriel et le niveau élevé d'incertitudes dans l'état actuel des connaissances, nous proposons une réflexion sur les impacts possibles du changement climatique sur les aléas torrentiels. **Cette réflexion s'appuie sur notre connaissance des phénomènes et sur une synthèse bibliographique, forcément non exhaustive.** La bibliographie s'intéresse à :

- **L'évolution des précurseurs**. A ce titre, nous notons que les études sur l'évolution de la disponibilité sédimentaire des bassins versants sont rares (en comparaison des études sur l'évolution des précipitations extrêmes par exemple) ;

- **L'évolution de la fréquence et la magnitude des crues**. Les séries d'observation sur le temps long et à l'échelle régionale sont également relativement rares.

3. Evolution des précurseurs

3.1. Le forçage hydrologique

3.1.1. Les débits

Le forçage hydrologique correspond aux apports en eau menant au ruissellement puis aux écoulements dans les principaux talwegs et cours d'eau drainant un bassin versant. A l'échelle d'une crue, ces apports liquides peuvent être liés à des précipitations, à la fonte nivale, ou à un phénomène d'origine glaciaire. La variable la plus couramment utilisée pour caractériser l'écoulement liquide lors d'une crue est **le débit**, correspondant à un volume écoulé par unité de temps (flux d'eau). Les évolutions morphologiques lors des crues torrentielles sont fortement (mais pas uniquement) liées aux débits liquides : plus celui-ci est élevé et sur une longue durée, plus les cours d'eau torrentiels sont susceptibles de connaître des évolutions morphologiques marquées.

Les mesures de débit continues sur les torrents sont très rares. Cela s'explique par la difficulté d'instrumentation et de mesure (terrains raides, matériel pouvant être endommagé par le transport solide, section d'écoulement évolutive rendant très incertaine la mesure, débit intermittent). **Les rivières torrentielles** sont plus fréquemment instrumentées, bien qu'elles le soient beaucoup moins systématiquement que les grandes rivières.

Les études sur l'évolution des débits liquides en zone de montagne dans le contexte du changement climatique se focalisent en grande partie sur les évolutions de régime hydrologique (répartition saisonnière des débits au cours de l'année) avec un consensus autour des évolutions attendues : pic de fonte plus précoce, débits hivernaux plus importants, étiages estivaux plus marqués. En revanche, moins d'études ont analysé les évaluations des débits de crues intéressants la cartographie des aléas et/ou le dimensionnement d'ouvrages de protection, typiquement des évènements centennaux. En effet, les évolutions affichées correspondent généralement aux maximums annuels, soient des débits nettement plus probables que les crues « dimensionnantes ». Néanmoins, quelques études ont pu investiguer ces gammes élevées de débits à des échelles régionales ou à l'échelle du continent. Des résultats contrastés sont reportés : certaines études (notamment en Suisse) indiquent des augmentations très significatives des débits rares avec par exemple un débit centennal devenant un débit vingtennal post-réchauffement (soit cinq fois plus probable à échéance 100 ans), d'autres études suggèrent des évolutions plus contrastées et/ou non significatives.

Par ailleurs, on retient d'études sur le temps long que les tendances observées (sur les débits, les précipitations) ne peuvent pas être automatiquement imputées au changement climatique d'origine anthropique en cours. En effet, **la variabilité interne du climat** est importante et induit des évolutions pluri-décennales fortes avec des périodes riches et d'autres plus pauvres en crues. L'attribution d'évolutions récentes au changement climatique doit donc être mise en regard des évolutions naturelles sur le temps long de la variable considérée.

Au-delà de ces travaux sur les débits liquides qui sont limités par les données d'observation aux échelles torrentielles, des travaux existent sur les différentes variables jouant un rôle quant aux crues des torrents et rivières torrentielles à l'échelle évènementielle : les précipitations, la fonte nivale, et les phénomènes d'origine glaciaire.

3.1.2. Les précipitations

La variabilité spatiale des précipitations en zone de montagne est forte, puisque les reliefs influencent les masses d'air. Pour saisir cette variabilité et analyser les tendances des précipitations les plus fortes dans le contexte du changement climatique, il convient donc :

- **D'avoir un réseau d'observation dense** (pluviomètres) sur une large gamme d'altitude, afin d'analyser des tendances passées puisque le changement climatique

est souvent déjà détectable. Les réseaux de pluviomètres des massifs français (Météo France, EDF) fournissent des données avec une bonne profondeur temporelle (années 1950 en journalier, années 1980 en horaire). Les observations sont néanmoins **rares au-dessus de 2000 m d'altitude**, en lien avec les difficultés de mesure et de maintenance ;

- **D'avoir des modèles de climat à haute-résolution spatiale et intégrant les effets multi-échelles du relief** afin d'analyser les tendances futures selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les projections climatiques multi-modèles actuellement disponibles ne possèdent pas une résolution spatiale assez fine pour représenter de manière réaliste la variabilité spatiale de tous les types de fortes précipitations en montagne, notamment les précipitations convectives très locales. Néanmoins, cette thématique est au cœur des recherches actuelles et des résultats sont à attendre prochainement.

En théorie, un air plus chaud peut contenir plus d'humidité (7%/°C). On pourrait donc s'attendre, globalement, à une augmentation des précipitations extrêmes de 7%/°C. **La réalité est plus nuancée** (tendances observées dans les Alpes françaises en Figure 2), parce que les précipitations sont aussi régies par les circulations atmosphériques, les effets orographiques, par la disponibilité en humidité et par la physique des nuages, entraînant des modulations de l'évolution selon la localisation et la saison.

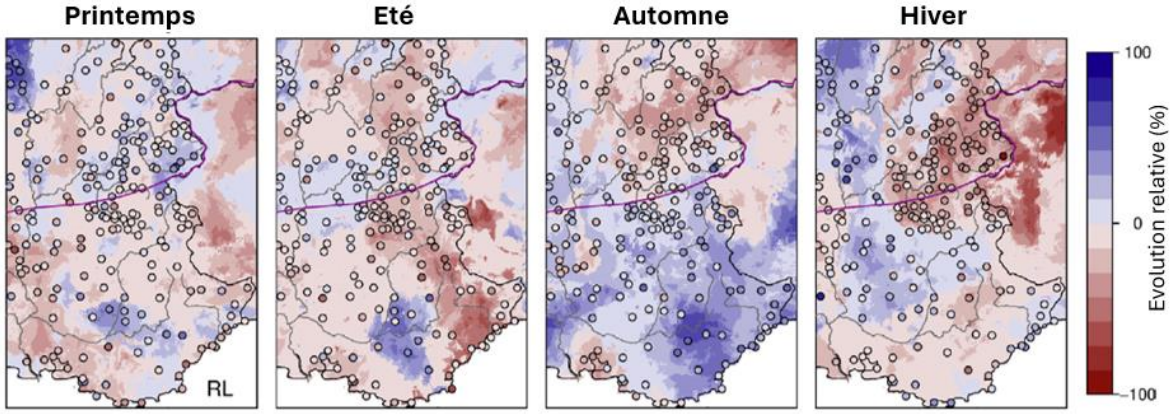

Figure 2: Evolution relative (en %) du niveau de retour 20 ans de précipitation journalière sur la période 1958-2017 au regard du niveau de retour 20 ans moyen sur les 60 ans, dans les Alpes françaises (Blanchet et al., 2021).

L'augmentation des précipitations extrêmes en région Méditerranéenne et dans les Alpes du Sud en automne fait consensus. La Figure 2 met en avant une augmentation de l'ordre de 30% à 60% en 60 ans du niveau de retour 20 ans de précipitation journalière. A l'inverse, elle illustre plutôt une diminution des précipitations extrêmes en hiver dans les Alpes du Nord. Aux autres saisons, les tendances sont moins claires.

Dans les Alpes européennes, certaines études suggèrent une **augmentation de l'activité convective** en été, c'est-à-dire des pluies d'orages. Sur ces précipitations courtes, l'accroissement de l'humidité dans un air plus chaud semble jouer un rôle au premier ordre, et le réchauffement apporte une plus grande quantité d'énergie pour la convection.

Au-delà des précipitations fortes à l'échelle d'une journée ou d'un orage, **les précipitations antécédentes** sur de plus longues périodes régissent **l'état d'humidification des bassins versants** et ainsi leur réaction hydrologique. Sur la période 1950-2020, les cumuls hivernaux et estivaux sont en diminution dans la moitié sud de la France, et les cumuls automnaux sont en augmentation dans le sud-est et le nord-est. Les tendances sur l'évolution des forts cumuls aux échelles de temps intermédiaires (entre la saison et la journée) sont moins bien documentées et les incertitudes sur l'évolution des blocages des systèmes dépressionnaires dans le contexte du changement climatique sont fortes.

3.2.3. Les épisodes de pluie sur neige

La fonte nivale seule, sans précipitations, est rarement capable de produire des débits mobilisant une quantité importante de matériaux sur un torrent, bien que cela ait déjà été observé sur des bassins versants très dégradés. C'est moins le cas à l'échelle des rivières torrentielles, pouvant charrier des matériaux avec des débits de fonte importants.

En revanche, les épisodes de pluie sur neige peuvent être à l'origine de crues torrentielles majeures (exemple des crues de 1957 dans les Alpes ou de 2013 dans les Pyrénées). L'évolution des occurrences d'événements de pluie sur neige est pilotée par deux tendances : celle de la couverture neigeuse et celle des précipitations sous forme liquide. Elles dépendent fortement de l'altitude et la saisonnalité, si bien qu'aucune tendance globale ne peut être formulée.

En s'intéressant uniquement aux événements intenses de pluie sur neige dans les Alpes (cumul ≥ 50mm), **une augmentation de 40% de l'occurrence** est observée sur la période 1960-2015 au-delà de 1000m d'altitude. Les simulations futures prévoient **une baisse des occurrences de pluie sur neige pour les altitudes inférieures à 1500m, et une hausse maximale de 40% pour les altitudes supérieures,** jusqu'à un réchauffement local de 4°C au-delà duquel la diminution de la couverture neigeuse serait prédominante.

Au-delà de la présence de neige au sol, ou de toute évolution des précipitations extrêmes, il est important d'avoir en tête que l'élévation de la limite pluie-neige rend, à l'échelle évènementielle, **un bassin versant plus productif** : augmentation de la surface impactée par la pluie et contribuant au ruissellement et à l'érosion, diminution de la surface impactée par la neige et contribuant ainsi au stockage.

3.1.4. Les GLOF (Glacial Lake Outburst Flood : Crue suite à la vidange d'un lac glaciaire)

L'important retrait glaciaire en cours favorise **l'apparition de lacs glaciaires** dans les zones topographiquement favorables. Dans les Alpes françaises, 70 lacs d'une superficie supérieure à 2500 m² sont apparus entre 1950 et 2022 en lien avec le retrait glaciaire. Seulement une partie de ces lacs peuvent être à l'origine de crues en cas de vidange ou de surverse. Il s'agit de lacs possédant des berges potentiellement instables (glace, matériaux morainiques) et/ou susceptibles d'être atteints par un phénomène gravitaire (avalanche, effondrement). On constate donc dès aujourd'hui une augmentation des situations propices à la formation de crues liées à des GLOF du fait du changement climatique en haute montagne.

Les poches d'eau intraglaciaires ou sous-glaciaires peuvent aussi être à l'origine de crues (exemple de la catastrophe de Saint-Gervais en 1892), mais les processus menant à la rétention de volumes d'eau puis à leur vidange sont mal connus, tout comme l'évolution du phénomène dans le contexte du changement climatique.

3.2. Les stocks de matériaux

3.2.1. Typologie de bassins

L'évolution des crues torrentielles sur les torrents est fonction de l'évolution des forçages hydrologiques (cf. paragraphe précédent) et de la **disponibilité en sédiments**. La disponibilité des sédiments pour un torrent dépend des processus d'érosion dans le bassin versant, et donc **de la géologie et de la géomorphologie locale.** On distingue :

- **Les bassins versants limités par le stock de matériaux disponibles** quant à l'initiation de crue torrentielle (« supply-limited » en anglais), par exemple alimentés par la dégradation des roches du bassin versant ;
- **Les bassins versants dont le stock en matériaux est « illimité »** si bien que l'initiation d'une crue résulte principalement de la magnitude du forçage hydrologique

(« transport-limited » en anglais). Ces bassins versants comprennent par exemple des stocks massifs de matériaux morainiques ou souffrent de nombreux glissements de terrains très actifs.

De nombreuses études suggèrent des différences de réponses au changement climatique pour ces deux typologies de bassins. Une augmentation du forçage hydrologique conduirait dans un bassin non limité par le stock de matériaux à une augmentation en fréquence et en magnitude des crues torrentielles, tandis qu'elle pourrait conduire à une augmentation de la fréquence, mais une diminution de la magnitude des évènements pour des bassins limités par le stock, qui auraient tendance à purger plus régulièrement les volumes accumulés (Figure 3).

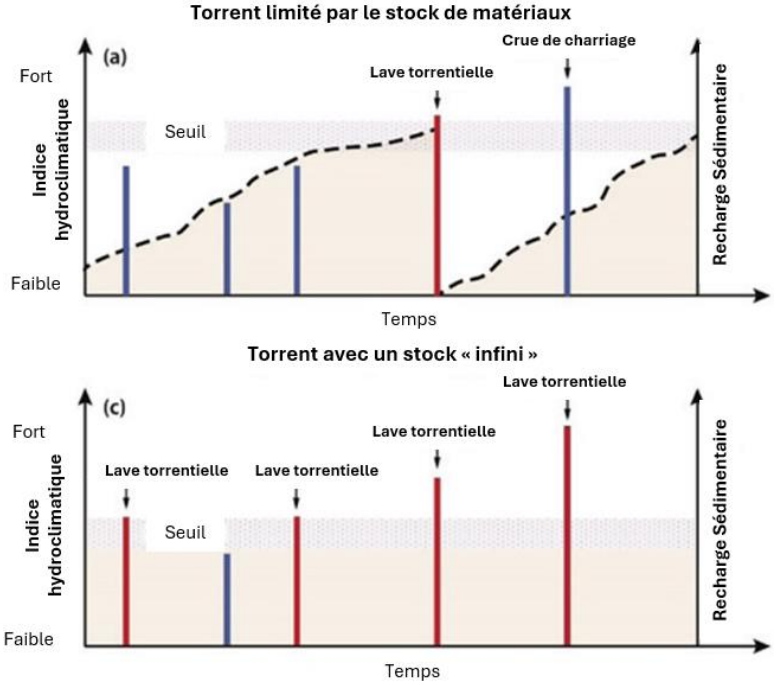

Figure 3: Réponse différentes des bassins versants torrentiels à des conditions hydro-climatiques similaires selon la disponibilité en matériaux pour les crues (adapté de la Figure 4 de Bovis and Jakob, 1999).

Notons que cette classification en deux catégories reste incertaine en pratique et que **nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'une vision globale de la répartition des typologies de bassins versants dans les Alpes et dans les Pyrénées.** Notons également que de nouvelles « connexions » entre cours d'eau et zones sources historiquement non contributives du fait de l'augmentation des forçages météorologiques pourraient apparaître : les pluies extrêmes liées à la tempête Alex (Oct. 2020) ont par exemple mobilisé plusieurs millions de m^3 de sédiment dans le bassin versant de la Vésubie (affluents et sapement des pieds de versants), métamorphosant cette rivière relativement peu active en une rivière en tresses très dynamique sur plus de 30 km.

Par ailleurs, des évolutions sur l'état des stocks de sédiments dans ces bassins peuvent intervenir en lien avec le changement climatique.

3.2.2. Evolution des stocks de matériaux

Les phénomènes à l'origine de l'érosion des versants dans un bassin sont multiples (chutes de blocs, écroulements, glissements de terrain, ravinement, avalanches, cycles gel/dégel) mais les liens avec le réchauffement en cours ne sont pas clairement établis. **Aucun consensus n'existe** sur l'évolution de l'activité de chute de blocs, d'écroulements, et de glissements en dehors du contexte de permafrost dans le contexte du changement climatique. **Le nombre de cycles de gel/dégel devrait continuer à diminuer à moyenne altitude** avec le réchauffement et pourrait contribuer à réduire la production sédimentaire, cette tendance

n'étant pas quantifiée.

En parallèle, **la couverture ou l'absence de couverture végétale des terrains a un effet au premier ordre sur leur érosion**. Si le réchauffement peut favoriser l'expansion de la forêt à des altitudes supérieures lorsque les terrains le permettent, il favorise aussi les dépérissements et les incendies sur les forêts existantes (développement de parasites, augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des sécheresses et des vagues de chaleur). Notons qu'à la suite d'un incendie, une augmentation élevée mais de courte durée (typiquement une à quelques années) de la susceptibilité à la formation de lave torrentielle et de leur magnitude est documentée.

Par ailleurs, la réduction de la durée d'enneigement est déjà très marquée en moyenne montagne, rendant les terrains plus longtemps exposés à l'érosion. Elle a par exemple diminué d'environ 40 jours entre 1980 et 2010 à la station du Col de Porte à 1325 m d'altitude.

3.2.3. Les spécificités de la haute montagne

Le changement climatique provoque le dégel de la haute-montagne (altitude typiquement supérieure à 2700 m/3000 m en France métropolitaine), qui se traduit à la fois par **le retrait glaciaire et par la fonte du pergélisol.** Le retrait glaciaire met à nu des sédiments nouvellement exposés à l'érosion, et peut favoriser la déstabilisation de moraines ou de versants à proximité de glaciers. Le dégel du pergélisol se traduit par une augmentation de la fréquence des chutes de blocs et éboulements, par l'accélération des glaciers rocheux, et par des déstabilisations de terrains jusqu'alors gelés en permanence. La fonte accélérée des glaciers augmente la capacité à transporter des matériaux et libère des stocks jusqu'alors englacés. Toutes ces dynamiques vont dans le sens **d'une augmentation de la production sédimentaire des bassins versants de haute-altitude.** Il est important d'avoir en tête que cette dynamique en cours est **transitoire**, dans le sens où un équilibre nouveau pourrait être atteint lorsque les têtes de bassins versants auront entièrement dégelé. Cette tendance générale à l'augmentation des stocks disponibles en haute altitude peut être nuancée dans certains cas lorsque l'évolution morphologique du site mène à une déconnexion des sources sédimentaires (exemple de formation d'un lac proglaciaire, ou de la déconnexion de moraines latérales).

A cette tendance à l'augmentation, s'ajoute une réduction de la durée de la couverture nivale qui rend les terrains plus longtemps exposés à l'érosion (précipitations, cycles gel/dégel). La durée d'enneigement a par exemple diminué d'environ 25 jours entre 1980 et 2010 à la station de Weissfluhjoch à 2536 m dans les Alpes Suisses.

4. Evolution observée des crues torrentielles

Peu d'observations continues de débit ou de volume solide apporté sont disponibles sur le temps long sur les torrents. En revanche, des bases de données ou reconstructions existent pour recenser l'occurrence de crues torrentielles (recensement des évènements, reconstructions grâce aux archives, aux images satellites, aux sédiments dans les lacs, à la dendrogéomorphologie…).

En France, la base de données RTM recense les crues torrentielles dans les Alpes et les Pyrénées, en faisant une source de données très riche. Comme les autres bases de données, son utilisation nécessite des traitements statistiques et une bonne contextualisation pour tenter de s'affranchir des biais et aboutir à une tendance climatique. Plusieurs travaux scientifiques utilisent la base de données RTM, et tendent à montrer une augmentation de la fréquence des crues torrentielles. **L'utilisation de la BDRTM dans de futurs travaux semble pertinente pour exploiter cette base unique en France dans le contexte du changement climatique.**

4.1. Evolution des laves torrentielles

Une synthèse de 16 de ces études utilisant des reconstitutions de chroniques de laves torrentielles et quelques séries d'observations dans les Alpes européennes indique que :

- **50% des études suggèrent une augmentation de l'occurrence des laves torrentielles ;**
- **50% ne mettent pas en avant de tendance** (Figure 4).

Les études qui traduisent une augmentation de la fréquence des laves aux altitudes élevées mettent en avant des laves torrentielles là où elles n'avaient pas été observées par le passé (en lien avec le retrait glaciaire), où relient l'occurrence de laves en été avec le dégel/l'épaississement de la couche active du permafrost (zone qui dégèle chaque année) et à la remontée en altitude des principaux processus d'érosion. Les études qui traduisent une augmentation de la fréquence des laves aux altitudes plus basses montrent parfois que l'augmentation de la fréquence des laves n'est pas sans précédent, avec des périodes d'activité forte qui ont aussi été observées à la fin du XIXe siècle et entre 1920 et 1940.

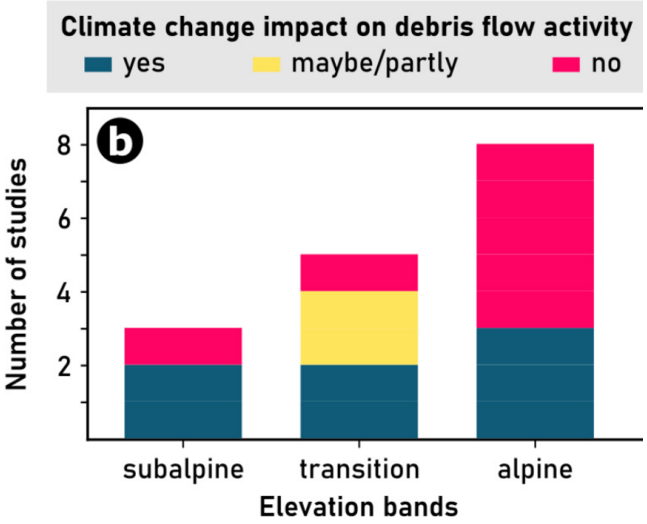

Figure 4 : Adaptation de la Figure 11 de la synthèse bibliographique de Jacquemart et al. (2024) pour l'évolution passée des laves torrentielles en basse, moyenne et haute altitudes. Attention, les études qui ne mettent pas en avant d'impact du changement climatique sur les laves torrentielles ne signifient pas que le lien est inexistant. Il traduit simplement qu'aucune tendance n'a été mise en évidence.

Par ailleurs, l'étude de carottes de sédiments déposés dans plusieurs lacs alpins a mis en évidence une fréquence plus importante de crues torrentielles au cours des périodes froides passées en comparaison des périodes chaudes. Cela fait le lien avec certaines études qui suggèrent que l'évolution attendue des régimes de précipitations pourrait mener à des laves torrentielles moins fréquentes mais plus intenses, pouvant avoir lieu en dehors de la période estivale.

Ces résultats contrastés sur les chroniques temporelles d'observations sont à mettre en lien avec l'aspect multifactoriel des crues sur les torrents et notamment l'état du stock sédimentaire et de son évolution avec le changement climatique : **l'évolution des forçages hydrologiques (précipitations, conséquence pour l'enneigement au sol) est modulée par l'état du stock sédimentaire et son évolution dans le temps**.

L'analyse de larges bases de données d'évènement recensés sur les torrents alpins, pour certaines considérées comme homogènes sur une relativement longue période, montrent également des tendances contrastées. Par exemple, une étude sur une base de données de 12 000 évènements en Autriche de 1962 à 2017 (similaire à la BDRTM) ne montre pas de tendance à l'augmentation des dommages liés aux laves torrentielles (Figure 5), malgré une augmentation des conditions météorologiques propices à l'initiation de ces processus ainsi que des enjeux exposés. Cette tendance de non-augmentation est attribuée à l'augmentation concomitante du nombre d'ouvrages de protection. **Cela montre l'importance de maintenir ces ouvrages de protection et les difficultés de l'analyse statistique des bases de données d'évènement pour quantifier l'effet du changement climatique (les différents effets à l'origine des évolutions pouvant se conjuguer et/ou se compenser).**

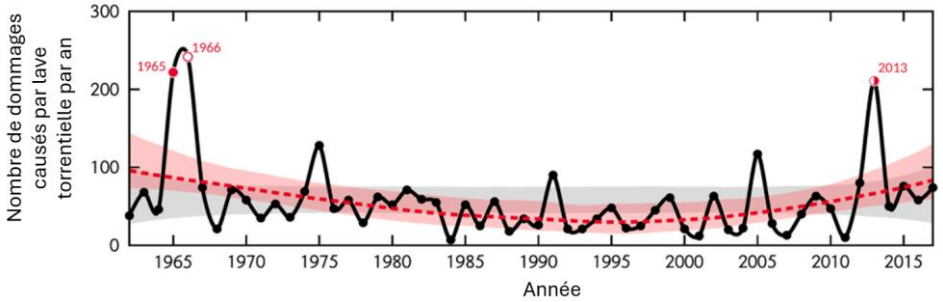

Figure 5 : Evolution du nombre dommages causés par laves torrentielles par an en Autriche sur la période 1967-2017 d'après l'analyse d'une base de données homogène de 12 000 évènements (Schlogl et al. 2021).

4.2. Evolution des crues de charriage

Les évolutions des crues de charriage sont principalement étudiées sur les rivières torrentielles (bibliographie rare sur l'évolution du charriage sur les torrents). Ces dernières sont situées en fond de vallée peuvent menacer de nombreux enjeux. Elles reçoivent les flux liquides et les matériaux solides apportés par les torrents et pourraient connaitre des évolutions majeures, en fonction de l'évolution de ces apports.

Il est établi dans la littérature scientifique **qu'en cas d'augmentation significative d'apport de matériaux solides,** la morphologie de ces cours d'eau évolue vers des styles divagants avec **une augmentation de l'altitude du fond du lit et un élargissement de celui-ci** menant à des érosions des terrains avoisinants et une augmentation de la probabilité de débordement. Ce type d'évolution à moyen terme (quelques décennies) est bien décrit dans plusieurs travaux sur des secteurs en aval de bassins versants en cours de désenglacement (exemple en Figure 6), ainsi que dans d'autres situations menant à des augmentations d'apport en matériaux solides. Notons que localement, des dynamiques inverses d'enfoncement et de contraction du lit ont par exemple été observées lorsque la formation d'un lac proglaciaire piège une grande partie des sédiments provenant de l'amont. Ces adaptations de morphologies peuvent être relativement rapides temporellement et s'étendre sur des linéaires importants en aval.

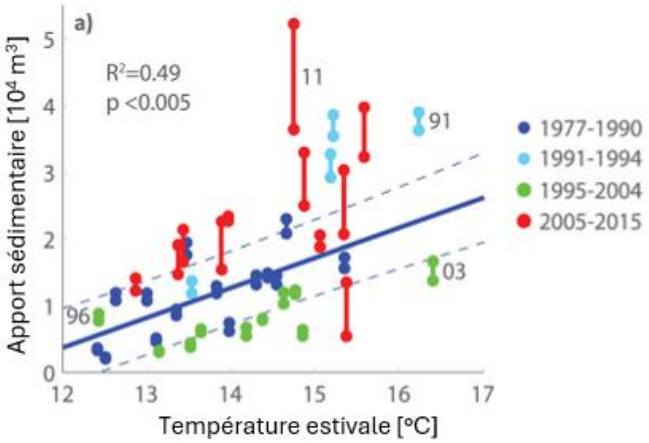

Figure 6 : Evolution des volumes de matériaux solides apportés en aval d'un bassin versant en cours de désenglacement en fonction de la température en été. Source : Bakker et al. (2018).

Par ailleurs, **l'évolution du régime hydrologique des rivières torrentielles, indépendamment du régime d'apport en matériaux solides depuis les versants, peut également avoir un effet sur la morphologie de leurs lits.** Des travaux suggèrent que l'évolution d'un régime nival vers un régime pluvio-nival avec une répartition statistique différentes des débits (débits médians plus faibles et débits extrêmes plus élevés) mènerait à une augmentation de la largeur active du lit et aux migrations latérales de celui-ci. **Des stocks importants de sédiments peuvent être présents en fond de vallée, leur remobilisation pouvant mener à des augmentations de mobilité du lit indépendamment des apports de versants.**

Enfin, l'évolution de la présence et du type de végétation à proximité des lits actifs de rivières torrentielles (causes pas forcément climatiques) est un facteur pouvant également avoir un effet non négligeable sur l'évolution de leur morphologie (contraction ou expansion).

Quelques travaux de modélisation à long terme ont exploré les effets du changement climatique sur les évolutions morphologiques précitées. Ceux-ci présentent des degrés élevés d'incertitude, sont peu nombreux et ne sont pour le moment pas généralisables à l'ensemble des territoires de montagne.

Les analyses de bases de données d'évènements sont, à notre connaissance, **moins nombreuses que pour les laves torrentielles.** Les travaux détaillés sur la base de données autrichienne (1962 à 2017) ne montrent pas de tendance statistiquement significative sur la fréquence ou la magnitude (Figure 7). Comme pour les laves torrentielles, cette absence d'augmentation des dommages liés aux crues torrentielles malgré une augmentation des forçages météorologiques et l'augmentation de l'exposition, est attribuée à **une augmentation concomitante des ouvrages de protection, rappelant leurs effets primordiaux.**

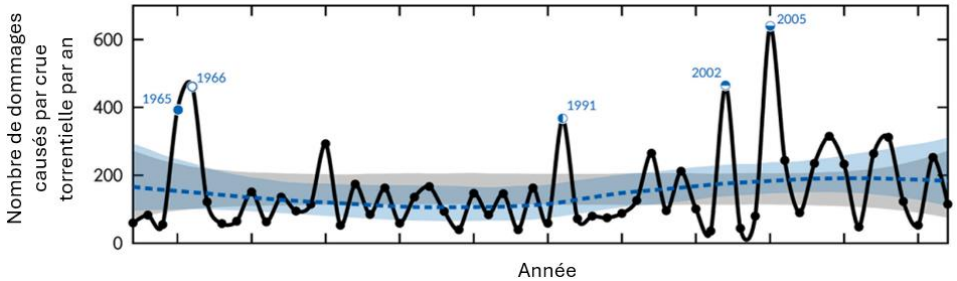

Figure 7 : Evolution du nombre de dommages causés par crues torrentielles par an en Autriche sur la période 1967-2017 d'après l'analyse d'une base de données homogène de 12 000 évènements (Schlogl et al. 2021).

5. Synthèse

Les crues rencontrées en montagne sur les torrents et rivières torrentielles sont **spécifiques et souvent bien différentes de celles rencontrées sur les cours d'eau fluviaux de plaine.** Ainsi, l'évolution des crues liées à ces cours d'eau de montagne en lien avec le changement climatique **nécessitent une analyse spécifique.**

Les crues torrentielles sont très compliquées à évaluer (même dans un climat stationnaire) :

- Elles sont **multifactorielles** (eau et matériaux solides) et incluent un ensemble de processus complexes ;
- **Les connaissances** sur les principaux processus **restent limitées** malgré plusieurs décennies de recherche ;
- Les modélisations/approches quantitatives reliant **forçage météorologique et aléa torrentiel sont très incertaines.**

Dans ces conditions, malgré l'existence de quelques résultats, des projections quantifiées en climat futur ne sont pas systématiquement disponibles - avec des niveaux de confiance suffisant pour permettre leur utilisation directe en ingénierie - comme pour les projections de crues liquides de rivières de plaine de type Explore 2.

Concernant les précurseurs et la connaissance des processus (forçage hydrologique, disponibilité sédimentaire et leurs liens), nous retenons :

1) **Une augmentation des précipitations extrêmes en région Méditerranéenne et dans les Alpes du Sud en automne** et plutôt une diminution des précipitations extrêmes d'hiver dans les Alpes du Nord. Plusieurs études suggèrent une **intensification des pluies courtes (orages)** mais les observations sur un temps suffisamment long sont rares ;

2) **Une élévation de la limite pluie-neige**. Les épisodes de pluie sur neige concernent des altitudes de plus en plus élevées, et sont de plus en plus précoces aux altitudes élevées, tandis que l'enneigement au sol se réduit ;

3) **L'apparition de lacs glaciaires** favorisée par le réchauffement en cours. Certains de ces lacs peuvent produire des crues par vidange/surverse. C'est aussi le cas des poches d'eau, dont l'évolution dans le contexte du changement climatique est beaucoup plus incertaine ;

4) Une **réponse contrastée** concernant **l'activité torrentielle des cours d'eau** selon qu'ils soient **limités ou non par le stock de matériaux mobilisables** :

    a. **Evolution concomitante de l'activité torrentielle** directement en lien avec celle du forçage météorologique pour les **bassins sans limitation du stock de matériaux mobilisables** ;

    b. **Evolution plus contrastée** pour les bassins avec **un stock de matériaux mobilisables limité** ;

5) Une **réponse contrastée** concernant **l'activité torrentielle des cours d'eau** selon **l'altitude des bassins versants :**

    a. **Tendance à l'augmentation transitoire de l'activité torrentielle des torrents et des rivières torrentielles** en aval, sans que cela ne soit généralisé,

pour les bassins versant possédant des formes glaciaires/périglaciaires (tête de bassin généralement supérieure à 2500 m d'altitude) ;

b. **Evolution plus contrastée ou inexistante** selon l'évolution des forçages météorologiques et l'état du stock de matériaux préexistant dans les torrents et rivières torrentielles pour les bassins versants plus bas en altitude.

Concernant les observations des crues torrentielles, nous retenons :

1) Une tendance à l'**augmentation** de la fréquence des laves torrentielles dans certaines études, et des tendances **non significatives** selon d'autres études ;

2) Une tendance peu étudiée pour les crues de charriage sur les torrents, et une tendance contrastée pour les crues de charriage sur les rivières torrentielles.

Malgré ces tendances contrastées, nous notons une augmentation des évènements torrentiels recensés à l'échelle nationale **dans la BDRTM au cours des dernières décennies**, sans que les effets des sources de la base de données n'aient été analysés finement ni que cette augmentation n'ait été formellement associée au changement climatique pour le moment (plutôt qu'à des changements de pratique dans le relevé des évènements ou à la présence d'enjeux plus nombreux ; c'est un travail futur à engager).

Conclusion :

En conclusion de cette synthèse, bien que les tendances sur l'activité torrentielle soient contrastées dans les études valorisant les observations des crues, il nous semble que les évolutions des précurseurs/processus favorisant une augmentation de l'activité torrentielle (apports sédimentaires en haute montagne, précipitations, élévation de la limite pluie neige, apparition de lacs glaciaires) seront généralement plus impactantes que les évolutions favorisant une diminution de celle-ci (végétalisation, déconnexion des sources sédimentaires). Ainsi, sauf exception locale dument justifiée, la prudence nous incite à considérer les phénomènes torrentiels au mieux comme stables, et plus vraisemblablement en augmentation dans un contexte du changement climatique. Les éléments formulés dans le présent paragraphe **peuvent être considérés comme une synthèse à dire d'expert** basée sur les métiers/expériences des rédacteurs et la bibliographie, plutôt que sur une réelle analyse quantitative.

Le changement climatique a dans le présent, et aura dans le futur, des effets non négligeables sur les crues torrentielles. Ces effets sont délicats à prédire de manière quantitative et sont aujourd'hui peu/pas intégrés à la prévention des risques pour les territoires de montagne en France. Ils auront très certainement **un impact fort sur les territoires de montagne.** Dans ce contexte, **il semble important d'améliorer les connaissances et les méthodes sur la caractérisation de ces crues et sur leur évolution à venir avec le changement climatique.**

6. Références mobilisées pour la rédaction de cette note

Allamano et al. (2009). **Global warming increases flood risk in mountainous areas**, Geophys. Res. Lett., 36, L24404, doi: https://doi.org/10.1029/2009GL041395

Bakker et al. (2018). **Combined flow abstraction and climate change impacts on an aggrading Alpine river.** Water Resources Research, 54, 223–242. https://doi.org/10.1002/2017WR021775

Bard et al. (2012). **Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin.** La Houille Blanche, 98. https://doi.org/10.1051/lhb/2012006

Bard et al. (2015). **Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers.** Journal of Hydrology, 529, 1823-1837. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.052

Beniston and Stoffel (2016). **Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 °C and decrease thereafter.** Science of the Total Environment, 571:228-36. https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.146

Bertola et al. (2023). **Megafloods in Europe can be anticipated from observations in hydrologically similar catchments**. *Nat. Geosci.* **16**, 982–988. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01300-5

Blanchet et al. (2021). **Explaining recent trends in extreme precipitation in the Southwestern Alps by changes in atmospheric influences.** Weather and Climate Extremes, https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100356

Bisquert et al. (2025). **La base de données événementielles RTM pour la connaissance des risques naturels en montagne : L'exemple du département de l'Isère (France).** Revue de Géographie Alpine, https://journals.openedition.org/rga/13719

Bovis and Jakob. (1999). **The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity.** ESPL. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199910)24:11<1039::AID-ESP29>3.0.CO;2-U

Cache et al. (2023). **Increased erosion in a pre-Alpine region contrasts with a future decrease in precipitation and snowmelt.** Geomorphology, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108782

Castellarin and Pistocchi, (2012), **An analysis of change in alpine annual maximum discharges: implications for the selection of design discharges**. Hydrol. Process., 26: 1517-1526. https://doi.org/10.1002/hyp.8249

Comiti et al. (2019). **Glacier melt runoff controls bedload transport in Alpine catchments.** Earth and Planetary Science Letters. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.05.031

Creutin et al. (2022). **Reported Occurrence of Multiscale Flooding in an Alpine Conurbation over the Long Run (1850–2019).** Water, 2022, 14 (4), pp.548. https://doi.org/ff10.3390/w14040548f

Dallan et al. (2021). **Enhanced Summer Convection Explains Observed Trends in Extreme Subdaily Precipitation in the Eastern Italian Alps.** Geophysical Research Letters, https://doi.org/10.1029/2021GL096727

Davidson and Eaton (2018). **Beyond Regime: A Stochastic Model of Floods, Bank**

Erosion, and Channel Migration. Water Resources Research. https://doi.org/10.1029/2017WR022059

Essery et al. (2020). **Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models.** The Cryosphere, https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020

Giorgi et al. (2016). **Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming.** Nature Geoscience, https://www.nature.com/articles/ngeo2761

Goss (2021), **Glacier retreat and fluvial landscape response,** Univ. Calgary (Ms Thesis), http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.15931.49446

Heiser et al. (2022). **Repose time patterns of debris-flow events in alpine catchments.** ESPL. https://doi.org/10.1002/esp.5533

Hirschberg et al. (2021). **Climate change impacts on sediment yield and debris flow activity in an Alpine catchment.** Journal of Geophysical Research: Earth Surface, https://doi.org/10.1029/2020JF005739

Hock et al. (2019). **High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner et al.].** Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131-202. https://doi.org/10.1017/9781009157964.004

Hodgkins, et al. (2017). **Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe**, Journal of Hydrology (2017), doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027

INRAE (2023). **ALEACLIM : Réponse des aléas de montagne au changement climatique.** Programme MTECT (DGPR/SRNH) : Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques.

Jacquemart et al. (2024). **Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps.** Earth Science Reviews, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104886

Jomelli (2018). **Évolutions dans un climat changeant, approche par phénomène : les laves torrentielles. In : Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique [ONERC].** https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/ONERC_Rapport_2018_Evenements_meteorologiques_extremes_et_CC_WEB.pdf

Jomelli et al. (2019). **Respective influence of geomorphologic and climate conditions on debris-flow occurrence in the Northern French Alps.** Landslides, 16, 1871-1883, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.025

Kiefer et al. (2021). **A 4000-year debris flow record based on amphibious investigations of fan delta activity in Plansee (Austria, Eastern Alps).** Earth Surface Dynamics. https://doi.org/10.5194/esurf-9-1481-2021

Köplin et al. (2014), **Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change.** Hydrol. Process., 28: 2567-2578. https://doi.org/10.1002/hyp.9757

Lane et al. (2016). **Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession.**

Geomorphology, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.015

Lejeune et al. (2019). **57 years (1960–2017) of snow and meteorological observations from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325m of altitude).** Earth System Science Data, https://doi.org/10.5194/essd-11-71-2019

Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R., **Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe**, Journal of Hydrology (2014), doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003

Mancini et al. (2024). **Rates of Evacuation of Bedload Sediment From an Alpine Glacier Control Proglacial Stream Morphodynamics.** Journal of Geophysical Research: Earth Surface. https://doi.org/10.1029/2024JF007727

Moran-Tejeda et al. (2016). **Rain-on-snow events in Switzerland: recent observations and projections for the 21st century.** Climate Research, 71 :111-125. https://doi.org/10.3354/cr01435

Musselman et al. (2018). **Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America.** Nature Climate Change. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0236-4

Paquet (2024). **A detailed stationarity analysis and trend modelling of French daily precipitations.** IMSC 2024, Toulouse

Pavlova et al. (2014). **Debris flow activity related to recent climate conditions in the French Alps: A regional investigation.** Geomorphology, 219 : 248-259. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.025

Peleg et al. (2019). **Temperature effects on the spatial structure of heavy rainfall modify catchment hydro-morphological response.** Earth Surf. Dynam, https://doi.org/10.5194/esurf-8-17-2020

Piermattei et al. (2023). **Evolution of an Alpine proglacial river during 7 decades of deglaciation**. Earth Surf. Dynam, https://doi.org/10.5194/esurf-11-383-2023

Qie et al .(2024). **A supply-limited torrent that does not feel the heat of climate change.** Nature Communication. https://doi.org/10.1038/s41467-024-53316-z

Ribes et al. (2019). **Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean.** Climate Dynamics, https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2

Schlögl et al. (2021). **Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures**. Climate Risk Management, https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294.

Schmocker-Fackel and Naef (2010). **Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500**, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1581–1594, https://doi.org/10.5194/hess-14-1581-2010.

Stoffel et al. (2024). **Climate Change Effects on Debris Flows. In : Advances in Debris-flow Science and Practice [Jakob et al.].** Geoenvironmental Disaster Reduction, https://doi.org/10.1007/978-3-031-48691-3

Wilhelm et al. (2022). **Impact of warmer climate periods on flood hazard in the European Alps.** Nature Geoscience, https://doi.org/10.1038/s41561-021-00878-y