

Précipitations ponctuelles extrêmes

Résumé

Les cartes des précipitations ponctuelles extrêmes illustrent les hauteurs enregistrées lors d'événements rares de forte intensité dans le climat actuel. Les analyses peuvent être représentées pour des périodes de retour (ou de récurrence) de 2 à 300 ans. Pour l'heure, seuls les résultats pour des cumuls extrêmes sur 72, 48, 24, 12 et 6 heures et 180, 60, 10, 5 et 2 minutes sont disponibles, mais des analyses seront intégrées ultérieurement pour d'autres durées. Pour chaque cellule de la grille, il est possible d'afficher un tableau indiquant les niveaux de retour au centre de la cellule (médiane et marge d'incertitude). Notons que l'échelle de couleurs varie selon les différentes durées d'accumulation des précipitations. Les indications figurant au chapitre 4 du texte d'accompagnement devraient en outre être prises en compte lors de l'interprétation.

Auteures et auteur : Sophie Fukutome¹, Sonia Alouini^{1,2}, Christoph Frei¹

¹ Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse, Operation Center 1, CH-8058 Zurich-Aéroport

² Center for Climate Systems Modeling C2SM, ETH Zurich, Zurich

1 Introduction

Les hauteurs de précipitations qui peuvent résulter d'événements rares de forte intensité constituent des informations fondamentales, par exemple lorsqu'il faut évaluer les risques de catastrophes naturelles ou dimensionner des systèmes d'évacuation des eaux. Ces informations sont déduites de longues séries de mesures et fournies sous la forme de niveaux de retour associés à des périodes de retour déterminées. Le niveau de retour pour la période de retour T est défini comme la hauteur de précipitations dépassée avec une probabilité de $1/T$ au cours d'une année. Le terme de « précipitations » désigne ici les chutes aussi bien de pluie que de neige.

Pour la Suisse, de nombreuses informations sur les hauteurs de précipitations extrêmes sont disponibles pour des stations avec de longues séries de mesures. Elles sont publiées sur le site internet climate-extremes.ch pour des durées d'accumulation des précipitations allant de 10 minutes (67 stations) à 5 jours (341 stations) [1, 2]. Cependant, étant donné la variation rapide du climat sur de courtes distances horizontales, ces informations limitées à l'emplacement des stations ne suffisent pas, car elles ne sont pas en mesure de représenter adéquatement le climat en un point quelconque de la Suisse. Les cartes présentées ici comblent cette lacune en fournissant des informations sur les niveaux de retour à l'échelle nationale, en chaque point d'une grille avec une résolution d'environ 1 km. Les représentations spatiales sont elles aussi fondées sur les séries chronologiques de stations pluviométriques, mais l'inclusion de données provenant de l'ensemble du réseau de mesure permet d'estimer les niveaux de retour entre les stations. Du fait de l'interpolation spatiale, les estimations figurant sur les cartes sont sujettes à une incertitude supplémentaire par rapport à celles obtenues aux stations.

Des cartes des précipitations ponctuelles extrêmes en Suisse ont déjà été publiées dans l'Atlas hydrologique de la Suisse dans les années 1990 [3, 4]. Les résultats représentés ici reposent sur des séries de données plus récentes et d'une qualité plus fiable. La méthode d'analyse utilisée a aussi été modernisée : les hypo-

thèses sous-tendant le modèle statistique sont plus crédibles, les effets topographiques à fine échelle sont pris en compte, et les incertitudes sont représentées quantitativement. Les différences entre les cartes représentées ici et les cartes plus anciennes sont traitées au chapitre 5.

Les cartes de niveaux de retour sont actuellement disponibles pour les précipitations sur 72, 48, 24 et 12 heures et sur 180, 60, 10, 5 et 2 minutes, et ce pour neuf périodes de retour, allant de 2 à 300 ans. Les évaluations couvrent le territoire de la Suisse hydrologique et incluent également des séries de données des pays limitrophes. Les cartes pour d'autres durées de précipitations seront intégrées dans la plateforme de données et d'analyse de l'Atlas hydrologique de la Suisse dès que les données auront été traitées.

2 Données et méthodologie

Les données utilisées pour établir les cartes dépendent du réseau de mesure disponible pour la période considérée et de l'ampleur du contrôle de qualité. MétéoSuisse enregistre les observations à des intervalles de 10 minutes et d'un jour (quotidiennement à 06h00 UTC). Le contrôle de qualité dépend de la disponibilité d'informations indépendantes et est donc le plus complet pour les observations journalières, suivi des agrégations horaires (toutes les heures à l'heure pleine). Même lorsque des observations sont disponibles toutes les 10 minutes, les résultats sont plus fiables lorsqu'ils sont basés sur des observations horaires. De ce fait, la création de cartes pour 60 et 180 minutes ainsi que pour 6 et 12 heures est basée sur des observations horaires, tandis que les cartes pour des durées de 24, 48 et 72 heures utilisent des cumuls de précipitations sur 1 jour. Voir la section 2.3 pour les conséquences pour l'estimation et la convention de dénomination. Le tableau 1 présente une liste du nombre de stations, de la durée maximale observée et du nombre minimum d'années prises en compte pour les différentes durées. Les données sous-tendant les cartes pour 60 minutes et 24 heures sont décrites en

| Durée | Région | Nombre de stations | Nombre min. d'années | Période de référence |
|------------------------------|----------|--------------------|----------------------|----------------------|
| 10 minutes | Suisse | 70 | 20 | 1981–2023 |
| | Etranger | 88 | 10 | |
| 60 minutes | Suisse | 69 | 15 | 1981–2020 |
| | Etranger | 100 | 10 | |
| 180 minutes, 6, 12 heures | Suisse | 71 | 15 | 1981–2023 |
| | Etranger | 112 | | |
| 24, 48, 72 heures | Suisse | 418 | 30 | 1961–2020 |
| | Etranger | 78 | | |

Tableau 1. Données utilisées pour l'analyse spatiale des valeurs extrêmes pour chaque durée (10, 60, 180 minutes, 6, 12, 24, 48, 72 heures) ; pour les durées de 2 et 5 minutes, aucune observation n'est disponible.

détail ci-dessous, car elles sont représentatives des données infra- et supra-journalières, respectivement. Puisque 10 minutes est l'intervalle de mesure le plus court qui soit disponible sur un nombre d'années suffisant, une méthode différente a été utilisée pour produire les cartes de niveaux de retour de 5 et 2 minutes. Les durées de cumul de 10 minutes et plus sont soumises à une analyse statistique spatiale complexe, tandis que les durées de cumul très courtes sont extrapolées indirectement à partir de la carte de 10 minutes.

2.1 Données

L'analyse spatiale des précipitations sur 60 minutes se base sur les données relevées pendant la période 1981–2020 à 69 stations de MétéoSuisse et 100 stations situées dans les pays limitrophes. Pour être sélectionnées, les stations devaient avoir effectué des mesures durant au moins 15 ans en Suisse et au moins 10 ans dans les pays voisins. Pour les précipitations sur 24 heures en revanche, l'analyse utilise les données relevées pendant la période 1961–2020 à 418 stations de MétéoSuisse et 78 stations des pays avoisinants (avec une longueur minimale des séries de mesures de 30 ans). Les valeurs mesurées avant 1961 ont été délibérément omises afin de limiter l'influence possible des variations du climat sur le long terme. [5]. Les données ont fait l'objet d'un contrôle de qualité, avec des exceptions pour celles provenant des pays limitrophes, mais elles n'ont pas été corrigées pour les erreurs de mesure systématiques. Ces dernières sont cependant relativement faibles pour les fortes précipitations et pour les événements se produisant principalement en été et en automne [6].

2.2 Analyse spatiale

La méthode utilisée pour l'analyse spatiale est décrite en détail dans [7]. Nous résumons simplement ici les grandes lignes de la procédure. La méthode repose sur la modélisation de « maxima par bloc » avec la « distribution généralisée des valeurs extrêmes » (GEV) (p. ex. [8]), une approche de l'analyse des valeurs extrêmes très répandue. Cependant, ce sont ici les maxima saisonniers qui sont modélisés, et non pas les maxima annuels comme c'est généralement le cas. Il est ainsi possible de dissocier les fortes précipitations de nature différente et donc de mieux satisfaire aux conditions théoriques de l'analyse des valeurs ex-

trêmes. Les résultats stratifiés par saison sont ensuite combinés en une distribution pour les maxima annuels. Seuls ces résultats annuels sont visualisés sur la plateforme de données et d'analyse. Des cartes représentant des niveaux de retour pour chaque saison figurent sur climate-extremes.ch et, à titre d'exemple, au chapitre 3.

Dans l'analyse spatiale des valeurs extrêmes, les paramètres de la distribution GEV sont considérés comme des champs spatiaux, eux-mêmes étant chacun une réalisation (non observée) d'un modèle stochastique (champ aléatoire gaussien, GRF). Les deux composantes stochastiques, GEV et GRF, sont couplées dans le cadre d'un modèle bayésien hiérarchique avec une vraisemblance composite (composite-likelihood) et tous les paramètres sont estimés à l'aide d'un algorithme de Monte-Carlo par chaînes de Markov [9, 10, 11, 7].

L'application à la Suisse de cette modélisation spatiale des valeurs extrêmes présente trois précieux avantages. (1) La méthode permet d'intégrer des informations supplémentaires sur les fines variations de la distribution spatiale (champs prédictors) et, ainsi, de mieux représenter les effets de la topographie ainsi que les différences entre les régions climatiques. (2) Grâce à l'estimation simultanée à partir des données de l'ensemble des stations, l'analyse est alimentée en informations provenant de tout le réseau de mesure pour chaque lieu, ce qui permet de réduire les incertitudes. (3) L'inférence bayésienne qui est utilisée fournit une estimation probabiliste complète, c'est-à-dire une distribution de probabilité pour chaque niveau de retour. Cette distribution estimée livre des informations détaillées sur le degré d'incertitude (voir aussi [7] et chapitre 4).

La plateforme de données et d'analyse met à disposition les quantiles caractérisant la distribution estimée. Les cartes montrent la médiane (quantile 50 %). Les tableaux qui s'affichent lorsque l'on clique sur la carte fournissent les quantiles 2.5 %, 50 % et 97.5 % de la distribution estimée. L'intervalle entre les quantiles 2.5 % et 97.5 % indique l'intervalle de confiance à 95 % de l'estimation.

2.3 Correction d'échantillonnage

En hydrologie, on sait depuis longtemps que les valeurs de retour sur 24 heures estimées à partir des mesures journalières des précipitations – accumulées

entre 6h00 UTC et 6h00 UTC le lendemain – sont sous-estimées [12, 13]. En effet, un événement durant 24 heures qui commence avant 6h00 UTC sera enregistré sous forme de deux valeurs journalières plus faibles, ce qui conduit à des valeurs maximales saisonnières ou annuelles plus faibles.

Ici, en raison du nombre plus important de stations journalières et du contrôle de qualité plus complet, l'analyse statistique pour les 24 heures a été effectuée avec les précipitations journalières, et non pas avec des cumuls sur 24 heures « glissants » toutes les heures. Pour obtenir les niveaux de retour des cumuls de précipitations sur 24 heures glissants, les paramètres GEV des analyses saisonnières ont été corrigés. La correction résulte d'une régression linéaire aux stations à données horaires, les paramètres de la GEV ayant été estimés pour les deux échantillonnages, glissant et fixe. En fonction de la saison, la distribution se trouve ainsi décalée vers des valeurs légèrement plus élevées (voir aussi [14]). De la même façon, les cartes pour 2 et 3 jours ont été corrigées afin d'obtenir des cartes pour 48 et 72 heures respectivement.

Une approche similaire a été utilisée pour les cumuls d'une heure et 3 heures, car les échantillons horaires, eux aussi, divisent les événements en cumuls plus petits et conduisent à une sous-estimation des valeurs de retour. Comme pour les précipitations journalières, le modèle a d'abord été ajusté aux cumuls sur 1 heure et 3 heures, puis les paramètres GEV ont été corrigés pour imiter une fenêtre glissante de 60 et 180 minutes respectivement. Comme la correction estimée diminue rapidement avec la durée de cumul, aucune correction n'a été nécessaire pour les modèles saisonniers des précipitations sur 6 et 12 heures.

Il convient de noter que l'échantillonnage des précipitations sur 10 minutes à des intervalles fixes (HH :10, HH :20, etc.) conduit à une sous-estimation similaire. Cependant, comme il n'existe pas de durées de mesure plus courtes, la correction ne peut pas être estimée.

Nous distinguons désormais les agrégations non corrigées et corrigées selon la convention suivante : pour les durées comprises entre 1 heure et 12 heures, x heure(s) signifie que les valeurs sont conventionnelles, tandis que x minutes signifie que les valeurs sont corrigées. Ainsi, les précipitations sur 180 minutes sont corrigées, contrairement à celles sur 3 heures.

Pour les durées supérieures ou égales à 1 jour (1 à 3 jours), les précipitations sur « x jour(s) » sont conventionnelles, tandis que les précipitations sur « x heures » sont corrigées. Ainsi, les précipitations sur 48 heures sont corrigées, mais les précipitations sur 2 jours ne le sont pas.

2.4 Extrapolation à des durées non observées

La méthode d'extrapolation utilise la relation entre les cumuls de précipitations de différentes durées pour déduire les paramètres GEV pour les précipitations sur 5 et 2 minutes à partir de ceux pour les précipitations sur 10 minutes. Ainsi, pour chaque saison, les

paramètres GEV pour les cumuls sur 10 minutes à chaque point de la grille sont multipliés par un facteur. Les valeurs de retour annuelles sont ensuite déterminées à partir des distributions GEV saisonnières, comme pour les analyses spatiales des durées de précipitations observées. Le facteur de multiplication (appelé « Simple Scaling » dans la littérature [15, 16]) est supposé proportionnel au rapport entre les durées (par exemple 5/10), l'exposant dépendant du site et de la saison. L'exposant est estimé séparément pour chaque station sur la base du rapport entre les cumuls de précipitations sur 10 et 20 minutes, puis interpolé sur une grille de 1 km à l'aide d'une méthode de krigage à covariable unique, en ce cas la région (nord, Alpes ou sud).

Les détails de cette méthode sont disponibles dans la documentation méthodologique sur l'extrapolation des précipitations sur 2 et 5 minutes aux stations sous [1].

3 Résultats

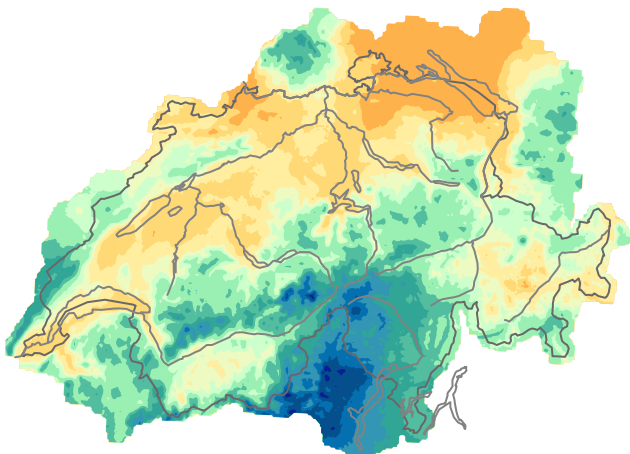
En Suisse, les précipitations extrêmes se répartissent de manière très irrégulière sur le territoire et entre les saisons, et il y a des différences nettes entre les précipitations sur 60 minutes et sur 24 heures (figure 4, en bas).

Par exemple, les niveaux de retour centennaux des précipitations sur 24 heures sont cinq fois plus élevés dans l'ouest du Tessin (420 mm) qu'en Valais au fond de la vallée du Rhône (90 mm). La région la plus ensoleillée de Suisse est donc aussi celle qui enregistre les précipitations les plus fortes. Au nord de la crête principale des Alpes, les valeurs les plus élevées se trouvent le long des Préalpes centrales et orientales ainsi que dans l'ouest du Jura (vallée de Joux).

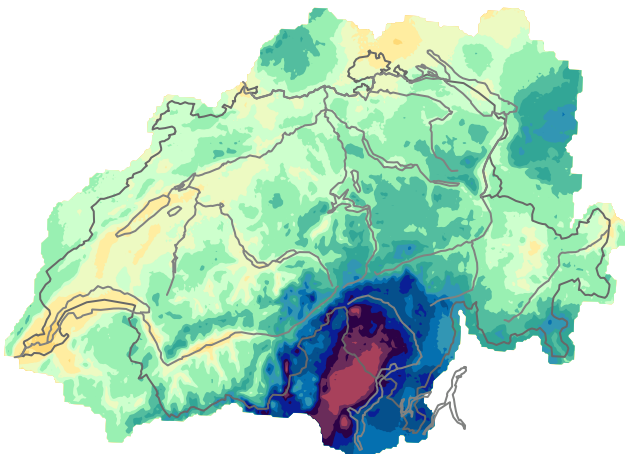
Le régime saisonnier (figure 1) montre que le long des Préalpes septentrionales, les précipitations extrêmes sur 24 heures se produisent surtout en été. Des orages locaux, mais aussi des événements atmosphériques dynamiques à grande échelle accompagnés d'un important transport d'humidité et un fort soulèvement de masses d'air (comme en août 2005 [17]), y contribuent. Au sud de la crête des Alpes, les précipitations extrêmes sur 24 heures surviennent du printemps à l'automne, les niveaux de retour dans l'ouest du Tessin étant les plus élevés en automne. En Valais, les niveaux de retour sont plus bas en été que pendant le reste de l'année. Dans l'ouest du Jura, les Alpes vaudoises, les Alpes du nord du Valais et dans l'Oberland bernois, c'est en hiver que les événements sont les plus forts.

La distribution spatiale des fortes précipitations d'une durée de 60 minutes s'écarte considérablement de celle des précipitations sur 24 heures (voir aussi [18]). Elle se répartit de manière beaucoup plus uniforme dans toute la région au nord de la crête des Alpes et le contraste nord-sud est nettement moins prononcé. On dénote également des différences marquées dans le régime saisonnier (figure 2) par rapport aux précipitations sur 24 heures. Les événements les plus forts se produisent avant tout durant l'été. Les niveaux de

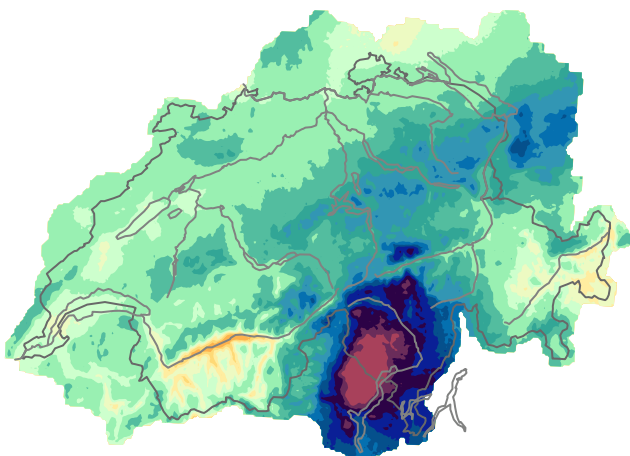
Hiver (décembre, janvier, février)



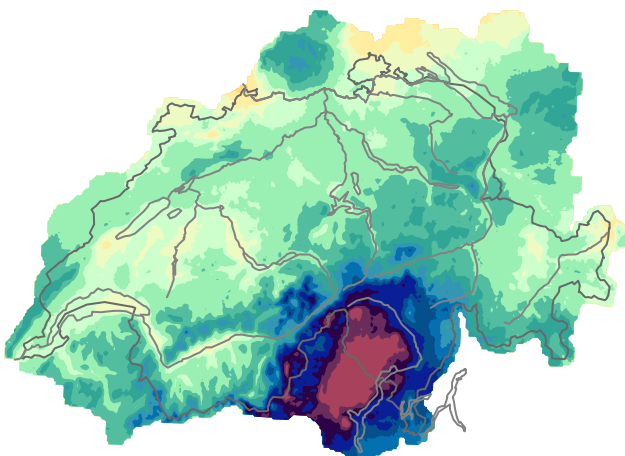
Printemps (mars, avril, mai)



Eté (juin, juillet, août)



Automne (septembre, octobre, novembre)



Niveau de retour des précipitations sur 24 heures

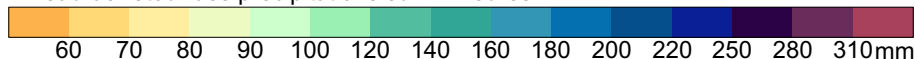


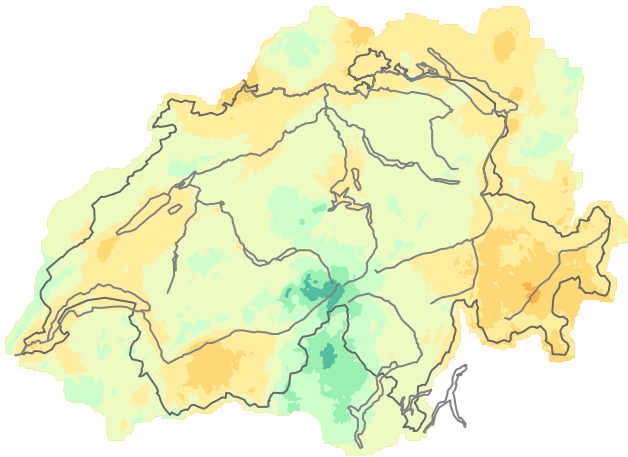
Figure 1. Niveaux de retour centennaux des précipitations sur 24 heures en hiver, au printemps, en été, et en automne [mm/24 heures]

retour sont les plus élevés au Tessin durant toutes les saisons, sauf en hiver. Le Valais et l'Engadine enregistrent les extrêmes les plus faibles.

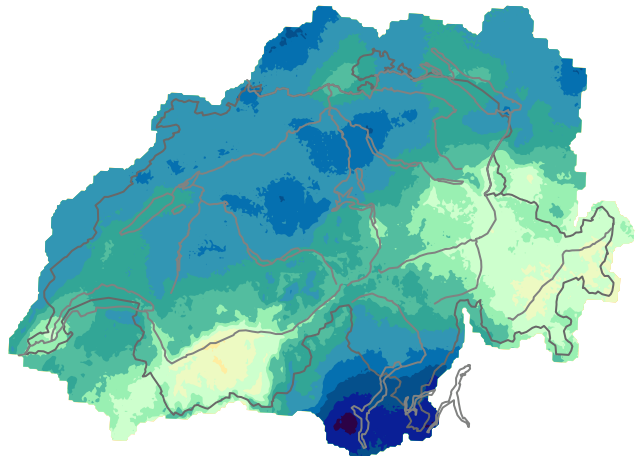
Les cartes saisonnières des valeurs de retour sur 6 heures (figure 3) illustrent les changements dans la répartition spatiale lorsque la durée des précipitations passe de 60 minutes à 24 heures. La transition varie d'une région à l'autre et n'est pas linéaire. Sur le Plateau, les valeurs extrêmes des précipitations sur 6 heures en hiver et au printemps présentent des caractéristiques similaires à celles des valeurs extrêmes sur 24 heures, mais avec une influence topographique atténuée. En été, la répartition spatiale rappelle plutôt les précipitations sur 60 minutes, les fortes précipitations s'étendant jusqu'à la plaine. En automne, certaines des caractéristiques topographiques des valeurs extrêmes sur 24 heures sont visibles dans le nord et l'ouest, mais la baisse d'intensité dans les Préalpes est similaire à celle des précipitations sur 60 minutes. Au Tessin, l'hiver se démarque par des caractéristiques similaires à celles des précipitations sur

60 minutes, mais avec des contrastes plus marqués. Au printemps, les valeurs les plus élevées se situent dans le sud, comme pour les extrêmes sur 60 minutes, mais le contraste est-ouest typique des périodes plus longues s'accroît. En été, les valeurs les plus élevées ne se situent plus dans le sud comme pour les courtes durées, mais n'atteignent pas la position des durées plus longues. Aussi, les deuxièmes valeurs les plus élevées se situent à la frontière orientale du Tessin, comme pour les extrêmes sur 60 minutes. En automne, les précipitations les plus extrêmes sont positionnées de manière similaire aux extrêmes sur 60 minutes, mais le fort contraste avec les valeurs enregistrées dans le reste de la Suisse est typique des longues durées. En Engadine, on observe le long de la frontière sud une bande avec une intensité accrue, en particulier au printemps et en automne, qui rappelle les valeurs extrêmes sur 24 heures. Le nord-est, quoique moins homogène que pour les valeurs extrêmes sur 60 minutes, est moins contrasté que pour les durées plus longues.

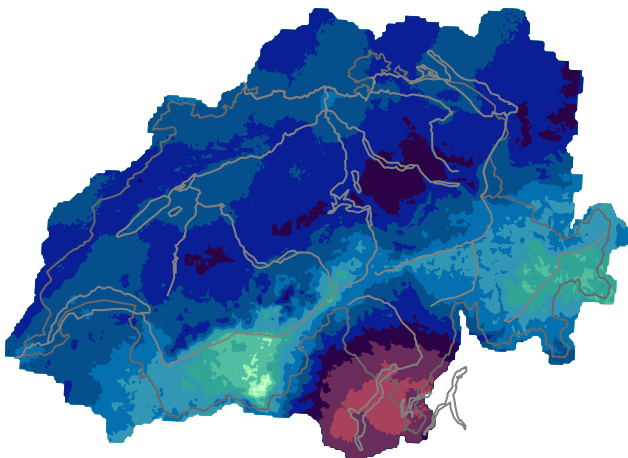
Hiver (décembre, janvier, février)



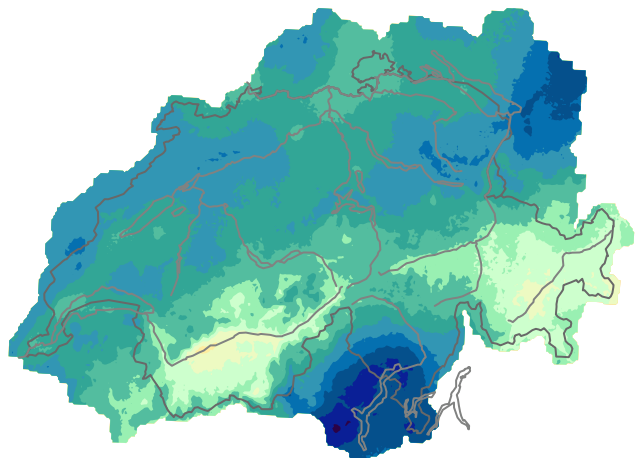
Printemps (mars, avril, mai)



Été (juin, juillet, août)



Automne (septembre, octobre, novembre)



Niveau de retour des précipitations sur 60 minutes

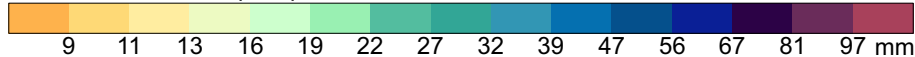


Figure 2. Niveaux de retour centennaux des précipitations sur 60 minutes en hiver, au printemps, en été, et en automne [mm/60 minutes]

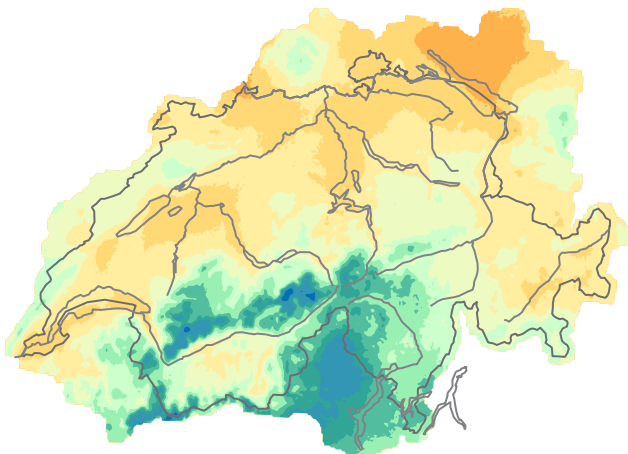
La saisonnalité des extrêmes dépend de leur durée. Pour les courtes durées, les valeurs de retour les plus élevées pour la plupart des points de grille se produisent en été et les plus faibles en hiver. Avec l'augmentation de la durée, cet écart diminue, tout comme l'écart entre les valeurs de retour des différentes saisons. Comparées aux autres saisons, les valeurs de retour en hiver augmentent fortement entre 60 minutes et 12 heures et sont même les plus élevées de l'année dans les hautes montagnes du Valais pour 6 et 12 heures. Alors qu'en automne, les valeurs de retour pour les courtes durées sont équivalentes à celles du printemps, elles sont plus élevées pour les durées plus longues et dépassent même les valeurs estivales dans le sud pour les durées de plus de 12 heures.

4 Interprétation et utilisation correctes

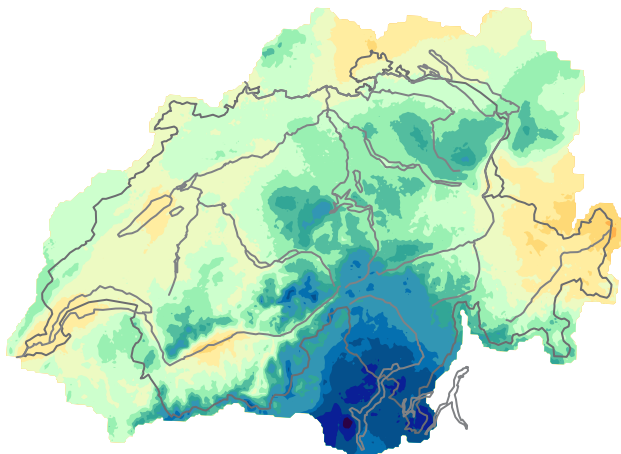
Pour interpréter correctement les niveaux de retour représentés, il est indispensable de tenir compte des indications suivantes :

- Les niveaux de retour décrivent la situation pour les précipitations ponctuelles. La valeur attribuée à une cellule de la grille décrit la situation au centre de la cellule, et non une valeur moyenne sur toute la cellule, la moyenne des précipitations extrêmes sur une région ne peut donc pas être déduite directement des cartes présentées ici. **En particulier, il n'est pas possible d'obtenir des statistiques sur les précipitations dans les bassins versants, par exemple en faisant la moyenne spatiale des valeurs des cellules de la grille**, car cela conduit à une sur-estimation des valeurs de retour. Une conversion au moyen des courbes de réduction publiées dans l'Atlas hydrologique de la Suisse sur papier pourrait fournir des informations sur les précipitations régionales extrêmes (planche 2.5 [19]). Des études plus récentes sont également disponibles [20].
- Même si la modélisation statistique employée s'appuie sur la distribution généralisée des va-

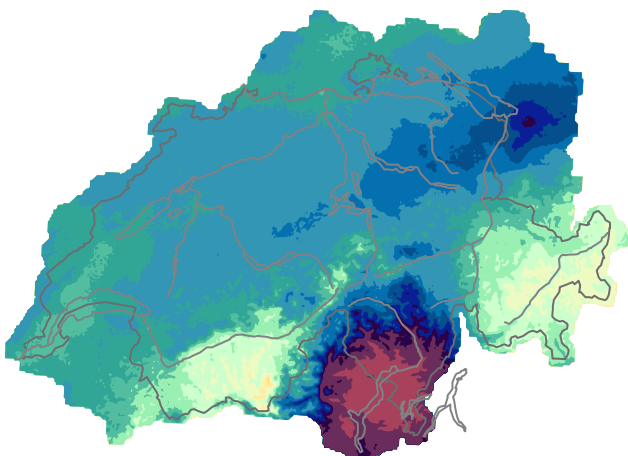
Hiver (décembre, janvier, février)



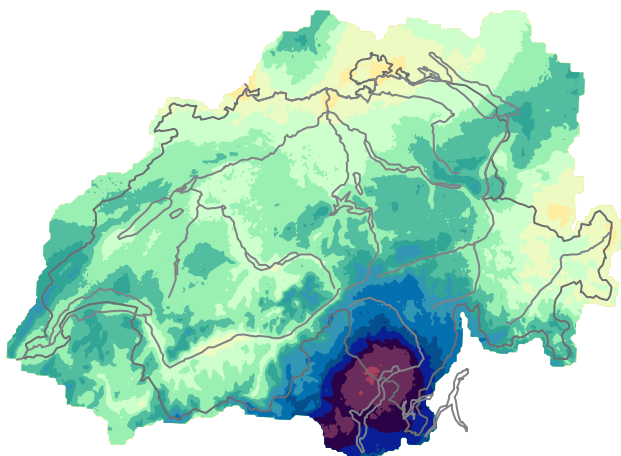
Printemps (mars, avril, mai)



Été (juin, juillet, août)



Automne (septembre, octobre, novembre)



Niveau de retour des précipitations sur 6 heures

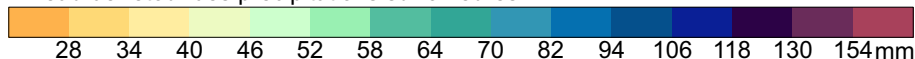


Figure 3. Niveaux de retour centennaux des précipitations sur 6 heures en hiver, au printemps, en été, et en automne [mm/6 heures]

leurs extrêmes (GEV), les niveaux de retour représentés en fonction de la période de retour n'obéissent pas à la loi de distribution généralisée des valeurs extrêmes. Il s'agit là d'une conséquence de l'analyse stratifiée par saison et de la méthode bayésienne utilisée pour l'estimation. Cela implique notamment que les niveaux de retour pour des périodes autres que celles fournies ne peuvent pas être interpolés ou extrapolés à l'aide d'une simple GEV. Il est vivement déconseillé de procéder à une telle interpolation ou extrapolation.

- Les estimations des hauteurs de précipitations d'événements rares sont forcément entachées d'incertitudes. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la période de retour est longue, et ce plus encore pour les lieux éloignés des stations de mesure. La représentation quantitative des incertitudes sous forme de distributions estimées est une composante essentielle des analyses présentées ici. Nous recommandons aux utilisateurs

de tenir compte de ces incertitudes dans leurs applications. Cette prise en compte conduit dans l'ensemble à des décisions plus solides, qui sont moins sensibles aux modifications de l'estimation, notamment lorsque de nouveaux événements de fortes précipitations sont inclus dans l'analyse. L'intervalle de confiance à 95 % peut être interprété de la manière suivante : le niveau de retour réel se situe à l'intérieur des deux limites de l'intervalle de confiance avec une probabilité de 95 %, en deçà de la limite inférieure de l'intervalle de confiance avec une probabilité de 2.5 %, et au-delà de la limite supérieure de l'intervalle de confiance avec une probabilité de 2.5 %. La médiane divise la distribution estimée en deux parties ayant chacune une probabilité de 50 %.

- Les analyses présentées sur la plateforme de données et d'analyse sont mises à jour au fur et à mesure, ce qui permet d'actualiser les estimations existantes par des données provenant

| minutes | 2 | 5 | 10 |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $l/s \cdot m^2$ | $\times 1/120$ | $\times 1/300$ | $\times 1/600$ |
| $l/s \cdot ha$ | $\times 10000/120$ | $\times 10000/300$ | $\times 10000/600$ |

Tableau 2. Facteurs de conversion des mm par durée (par exemple mm/5-minutes) en unités courantes pour le dimensionnement

d'événements plus récents et de perfectionner la méthodologie statistique. Les principales modifications sont consignées dans le présent document (voir chap. 6). Les nouvelles estimations se trouvent en général à l'intérieur de l'intervalle de confiance de 95 %, avec toutefois une probabilité de 5 % de se situer en dehors.

- Les niveaux de retour présentés sur la plateforme de données et d'analyse décrivent la situation dans le climat actuel (1961–2020 et 1981–2020 pour 60 minutes et 24 heures respectivement ; v. tab. 1 pour les autres durées). Il faut cependant partir du principe que la répartition de la fréquence des fortes précipitations changera en raison du changement climatique anthropique. L'analyse de simulations climatiques actuelles pour la Suisse indique une augmentation des niveaux de retour saisonniers pour les précipitations journalières $T = 10$ ans et $T = 100$ ans [21]. Pour un scénario ne prévoyant aucune réduction des émissions (RCP8.5), on s'attend à une augmentation de 10 à 25 % d'ici la fin du XXI^e siècle. Les incertitudes sont cependant considérables, surtout en ce qui concerne les changements en été. Il n'est pas encore possible d'estimer de façon fiable les effets du changement climatique sur les durées d'accumulation des précipitations infra-journalières ; il subsiste de très grandes incertitudes aussi bien pour les données d'observation que pour les modèles. Il existe toutefois des indices sérieux d'une augmentation des précipitations infra-journalières extrêmes dans la région alpine, tant dans les données d'observation que dans les projections climatiques pour l'avenir ([22, 23, 24]).
- Les valeurs de retour sont indiquées en mm par unité de durée. Les unités couramment utilisées pour les durées courtes sont $l/s \cdot m^2$ et $l/s \cdot ha$. Les facteurs de conversion à utiliser sont répertoriés dans le tableau 2.

5 Comparaison avec les planches HADES 2.4 et 2.4²

Les cartes B04 décrites ici pour les précipitations ponctuelles extrêmes d'une durée de respectivement 60 minutes et 24 heures, remplacent les planches 2.4 [3] et 2.4² [4] publiées dans l'ancien HADES analogue. La figure 4 compare les cartes anciennes et actuelles pour une période de retour de 100 ans (notez ici la convention de dénomination introduite dans la section 2.3).

Les anciennes planches montrent des champs relativement lisses, qui ont un rapport indéfini avec la réalité topographique et physique comme les vallées ou les massifs montagneux. La zone des précipitations les plus extrêmes, aussi bien sur 24 heures que sur une heure, décrit un arc partant du Tessin, traversant la crête des Alpes, et longeant les Préalpes jusqu'en Suisse orientale. Les extrêmes sont nettement plus petits dans le reste de la Suisse, surtout pour les précipitations sur 24 heures. Enfin, les analyses du passé sont parsemées de nombreux maxima et minima locaux qui coïncident avec les emplacements de stations (voir [3]), mais qui semblent physiquement peu plausibles. Les cartes B04 publiées ici (figure 4, 3^e rangée) affichent une structure beaucoup plus détaillée, avec des signatures topographiques clairement reconnaissables. L'arc des précipitations les plus fortes sur 24 heures présente une prolongation dans la région du Napf ainsi que des Alpes fribourgeoises et bernoises. Les vallées alpines et le Jura se distinguent clairement. La répartition spatiale des précipitations extrêmes sur 60 minutes présente des différences particulièrement marquées par rapport aux anciennes planches. Les anomalies dans le sud et le nord sont séparées, la septentrionale s'étendant tout le long des Préalpes et des parties plus élevées du Plateau. Pour les deux durées d'accumulation des précipitations, les niveaux de retour sur B04 sont en majeure partie supérieurs à ceux des anciennes planches, spécialement dans les Préalpes occidentales et le Plateau, mais également au Tessin.

Il y a plusieurs raisons pour les différences observées. D'une part, la qualité supérieure des données a probablement contribué à des évaluations plus solides. D'autre part, les conditions climatiques actuelles ont peut-être légèrement changé par rapport au passé. Il y a des indices dans ce sens pour les précipitations journalières d'intensité modérée avec des périodes de retour < 1 an [25] et pour les maxima annuels (analyse MétéoSuisse). L'importance et la forme des différences entre les cartes indiquent cependant que ce sont avant tout les progrès méthodologiques qui ont permis une représentation plus fiable des précipitations ponctuelles extrêmes. Voici une brève description des principales répercussions :

- L'application de la « statistique spatiale des valeurs extrêmes » pour B04 fait que l'analyse est toujours alimentée par des informations provenant de l'ensemble des stations. Cette méthode ne requiert pas d'analyse des valeurs extrêmes (univariée) préalable aux stations (comme c'était le cas pour les planches 2.4 et 2.4²) qui peut mener à des maxima et minima locaux (bull's eyes) peu plausibles en raison des incertitudes d'estimation.
- La modélisation à l'aide d'informations externes (co-variables) pour la carte B04, combinée avec l'application stratifiée par saison, peut expliquer plus de variance dans les données. Il en résulte une réduction de l'incertitude de l'analyse, ainsi que la possibilité de représenter davantage de

Planche HADES 2.4 [3]: Cumul des précipitations sur 24 heures

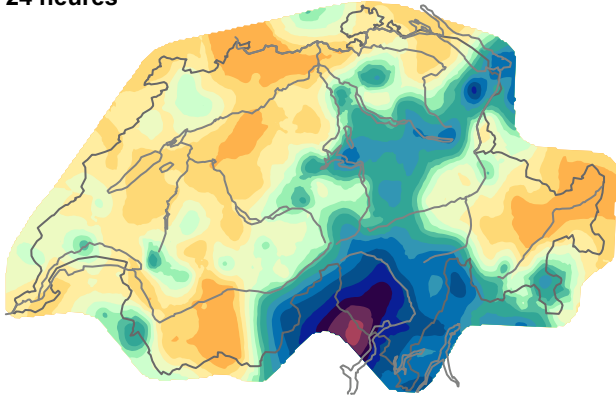


Planche HADES 2.4 [3]: Cumul des précipitations sur 1 heure

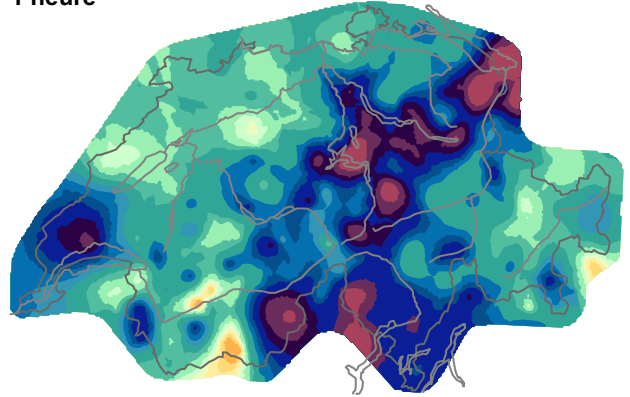


Planche HADES 2.4² [4]: Cumul des précipitations sur 24 heures

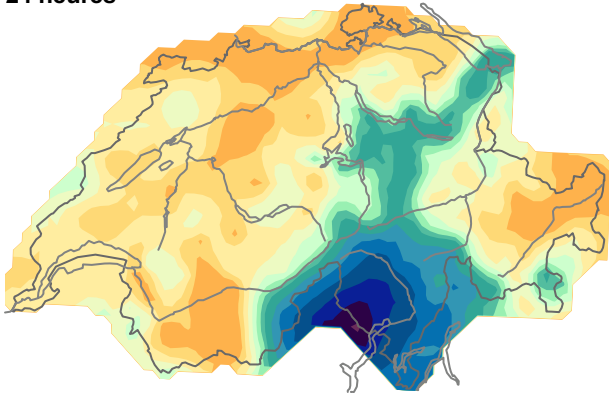
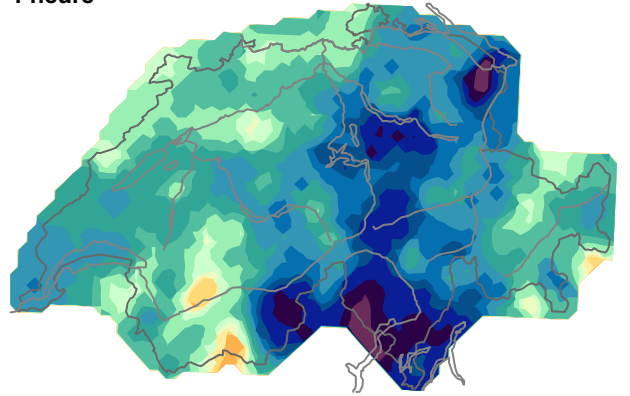
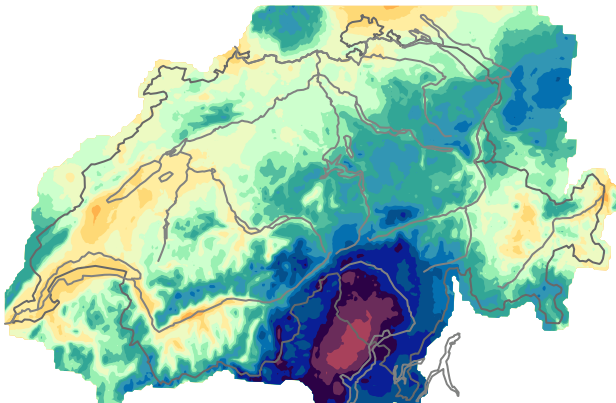


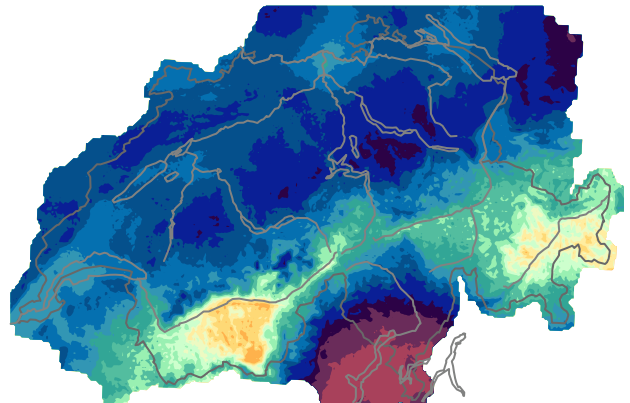
Planche HADES 2.4² [4]: Cumul des précipitations sur 1 heure



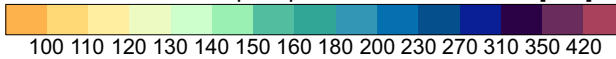
HADES B04: Cumul des précipitations sur 24 heures



HADES B04: Cumul des précipitations sur 60 minutes



Niveau de retour des précipitations sur 24 heures [mm]



Niveau de retour des précipitations sur 60 minutes [mm]



Figure 4. Comparaison des niveaux de retour centennaux pour les précipitations sur 24 heures (à gauche) et sur 1 heure / 60 minutes (à droite) tirée des planches HADES 2.4 (en haut), 2.4² (milieu), et B04 (en bas)

détails spatiaux. Il est probable que l'apparence « lisse » de la planche 2.4² soit liée au « biais conditionnel » découlant de la variance inexplicite des données. Le « biais conditionnel », la sous-estimation des pointes locales et la sur-estimation des creux locaux, sont des conséquences directes des incertitudes dans les analyses spatiales (p. ex. [26], [27]). Les niveaux de retour nettement inférieurs sur la planche 2.4² par rapport à B04 pour les régions enregistrant des extrêmes localement supérieurs (p. ex. Tessin, Préalpes, Jura) pointent nettement vers un tel effet.

- Pour les analyses horaires des planches 2.4 et 2.4², des maximums horaires annuels ont été extrapolés à partir des mesures journalières aux stations qui n'étaient pas équipées pour mesurer les précipitations à l'échelle infra-journalière. Cette façon de faire devrait expliquer la grande similitude de la répartition spatiale des extrêmes pour les deux durées d'accumulation des précipitations, et donc aussi les différences marquées avec B04. L'analyse sur 60 minutes de la carte B04, elle, est basée exclusivement sur des données mesurées.
- Certaines différences sont dues également à la conversion inégale de cumuls de précipitation fixes en cumuls glissants. Pour les anciennes planches, les résultats glissants sur 24 heures ont été estimés à partir des maxima annuels multipliés par le facteur 1.143 ([12]). Les résultats horaires, en revanche, n'ont pas été ajustés. Dans la carte B04, ces ajustements (voir section 2.3) ont été stratifiés par saison et faits directement sur les paramètres GEV, spécifiquement pour les conditions régnant en Suisse. Cette démarche est plus flexible, et tient compte du fait que la magnitude de la correction dépend de la période de retour.

Globalement, les analyses effectuées pour les nouvelles cartes B04 ont permis d'éliminer des défauts méthodologiques déterminants des anciennes planches. En outre, les informations quantitatives qui sont désormais disponibles sur les incertitudes apportent une grande plus-value. En effet, les incertitudes sont considérables pour les événements très rares et il est maintenant possible d'en tenir compte dans la pratique.

6 Versions

Tableau 3. Versions

| Version | Description |
|-------------|---|
| v1.0 (2018) | Première analyse pour les précipitations journalières. Suisse, grille de 2 km, 1961–2015. |
| v2.0 (2022) | Analyse pour les précipitations sur 24 heures et sur 60 minutes. Suisse hydrologique, en intégrant des données provenant des régions limitrophes, grille de 1 km, 1961–2020 et 1981–2020 respectivement. Pour les précipitations sur 24 heures, deux éléments importants distinguent les versions v2.0 et v1.0 : (a) Les niveaux de retour se rapportent à des cumuls glissants (24 h) et non pas fixes (1 jour). Ils sont de ce fait généralement supérieurs à ceux de v1.0. (b) La méthodologie tient compte de la dépendance des maxima par blocs (mesurés) à l'aide d'une vraisemblance composite (composite-likelihood). Les marges d'incertitude des niveaux de retour en deviennent plus réalistes et, comparés à la v1.0, nettement plus grandes. |
| v3.0 (2025) | Analyse pour les précipitations pour 2, 5, 10, 180 minutes et 6, 12, 48 et 72 heures ajoutée. |

Références

- [1] MeteoSuisse (2022). *Analyses des valeurs extrêmes (version 2022)*. <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/climat-de-la-suisse/records-et-extremes/analyses-des-valeurs-extremes.html>. Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. URL : <https://www.climate-extremes.ch>.
- [2] Fukutome, S., Schindler, A. et Capobianco, A. (2018). *MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation. Technical Report MeteoSwiss*. Third. Zürich.
- [3] Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. et Office fédéral de l'environnement OFEV (1992). Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901–1970. In : *Atlas hydrologique de la Suisse*. T. 1. Planche 2.4. <https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/precipitations/planche-2-4>. Berne : Office fédéral de topographie swisstopo.
- [4] Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. et Office fédéral de l'environnement OFEV (1997). Pluies ponctuelles extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1901–1970. In : *Atlas hydrologique de la Suisse*. T. 1. Planche 2.4². <https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/precipitations/planche-2-4b>. Berne : Office fédéral de topographie swisstopo.
- [5] Serinaldi, F. et Kilsby, C. (2015). Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution of extremes. In : *Advances in Water Resources* 77. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>, p. 17-36. URL : <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.
- [6] Vuerich, E., Monesi, C., Lanza, L., Stagi, L. et Lanzinger, E. (2009). *WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges*. Rapp. tech. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=15525#.w88p4y2B3dQ. Geneva, Switzerland : World Meteorological Organisation WMO.
- [7] Frei, C. et Fukutome, S. (2026). Mapping extreme return levels of 24-hour precipitation in a region of complex topography and climate. In : *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. in preparation.
- [8] Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London : Springer. ISBN : 978-3-9525031-4-0.
- [9] Cooley, D., Nychka, D. et Naveau, P. (2007). Bayesian Spatial Modeling of Extreme Precipitation Return Levels. In : *Journal of the American Statistical Association* 102.479. <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>, p. 821-840. URL : <http://doi.org/10.1198/016214506000000780>.
- [10] Ribatet, M., Cooley, D. et Davison, A. C. (2012). Bayesian inference from composite likelihoods, with an application to spatial extremes. In : *Statistica Sinica* 22.2. <https://doi.org/10.5705/ss.2009.248>, p. 813-845. URL : <http://doi.org/10.5705/ss.2009.248>.
- [11] Dyrddal, A. V., Lenkoski, A., Thorarinsdottir, T. L. et Stordal, F. (2014). Bayesian hierarchical modeling of extreme hourly precipitation in Norway. In : *Environmetrics*. <http://doi.org/10.1002/env.2301>, p. 1-31. URL : <https://doi.org/10.1002/env.2301>.
- [12] Weiss, L. (1964). *Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall*. HY 1. <http://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>. New York : Journal of the Hydraulics Division.
- [13] Hershfield, D. M. (1961). Rainfall frequency atlas of the United States for durations of 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years. In : *Journal of Hydrology* 40. Technical Paper No. 40, p. 1-61.
- [14] Papalexioiu, S., Dilynas, Y. et Grimaldi, S. (2016). Hershfield factor revisited: Correcting annual maximum precipitation. In : *Journal of Hydrology* 542. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>, p. 884-895. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.058>.
- [15] Gupta, V. K. et Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. In : *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 95, NO. D3, p. 1999-2009. URL : <https://doi.org/10.1029/JD095iD03p01999>.
- [16] Blanchet, J., Ceresetti, D., Molinié, G. et Creutin, J.-D. (2016). A regional GEV scale-invariant framework for Intensity–Duration–Frequency analysis. In : *Journal of Hydrology* 540, p. 82-95. ISSN : 0022-1694. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.007>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416303584>.
- [17] MeteoSchweiz (2006). *Starkniederschlagsereignis August 2005*. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211. Zürich : Meteoschweiz.
- [18] Fukutome, S. et Schindler, A. (2015). *MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation*. Sous la dir. de Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss. Technical Report MeteoSwiss 255. Zürich.
- [19] Grebner, D., Roesch, T., Schwarb, M. et Office fédéral de l'environnement OFEV (1999). Précipitations régionales extrêmes de différentes durées et périodes de récurrence 1981–1993. In : *Atlas hydrologique de la Suisse*. T. 1. Planche 2.5. <https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/precipitations/planche-2-5>. Berne : Office fédéral de topographie swisstopo.
- [20] Haruna, A., Blanchet, J. et Favre, A.-C. (2024). Estimation of Intensity-Duration-Area-

- Frequency Relationships Based on the Full Range of Non-Zero Precipitation From Radar-Reanalysis Data. In : *Water Resources Research* 60.2. e2023WR035902 2023WR035902, e2023WR035902. DOI : <https://doi.org/10.1029/2023WR035902>. eprint : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2023WR035902>. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023WR035902>.
- [21] CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical report*. Zürich : National Centre for Climate Services. ISBN : 978-3-9525031-4-0.
- [22] Bauer, V. M. et Scherrer, S. C. (2024). The observed evolution of sub-daily to multi-day heavy precipitation in Switzerland. In : *Atmospheric Science Letters* 25(9), e1240. DOI : <https://doi.org/10.1002/asl.1240>.
- [23] Estermann, R., Rajczak, J., Velasquez, P., Lorenz, R. et Schär, C. (2025). Projections of heavy precipitation characteristics over the Greater Alpine Region using a kilometer-scale climate model ensemble. In : *Journal of Geophysical Research:Atmospheres* 130, e2024JD040901. DOI : <https://doi.org/10.1029/2024JD040901>.
- [24] Haslinger, K. et al. (2025). Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. In : *Nature* 639, p. 667-672. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2>.
- [25] Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniiger, M. A. et Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. In : *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 121.12. <https://doi.org/10.1038/175238c0>. URL : <https://doi.org/10.1038/175238c0>.
- [26] Olea, R. A. et Pawlowsky, V. (1996). Compensating for Estimation Smoothing in Kriging. In : *Mathematical Geology* 28.4. <https://doi.org/10.1007/BF02083653>, p. 407-417. URL : <https://doi.org/10.1007/BF02083653>.
- [27] Frei, C. et Isotta, F. (2019). Ensemble spatial precipitation analysis from rain-gauge data: Methodology and application in the European Alps. In : *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD030004>, p. 5757-5778.