

# EVALUATION DES DIFFERENTES LOIS STATISTIQUES POUR L'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES EXTREMES EN SUISSE

FALLOT J.-M., SAUTEBIN T.

Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, [Jean-Michel.Fallot@unil.ch](mailto:Jean-Michel.Fallot@unil.ch)

**Résumé :** Les précipitations journalières extrêmes centennales ont été estimées à partir de six lois statistiques différentes effectuées sur des séries de mesures pluviométriques à 151 endroits en Suisse pour deux périodes de 50 ans. Ces estimations ont été comparées avec les valeurs journalières maximales mesurées durant les 100 dernières années (1911-2010) afin de tester l'efficacité de ces six lois. Cette comparaison révèle que la loi de Gumbel avec la méthode du maximum de vraisemblance et la loi Log-Normale sont globalement les meilleures pour estimer les précipitations journalières centennales en Suisse alors que les lois Normale et de Weibull les sous-estiment le plus fortement par rapport aux valeurs journalières maximales mesurées de 1911 à 2010. Mais la loi de Gumbel avec les méthodes des moments et des moindres carrés serait la plus efficace avec celle de Fréchet pour estimer les précipitations journalières centennales dans le futur si l'augmentation des précipitations journalières maximales mesurée de 1911 à 2010 devait se poursuivre.

**Mots clés :** précipitations centennales, séries de mesures, lois statistiques, Suisse.

**Abstract:** *Efficiency of some statistical analyses for determining extreme daily precipitation in Switzerland.* Analyses with 6 different statistical laws were carried out on rainfall time-series at 151 locations in Switzerland for two different periods of 50 years in order to estimate daily extreme precipitation with a return time of 100 years. Those estimations were compared with maximal daily values measured during the last 100 years (1911-2010) to test the efficiency of these 6 laws. This comparison shows that Gumbel's law with maximum likelihood method and Log-normal law are globally the best for assessing daily extreme precipitation with a return time of 100 years in Switzerland, while Normal and Weibull's laws underestimate it most strongly in comparison to the highest daily values measured from 1911 to 2010. But Gumbel's law with moments and least squares methods would be the most efficient with Fréchet's law for assessing daily precipitation with a return time of 100 years in the future if increasing of maximal daily rainfalls measured from 1911 to 2010 should continue.

**Key-words:** precipitation with a return time of 100 years, time series, statistical analyses, Switzerland.

## Introduction

Les intempéries et les crues représentent les dangers naturels occasionnant environ la moitié des dégâts aux constructions humaines en Suisse (Fallot et Hertig, 2013). Pour éviter de tels dégâts, il convient de dimensionner les ouvrages de protection contre les crues sur la base des précipitations extrêmes avec un temps de retour d'au moins 500 ans. Or, les séries de mesures pluviométriques disponibles ne dépassent pas 150 ans en Suisse. Il est nécessaire de recourir à des méthodes statistiques ou à des modélisations pour estimer ces précipitations extrêmes avec un temps de retour aussi long.

Concernant les méthodes statistiques, des études précédentes ont démontré que la loi de Gumbel aboutit globalement à de bons résultats en Suisse (Zeller et al., 1991) et en Allemagne (Trömel et Schönwiese, 2007) pour estimer des précipitations journalières avec un temps de retour plus long que les séries de mesures disponibles. Les résultats en Suisse sont meilleurs lorsque ces estimations sont réalisées à partir des séries de mesures pluviométriques de 1961 à 2010 que de 1911 à 1960 (Fallot, 2012 et 2013). Toutefois, la loi de Gumbel tend à sous-estimer les précipitations extrêmes dans le Nord-Est de la Suisse (Zeller et al., 1991). Une telle sous-estimation apparaît également avec cette loi dans d'autres régions du monde (Koutsoyannis, 2004), en particulier dans le Sud de l'Europe (Livada et al., 2008 ; Bacro et Chaouche, 2006) où la loi de Fréchet est plus performante. Il existe encore d'autres lois statistiques qui permettent de telles estimations comme les lois de Weibull, Normale, Log-Normale et Gamma (Coles, 2001 ; Laborde, 2000). Il convient de vérifier si ces différentes lois statistiques n'aboutissent

pas à de meilleurs résultats en Suisse que celle de Gumbel, en particulier dans le Nord-Est du pays et pour la période de mesures 1911-1960. Une telle comparaison n'a pas encore été réalisée de manière systématique pour ce pays.

## 1. Méthodes

Les lois de Gumbel, Fréchet, Weibull, Normale, Log-Normale et Gamma constituent des méthodes statistiques souvent utilisées en météorologie et en hydrologie pour rechercher les valeurs extrêmes pour les précipitations ou les crues (Coles, 2001 ; Laborde, 2000). Ces lois permettent de définir une distribution de probabilité en fonction de la fréquence d'apparition d'événements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue (par exemple 500 ans) que la série de mesures disponible. Elles sont décrites en détail dans Laborde (2000) et Coles (2001).

Les lois de Gumbel, de Fréchet et de Weibull dérivent de la loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV)  $F(x)$  pour laquelle il convient de déterminer les paramètres de position  $x_0$ , d'échelle  $s$  et de forme  $\alpha$  de la distribution de probabilité des valeurs  $x$  mesurées.

$$F(x) = \exp[-(1 + \alpha * u)^{-1/\alpha}] \text{ si } \alpha \neq 0 \text{ et } F(x) = \exp[-\exp(-u)] \text{ si } \alpha = 0 \quad \text{avec } u = (x - x_0)/s$$

Ces paramètres  $x_0$ ,  $s$  et  $\alpha$  peuvent être estimés à partir des méthodes du maximum de vraisemblance, des moments ou des moindres carrés (Laborde, 2000). Le paramètre de forme  $\alpha$  est le plus difficile à estimer et pour cette raison, la loi de Gumbel est souvent utilisée, car ce paramètre est égal à 0 contrairement aux lois de Fréchet et de Weibull. La loi de Gumbel permet ainsi un ajustement linéaire des probabilités des valeurs  $x$  mesurées à partir d'une double loi exponentielle selon une méthode décrite dans Gumbel (1958) et illustrée dans Fallot et Hertig (2013).

La loi Normale (ou de Gauss) et la loi Log-Normale (ou de Galton ou de Gibrat-Gauss) représentent les valeurs  $x$  mesurées sous la forme d'une distribution normale ou gaussienne pour laquelle on calcule les moyennes et les écarts types (ou les logarithmes de ces deux paramètres pour la loi Log-Normale) de l'échantillon des données. La loi Gamma (ou de Pearson) représente ces valeurs sous la forme d'une fonction gamma  $\alpha$  pour laquelle les paramètres d'échelle  $s$  et de forme  $\alpha$  doivent être déterminés (Laborde, 2000).

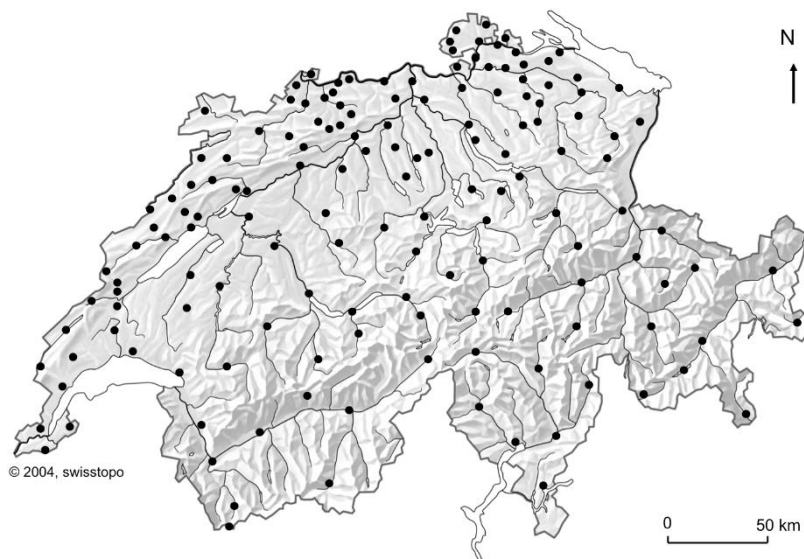
Dans cette étude, nous avons retenu les précipitations journalières maximales mesurées sur 24 heures pour chaque année dans une série de mesures donnée. Ces valeurs maximales  $x$  sont classées par ordre croissant pour lesquelles une fréquence de non dépassement ou d'apparition  $F(x)$  (qui correspond à l'inverse du temps de retour) est calculée en fonction de la distribution des probabilités obtenue pour chaque série de mesures selon les méthodes mentionnées ci-dessus pour les six lois étudiées. Il existe plusieurs formules empiriques pour estimer la fonction de répartition  $F(x)$  à partir du rang de chaque valeur  $x$  par ordre croissant et la taille de l'échantillon (nombre d'années ou de mois) :

$$F(x_r) = (r - \alpha)/(n + 1 - 2\alpha) \text{ avec } n = \text{taille de l'échantillon (nombre d'années ou de mois)} \\ x_r = \text{valeur de } x \text{ pour le rang } r \text{ et } \alpha = \text{coefficient entre 0 et 0.5}$$

Plusieurs valeurs empiriques ont été proposées pour ce coefficient  $\alpha$  allant de 0 à 0.5 (Fallot, 2013). Une étude précédente a montré que les estimations des précipitations journalières extrêmes en Suisse sont globalement les meilleures avec la loi de Gumbel pour la valeur  $\alpha$  de 0.5 proposée par Hazen (Fallot, 2013). Cette valeur  $\alpha$  de 0.5 a donc été retenue pour les six lois statistiques étudiées ici.

Les précipitations journalières avec un temps de retour de 100 ans (= précipitations centennales) ont ainsi été estimées à partir de ces six lois statistiques pour deux périodes de

mesures de 50 ans (1901-1960 et 1961-2010) à 151 endroits de la Suisse où des mesures en continu sont disponibles de 1911 à 2010 (figure 1). Les précipitations centennales ainsi estimées ont été comparées avec la valeur journalière maximale mesurée durant les 100 dernières années



(1911-2010) à ces 151 endroits pour les 6 lois, afin de tester leur efficacité. Pour la loi de Gumbel, ces comparaisons ont été effectuées avec les paramètres de position  $x_0$  et d'échelle  $s$  calculés avec les méthodes des moments, des moindres carrés et du maximum de vraisemblance. Pour les lois de Weibull et de Fréchet, seules les estimations obtenues à partir de la méthode du maximum de vraisemblance sont présentées ici.

**Figure 1.** Localisation des 151 stations pluviométriques étudiées en Suisse de 1911 à 2010

## 2. Résultats

Le tableau 1 montre que les coefficients  $R^2$  dépassent 0.95 pour 80 à 91% des stations pour les précipitations journalières centennales estimées avec les lois de Fréchet, de Gumbel et Log-Normale à partir des deux périodes de mesures de 50 ans. Dans ces cas-là, ces trois lois ajustent bien la distribution des précipitations journalières maximales par an mesurées pour les deux périodes étudiées et elles permettent une bonne estimation des précipitations journalières centennales et pour des temps de retour plus longs (Fallot et Hertig, 2013). De tels cas se rencontrent encore pour 71 à 75% des stations avec la loi Gamma, mais seulement pour 14 à 36% des cas avec les lois Normale et de Weibull pour les deux périodes de mesures.

**Tableau 1.** Fréquences d'apparition des coefficients de détermination  $R^2$  pour les courbes d'ajustement des six lois statistiques testées et deux périodes de mesures de 50 ans (1911-1960 et 1961-2010)

Loi	$R_2$ entre 0.7 et 0.8		$R_2$ entre 0.8 et 0.9		$R_2$ entre 0.9 et 0.95		$R_2$ entre 0.95 et 1	
	1911-1960	1961-2010	1911-1960	1961-2010	1911-1960	1961-2010	1911-1960	1961-2010
Gumbel mo.	0.0%	0.0%	2.6%	0.7%	9.9%	16.6%	87.4%	82.8%
Gumbel m.c.	0.0%	0.0%	2.6%	0.7%	9.9%	16.6%	87.4%	82.8%
Gumbel m.v.	0.0%	0.0%	2.6%	0.7%	9.9%	16.6%	87.4%	82.8%
Fréchet	0.0%	0.0%	0.7%	1.3%	9.3%	7.3%	90.1%	91.4%
Weibull	2.0%	0.7%	21.9%	27.8%	49.0%	57.0%	27.2%	14.6%
Gamma	0.7%	0.0%	5.3%	10.6%	19.2%	18.5%	74.8%	70.9%
Log-Normale	0.0%	0.0%	3.3%	4.0%	12.6%	15.9%	84.1%	80.1%
Normale	3.0%	5.3%	20.2%	25.8%	40.4%	50.3%	36.4%	18.5%

mo. = méthode des moments m.c = méthode des moindres carrés m.v. = méthode du maximum de vraisemblance

Par contre, les estimations des précipitations journalières centennales deviennent assez mauvaises lorsque les coefficients  $R^2$  sont inférieurs à 0.9. Ceci concerne 23 à 31% des stations pour les lois Normale et de Weibull, 6 à 11% des stations pour la loi Gamma et 1 à 4% des stations pour les lois de Fréchet, de Gumbel et Log-Normale suivant les périodes considérées.

Ces cas se rencontrent généralement lorsque la valeur la plus élevée des précipitations journalières enregistrée durant une année se situe largement au-dessus de la tendance logarithmique dessinée par les valeurs journalières maximales mesurées durant les autres années (Fallot et Hertig, 2013). Pour ces cas-là, les précipitations journalières centennales déterminées à partir des lois statistiques sont sous-estimées et cette sous-estimation est d'autant plus grande que les coefficients  $R^2$  sont bas. Ainsi, les lois Normale et de Weibull sous-estiment les précipitations journalières extrêmes pour un plus grand nombre de stations en Suisse que les autres lois, comme le montre aussi le tableau 2.

Le tableau 2 révèle que les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1961-2010 avec la loi de Gumbel et la méthode du maximum de vraisemblance sont semblables (0.0%) aux valeurs maximales mesurées durant ces 100 dernières années (1911-2010) lorsqu'on considère l'ensemble des 151 stations en Suisse (= Moyenne). Il en va de même pour la loi Log-Normale (-1.0%), alors qu'elles sont en moyenne plus basses de 7% avec la loi Gamma et de 10 à 12% avec les lois de Weibull et Normale. On observe la tendance inverse pour la loi de Fréchet (+12.1%) et dans une moindre mesure la loi de Gumbel avec les méthodes des moments et des moindres carrés (+4.5%).

**Tableau 2.** Comparaison entre les précipitations journalières centennales (PT100 ans) estimées par les six lois statistiques pour deux périodes de mesures *in situ* (1911-1960 = SM1 et 1961-2010 = SM2) et les précipitations journalières maximales mesurées (PJmax) de 1911 à 2010 pour 151 stations en Suisse

Séries de mesures	Différences (%) entre PT100 ans estimé et PJmax mesuré					
	-60 à -30%	-30 à -10%	-10 à +10%	10 à 30%	30 à 80%	Moyenne
<b>1911-1960 (SM1)</b>						
PT100 ans Gumbel mo. SM1	8.6%	33.1%	49.0%	9.3%	0.0%	-7.8%
PT100 ans Gumbel m.c. SM1	8.6%	33.7%	47.0%	10.6%	0.0%	-7.8%
PT100 ans Gumbel m.v. SM1	8.6%	33.1%	49.0%	7.9%	1.3%	-7.9%
PT100 ans Fréchet SM1	8.7%	37.1%	37.1%	13.9%	3.4%	-7.0%
PT100 ans Weibull SM1	21.2%	61.6%	17.2%	0.0%	0.0%	-21.0%
PT100 ans Gamma SM1	12.0%	61.6%	25.8%	0.7%	0.0%	-17.3%
PT100 ans Log-Normale SM1	10.5%	41.1%	42.4%	6.0%	0.0%	-12.3%
PT100 ans Normale SM1	20.6%	65.6%	13.9%	0.0%	0.0%	-21.8%
Séries de mesures	Différences (%) entre PT100 ans estimé et PJmax mesuré					
1961-2010 (SM2)	-60 à -30%	-30 à -10%	-10 à +10%	10 à 30%	30 à 80%	Moyenne
PT100 ans Gumbel mo. SM2	0.0%	11.9%	54.3%	33.8%	0.0%	4.5%
PT100 ans Gumbel m.c. SM2	0.0%	13.9%	51.6%	34.4%	0.0%	4.6%
PT100 ans Gumbel m.v. SM2	2.6%	19.8%	49.7%	24.5%	3.3%	0.0%
PT100 ans Fréchet SM2	0.0%	5.9%	45.7%	35.1%	13.3%	12.1%
PT100 ans Weibull SM2	2.6%	41.8%	55.6%	0.0%	0.0%	-10.3%
PT100 ans Gamma SM2	1.3%	35.1%	58.9%	4.6%	0.0%	-6.9%
PT100 ans Log-Normale SM2	0.0%	22.5%	62.3%	15.2%	0.0%	-1.0%
PT100 ans Normale SM2	4.0%	51.6%	44.4%	0.0%	0.0%	-12.0%

mo. = méthode des moments m.c. = méthode des moindres carrés m.v. = méthode du maximum de vraisemblance  
 PT100 ans Gumbel mo. SM1 = Précipitations journalières centennales estimées avec la loi de Gumbel et la méthode des moments (mo.) à partir des séries de mesures 1 (SM1 : 1911-1960)  
 PJmax = Précipitations journalières (24 heures) maximales mesurées de 1911 à 2010

En revanche, les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1911-1960 sont plus basses de 7 à 8% pour les lois de Gumbel et Fréchet par rapport aux valeurs journalières maximales mesurées durant les 100 dernières années pour l'ensemble des stations. Ces sous-estimations atteignent en moyenne 12% pour la loi Log-Normale, 17% pour la loi de Gamma et 21 à 22% pour les lois Normale et de Weibull. De telles sous-

estimations ne résultent pas d'une efficacité moins grande des analyses statistiques pour cette période, car les coefficients  $R^2$  sont semblables, voire même plus élevés que ceux pour la période 1961-2010 (cf. tableau 1). Ces sous-estimations proviennent du fait que les valeurs journalières maximales mesurées durant la période 1911-1960 sont globalement plus basses de 15% par rapport à celles de la période 1961-2010 consécutivement au réchauffement du climat observé durant le 20<sup>ème</sup> siècle (Fallot, 2013 ; Scherrer et al., 2016). Avec cela, les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1961-2010 sont en moyenne de 8 à 12% plus élevées (et même 19% pour la loi de Fréchet) que celles obtenues à partir de la période de mesures 1911-1960.

Les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1961-2010 se situent à moins de 10% des valeurs maximales mesurées de 1911 à 2010 pour 62% des stations avec la loi Log-Normale, 59% avec la loi Gamma et 44 à 56% des stations avec les autres lois statistiques. De tels cas se rencontrent encore pour 47 à 49% des stations avec la loi de Gumbel, 42% avec la loi Log-Normale et seulement 14 à 17% des stations avec les lois Normale et de Weibull pour la période de mesures 1911-1960 (tableau 2).

Parmi les six lois testées, celle de Gumbel avec la méthode du maximum de vraisemblance aboutit aux meilleures estimations des précipitations journalières centennales par rapport aux valeurs journalières maximales mesurées de 1911 à 1960 pour 45% des 151 stations étudiées, devant la loi de Fréchet (21%), lorsque ces estimations sont effectuées à partir de la période de mesures 1911-1960. Ces stations apparaissent plutôt dans la moitié nord du Pays. Par contre, aucune loi ne ressort vraiment du lot pour les estimations faites à partir de la période de mesure 1961-2010.

La loi de Gumbel avec la méthode du maximum de vraisemblance serait ainsi globalement la meilleure pour estimer des précipitations journalières centennales en Suisse devant les lois Log-Normale, Gamma et de Fréchet. Mais l'augmentation des précipitations journalières maximales mesurée entre les périodes 1911-1960 et 1961-2010 en relation avec le réchauffement global du climat devrait se poursuivre durant le 21<sup>ème</sup> siècle selon les modèles climatiques régionaux (Beniston et al., 2007 ; Rajczak et al., 2013). On peut penser que les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1961-2010 (et *a fortiori* 1911-1960) avec la loi de Gumbel et la méthode du maximum de vraisemblance, ainsi qu'avec les lois Log-Normale et Gamma seront trop basses par rapport aux pluies extrêmes qui seront mesurées durant le 21<sup>ème</sup> siècle. Dans ces conditions, ces lois tendent aussi à sous-estimer les précipitations journalières avec un temps de retour supérieur aux séries de mesures disponibles et il conviendrait d'utiliser d'autres lois pour ces analyses dans ce genre de situation, en particulier celles de Fréchet et de Gumbel avec les méthodes des moments et des moindres carrés. Mais la loi de Fréchet entraîne pour quelques stations une forte surestimation (jusqu'à 80%) des précipitations journalières centennales par rapport aux valeurs maximales mesurées durant le 20<sup>ème</sup> siècle. En outre, l'ajustement des courbes de régression est plus simple avec la loi de Gumbel que pour la loi de Fréchet où le paramètre de forme  $\alpha$  de la courbe n'est pas nul.

Vu la tendance à la hausse des valeurs des précipitations journalières maximales constatée durant le 20<sup>ème</sup> siècle et projetée pour le 21<sup>ème</sup> siècle, la loi de Gumbel avec les méthodes des moments et des moindres carrés nous semble finalement la plus efficace pour estimer des précipitations journalières extrêmes avec des temps de retour plus longs que les séries de mesures disponibles en Suisse. Ceci va à l'encontre de plusieurs études affirmant que la loi de Gumbel n'est pas appropriée pour ce genre d'estimations et que la loi de Fréchet aboutit globalement à de meilleurs résultats dans la plupart des régions du monde (Koutsoyiannis, 2004), notamment autour de la Méditerranée (Livada et al., 2008 ; Bacro et Chaouche, 2006).

---

## Conclusion

Les précipitations journalières centennales estimées à partir de six lois statistiques sur deux périodes de mesures de 50 ans aboutissent à de bons résultats en Suisse avec les lois de Gumbel, de Fréchet, Log-Normale et Gamma pour des estimations faites à partir de la période de mesures 1961-2010. Par contre, les lois Normale et de Weibull sous-estiment les précipitations journalières centennales, surtout pour la période de mesures 1911-1960. Une telle sous-estimation apparaît aussi pour cette période avec les autres lois. Les différences de performances entre les six lois pour les deux périodes étudiées de 50 ans résultent de la représentativité des valeurs des précipitations journalières maximales contenues dans les séries de mesures pluviométriques. Si l'on tient compte de l'augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes déjà observée et prévue par les modèles climatiques pour le futur, la loi de Gumbel avec les méthodes des moments et des moindres carrés est, globalement, la plus appropriée pour estimer des précipitations journalières extrêmes en Suisse avec des temps de retour 2 à 3 fois plus longs que les séries de mesures disponibles. Il s'agit d'un résultat appréciable pour les bureaux et services spécialisés dans les eaux, car cette loi est plus simple à utiliser que les autres pour de telles estimations.

## Bibliographie

- Bacro J. N., Chaouche A., 2006. Incertitude d'estimation des pluies extrêmes du pourtour méditerranéen : illustration par les données de Marseille. *Hydrological Sciences Journal*, **51**(3), 389-403.
- 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.
- Coles S., 2001. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. London, Springer Verlag, 211 p.
- Fallot J.-M., 2012. Efficiency of Gumbel analyses for determining extreme daily precipitation in Switzerland. *4<sup>th</sup> Conference on Air and Water Components of the Environment, Cluj-Napoca, Romania, 23-24.03.2012. DOAJ 2067743X, Issue 2012*, p. 1-8.
- Fallot J.-M., 2013. Evaluation des différentes formules de la loi de Gumbel pour l'estimation des précipitations journalières extrêmes en Suisse. *Actes du 26<sup>ème</sup> colloque international de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonou, Bénin, 3-7.09.2013, p. 224-229.
- 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<sup>ème</sup> siècle. *Mém. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, **25**, p. 13-24.
- Gumbel E.J., 1958. *Statistics of extremes*. Columbia University press, 375 p.
- Koutsoyiannis D., 2004. Statistics and estimation of extreme rainfall: Part II. Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences*, **49**, 591-610.
- Laborde J.-P., 2000. *Eléments d'hydrologie de surface*. Université de Nice – Sophia Antipolis, 204 p.
- Livada I., Charalambus G., Assimakopoulos M.N., 2008. Spatial and temporal study of precipitation characteristics over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, **93**, 45-55.
- Rajczak J., Pall P., Schär C., 2013. Projection of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 3610-3626.
- 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.
- 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.
- Zeller J., Geiger H., Roethlisberger G., 1991. *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrand-Gebiet*. Office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage (WSL), Birmensdorf, 334 p.