

DÉTERMINATION DES PRÉCIPITATIONS ET DES CRUES EXTRÊMES EN SUISSE À L'AIDE DE LA MÉTHODE PMP-PMF

Jean-Michel FALLOT, Jacques-André HERTIG,
Ramona Georgeta RECEANU, Fraenz ZEIMETZ

Résumé

Les barrages alpins en Suisse doivent être dimensionnés pour résister à des crues extrêmes avec un temps de retour d'au moins 10.000 ans. La méthode PMP-PMF a été appliquée pour estimer des pluies et des crues extrêmes avec un temps de retour aussi élevé. Les PMP ont été calculées avec un modèle atmosphérique et un modèle de pluie pour plusieurs durées avec une résolution horizontale de 2 km. Ces modèles permettent de reproduire de manière satisfaisante ces PMP pour l'ensemble du pays lorsqu'on les compare avec les précipitations extrêmes estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir de méthodes statistiques. Les PMP calculées par les modèles sont toutefois trop élevées sur plusieurs sommets alpins et trop basses au sud des Alpes. Malgré ces approximations, elles peuvent être utilisées pour calculer avec un modèle hydrologique approprié des crues de sécurité avec un temps de retour d'au moins 10.000 ans pour les bassins versants en Suisse ayant une surface inférieure à 230 km².

Mots-clés

PMP-PMF (Précipitations maximales probables – Crues maximales probables), modèles tridimensionnels, topographie accidentée, pluies orographiques et convectives, Suisse

Abstract

Alpine dams in Switzerland have to resist to extreme floods with a return period of at least 10.000 years. The PMP-PMF method has been applied to assess extreme precipitation and floods with such high return periods. PMP have been calculated with an atmospheric model and a rainfall model for several durations with a horizontal resolution of 2 km. These models are able to reproduce PMP well enough for the whole country when the values are compared with extreme precipitation assessed for a return period of 500 years from statistical methods. PMP values calculated by the models are however too high on several alpine summits and too low south of the Alps. Despite these approximations, PMP values can be used for calculating with an appropriate hydrological model security floods with a return period of at least 10.000 years for catchment basins in Switzerland with a surface smaller than 230 km².

Keywords

PMP-PMF (Probable Maximum Precipitation – Probable Maximum Flood), three-dimensional models, mountainous terrain, orographic and convective rain, Switzerland

I. INTRODUCTION

Les intempéries et les crues représentent les dangers naturels occasionnant environ la moitié des dégâts aux constructions humaines en Suisse (AEAI, 2011). Les précipitations constituent le paramètre le plus sensible dans les modèles hydrologiques pour calculer des débits et des crues pour les cours d'eau en cas d'intempéries. Une estimation aussi fine que possible des précipitations extrêmes est donc nécessaire pour calculer des crues réalistes et proposer ensuite des mesures de protection appropriées contre ce danger naturel (Receanu, 2013).

Les hydrologues ont besoin de connaître les précipitations extrêmes possibles pour un temps de retour

d'au moins 500 ans pour dimensionner les ouvrages de protection contre les crues des cours d'eau ou les barrages des lacs artificiels. La directive fédérale des crues en Suisse demande même de dimensionner de tels ouvrages pour les barrages sur la base d'un débit millénal (temps de retour de 1.000 ans) multiplié par 1.5 (OFEN, 2008), ce qui équivaut à un temps de retour d'au moins 10.000 ans (= crue de sécurité).

La prise en compte d'un temps de retour aussi long n'est pas utopique, car plusieurs études ont montré que le réchauffement global du climat s'accompagne d'une augmentation de la fréquence des fortes précipitations dans de nombreuses régions du globe (Frei *et al.*, 2000 ; Klein Tank et Können, 2003 ; Moberg *et al.*, 2006 ; Trömel et Schönwiese,

2007 ; IPCC, 2013). Une telle augmentation est aussi perceptible en Suisse (Scherrer *et al.*, 2016), où les précipitations journalières maximales par an tendent à augmenter depuis 1900 pour la plupart des stations (Fallot, 2011), tout comme l'intensité moyenne des précipitations (Fallot, 2010). Les modèles climatiques globaux et régionaux prévoient que la fréquence des fortes précipitations devrait continuer de croître durant le 21^{ème} siècle en Suisse et dans le monde (Frei *et al.*, 2006 ; Beniston *et al.*, 2007 ; CH2011, 2011 ; IPCC, 2013 ; Ban *et al.*, 2015).

Or, les séries de mesures pluviométriques disponibles ne dépassent pas 150 ans en Suisse. Il est donc nécessaire de recourir à des méthodes statistiques et déterministes (modélisations) pour déterminer des précipitations et des crues extrêmes avec des périodes de retour de 500 ans ou plus.

Des études précédentes ont démontré que les méthodes statistiques, en particulier celles avec la loi de Gumbel (1958), aboutissent globalement à de bons résultats en Suisse et en Europe centrale pour estimer des précipitations extrêmes avec des temps de retour plus longs que les séries de mesures (Zeller *et al.*, 1980 ; Trömel et Schönwiese, 2007 ; Fallot, 2012 ; Fallot et Hertig, 2013). Toutefois, ces analyses peuvent sous-estimer (ou surestimer) les précipitations extrêmes dans certains cas (Livada *et al.*, 2008 ; Koutsoyiannis, 2004). En outre, ces estimations peuvent difficilement aller au-delà de 3 ou 4 fois la longueur des séries de mesures disponibles qui documentent au maximum 150 ans en Suisse (OFEN/OFEG, 2003).

Il convient donc de recourir à des méthodes déterministes et à des modélisations pour estimer des précipitations et des crues extrêmes avec des temps de retour supérieurs à 500 ans. L'estimation des précipitations extrêmes utilisant les méthodes déterministes consiste à représenter par des lois analytiques les phénomènes atmosphériques responsables des précipitations et à évaluer leur volume en fonction des différents paramètres qui influencent la nature (et le modèle). Ces méthodes sont valables seulement si la modélisation des phénomènes est « réaliste » au sens où elle doit tenir compte des phénomènes prépondérants sollicités par les précipitations extrêmes et utiliser des méthodes de résolution adéquates. Certains processus sont toutefois difficiles à reproduire par

les modèles, car ils ont un maillage trop grossier pour cela (Goulpié, 2004).

Parmi les méthodes déterministes, la méthode PMP (Probable Maximum Precipitation) est une des plus utilisées pour calculer les précipitations maximales probables sur un bassin versant donné. Cette méthode offre une alternative intéressante aux méthodes statistiques, qui présentent des lacunes (Bérod, 1994). Les hydrologues utilisent ensuite les PMP calculées pour déterminer les crues maximales probables (PMF) qui représentent l'événement conceptuel maximal utilisé dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques pour une fiabilité et une sécurité maximales.

La méthode PMP-PMF suppose l'existence d'une limite physique à la quantité de précipitations susceptibles de tomber sur un bassin versant donné (WMO, 2009 ; Bérod *et al.*, 1992). Avec cette hypothèse, la crue obtenue admet également une limite supérieure. La méthode PMP-PMF s'oppose ainsi au concept de lois statistiques non bornées utilisées pour la détermination des crues avec un temps de retour de 10.000 ans ou plus (Bérod *et al.*, 1994). Cette méthode est un outil déterministe permettant de calculer les crues maximales susceptibles de se produire sur un bassin versant.

La méthode PMP-PMF a été utilisée pour la première fois aux USA au milieu des années 1930 suite à plusieurs crues qui se sont produites avant les années 1930 et qui n'avaient pas pu être prédites avec les méthodes empiriques et statistiques existantes à cette époque (Stallings *et al.*, 1986). Elle est depuis très utilisée aux USA et au Canada (Hansen *et al.*, 1982 ; Wang et Jawed, 1986), mais moins en Europe et ailleurs dans le monde. Une utilisation inadéquate des PMP peut en effet conduire à des calculs de crues trop élevées et irréalistes (Receanu, 2013). La méthode PMP-PMF a néanmoins été appliquée dans quelques études expérimentales en Angleterre par l'Institute of Hydrology en 1975, en Allemagne, France et Roumanie en 1983, en Autriche en 1990 (Bérod *et al.*, 1992 ; Desurosne *et al.*, 1993).

Plus récemment, une analyse de la distribution spatiale des PMP a été réalisée en Inde (Clark *et al.*, 2002). En Italie, les résultats des PMP ont été comparés avec une pluie extrême mesurée pour définir une échelle d'intensité pour les Alpes

Apuanes en Toscane (Poinsotte et Cavazza, 2003). En Espagne, les PMP sur une durée de 24 heures ont été calculées avec une résolution spatiale fine pour la Catalogne à partir des mesures de 145 pluviomètres (Casas *et al.*, 2008) et de la méthode statistique de Hershfield (1961). Puis, des PMP avec des durées variant entre 5 minutes et 30 heures ont été calculées dans cette région à partir de cette méthode statistique et d'une méthode physique basée sur la maximisation de l'averse qui aboutit à des résultats assez semblables (Casas *et al.*, 2010).

La méthode PMP-PMF a également été appliquée pour les barrages de Deriner en Turquie (Hertig *et al.*, 1999) et de Krasnodar en Russie (Goulpié *et al.*, 2002). La Suède a introduit cette méthode dans la Directive suédoise pour la détermination des crues de projet pour les barrages (Bergström *et al.*, 2007). L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) présente aussi les méthodes d'estimation et d'application des PMP et des PMF dans plusieurs régions des USA, de l'Australie, de la Chine et des zones tropicales (WMO, 2009). Des études se sont dernièrement intéressées à l'évolution des PMP dans le futur en relation avec le changement climatique pour certains scénarios (Kunkel *et al.*, 2013).

Plusieurs études ont également cherché à appliquer la méthode PMP-PMF en Suisse depuis les années 1990, car elle abrite de nombreux barrages et lacs artificiels. En particulier, le projet CRUEX, financé pendant plus de 10 ans par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), a eu pour objectif de développer des outils déterministes permettant une estimation des PMF adaptées aux conditions pluviométriques de la Suisse de manière à pouvoir la recommander dans la Directive fédérale des crues. Ce grand projet a été réalisé par 3 laboratoires de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) : le Laboratoire des Systèmes Energétiques (LASSEN), le laboratoire d'Hydrologie et d'Aménagement (HYDRAM) et le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH). La méthode PMP-PMF recommandée par l'OMM a été adaptée dans le cadre de ce projet dès 1996 aux conditions des Alpes, avec l'établissement de cartes des PMP pour l'ensemble de la Suisse à l'aide d'un modèle numérique atmosphérique et hydrodynamique non-hydrostatique en 3D (Montavon, 1998a et 1998b) et d'un modèle de pluie utilisant la formulation de Kessler (1969). Ces cartes ont été réalisées pour

plusieurs durées de pluie (de 1h à 24h) et elles ont été comparées avec les précipitations extrêmes estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir de méthodes statistiques (Hertig et Audouard, 2005 ; Audouard *et al.*, 2006). Ces comparaisons ont révélé plusieurs approximations dans ces cartes qui ont été corrigées. Elles ont ensuite servi de base à des modèles hydrologiques pour calculer des PMF dans plusieurs bassins versants alpins suisses (Boillat et Schleiss, 2002 ; Cohen *et al.*, 2009 ; Receanu *et al.*, 2010, 2012 et 2013 ; Receanu, 2013 ; Zeimetz *et al.*, 2014 ; Zeimetz, 2017).

Cet article présente les méthodes de calculs des PMP et les résultats obtenus pour la Suisse à l'aide de modèles numériques développés dans le cadre du projet CRUEX. Il discute également de l'application de ces PMP pour le calcul des crues maximales probables (PMF) avec des modèles hydrologiques selon la méthode PMP-PMF. La Figure 1 localise les différentes régions de Suisse discutées dans cet article.

II. MÉTHODES

La méthode PMP-PMF de l'OMM (WMO, 2009) pour une topographie accidentée recommande de déterminer 2 composantes pour les PMP, à savoir les précipitations orographiques et les précipitations convectives ou de convergence. Les premières se produisent lorsqu'une masse d'air en mouvement (advection) doit escalader une chaîne de montagne qui va provoquer un effet de barrage sur le versant au vent et un effet de foehn sur le versant sous le vent. Les précipitations convectives se forment consécutivement à des ascendances ou à des convergences qui ne sont pas liées aux reliefs. Ces ascendances peuvent avoir une origine thermique (air chaud près du sol), frontale ou cyclonique.

Les précipitations extrêmes dépendent de plusieurs paramètres météorologiques. L'intensité des précipitations orographiques augmente avec la vitesse du vent et la stabilité de l'air qui renforcent l'effet de barrage sur le versant au vent. Par contre, l'intensité des précipitations convectives s'accroît lorsque la vitesse du vent en altitude et la stabilité de l'air diminuent. Ces conditions favorisent un développement plus important de nuages de convection qui vont ensuite arroser copieusement plus longuement une région donnée avec des vents faibles. Il faut donc dédoubler les

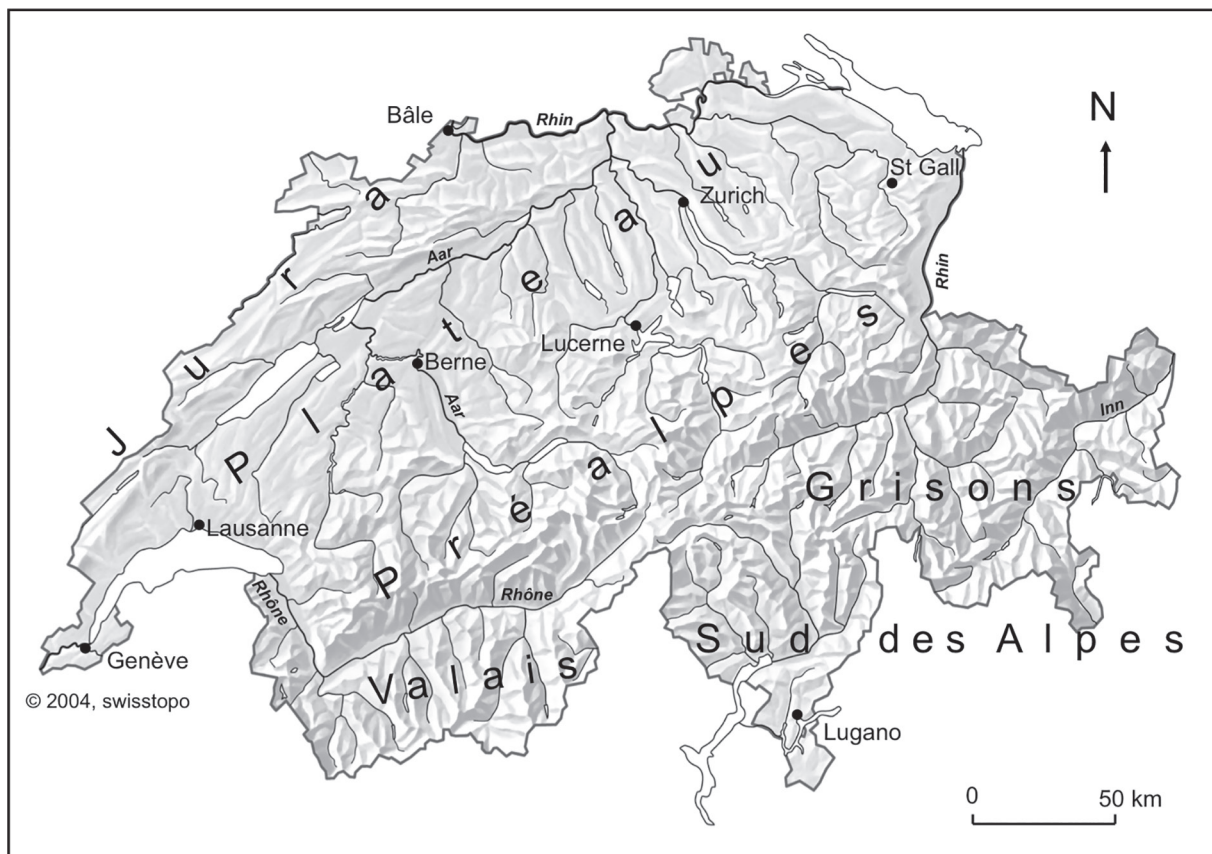


Figure 1. Localisation des principales régions en Suisse

estimations pour les précipitations orographiques et convectives, c'est-à-dire rechercher les PMP pour les précipitations orographiques et les PMP pour les précipitations convectives.

Pour les PMP orographiques, un modèle numérique atmosphérique et hydrodynamique non hydrostatique a été développé pour calculer des champs de vent et d'autres paramètres météorologiques au-dessus de la topographie pour une situation donnée en spécifiant les conditions initiales de vent, des températures et de l'humidité de l'air. Ce modèle numérique est décrit en détail dans Montavon (1998a et 1998b). Le champ de vent ainsi calculé est ensuite utilisé pour résoudre les équations d'un modèle de pluie selon les formulations de Kessler (1969) pour obtenir des champs de pluie pour différentes durées. Les équations de ce modèle de pluie sont présentées en annexe.

Les formulations de Kessler ne permettent pas de calculer les précipitations solides contrairement à celles développées plus tard par Caniaux (1993). Pour cela, ces formulations de Caniaux (1993) ont également été introduites dans le modèle de pluie.

Les précipitations extrêmes calculées avec ces deux formulations sont très proches, mais celles de Caniaux demandent plus de temps de calcul. Pour cette raison, elles n'ont pas été retenues pour le calcul des PMP en Suisse (Hertig et Audouard, 2005).

Ces deux modèles ont tout d'abord calculé les champs de vent et les précipitations extrêmes mesurées sur le terrain pour deux épisodes particuliers, afin de vérifier leur capacité à reproduire ces paramètres dans une topographie aussi accidentée que celle de la Suisse pour ce genre d'événements. Ces calculs ont d'abord été réalisés pour une situation de barrage active au sud des Alpes avec des pluies abondantes sur ce versant-là. L'épisode choisi est celui de septembre 1993 qui avait provoqué des inondations en plusieurs endroits du sud des Alpes, ainsi que dans le Haut Valais (Brig). Les précipitations calculées par le modèle étaient proches de celles mesurées sur le terrain pour cet épisode (Montavon *et al.*, 1995). Puis les calculs ont été effectués pour une situation de barrage active au nord des Alpes avec des pluies importantes sur ce versant-là. Là aussi, les modèles ont permis de bien reproduire les précipitations mesurées pour cet épisode dans les différentes régions du pays.

Une fois calés pour ces deux épisodes, ces deux modèles ont calculé les vents et les PMP orographiques pour chaque secteur de vent de 30° de manière à prendre en compte les différences d'exposition des reliefs face aux afflux d'air humide. Pour chaque secteur, les différents paramètres influençant les fortes pluies (vitesse du vent, température, humidité et stabilité de l'air) ont été maximisés pour une durée donnée. Nous avons ainsi retenu une vitesse des vents élevée en altitude, en l'occurrence la vitesse extrême avec un temps de retour de 50 ans pour chaque secteur de 30°, comme recommandé par l'OMM (WMO, 2009) pour le calcul des PMP orographiques. Cette vitesse a été obtenue à partir d'analyses de Gumbel réalisées pour les vents mesurés sur deux sommets jurassiens, Chasseral et La Dôle, qui documentent bien les vents géostrophiques soufflant en altitude au-dessus de la Suisse (Fallot et Hertig, 2008). La Figure 2 présente les vitesses cinquantennales ainsi déterminées pour les 12 secteurs de vent en altitude retenus pour la détermination des PMP orographiques. Ces vitesses varient entre 23 m/s pour un vent du nord-nord-est et 49 m/s pour un vent d'ouest-nord-ouest.

Les études menées par MétéoSuisse ont montré que les précipitations orographiques abondantes en

Suisse se produisent avec un refroidissement moyen de l'air de 0.55°C par 100 m, soit une atmosphère assez stable, ainsi qu'avec un air saturé sur l'ensemble de la troposphère (Courvoisier, 1981). Nous avons retenu ces caractéristiques de la troposphère pour la détermination des PMP, ainsi qu'une température au sol de 20°C, car les précipitations les plus intenses et abondantes se produisent en saison chaude en Suisse consécutivement à une capacité hygrométrique de l'air plus élevée.

Les plus graves intempéries en Suisse se produisent avec des précipitations abondantes pendant 24 heures ou plus. Les situations les plus critiques se rencontrent avec un afflux d'air chaud et très humide provoquant une situation de barrage très active au nord ou au sud des Alpes. La présence d'une dépression ou d'un front stationnaire près des Alpes peut encore renforcer cet effet de barrage et provoquer des précipitations très abondantes et des crues sur de vastes surfaces en Suisse, à l'image des intempéries d'août 2005 en Suisse alémanique, d'octobre 2000 ou de novembre 2002 dans le sud de la Suisse. Nous avons retenu ce scénario pour le calcul des PMP orographiques d'une durée de 24 heures en maximisant les différents paramètres comme énoncé ci-dessus, car nous disposons du

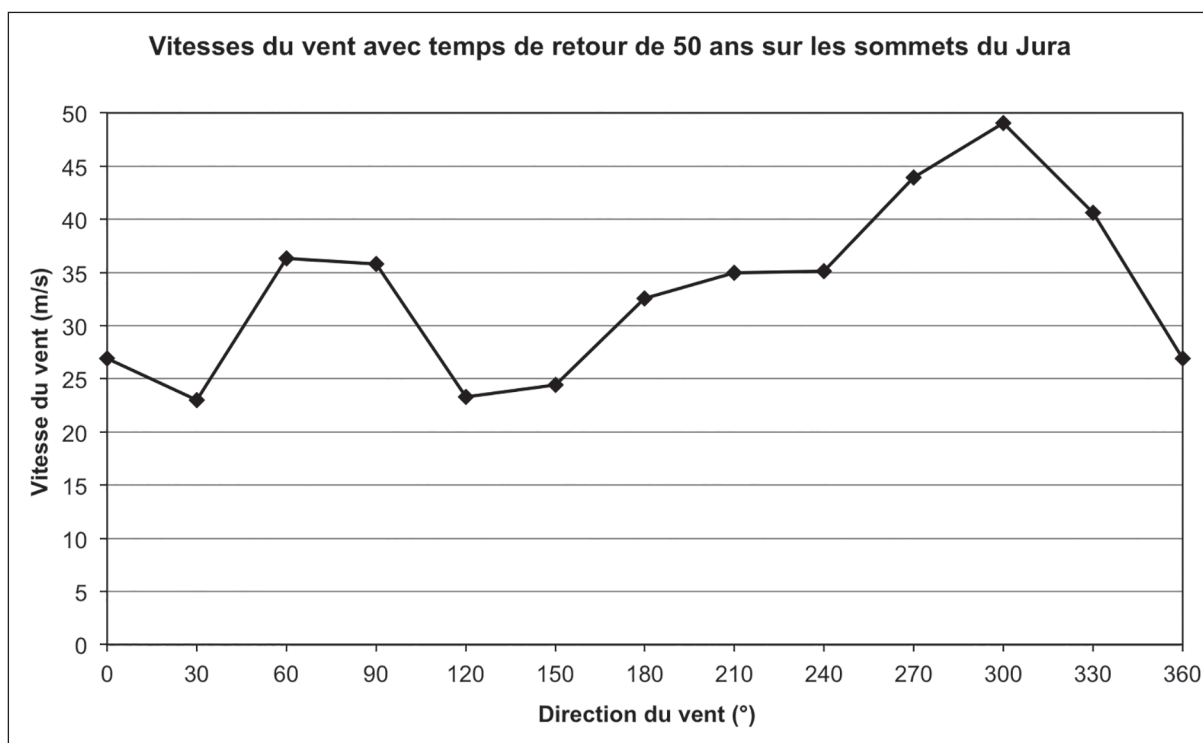


Figure 2. Vitesses du vent déterminées pour un temps de retour de 50 ans par secteur de 30° à partir d'analyses de Gumbel réalisées pour les mesures du vent effectuées par deux stations situées sur des sommets jurassiens sur une période de 20 ans (1982-2001)

plus grand nombre de mesures sur le terrain pour cette durée avec environ 500 pluviomètres relevés une fois par jour en Suisse.

Mais des pluies très intenses de plus courte durée (orages) peuvent aussi provoquer des crues torrentielles, notamment dans des petits bassins versants. Les PMP orographiques (et convectives) ont également été calculées pour une durée plus courte de 3 heures en considérant comme scénario maximisant un front froid orageux actif traversant la Suisse à une vitesse très élevée (vitesse avec un temps de retour de 50 ans).

Pour chaque pixel du modèle, la PMP orographique retenue correspond à la valeur des précipitations la plus élevée obtenue pour les 12 secteurs de vent étudiés. Cela signifie que cette PMP peut se rencontrer pour des secteurs de vent très différents suivant l'endroit et qu'elle ne peut pas se produire simultanément sur l'ensemble de la Suisse pour une même situation météorologique critique. Il convient d'en tenir compte pour le calcul des crues extrêmes dans un bassin versant.

Dans un deuxième temps, les PMP convectives ont été déterminées pour des ascendances d'air chaud et des courants remontant les pentes et les vallées avec des vents faibles en altitude. Ces courants ont été calculés avec le modèle atmosphérique (Hertig et Audouard, 2005 ; Audouard *et al.*, 2006) et ces pluies à l'aide d'une paramétrisation de la convection basée sur les formules de Haiden *et al.* (1992) présentées en annexe.

Pour chaque pixel du modèle, on retient ensuite la valeur la plus élevée obtenue entre les PMP orographiques et les PMP convectives comme étant la PMP finale. Celle-ci peut donc avoir une origine convective ou une origine orographique selon les régions de la Suisse.

Les cartes des PMP ont donc été calculées pour l'ensemble de la Suisse sur une surface de 350 x 246 km pour des durées de pluies de 3 et 24 heures avec une résolution horizontale de 2 km. Il aurait été souhaitable de pouvoir réaliser ces calculs avec une résolution encore plus fine pour mieux prendre en compte les effets de la topographie locale et de la convection sur les écoulements et les précipitations extrêmes. Mais il faudrait disposer d'ordinateurs plus puissants et modifier aussi les équations

contenues dans les modèles pour simuler les pluies convectives à une échelle plus fine sur l'ensemble de la Suisse (Goulpié, 2004).

Des cartes des PMP ont ensuite été extrapolées pour des durées de 1h, 6h, 9h et 12h à partir de celles calculées pour des durées de 3h et 24h sur la base des courbes IDF (Intensité – Durée – Fréquence : Figure 3). Ces courbes révèlent que pour un même temps de retour, l'intensité d'une pluie diminue avec la durée. En outre, pour une même durée, une pluie sera plus intense si son temps de retour est plus grand. Les analyses statistiques effectuées pour des séries pluviométriques de 70 ans (1901-1970) et des durées moyennes de pluie allant de 10 minutes à 30 jours (soit 720 heures) montrent que ces courbes IDF sont parallèles entre elles pour différents temps de retour (Zeller *et al.*, 1980) comme le montre la Figure 3 pour des temps de retour de 2.33, 10, 50 et 100 ans. On peut donc supposer que la courbe pour les PMP avec un temps de retour de 10.000 ans sera également parallèle aux autres, ce qui permet d'estimer des PMP pour d'autres durées (1h, 6h, 9h, 12h) à partir de celles calculées par les modèles pour deux durées (3h et 24h).

L'exposition des bassins versants aux crues varie en fonction de leur temps de réponse et de la durée des fortes précipitations (Receanu, 2013). Le temps de réponse tend à augmenter avec la surface des bassins versants : les petits bassins sont surtout exposés à de violents orages de courte durée (1 heure) et les grands bassins à des épisodes avec des pluies abondantes sur une longue durée (24 heures ou plus), ce qui justifie les calculs des PMP pour plusieurs durées.

III. RÉSULTATS

Dans cet article, seules les cartes des PMP pour des durées de 3 et 24 heures sont présentées (Figures 4 et 5). Les valeurs pour les axes x et y sur ces deux figures (et sur les Figures 6 à 8) correspondent aux coordonnées géographiques militaires en km utilisées en Suisse. En plus des cartes des PMP finales pour tous les secteurs de vent confondus, des cartes sectorielles ont été établies pour les durées de 3 et 24 heures. Les calculs des crues extrêmes (PMF) pour un bassin versant ne peuvent pas se baser sur les cartes des PMP finales tous secteurs confondus. En effet, les précipitations les plus extrêmes (PMP) peuvent se rencontrer pour des

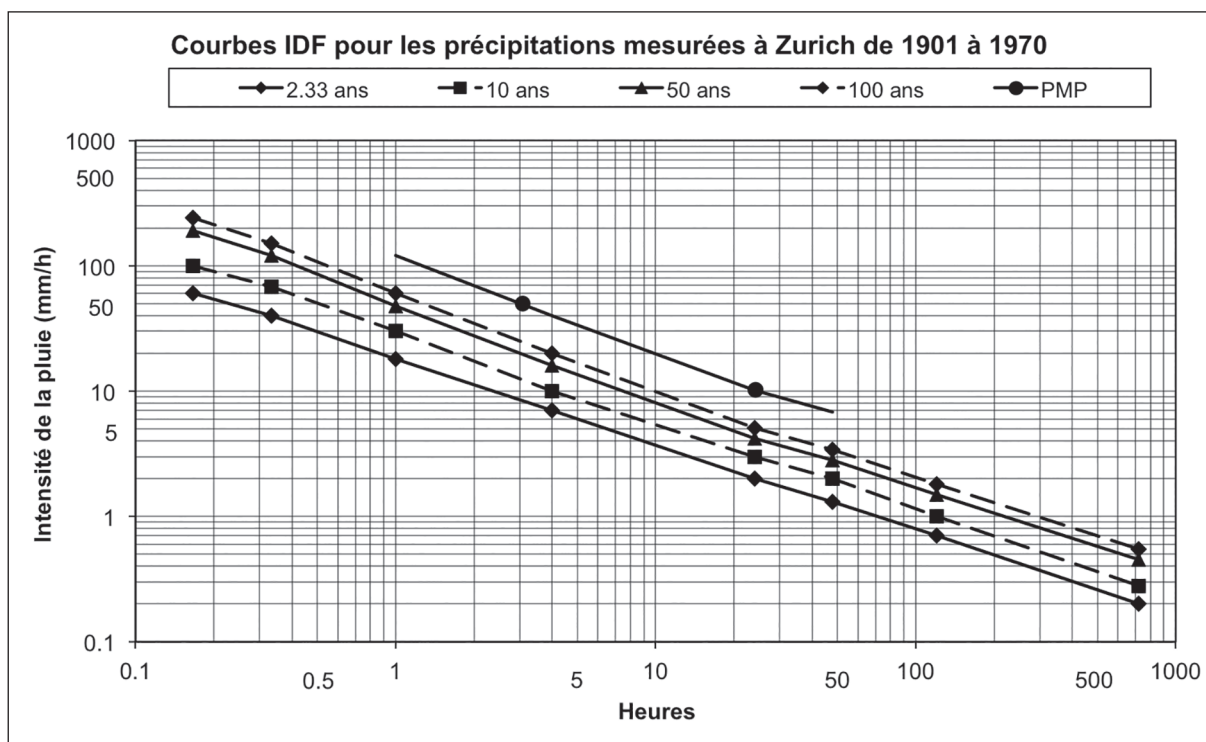


Figure 3. Courbes intensité – durée – fréquence (IDF) des précipitations mesurées à la station de Zurich (d'après Zeller *et al.*, 1980, modifié Fallot)

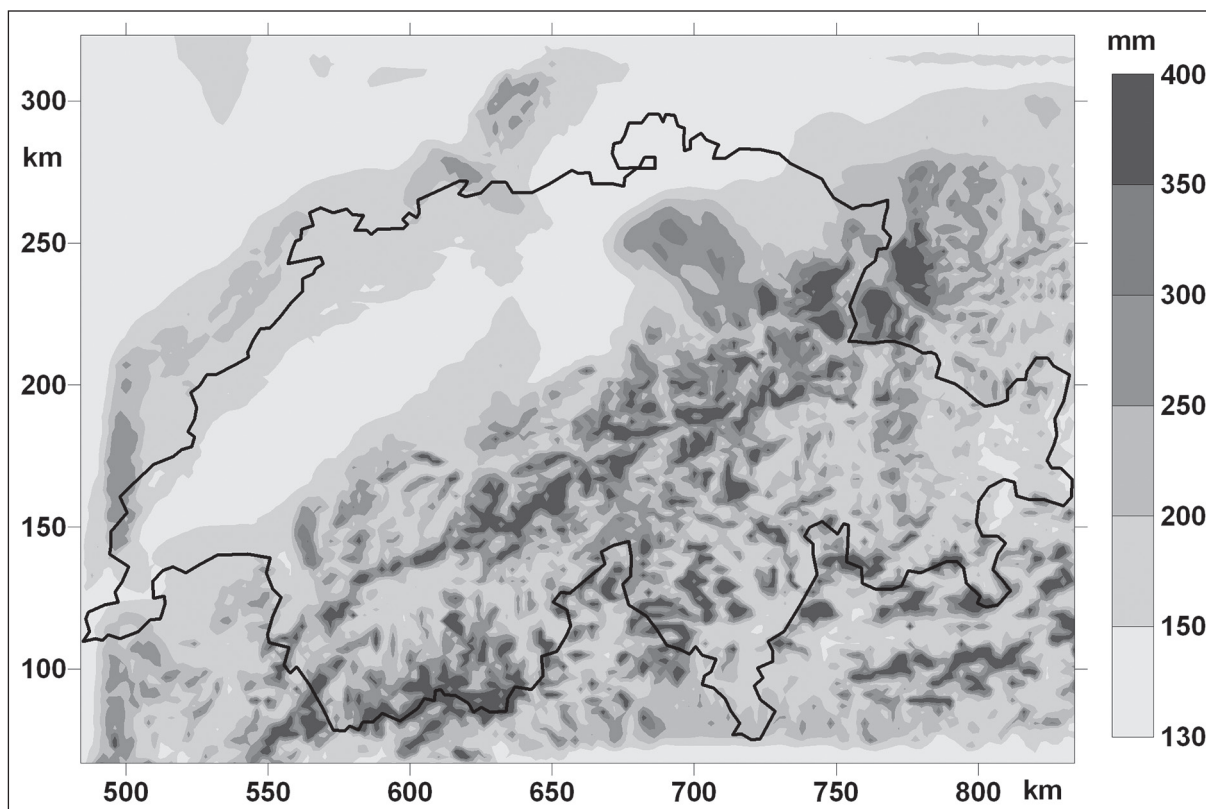


Figure 4. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 3 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour tous secteurs de vent confondus

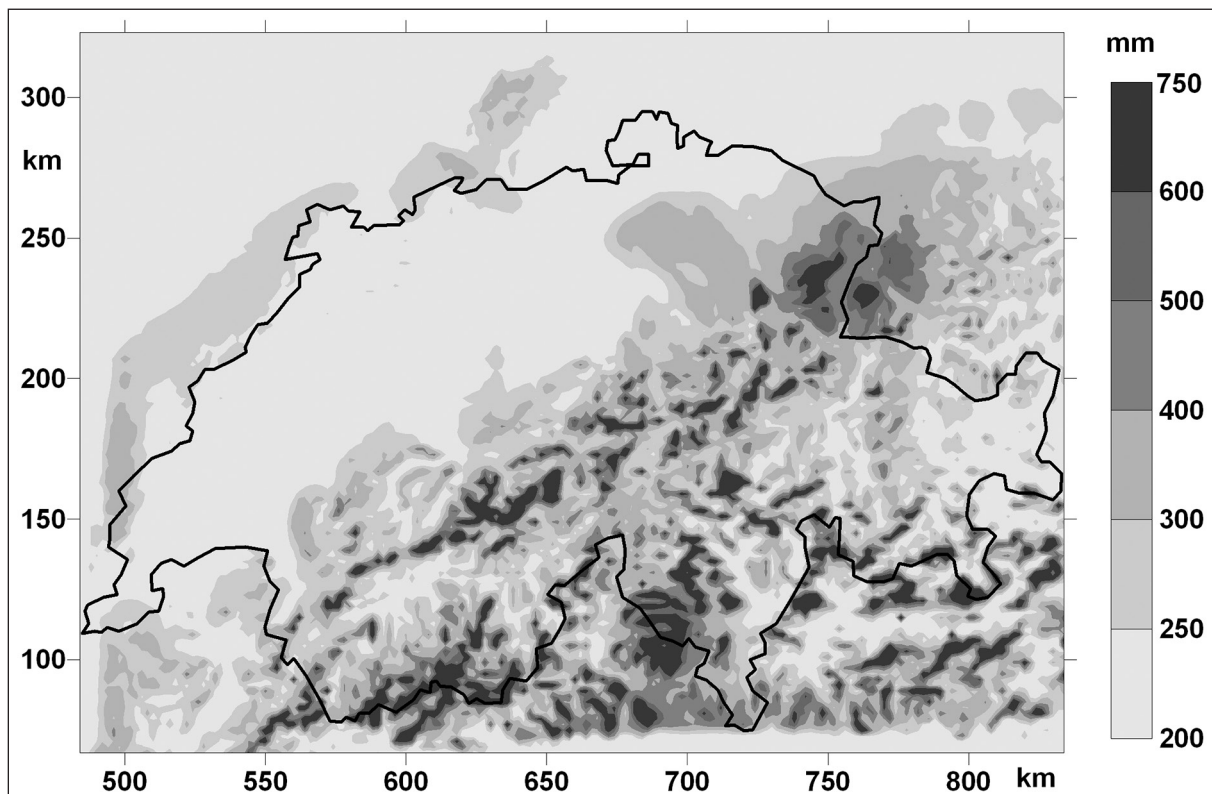


Figure 5. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour tous secteurs de vent confondus

secteurs de vent très différents à l'intérieur d'un même bassin versant, notamment pour ceux situés près de la ligne de faite principale des Alpes. Or, une situation météorologique ne peut pas produire des précipitations extrêmes simultanément pour un vent du nord et un vent du sud. Un calcul réaliste des crues extrêmes nécessite de connaître les précipitations extrêmes tombant simultanément pour une situation météorologique critique durant 3 ou 24 heures. Pour une telle situation, la direction générale des vents peut fluctuer de quelques dizaines de degrés, mais pas de 180°.

Pour les précipitations orographiques, les situations les plus critiques au nord des Alpes se rencontrent avec un afflux d'air humide d'ouest à nord-est provoquant un effet de barrage actif sur le versant nord alpin. Vu le large éventail de directions entre l'ouest et le nord-est, 2 grandes situations de barrage ont été distinguées : celles avec un vent d'ouest à nord-ouest et celles avec un vent du nord à nord-est. Au sud des Alpes, les situations les plus critiques se rencontrent avec un afflux d'air humide du sud-est à sud-ouest générant un effet de barrage actif sur le versant sud alpin. Trois cartes sectorielles de précipitations extrêmes ont donc été calculées, en plus de la carte finale tous secteurs

de vent confondus, pour reproduire les situations météorologiques les plus critiques pour les crues :

- Une carte pour les secteurs sud-est à sud-ouest avec une situation de barrage active au sud des Alpes (Figure 6).
- Une carte pour les secteurs ouest à nord-ouest avec une situation de barrage active au nord des Alpes (Figure 7),
- Une carte pour les secteurs nord à nord-est avec une situation de barrage active au nord des Alpes (Figure 8).

Ces trois cartes présentent les PMP calculées pour ces trois grands secteurs de vent pour une durée de 24 heures. Les cartes des PMP pour une durée de 3 heures pour ces trois secteurs de vent ne sont donc pas montrées ici, car elles sont assez semblables à celles de 24 heures.

La carte des PMP tous secteurs de vent confondus montre que les précipitations peuvent atteindre jusqu'à 400 mm en 3 heures et 750 mm en 24 heures sur les reliefs alpins les plus exposés, soit des valeurs sensiblement plus élevées que celles estimées à partir des mesures *in situ* pour un temps

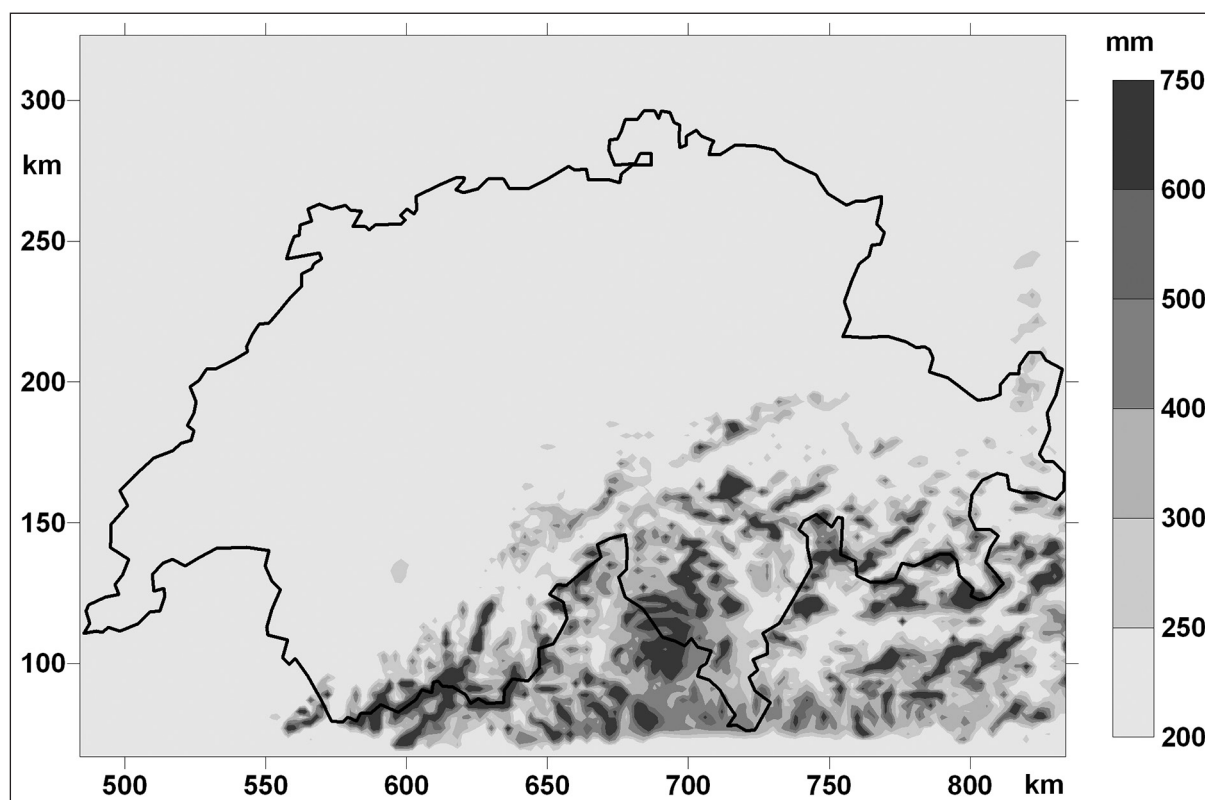


Figure 6. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du sud-est à sud-ouest

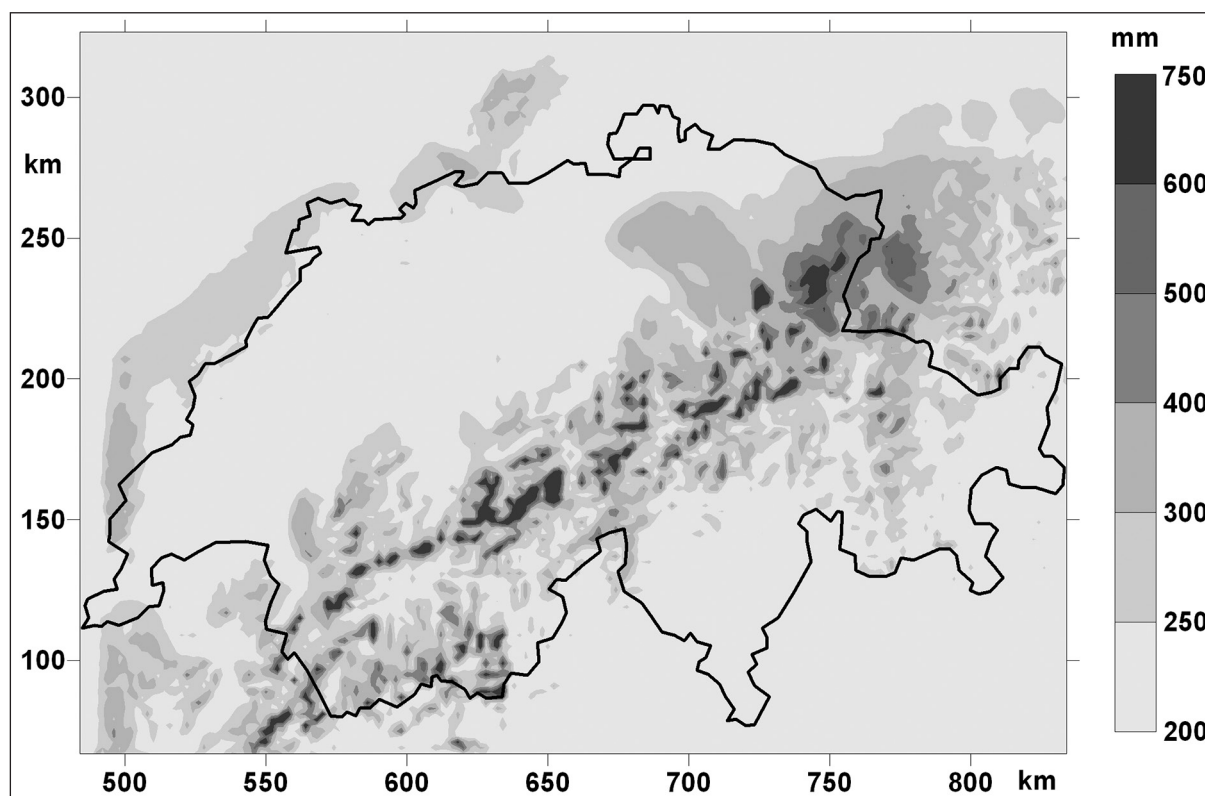


Figure 7. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent d'ouest à nord-ouest

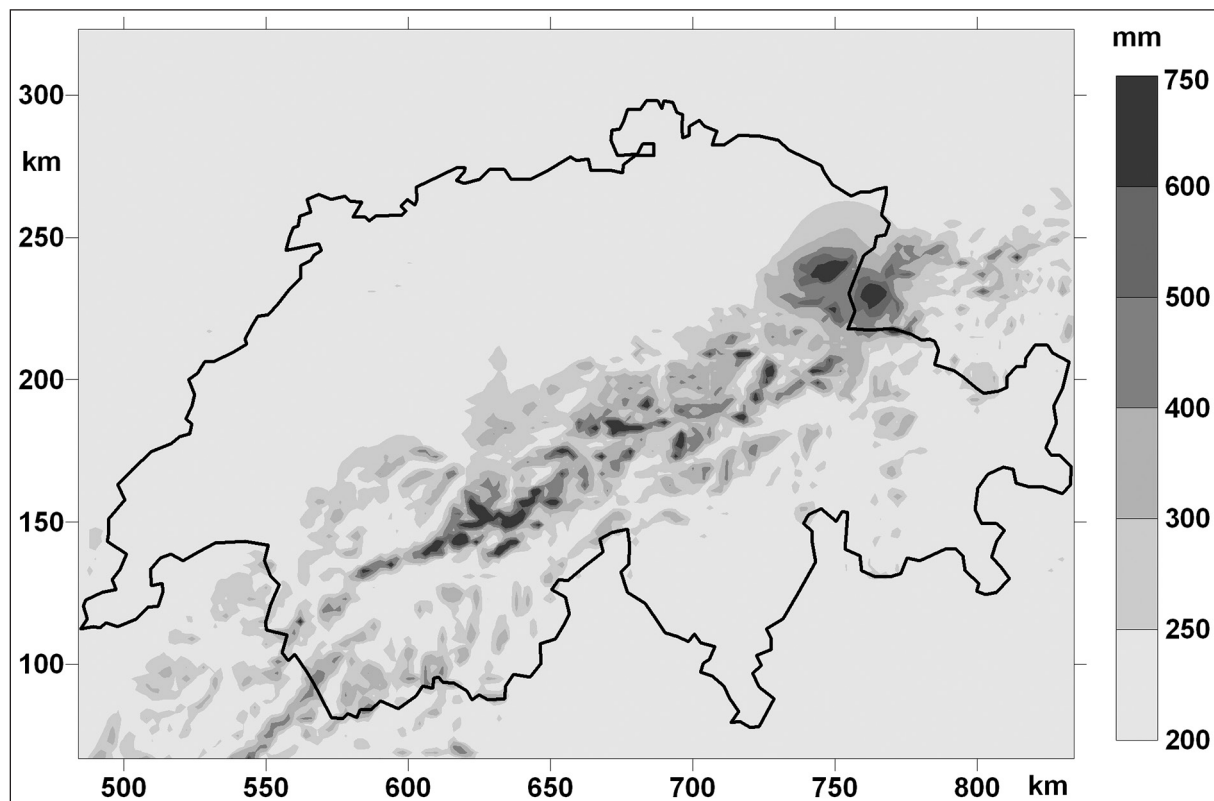


Figure 8. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km pour un vent du nord à nord-est

de retour de 500 ans (jusqu'à 560 mm en 24 heures au sud des Alpes : Figure 9). À l'opposé, les PMP tous secteurs de vent confondus ne dépassent pas 150 mm en 3 heures et 200 mm en 24 heures sur le Plateau suisse et dans certaines vallées abritées (Valais, Engadine). Ces valeurs restent néanmoins supérieures à celles estimées pour ces régions-là à partir des mesures *in situ* pour un temps de retour de 500 ans

La carte pour les secteurs sud-est à sud-ouest sont à l'origine des PMP les plus élevées au sud des Alpes par effet de barrage (Figure 6). Elles débordent dans le Haut Valais et dans le sud des Grisons, ainsi que sur les crêtes des Alpes bernoises et glaronaises. Le reste du nord des Alpes est davantage abrité grâce à un effet de foehn et on observe des valeurs assez uniformes pour les PMP. Cela provient du fait que le nord des Alpes est davantage exposé à des pluies convectives pour ces secteurs-là et elles peuvent atteindre potentiellement la même intensité partout en été en cas de violents orages lorsqu'on maximise tous les paramètres.

La carte pour les secteurs ouest à nord-ouest sont à l'origine des PMP les plus élevées au nord des Alpes par effet de barrage (Figure 7). Le versant

nord des Alpes (Préalpes) et les sommets des Alpes valaisannes sont les plus exposés, alors que le sud des Alpes est davantage abrité grâce à un effet de foehn. Les vallées du Valais et des Grisons, ainsi que le Plateau suisse sont également moins touchés dans ce genre de situation que les reliefs du versant nord des Alpes.

Globalement, la carte pour les secteurs nord à nord-est (Figure 8) aboutissent à des PMP plus basses que celles pour les secteurs ouest à nord-ouest. Elles sont néanmoins très élevées sur les reliefs du versant nord des Alpes (Préalpes), alors qu'elles restent plus basses dans les autres régions alpines (Valais, Grisons), sur le Plateau, le Jura, ainsi que le sud des Alpes qui bénéficie à nouveau d'un effet de foehn.

Les cartes des PMP pour une durée de 24 heures tous secteurs confondus calculées par le modèle ont été comparées avec les précipitations journalières estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures *in situ* effectuées par 429 stations pluviométriques et météorologiques de 1961 à 2010. Ces estimations ont été faites à partir de la loi de Gumbel (1958), car plusieurs articles ont montré que cette loi aboutit globalement à de bons

résultats en Suisse pour estimer des précipitations journalières extrêmes avec des temps de retour de 100 ou 500 ans à partir de séries de mesures de 30, 50 ou 100 ans (Zeller *et al.*, 1980 ; Fallot, 2011 et 2012 ; Fallot et Hertig, 2013).

La Figure 9 montre que les précipitations extrêmes atteignent des valeurs sensiblement plus élevées au sud des Alpes (jusqu'à 560 mm au Centovalli), car ce versant est très exposé aux afflux d'air doux et humide de la Méditerranée qui peuvent provoquer des précipitations abondantes en été et en automne par effet de barrage. Le versant nord des Alpes peut également subir des effets de barrage très prononcés en cas d'afflux d'air humide d'ouest à nord-est, mais les précipitations restent moins abondantes (jusqu'à 240 mm dans les Préalpes centrales et orientales) sur ce versant qu'au sud des Alpes, car les masses d'air venant alors de l'Atlantique ou de la mer du Nord sont moins chaudes que l'air méditerranéen et elles contiennent par conséquent moins de vapeur d'eau. En outre, elles parcourent une plus grande distance sur les terres avant d'arriver en Suisse. Pour les deux versants des Alpes, les précipitations journalières les plus extrêmes se

rencontrent avec une situation de barrage active et la présence d'une dépression (goutte froide) ou d'un front froid stationnant près ou sur les Alpes qui favorise une forte convection en saison chaude et renforce encore l'effet de barrage (Fallot, 2000). Cela correspond au scénario retenu pour calculer les PMP d'une durée de 24 heures.

Les valeurs des PMP calculées par le modèle ont été extraites aux points des 429 stations pluviométriques et météorologiques, de manière à pouvoir les comparer avec les hauteurs d'eau estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures *in situ* (Figure 10). La Figure 11 présente le rapport entre les PMP calculées par le modèle et les valeurs cincentennales (= temps de retour de 500 ans) estimées à partir des mesures *in situ*.

On constate sur les Figures 10 et 11 que les PMP sont presque partout plus élevées que les précipitations estimées pour une période de retour de 500 ans d'un rapport variant le plus souvent entre 1.1 et 3. On obtient un rapport moyen de 1.9 pour toutes les stations, soit un rapport un peu plus élevé que celui normalement observé (1.5) entre

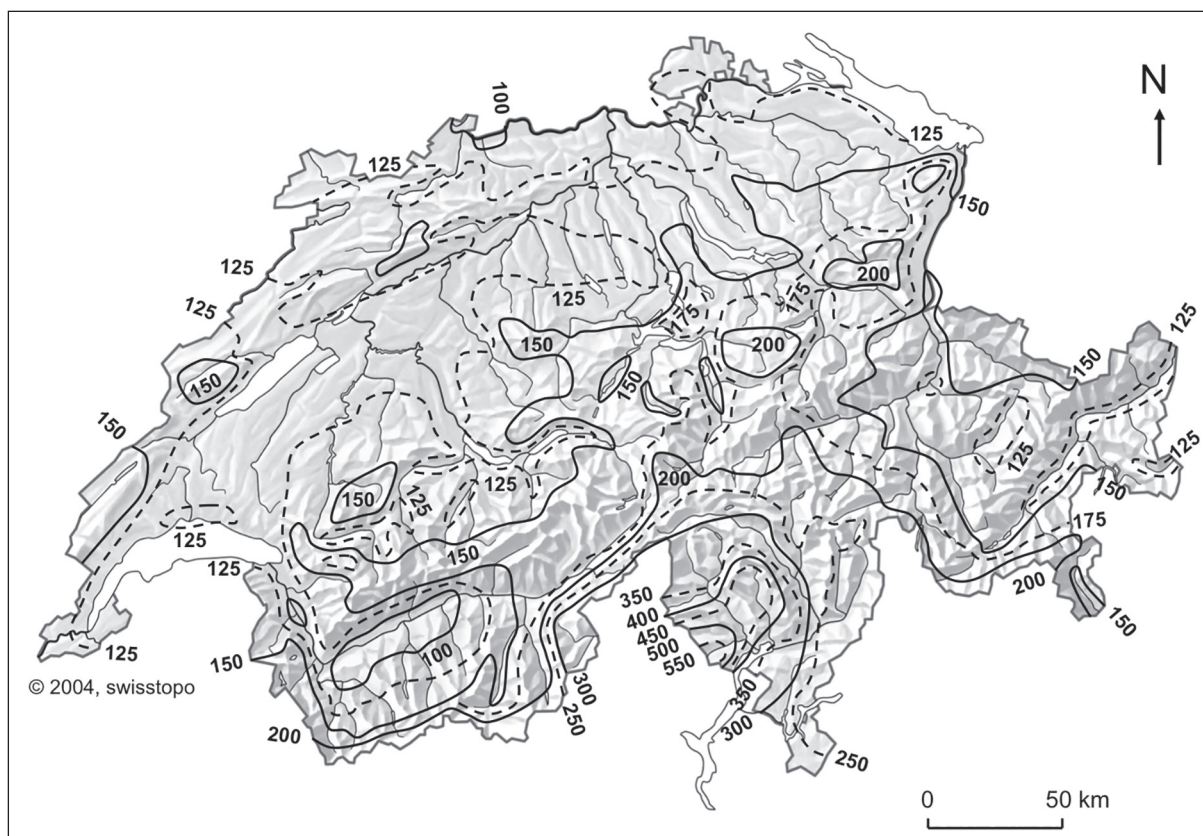


Figure 9. Précipitations journalières (en mm) estimées en Suisse pour un temps de retour de 500 ans à partir de la loi de Gumbel et des mesures *in situ* effectuées à 429 endroits de 1961 à 2010

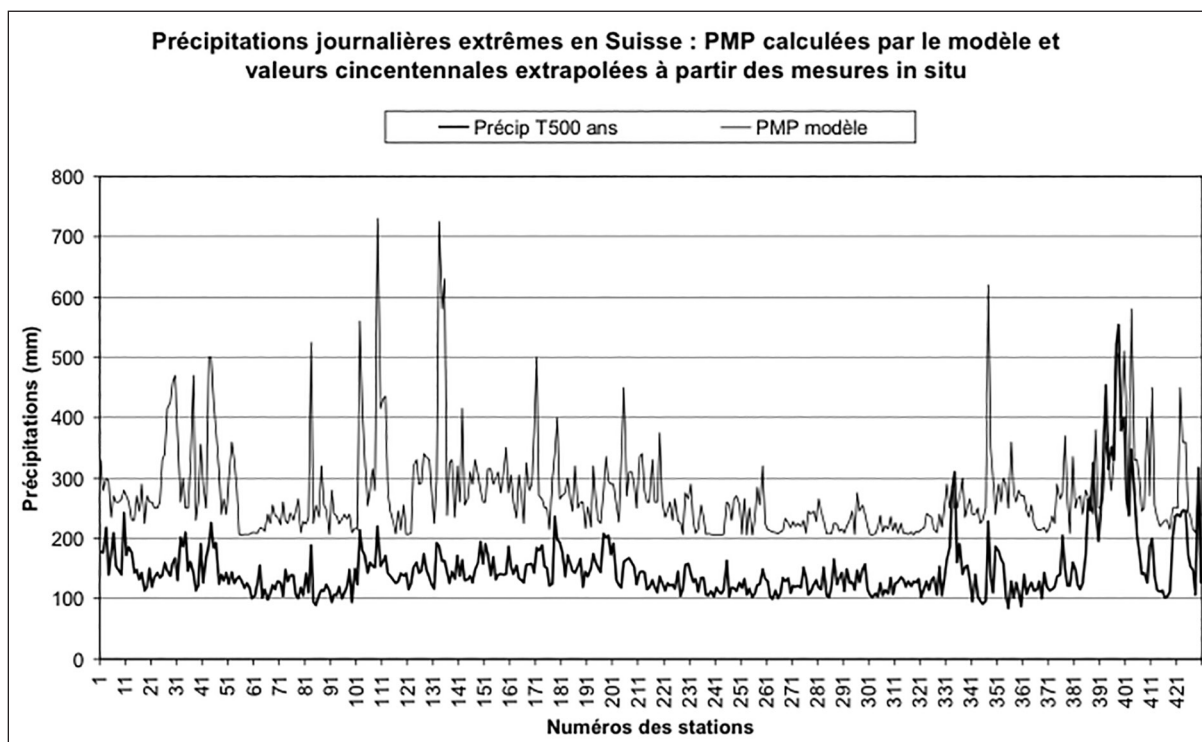


Figure 10. Précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures et valeurs maximales journalières (24 heures) estimées pour un temps de retour de 500 ans (Précip T500 ans) à partir des mesures *in situ* en Suisse de 1961 à 2010

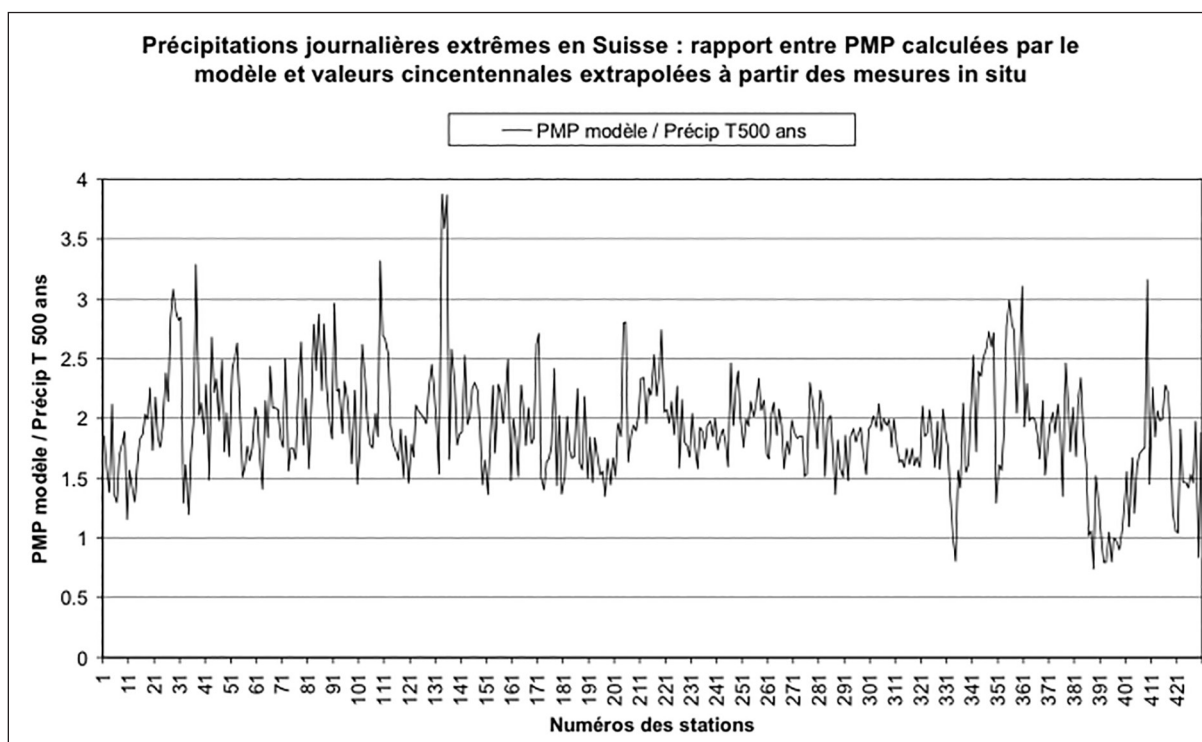


Figure 11. Rapport entre les précipitations maximales probables (PMP) calculées par le modèle pour une durée de 24 heures et les valeurs maximales journalières estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures *in situ* en Suisse de 1961 à 2010

des précipitations avec un temps de retour d'au moins 10.000 ans (PMP) et des précipitations cinquentennales. Cela signifie que les PMP calculées par le modèle pour une durée de 24 heures sont globalement un peu trop élevées par rapport aux valeurs cinquentennales estimées à partir des mesures *in situ*. Le modèle exagère les précipitations extrêmes en quelques endroits du pays, notamment là où les PMP calculées sont au moins 3 fois plus élevées que les valeurs cinquentennales estimées. Ces endroits apparaissent de manière isolée au nord et dans les Alpes, notamment sur plusieurs sommets alpins, dans le nord-est de la Suisse et la région de Bâle.

Le modèle tend également à sous-estimer les précipitations extrêmes en d'autres endroits du pays, là où le rapport entre les PMP calculées et les valeurs cinquentennales estimées est inférieur à 1.2. Ces endroits apparaissent au sud des Alpes qui est le plus exposé à de fortes précipitations en Suisse d'après les mesures *in situ*.

Les cartes des PMP pour une durée de 3 heures tous secteurs confondus ont également été comparées avec les précipitations tri-horaires estimées pour des temps de retour de 500 ans par le WSL (Institut fédéral suisse de recherche sur la forêt, la neige et le paysage) à partir de mesures effectuées par 300 stations pluviométriques de 1901 à 1970. Ces estimations n'ont pas été réactualisées pour la période 1961-2010 comme pour les précipitations journalières, faute de données suffisantes pour les pluies tri-horaires. Les résultats de ces comparaisons sont assez semblables à ceux obtenus pour les PMP 24 heures et ils ne sont donc pas illustrés ici. On obtient un rapport moyen un peu plus élevé de 2.2 pour toutes les stations entre les PMP et les précipitations tri-horaires cinquentennales. Les résultats sont globalement un peu moins bons que pour les PMP de 24 heures, mais nous disposons aussi de moins de mesures *in situ* des précipitations tri-horaires.

IV. DISCUSSION

Les approximations dans les PMP calculées par les modèles peuvent provenir du fait qu'une résolution horizontale de 2 km est encore trop basse pour reproduire certains effets de la topographie locale sur la pluviométrie extrême, notamment dans des vallées encaissées. Des effets de bord peuvent

également fausser les résultats, en particulier sur les Alpes Valaisannes, dans l'est des Grisons et l'ouest du Jura.

Les valeurs de précipitations très élevées obtenues sur les reliefs alpins peuvent aussi résulter de la présence d'ondes de relief reproduites par le modèle atmosphérique et hydrodynamique qui sont manifestement trop importantes pour certaines situations météorologiques, en particulier celles du sud-est à sud et du nord-ouest à nord avec du foehn du sud ou du nord dans les Alpes. Il en résulte des ascendances d'air très puissantes en certains endroits du modèle qu'on ne retrouve en principe pas dans la nature pour ces situations-là. Mais ces endroits sont souvent dépourvus de mesures sur le terrain. De tels effets résultent de la stabilité de l'air qui est un paramètre souvent difficile à reproduire dans les modèles. Le modèle de pluie calcule alors des précipitations orographiques manifestement trop abondantes pour certains reliefs alpins exposés à de telles ascendances. Des analyses de sensibilité ont montré que la stabilité de l'air est le paramètre qui influence le plus la forme des champs de pluie en Suisse (Hertig et Audouard, 2005). De telles ondes de relief n'étaient pas apparues lors du calage du modèle pour des épisodes très pluvieux avec des vitesses de vent plus faibles (Montavon *et al.*, 1995).

Les précipitations très élevées obtenues sur les reliefs alpins peuvent aussi résulter de vitesses de vent trop élevées retenues pour les calculs. Nous avons considéré des vitesses de vent avec un temps de retour de 50 ans estimées à partir d'analyses statistiques pour l'ensemble de l'année (Fallot et Hertig, 2008) comme recommandé par l'OMM (WMO, 2009). Or, les tempêtes les plus violentes se rencontrent en saison froide en Suisse et en Europe. Des rafales tout aussi intenses peuvent être mesurées en saison chaude en cas de violents orages, mais elles ne durent pas longtemps contrairement aux tempêtes en saison froide qui peuvent souffler violemment pendant plusieurs heures. Il en résulte des vitesses moyennes plus élevées en saison froide avec des vents forts. Comme mentionné plus haut, les PMP ont été recherchées pour des températures élevées telles qu'on les rencontre en saison chaude. Par conséquent, les vitesses de vent retenues pour un temps de retour de 50 ans sont probablement trop élevées pour la saison chaude et il en résulte des effets de barrage et des PMP orographiques trop importants sur plusieurs reliefs alpins. Ceci

peut expliquer les grandes différences qu'on peut observer pour les PMP finales entre les sommets et les vallées ou les dépressions calculées par le modèle qu'on ne retrouve pas de manière aussi marquée pour les précipitations extrêmes estimées à partir des mesures *in situ* (Figure 9).

Les PMP trop basses calculées au sud des Alpes par rapport aux valeurs cinquentennales estimées à partir des mesures *in situ* peuvent résulter d'approximations dans la modélisation des PMP convectives. Les précipitations les plus intenses et abondantes se produisent au sud des Alpes avec la présence d'un front froid actif qui favorise une convection importante et un renforcement de l'effet de barrage pour des afflux d'air du sud-est à sud-ouest. Les structures convectives sont de petite taille et une résolution horizontale de 2 km ne permet pas de les reproduire correctement. Il conviendrait de considérer une résolution horizontale de 50 m pour cela (Goulpié, 2004), mais il faudrait disposer d'ordinateurs plus puissants et modifier les équations contenues dans les modèles pour simuler des pluies convectives à une échelle aussi fine sur l'ensemble de la Suisse. Le modèle météorologique COSMO-1 de MétéoSuisse parvient depuis peu à calculer les précipitations et d'autres paramètres avec une résolution horizontale de 1 km pour la Suisse, mais il nécessite une puissance de calcul 20 fois plus grande que le précédent modèle COSMO-2 avec une résolution horizontale de 2 km (MétéoSuisse, 2016).

Des PMP de 700 mm en 24 heures (ou de 400 mm en 3 heures) calculées par les modèles sur plusieurs sommets alpins en Suisse correspondraient à des temps de retour largement supérieurs à 10.000 ans si on se base sur les valeurs maximales estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir des mesures *in situ* et de méthodes statistiques (jusqu'à 240 mm en 24 heures pour ces sommets au nord des Alpes). Mais on ne dispose que de peu de données fiables des précipitations sur les sommets préalpins et alpins en raison de leur inaccessibilité. En outre, le vent perturbe sensiblement les mesures par les pluviomètres, surtout en montagne où il souffle en moyenne plus fortement. Mais des valeurs de 700 mm en 24 heures ont déjà été mesurées dans certaines régions du sud de la France près de la Méditerranée et elles pourraient aussi se rencontrer en Suisse dans un futur plus ou moins lointain consécutivement au réchauffement du climat qui favorise une augmentation de la fréquence et de

l'intensité des pluies extrêmes (GIEC, 2013). La quantité de vapeur d'eau possible dans l'atmosphère et les valeurs des PMP déterminées sur la base des conditions climatiques actuelles pourraient aussi augmenter dans le futur dans la plupart des régions sur Terre (Kunkel *et al.*, 2013).

Les résultats présentés ici sont difficilement comparables avec les études menées précédemment sur les PMP dans d'autres pays, car elles ne sont pas déterminées avec des modèles atmosphériques et de pluie tridimensionnels, mais à partir de méthodes empiriques, physiques, statistiques ou de transposition (WMO, 2009). Les paramètres météorologiques influençant les pluies extrêmes (humidité de l'air, convergence, pluie) sont souvent estimés à partir de mesures *in situ* pour un certain nombre d'épisodes avec des intempéries, puis maximisés de manière à obtenir des PMP en certains endroits. Elles peuvent être représentées sous la forme d'enveloppes (courbes hauteur d'eau – durée – surface) et être ensuite déterminées par transposition dans d'autres régions à l'image des PMP calculées pour l'ensemble de l'Inde (Clark *et al.*, 2002) ou dans la moitié est des USA (Hansen *et al.*, 1982). Mais de telles transpositions sont difficiles dans une topographie accidentée où les précipitations varient fortement à l'échelle locale. Certains modèles d'écoulement laminaire avec une ou plusieurs couches ont été développés aux USA pour reproduire les effets de la topographie et calculer les PMP orographiques dans les régions montagneuses de ce pays (WMO, 2009).

Casas *et al.* (2008) ont déterminé les PMP en Catalogne à partir des méthodes statistiques de Hershfield (1961) et de mesures effectuées à 145 endroits, puis ils les ont interpolées pour l'ensemble de la région. Les auteurs ont ensuite estimé les probabilités des PMP calculées entre 10^{-4} et 10^{-8} selon les endroits. On retrouve des probabilités assez semblables pour les PMP calculées en Suisse avec les modèles.

Poinsotte et Cavazza (2003) ont déterminé les PMP dans une petite région d'Italie (Alpes Apuanes) à partir de la maximisation de certains paramètres météorologiques (humidité de l'air, convergence, pluie) mesurés sur le terrain lors d'un violent orage et d'un modèle de cellule convective. Les PMP obtenues à quelques endroits de cette région sont en moyenne 2 fois plus élevées que les pluies mesurées durant l'épisode le plus extrême. On ob-

serve un rapport moyen semblable entre les PMP calculées pour la Suisse à l'aide de modèles et les précipitations extrêmes estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir de méthodes statistiques et de mesures *in situ*.

V. APPLICATION DES CARTES DES PMP POUR LE CALCUL DES PMF EN SUISSE

Malgré certaines approximations, ces cartes des PMP de la Suisse calculées pour plusieurs durées ont ensuite été utilisées pour déterminer des crues maximales probables (PMF) selon la méthode PMP/PMF (OFEN/OFEG, 2003). Toutefois, ces cartes constituent une synthèse des valeurs les plus élevées qu'on peut rencontrer en un endroit si toutes les conditions météorologiques défavorables sont réunies en même temps. De telles conditions ne peuvent pas se présenter simultanément partout, mais uniquement sur une petite surface pour une situation donnée. Les précipitations les plus extrêmes sont observées avec des fronts froids et/ou de gros nuages d'averses et d'orages (cumulonimbus). Les images radar et les mesures sur le terrain montrent que les pluies extrêmes générées par ces nuages durant un épisode particulier couvrent une surface assez restreinte et qu'elles se caractérisent par une très forte variabilité spatiale et temporelle (Receanu et Fallot, 2016). Il est donc nécessaire de reproduire ces variations spatio-temporelles des pluies extrêmes pour calculer des crues extrêmes réalistes sous peine d'aboutir à des valeurs trop élevées (Receanu, 2013). Cette remarque s'applique aussi aux cartes des PMP calculées pour des secteurs de vent de 45 à 90° (ouest à nord-ouest, nord à nord-est, sud-ouest à sud-est).

Dans le cadre de sa thèse, Ramona Receanu a développé une méthode de distribution des pluies extrêmes mesurées sur le terrain en quelques endroits ou calculées par des modèles avec une résolution horizontale de 2 km. Cette méthode se base sur la création de champs de pluie à partir d'une équation d'advection-diffusion (Jinno *et al.*, 1993) modifiée par Receanu (2013). La taille et l'intensité des champs de pluie ainsi créés ont ensuite été contrôlées et validées pour quelques épisodes avec des pluies extrêmes provoquées par de violents orages et mesurées sur le terrain par des pluviomètres et des images radar (Receanu et Fallot, 2016).

Une fois validée, cette méthode de distribution

spatio-temporelle des pluies extrêmes a été introduite dans un modèle hydrologique développé pour calculer des crues extrêmes dans de petits bassins alpins non glaciaires. Ce modèle, ainsi que la méthode de distribution des pluies extrêmes, ont été décrits dans plusieurs articles (Receanu *et al.*, 2009, 2010, 2012 et 2013). Ce modèle hydrologique a d'abord été validé dans plusieurs bassins versants pour quelques épisodes avec de fortes pluies mesurées par des pluviomètres, puis il a calculé les PMF à partir des cartes des PMP de la Suisse. Ces calculs ont permis de déterminer des PMF avec un temps de retour d'au moins 10.000 ans (= crues de sécurité) pour des petits bassins versants alpins non glaciaires ayant une surface inférieure à 100 km². Ces calculs ont également démontré la nécessité de procéder à une distribution spatio-temporelle de ces PMP pour aboutir à ces crues de sécurité. Le modèle hydrologique calcule des crues sensiblement plus élevées et peu probables lorsqu'on considère des PMP réparties de manière uniforme dans le temps et l'espace sur l'ensemble d'un bassin versant, même petit (Receanu, 2013 ; Receanu *et al.*, 2013).

Suite à ces résultats, un nouveau projet de recherche CRUEX++ financé par l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) a vu le jour en 2012 afin notamment de voir si les cartes des PMP de la Suisse peuvent aussi être utilisées par des modèles hydrologiques pour calculer des PMF pour de plus grands bassins versants en Suisse, ainsi que pour ceux contenant des ouvrages de retenue (barrages), de régulation ou des glaciers. Le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), un centre de recherche (Crealp) et deux bureaux d'ingénieur (Hydrique Ingénieurs, Hertig & Lador) ont participé à ce projet qui s'est terminé en 2017. Pour ce nouveau projet, un autre modèle hydrologique (GSM-Socont), développé dans le cadre de plusieurs études réalisées à l'EPFL (Schaeffli *et al.*, 2005 ; Garcia Hernandez *et al.*, 2007 ; Schaeffli et Zehe, 2009 ; Garcia Hernandez *et al.*, 2017), a été utilisé pour calculer des crues extrêmes à partir des cartes des PMP pour une vingtaine de bassins versants en Suisse de taille diverse dont certains contiennent des ouvrages de retenue ou des glaciers. Ce modèle hydrologique a également été d'abord validé pour plusieurs épisodes avec des fortes pluies et des crues mesurées sur le terrain, avant de calculer les crues extrêmes à partir des cartes des PMP pour plusieurs durées de pluie dans le cadre d'une thèse menée au LCH

(Zeimetz, 2017). Les crues extrêmes ainsi calculées correspondent à des PMF avec un temps de retour variant entre 10^5 et 10^{11} ans pour des bassins versants avec une surface inférieure à 230 km^2 si on se réfère aux crues mesurées sur une période d'environ 50 ans. Par contre, on obtient des PMF sensiblement plus élevées avec des temps de retour encore plus longs pour des bassins versants plus grands en Suisse (Zeimetz, 2017), soit des crues extrêmes peu probables par rapport à celles mesurées durant les 50 dernières années dans ces bassins.

La méthode PMP-PMF permet ainsi une bonne estimation des crues maximales probables en Suisse avec un modèle hydrologique et une distribution des pluies appropriés à partir des cartes des PMP calculées par les modèles atmosphériques avec une résolution horizontale de 2 km pour des bassins versants ayant une surface inférieure à 230 km^2 (Zeimetz, 2017). Il s'agit là de résultats appréciables, car une bonne partie de ces bassins versants ne dispose pas de mesures des précipitations et des crues sur une longue période (50 ans) en Suisse. En outre, la plupart des barrages en Suisse sont situés dans de petits bassins versants. Un outil informatique a été développé à l'intention des bureaux d'ingénieur leur permettant de calculer des PMF pour ces bassins versants à partir des cartes des PMP de la Suisse (CRUEX++, 2017).

La méthode PMP-PMF basée sur ces cartes conduit par contre à des crues trop élevées pour les bassins versants plus grands. Cela provient du fait que la méthode PMP-PMF cherche à maximiser tous les paramètres météorologiques et hydrologiques en même temps pour reproduire la situation la plus critique possible. De telles conditions pourraient éventuellement se présenter simultanément sur l'ensemble d'un petit bassin versant, mais pas dans un grand bassin. Il conviendrait de développer d'autres méthodes pour calculer des PMF réalistes dans les grands bassins en Suisse avec un temps de retour d'environ 10.000 ans (crues de sécurité) comme le demande la Directive fédérale des crues (OFEN, 2008).

CONCLUSION

La méthode PMP-PMF développée aux USA a été appliquée à la Suisse en vue de déterminer des précipitations et des crues extrêmes avec un temps de retour d'au moins 10.000 ans, conformément aux exigences de la loi fédérale suisse des crues

pour les bassins versants contenant des ouvrages de retenue (barrages) (OFEN, 2008). Pour cela, des modèles ont été développés, afin de calculer des PMP pour plusieurs durées (de 1h à 24h) sur l'ensemble de la Suisse avec une résolution horizontale de 2 km. Elles ont été comparées avec des précipitations journalières estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir de méthodes statistiques. Ces comparaisons ont montré que ces cartes des PMP reproduisent de manière satisfaisante les pluies extrêmes en Suisse, mais elles contiennent tout de même certaines approximations. En particulier, les valeurs sont manifestement trop élevées sur plusieurs sommets alpins, car les calculs sont basés sur des vitesses de vent trop élevées avec un temps de retour de 50 ans telles que recommandées par l'OMM (WMO, 2009). Le modèle atmosphérique reproduit aussi des ondes de relief quelquefois trop importantes qui peuvent conduire à des ascendances et à des effets de barrage trop marqués sur certains sommets. Par contre, les valeurs sont trop basses dans certaines régions du sud des Alpes, probablement à cause d'approximations dans la simulation des PMP convectives. Une résolution horizontale de 2 km est aussi insuffisante pour reproduire avec précision les effets de la topographie locale et de la convection sur la pluviométrie extrême.

Malgré ces approximations, les cartes des PMP ont pu être utilisées pour calculer des crues maximales probables (PMF) avec un modèle hydrologique (GSM-Socont) et une distribution spatio-temporelle de ces pluies extrêmes appropriés. Les PMF obtenues correspondent à des crues de sécurité avec un temps de retour variant entre 10^5 et 10^{11} ans pour les bassins versants avec une surface inférieure à 230 km^2 , alors qu'elles aboutissent à des probabilités encore plus rares pour les bassins versants plus grands. La méthode PMP-PMF basée sur les cartes des PMP calculées pour la Suisse peut donc être recommandée dans la Directive fédérale des crues pour calculer des PMF avec un modèle hydrologique pour les petits bassins versants dans ce pays. Pour les grands bassins versants, il convient d'utiliser d'autres méthodes.

BIBLIOGRAPHIE

AEAI (Association des établissements cantonaux d'assurance incendie) (2011). *Part moyenne des origines dans le montant des dommages naturels en Suisse sur la période 2001-2010*. Site web : <http://irv.ch/>

- IRV/Services/Statistik/Elementar/Ursachen.aspx (consulté le 14.09.2011).
- Audouard, A., Hertig, J.A. & Fallot, J.M. (2006). Modélisation des précipitations extrêmes en Suisse. *Actes du 19^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Epernay, 6-9.09.2006, 83-88.
- Ban, N., Schmidli, J. & Schär, C. (2015). Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophysical Research Letters*, 42, 1165-1172.
- Beniston, M., Goyette, S., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Frei, C., Schöll, R., Halsnaes, K., Holt T., Palutikof, J., Jylhä, K., Koffi, B., Semmler, T. & Woth, K. (2007). Future extreme events in Europe climate. An exploration of regional climate model projection. *Climatic Change*, 81(s.1), 71-95.
- Bergström, S., Hellström, S.S., Lindström, G. & Wern, L. (2007). *Swedish Guidelines for Design Flood Determination for Dams*. Swedish Kraftnät and SveMins 2007, 42 p.
- Bérod, D., Devred, D. & Laglaine, V. (1992). La problématique PMP/PMF: une méthode déterministe pour l'estimation de la crue extrême; avantages, inconvénients et possibilités d'amélioration. *International Symposium INTERPRAEVENT*, Berne, 129-139.
- Bérod, D. (1994). Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation de processus d'écoulement. (Thèse de doctorat n°1319). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 191 p.
- Bérod, D., Devred, D., Laglaine, V., Chaix, O., Altinakar, M. & Delley, P. (1994). *Calcul des crues extrêmes par des méthodes déterministes du type pluie maximale probable (PMP)/Crue maximale probable (PMF)*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Boillat, J.-L. & Schleiss, A. (2002). Détermination de la crue extrême pour les retenues alpines par une approche PMP-PMF. *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, 94, Jahrgang, Heft 3/4, 107-116.
- Caniaux, G. (1993). *Paramétrisation de la phase glace dans un modèle non hydrostatique de nuage*. (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier de Toulouse, France.
- Casas, C.M., Rodriguez, R., Nieto, R. & Redano, A. (2008). The Estimation of Probable Maximum Precipitation. The case of Catalonia. *Climate Research. Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1146, 291-302.
- Casas, C.M., Rodriguez, R., Prohom, M., Garzquez, A. & Redano, A. (2010). Estimation of the probable maximum precipitation in Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, 31, 1322-1327.
- CH 2011 (2011). *Swiss Climate Change Scenario CH2011*. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETHZ, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 p.
- Clark, C., Rakhecha, P.R., Hill, C. & Lane, S. (2002). Areal PMP distribution of one-day to three-day duration over India. *Meteorological Applications*, 9, 399-406.
- Cohen, T., García Hernández, J., Dubois, J. & Boillat, J.-L. (2009). Influence of hydrological model complexity on the estimation of floods in an alpine catchment for PMP conditions. *3rd IAHR Congress Water Engineering for a Sustainable Environment*, Vancouver, 1763-1770.
- Courvoisier, H.W. (1981). *Starkniederschläge in der Schweiz in Abhängigkeit vom Druck-, Temperatur- und Feuchtefeld*. Publication Institut Suisse de Météorologie (ISM), Nr. 42, 59 p.
- CRUEx++ (2017). Méthodologie et outil informatique pour l'estimation des crues extrêmes en Suisse. Site web : <https://cruex.crealp.ch> (consulté le 7.06.2017).
- Desurosne, I., Oancă, V., Oberlin, G., Toma, A. & Hubert, P. (1993). Analyse comparative Agrégée / PMP-PMF en estimation des crues rares et extrêmes. *Hydrologie Continentale*, 8(2), 93-102.
- Fallot, J.-M. (2000). Évolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20^{ème} siècle. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 100-109.
- Fallot, J.-M. & Hertig, J.-A. (2008). Détermination des vents extrêmes à l'aide d'analyses statistiques et de modélisations numériques dans une topographie accidentée en Suisse. *Bulletin Société de Géographie de Liège*, 51, 31-47.
- Fallot, J.-M. (2010). Évolution de l'intensité moyenne et de la fréquence des précipitations en Suisse de 1901 à 2009. *Actes du 23^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, France, 1-5.09.2010, 249-254.
- Fallot, J.-M. (2011). Efficacité des analyses de Gumbel pour déterminer les précipitations journalières extrêmes en Suisse. *Actes du 24^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rovereto, Italie, 6-10.09.2011, 243-248.
- Fallot, J.-M. (2012). Efficiency of Gumbel analyses for determining extreme daily precipitation in Switzerland. *4th Conference on Air Water Components of the Environment*, March 23-24, 2012, Cluj-Napoca, Romania, 1-8. <https://doaj.org.toc/2067-743X>
- Fallot, J.-M. & Hertig, J.-A. (2013). Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20^{ème} siècle. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 25, 13-24.
- Frei, C., Davies, H.C., Gurtz, J. & Schär, C. (2000). Climate dynamics and extreme precipitation and flood events in Central Europe. *Integrated Assessment*, 1, 281-299.
- Frei, C., Schöll, R., Futukome, S., Schmidli, J. & Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- García Hernández, J., Jordan F., Dubois J., Boillat J.-L. & Schleiss A. (2007). *Routing System II-Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques*, LCH,

- n°32. Communication Laboratoire de constructions hydrauliques, Ed. Prof. Dr. A. Schleiss, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Garcia Hernandez, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. & Roquier, B. (2017). *RS Minerve – Technical manuel v2.8*. RS MINERVE Group. Switzerland, 134 p. + appendices.
- Goulpié, P., Hertig, J.-A., Reinhardt, F., Hug, Ch., Fallot, J.-M. & Stirnimann, O.F. (2002). Numerical Modelling of Probable Maximum Flood for the Watershed of the Krasnodar Dam in Russia. *Commission for the Hydrology of the Rhine basin, CHR Report II-17 International conference on flood estimation*, 101-111.
- Goulpié, P. (2004). *Maximisation numérique et mesures acoustiques des précipitations*. (Thèse de doctorat). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 337 p.
- Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of extremes*. Columbia University press, 375 p.
- Haiden, T., Kerschbaum, M., Kahlig, P. & Nobilis, F. (1992). A refined model of the influence of orography on the mesoscale distribution of extreme precipitation. *Hydrol. Sci. J.*, 37(5), 417-427.
- Hansen, E.M., Schreiner, L.C., & Miller, J.F. (1982). *Application of Probable Maximum Precipitation Estimates - United States East of the 105th Meridian*. Hydrometeorological Report No.52, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept of Commerce, Washington, D.C., 168 p.
- Hershfield, D.M. (1961). Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of Hydraulics Division : Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 87, 99-106.
- Hertig, J.-A., Goulpié, P. & Reinhardt, F. (1999). *Numerical calculation of PMP for the watershed of the Derimer dam in Turkey*. Rapport scientifique LASEN-EPFL N546.100, Lausanne, 49 p.
- Hertig, J.-A. & Audouard, A. (2005). *Carte des précipitations extrêmes pour la Suisse (PMP 2005)*. Rapport EFLUM-EPFL destiné à l'Office fédéral des Eaux et de la Géologie, Lausanne, 43 p.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1535 p.
- Jinno, K., Kawamura, A., Berndtsson, R., Larson, M. & Niemczynowicz, J. (1993). Real-time rainfall prediction at small space-time scales using a two-dimensional stochastic advection-diffusion model. *Water Resources Research*, 29(5), 1489-1504.
- Kessler, E. (1969). On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *American Meteorological Society*, 10(32), 84 p.
- Klein Tank, A. M. G. & Können G. P. (2003). Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate*, 16, 3665-3680.
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 590-610.
- Kunkel, K.E., Karl, T.R., Easterling, D.R., Redmond, K., Young, J., Yin, X. & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Journal of Geophysical Research*, 40(7), 1402-1408.
- Livada, I., Charalambus, G. & Assimakopoulos, M.N. (2008). Spatial and temporal study of precipitation characteristics over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 93, 45-55.
- MétéoSuisse (2016). Nouveau modèle de prévisions météorologiques pour le domaine alpin. Repéré à <http://www.meteosuisse.admin.ch/home/actualite/infos.subpage.html/fr/data/news/2016/3/nouveau-modele-de-previsions-meteorologiques-pour-le-domaine-alpin.html> (consulté le 29.11.2016).
- Moberg, A. & 39 Coauthors (2006). Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, D22106, doi: 10.1029/2006JD007103.
- Montavon, C., Alexandrou, C. & Hertig, J.-A. (1995). Simulation of extreme precipitation events in the Swiss Alps. *Proceed. Symp. Research and developments in the field of dams*. Crans-Montana, Switzerland.
- Montavon, C. (1998a). *Simulation of atmospheric flows over complex terrain for wind power potential assessment*. (Thèse de doctorat n°1855). École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 153 p. + annexes.
- Montavon, C. (1998b). Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 273-282.
- OFEN/OFEG (2003). *Evaluation des crues dans les bassins-versants de Suisse. Guide pratique, N°4*. Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) / Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), Berne, 115 p.
- OFEN (2008). *Sécurité des ouvrages d'accumulation. Documentation de base relative à la vérification de la sécurité en cas de crue*. Office Fédéral de l'Énergie (OFEN), Berne, 26 p.
- Poinsotte, P. & Cavazza, S. (2003). Rapports entre pluie extrêmes observée et pluie maximale probable. Application à un cas réel : Versilia 1996. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 15, 333-340.
- Receanu, R.G., Hertig, J.-A. & Fallot, J.-M. (2009). Modélisation spatiale et temporelle des précipitations pour l'estimation des crues extrêmes dans les Alpes. *Actes du 22^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Cluj-Napoca, Roumanie, 1-5.09.2009, 383-389.
- Receanu, R.G., Hertig, J.-A. & Fallot, J.-M. (2010). A methodology for the adaptation of a PMP at the

- determination of a PMF. *Scientific Bulletin of the «Politehnica» University of Timisoara, Romania. Transactions on Hydrotechnics*, 55(69), Fascicola 1, 41-49.
- Receanu, R.G., Hertig, J.-A. & Fallot, J.-M. (2012). The estimation of PMP and PMF on Alpine basins in Switzerland. *Publication in the proceedings book of Air and Water - Components of the Environment*. BDI index in DOAJ. <http://www.doaj.org/doaj?func=abstract&id=1044593>, 212-219.
- Receanu, R.G. (2013). *Simulation fine des précipitations et crues extrêmes. Application aux petits bassins alpins non glaciaires*. (Thèse de doctorat). Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne (Suisse), 220 p.
- Receanu, R.G., Hertig, J.-A. & Fallot, J.-M. (2013). Modélisation hydrologique des précipitations et des crues extrêmes dans les bassins versants alpins. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 25, 25-44.
- Receanu, R.G. & Fallot, J.-M. (2016) Distribution spatio-temporelle des précipitations de type PMP utilisant un modèle de champ de pluie : application en Suisse. *Climat et pollution de l'air. Actes du 29^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon, France, 6-9.07.2016, 413-418.
- Schaeffli, B., Hingray, B., Niggli, M. & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9(1/2), 95-109.
- Schaeffli, B. & Zehe, E. (2009). Hydrological model performance and parameter estimation in the wavelet-domain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(10), 1921-1936.
- Scherrer, S.C., Fischer, E.M., Posselt, R., Liniger, M.A., Croci-Maspoli, M. & Knutti, R. (2016). Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 121, 2626-2637.
- Stallings, E.A., Asce, M., Cudworth, A.G., Hansen, E.M. & Styner, W.A. (1986). Evolution of PMP Cooperative Studies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(4), 516-526.
- Trömel, S. & Schönwiese, C.D. (2007). Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 29-39.
- Wang, B. & Jawed, K. (1986). Transformation of PMP to PMF: case studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7), 547-561.
- WMO (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. World Meteorological Organisation (WMO) No. 1045, Geneva, Switzerland, 291 p.
- Zeimetz, F., Receanu R.G., Schleiss A. & Fallot J.-M. (2014). A comparison of statistical and deterministic methods for predicting extreme floods in an alpine catchment. *3th IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*, Porto, Portugal, 2014, 10 p.
- Zeimetz, F. (2017). *Development of a methodology for extreme flood estimations in alpine catchments for the verification of dam safety*. (Thèse de doctorat n°7307). École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 322 p.
- Zeller, J., Geiger, H. & Roethlisberger, G. (1980). *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrand-gebiet : Intensitäten und Häufigkeiten : ausgewertete Period 1901-1970*. Institut fédéral pour l'étude des forêts, de la neige et du paysage (WSL), Birmensdorf.

Coordonnées des auteurs :

Jean-Michel FALLOT
 Institut de géographie et durabilité
 Université de Lausanne
 CH-1015 Lausanne
 Jean-Michel.Fallot@unil.ch

† Jacques-André HERTIG
 Bureau Hertig & Lador SA
 CH-1176 St Livres

Ramona Georgeta RECEANU
 Bureau Hertig & Lador SA
 CH-1176 St Livres

Fraenz ZEIMETZ
 Laboratoire de Constructions Hydrauliques
 École Polytechnique Fédérale de Lausanne
 (EPFL)
 CH-1015 Lausanne

ANNEXE

Équations du modèle de pluie contenues dans le modèle atmosphérique

Pour le calcul des précipitations, deux équations de conservation sont résolues pour la vapeur et le contenu en eau de nuage (m) ainsi que pour le contenu en eau précipitante (M). Les équations du modèle de pluie, présentées ci-après, sont essentiellement les équations du modèle de Kessler (1969), avec une modification pour la paramétrisation du terme représentant la conversion de la vapeur en eau de nuage dans un mouvement vertical de l'atmosphère (fonction G(T,p) dans l'équation de m).

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial(mu_i)}{\partial x_i} &= u_3 G(T, p) && \text{(génération)} \\ &- S\{m - m^*\} C_a (m - m^*) && \text{(autoconversion)} \\ &- S\{m\} S\{M\} K_2 m M && \text{(accrétion)} \\ &- S\{-m\} S\{M\} K_3 m M^{13/20} && \text{(évaporation)} \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(Mu_i)}{\partial x_i} - V_c \frac{\partial M}{\partial x_3} &= S\{m - m^*\} C_a (m - m^*) \\ &+ S\{m\} S\{M\} K_2 m M \\ &+ S\{-m\} S\{M\} K_3 m M^{13/20} \end{aligned}$$

où m^* est le seuil d'autoconversion et S une fonction définie par : $S\{i\} = 1$ si $i \geq 0$
 $S\{i\} = 0$ si $i < 0$

Les constantes du modèle prennent les valeurs suivantes :

$$C_a = 1 \cdot 10^{-3}; \quad K_2 = 9,0; \quad K_3 = 4,85 \cdot 10^{-2}; \quad m^* = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

La fonction paramétrisant la condensation de la vapeur en eau de nuage dans un mouvement ascendant de la masse d'air est donnée par :

$$\begin{aligned} G(T, p) &= \frac{\xi}{RT} \left[\alpha(p, T) - \frac{g \cdot e_s(T)}{RT} \right] \\ \alpha(p, T) &= \Gamma_{dry} \cdot \frac{1 + \frac{L\xi}{RT} \cdot \frac{e_s(T)}{p}}{\left(\frac{\partial e_s}{\partial T}\right)^{-1} + \frac{L\xi}{c_p p}} \end{aligned}$$

Modèle de Haiden pour les précipitations convectives

Haiden *et al.*, (1992) ont modélisé les précipitations convectives orographiques en tenant compte des phénomènes de brises montantes entraînées par le réchauffement des surfaces du relief. À partir des équations de brises de pentes, Haiden *et al.* déterminent la convergence de flux d'humidité dans la couche limite ce qui les amène à définir un indice orographique convectif ($F_{OKV}(x,y)$: Orographisch-Konvektiver Verstärkungsindex). L'indice orographique convectif va déterminer avec la distribution spatiale d'humidité $q(x,y)$, le volume de précipitations orographiques convectives en chaque point du domaine de calcul.

Le volume de précipitations d'origine orographique convective pour une durée de 24 heures et une période de retour de 100 ans est selon Haiden *et al.* (1992) :

$$P(x, y) = C_1 \cdot q(x, y) \cdot H_q \cdot (1 + F_{OKV}(x, y) \cdot C_2)$$

où : $P(x,y)$: volume de précipitations orographiques convectives en mm

$q(x,y)$: fonction de distribution de la vapeur d'eau au sol (g/m^3) définie de la façon suivante :

$$q(x, y) = \frac{e_0}{p_h(z)} 0,622 \cdot e^{\frac{-z}{H}}$$

où : $p_h(z)$: profil de pression hydrostatique pour une atmosphère avec profil de température

donné par $\frac{dT}{dz} = -5,5 \text{ K/km}$

H_q : hauteur caractéristique de 2.2 km.

$F_{OKV}(x,y)$: indice orographique convectif

C_1 et C_2 : constantes de calage qui dépendent de la durée et de la période de retour

e = pression de vapeur saturante en hPa