

2. Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20^{ème} siècle

par

Jean-Michel FALLOT¹ & Jacques-André HERTIG²

Résumé.—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: 23-34.

Les précipitations journalières extrêmes ont été estimées pour un temps de retour de 500 ans à partir d'analyses de Gumbel effectuées sur des séries de mesures pluviométriques à 429 endroits de la Suisse pour la période 1961-2010. Ces estimations aboutissent à de bons résultats pour la plupart des stations dans ce pays. Les précipitations cinquentennales ainsi déterminées sont en moyenne 15% plus élevées que celles obtenues à partir d'analyses semblables faites sur des séries de mesures pour la période 1901-1970. Ceci confirme que les précipitations extrêmes tendent à augmenter durant le 20^{ème} siècle en Suisse comme ailleurs.

Mots clés: Précipitations extrêmes, analyses de Gumbel, séries de mesures, Suisse, crues.

Abstract.—FALLOT J.-M. & HERTIG J.-A., 2013. Assessing of extreme precipitation in Switzerland from statistical analyses and increase of extreme values during the 20th century. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 23-34.

Gumbel analyses were carried out on rainfall time series at 429 locations in Switzerland over the period 1961-2010 in order to estimate extreme daily precipitation with a return time of 500 years. These estimations provide good results for most stations in this country. Extreme daily precipitations estimated from these analyses are in average 15% higher than those determined from similar analyses made on time-series for the period 1901-1970. This confirms that extreme precipitation tend to increase during the 20th century in Switzerland as elsewhere.

Keywords: Extreme precipitation, Gumbel analyses, time-series, Switzerland, floods.

¹Institut de Géographie et Durabilité, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne.

E-mail: Jean-Michel.Fallot@unil.ch

²Hertig et Lador SA, CH-1170 St Livres (VD); tél.: +41 (0)21 312 70 77.

E-mail: hertig@hetl.ch

INTRODUCTION

Les intempéries et les crues représentent les dangers naturels qui occasionnent le plus de dégâts en Suisse. Selon l'Association des Etablissements cantonaux d'Assurance Incendie (AEAI 2011), les inondations sont à l'origine de 49% du montant total des dommages engendrés par les dangers naturels dans notre pays de 2001 à 2010, devant la grêle (34%) et les tempêtes (12.5%).

Pour les barrages, les hydrologues dimensionnent généralement les ouvrages de protection contre les crues sur la base des précipitations extrêmes avec un temps de retour de 500 ans (= précipitations cinquentales) ou 1000 ans multipliées par 1.5. L'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) avait calculé ces précipitations à près de 300 endroits de la Suisse à partir d'analyses statistiques effectuées sur des séries de mesures pluviométriques pour la période 1901-1970 (ZELLER *et al.* 1980).

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, TRÖMEL & SCHÖNWIESE 2007, IPCC 2007). Une telle augmentation est aussi perceptible en Suisse, où les précipitations journalières maximales par an tendent à augmenter sur la période 1911 à 2010 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, IPCC 2007). Pour cette raison, les précipitations journalières cinquentales pour une durée de 24 heures ont été recalculées à partir d'analyses statistiques effectuées sur des séries de mesures pluviométriques pour la période 1961-2010 à 429 endroits du pays, afin d'examiner si ces valeurs cinquentales n'ont pas augmenté par rapport à celles obtenues par le WSL sur la période 1901-1970.

MÉTHODES

La loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV: Generalised Extreme Value Distribution) constitue une méthode statistique souvent utilisée en météorologie pour rechercher les valeurs extrêmes pour les précipitations ou les vents (JENKINSON 1955). La loi GEV permet d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition des événements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus importante (par exemple 500 ans) que la série de mesures disponibles. Cet ajustement peut se faire selon plusieurs lois comme celles de Gumbel, de Fréchet ou de Weibull. La loi de Gumbel est souvent utilisée car elle permet un ajustement linéaire à partir d'une double loi exponentielle selon une méthode décrite dans GUMBEL (1958). Pour une série de mesures de précipitations donnée, on retient la hauteur d'eau journalière maximale mesurée en 24 heures pour chaque année ou chaque mois. Ces valeurs maximales sont ensuite classées par rang croissant et la fréquence d'apparition (période de retour) d'un événement extrême peut être estimée en fonction de la double loi exponentielle de Gumbel u :

$$u = -\ln(-\ln(1-1/T)), \quad \text{avec } T = \text{période de retour exprimée en années ou en mois}$$

On peut ensuite ajuster une droite de régression linéaire en fonction des valeurs obtenues et des valeurs maximales annuelles ou mensuelles mesurées.

Cependant, selon certains auteurs, les valeurs des précipitations les plus élevées et les plus rares ne suivent pas une distribution linéaire selon la double loi exponentielle de Gumbel et cette dernière tendrait à sous-estimer les valeurs extrêmes déterminées pour des temps de retour plus longs que les séries de mesures disponibles (KOUTSOYIANNIS 2004).

Le WSL a testé plusieurs méthodes statistiques pour déterminer les valeurs des précipitations journalières extrêmes pour une durée plus longue (100, 500 ans) que les séries de mesures disponibles. Les analyses de Gumbel ont abouti aux meilleurs résultats pour l'estimation des précipitations journalières (sur 24 heures) extrêmes en Suisse, sauf dans un quart Nord-Est et quelques autres endroits isolés. Dans ces régions-là, la loi log normale a fourni de meilleures estimations, mais elle se traduit par des valeurs de 27 à 43% plus élevées que les précipitations journalières cinquentennales déterminées par la loi de Gumbel.

Les analyses effectuées sur des séries de mesures en Allemagne ont aussi montré que la loi de Gumbel permet de déterminer efficacement les valeurs des précipitations extrêmes dans ce pays (TRÖMEL & SCHÖNWIESE 2007). Il en va de même pour le Sud-Est de la France, sauf dans les régions proches de la Méditerranée où la loi de Fréchet est plus performante (communication orale de Charles Obled le 14.02.2011 lors de la 2^{ème} Journée de Rencontre sur les Dangers Naturels à l'Université de Lausanne). La loi de Gumbel est également moins appropriée dans d'autres pays méditerranéens comme la Grèce (LIVADA *et al.* 2008).

Les précipitations journalières cinquentennales ont donc été estimées à partir de mesures effectuées durant 50 ans, de 1961 à 2010, en appliquant la loi Gumbel décrite plus haut, car elle donne globalement les meilleurs résultats en Suisse. Ces mesures proviennent du réseau de MétéoSuisse constitué de stations automatiques enregistrant en continu plusieurs paramètres météorologiques et de stations pluviométriques où sont relevées les hauteurs d'eau une fois par jour vers 5h40 UTC du matin. Une bonne partie de ces stations ont des mesures disponibles au format digital à partir de 1961, et celles-ci couvrent l'intégralité de la période 1961-2010 à 306 endroits. Puisque les précipitations varient fortement à l'échelle locale dans une topographie accidentée comme celle de la Suisse, nous avons également retenu des séries de mesures plus courtes durant cette période, mais couvrant au minimum 35 ans, à 123 autres endroits. Ces endroits supplémentaires permettent d'affiner la couverture spatiale, surtout dans les Alpes où les stations de mesures sont plus espacées. Cela représente un total de 429 stations pour lesquelles les précipitations journalières extrêmes ont été déterminées avec un temps de retour de 500 ans.

RÉSULTATS

La figure 1 présente à titre d'exemple les droites de régression obtenues pour les précipitations journalières maximales annuelles à 2 endroits de la Suisse (Lugano et Graechen) avec les hauteurs d'eau extrapolées pour une période de retour de 100 et 500 ans (= valeurs centennales et cinquentennales). On constate que la droite de régression de Gumbel obtenue à partir des valeurs maximales annuelles pour une période de 50 ans explique bien les variations de ces valeurs d'une année à l'autre à Lugano ($R^2 > 0.98$, soit plus de 98% des

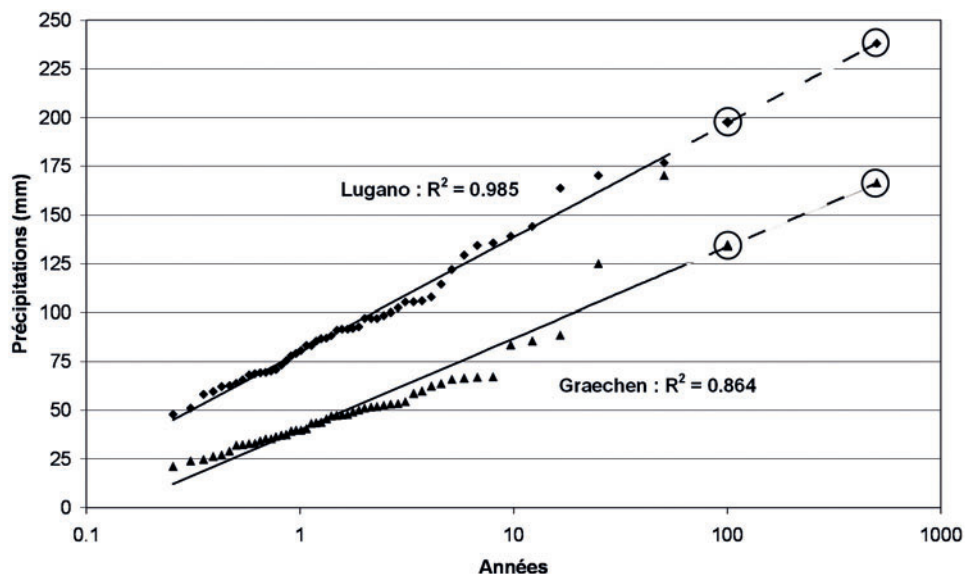


Figure 1.—Précipitations journalières maximales par an mesurées de 1961 à 2010 à 2 endroits de la Suisse (Lugano et Graechen: figures 2 et 3 pour leur localisation) et droites d'ajustement de la loi de Gumbel.

Les symboles entourés d'un cercle correspondent aux précipitations journalières centennales et cincennales (tout à droite) estimées en prolongeant la droite d'ajustement.

Maximal daily precipitation per year measured from 1961 to 2010 at 2 locations in Switzerland (Lugano and Graechen: figures 2 and 3 for their locations) and adjusting straight line of Gumbel law. *Symbols surrounded with circle correspond to daily precipitation with a return time of 100 and 500 years estimated by extending the adjusting straight line.*

variations expliquées). Elle permet par conséquent une bonne estimation des précipitations centennales et cincennales à cet endroit. On peut faire les mêmes constatations pour la plupart des séries de mesures en Suisse, sauf en quelques lieux comme Graechen.

Cet endroit se caractérise par un des coefficients R^2 le plus bas des 429 stations étudiées. Il dépasse encore 0.85, mais on remarque que les 2 valeurs journalières maximales annuelles les plus élevées se situent largement au-dessus de la tendance logarithmique dessinée par les autres valeurs journalières maximales. La double loi exponentielle de Gumbel n'ajuste pas très bien la tendance mesurée pour les précipitations journalières maximales mesurées à cet endroit durant la période 1961-2010. La valeur cincennale extrapolée à cet endroit par la loi de Gumbel avoisine les précipitations journalières maximales mesurées sur une période de 50 ans. Par conséquent, les précipitations journalières centennales et cincennales estimées par la loi de Gumbel sont sous-estimées pour cette distribution des valeurs journalières annuelles maximales. Des cas semblables ont été rencontrés en d'autres endroits de la Suisse et ils se caractérisent par des coefficients R^2 inférieurs à 0.9. D'une manière générale, plus ces coefficients sont bas, plus les écarts entre la valeur journalière maximale mesurée et la droite de régression ajustée par la loi de Gumbel sont grands et plus les précipitations journalières centennales et cincennales obtenues sont sous-estimées. Cette loi peut également surestimer les valeurs de ces précipitations extrêmes, comme nous

le verrons plus loin, mais de tels cas affectent moins fortement les coefficients R^2 .

Le tableau 1 montre que les coefficients R^2 dépassent 0.95 pour 79% des stations et la droite de régression de Gumbel ajuste bien la distribution des précipitations journalières maximales par an mesurées de 1961 à 2010. Dans ce cas, les précipitations journalières centennales et cinquentennales sont bien estimées pour ces stations à partir de la loi de Gumbel. Cette méthode donne des résultats un peu moins bons pour 15.2% des stations en Suisse avec des coefficients R^2 compris entre 0.9 et 0.95. Les estimations sont encore moins bonnes pour 5.8% des stations avec des coefficients R^2 inférieurs à 0.9. La majorité de ces dernières se localise dans un quart Nord-Est de la Suisse (figure 2), ce qui est semblable aux résultats trouvés précédemment par le WSL. Toutefois, ces stations ne représentent qu'une minorité parmi les autres stations de cette région de la Suisse où la loi de Gumbel aboutit à de bons résultats.

Dans environ 4 cas sur 10 (41.3%), comme la station de Lugano, les précipitations

Tableau 1.–Fréquences d'apparition des différents coefficients R^2 pour les droites d'ajustement de la loi de Gumbel.

Frequencies of different R^2 coefficients for adjusting straight lines of Gumbel law.

Coefficients R^2	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
0.95 - 1	79.0 %	79.0 %
0.9 - 0.95	15.2%	94.2%
0.85 - 0.9	4.9 %	99.1%
0.79 - 0.85	0.9 %	100 %

journalières maximales mesurées de 1961 à 2010 restent inférieures aux valeurs estimées par les analyses de Gumbel pour un temps de retour de 50 ans (tableau 2). Les précipitations journalières maximales mesurées durant cette période de 50 ans dépassent par contre les valeurs estimées par ces analyses pour un temps de retour de 250 et 500 ans dans respectivement 6.3% et 2.6% des stations en Suisse (comme celle de Graechen). Elles coïncident généralement avec les stations où les coefficients R^2 sont inférieurs à 0.9. Pour ces stations, les précipitations journalières cinquentennales (et centennales) obtenues à partir de la loi de Gumbel sont plus ou moins fortement sous-estimées comparativement aux valeurs maximales mesurées sur le terrain. Ces stations se rencontrent un peu partout en Suisse tout en étant un peu plus nombreuses dans le quart Nord-Est du pays (figure 3). Par contre, les analyses de Gumbel permettent d'estimer efficacement les précipitations journalières cinquentennales pour 74% des stations où les précipitations maximales mesurées sur le terrain restent inférieures aux valeurs centennales estimées. Ces estimations sont encore assez bonnes pour 17% des stations où les précipitations maximales mesurées se situent entre les valeurs avec un temps de retour de 100 et 250 ans.

Les valeurs journalières très élevées observées dans certaines séries pluviométriques en Suisse ne résultent pas d'erreurs de mesures. Elles coïncident avec des épisodes très pluvieux qui ont également provoqué de fortes précipitations dans les stations environnantes, mais avec des valeurs moins extrêmes. De tels épisodes se rencontrent surtout en saison chaude et ils peuvent être renforcés par un effet convectif local susceptible de conduire à des valeurs

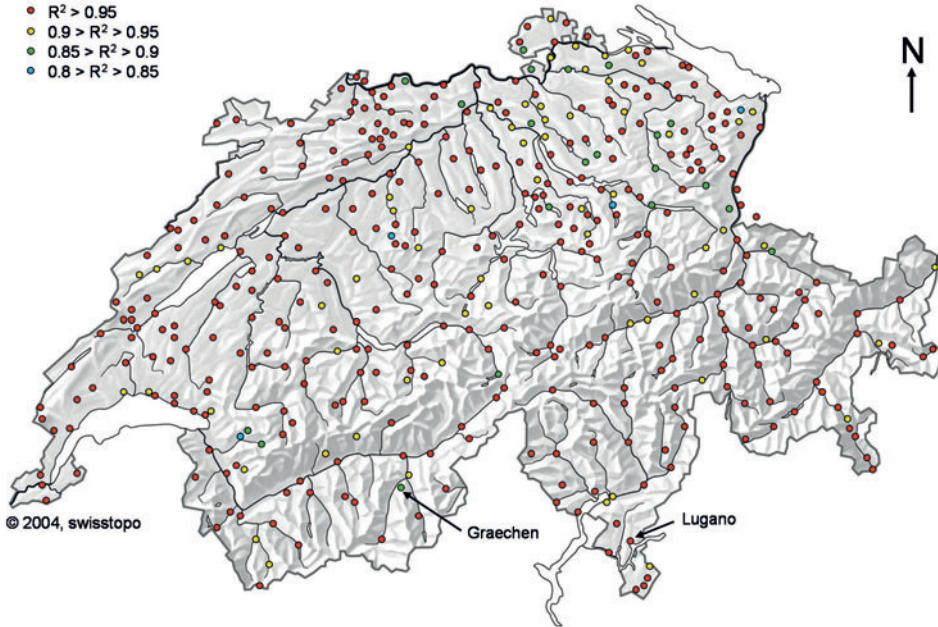


Figure 2.—Coefficients de détermination R^2 pour les droites d'ajustement de Gumbel pour les précipitations journalières maximales par an en Suisse.

Coefficient of determination R^2 for adjusting Gumbel straight lines for maximal daily precipitation per year in Switzerland.

Tableau 2.—Comparaison entre les précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2010 et les précipitations journalières estimées pour plusieurs temps de retour.

Prec. max. mes. = précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2010.

Prec. T 50 ans = précipitations journalières maximales estimées pour un temps de retour T de 50 ans.

Comparison between daily maximal precipitation measured from 1961 to 2010 and daily precipitation estimated from Gumbel analyses for several return times.

Prec. max. mes. = Daily maximal precipitation measured from 1961 to 2010.

Prec. T 50 ans = Daily maximal precipitation estimated for a return time T of 50 years.

	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
Prec. max. mes. < Prec. T 50 ans	41.3 %	41.3 %
Prec. T 50 ans > Prec. max. mes. > Prec. T 100 ans	32.9%	74.1 %
Prec. T 100 ans > Prec. max. mes. > Prec. T 250 ans	17.0 %	91.1 %
Prec. T 250 ans > Prec. max. mes. > Prec. T 500 ans	6.3 %	97.4 %
Prec. T 500 ans > Prec. max. mes. > Prec. T 1000 ans	2.6 %	100 %

journalières extrêmes en quelques endroits. De telles valeurs pourraient alors correspondre à un événement extrême avec un temps de retour de 500 ans ou plus qu'on aurait mesuré en quelques endroits du pays à l'intérieur de la série de mesures de 50 ans (1961-2010). Dans ce cas-là, les analyses de Gumbel ne sous-estimeraient pas les précipitations journalières cinquantennales à ces endroits-là, ce qui accroîtrait encore la validité de cette méthode pour leur estimation en Suisse.

Le WSL avait estimé les précipitations journalières cinquantennales de la même manière pour 240 stations à partir de mesures effectuées de 1901 à 1970. Il avait encore procédé à des estimations semblables pour 42 autres stations, mais à partir de la loi normale et non pas de la double loi exponentielle de Gumbel. Comme mentionné plus haut, les estimations à partir de la première méthode aboutissent à des valeurs plus élevées (de 27 à 43%) que la seconde. Le tableau 3 compare les précipitations journalières cinquantennales estimées à partir de la double loi exponentielle de Gumbel pour des mesures faites de 1901 à 1970 et de 1961 à 2010. Les valeurs cinquantennales estimées à partir des mesures pour la période 1961-2010 sont globalement plus élevées de 15% que celles obtenues sur la période 1901-1970 pour l'ensemble des 240 stations considérées. Les écarts entre les valeurs cinquantennales estimées à partir de ces 2 périodes de mesures varient entre 0 et 30% pour la majorité de ces stations (72%); ces écarts dépassent 30% pour 10% des stations. Par contre, les valeurs cinquantennales estimées à partir des mesures de la période 1961-2010 sont inférieures (de 0 à 20%) à celles obtenues à partir des mesures de la période 1901-1970 pour 18% des stations. Ceci confirme que les valeurs journalières extrêmes pour les précipitations tendent à augmenter durant le 20^{ème} siècle.

Pour vérifier cette tendance, FALLOT (2011) a déterminé les précipitations journalières centennales à partir d'analyses de Gumbel effectuées sur 4 périodes différentes de 30 ans (1911-1940, 1931-1960, 1961-1990, 1981-2010) et comparé avec les précipitations journalières maximales mesurées de 1911 à 2010 à 151 endroits de la Suisse où des mesures en continu durant les 100 dernières années sont disponibles sous format digital. Cette comparaison a également été faite avec les précipitations journalières centennales estimées à partir de séries de mesures couvrant l'ensemble de la période 1911-2010 et 2 périodes de 50 ans (1911-1960 et 1961-2010).

Le tableau 4 révèle que les précipitations journalières centennales estimées à partir des périodes de mesures 1961-1990, 1981-2010 et 1961-2010 sont proches (0 à 2%) des valeurs maximales mesurées durant ces 100 dernières années (1911-2010) lorsqu'on considère l'ensemble des 151 stations (= moyenne). Pour 51 à 66% des stations, les précipitations journalières centennales estimées se situent à moins de 10% des valeurs maximales mesurées de 1911 à 2010. La loi de Gumbel permet une bonne estimation des précipitations journalières centennales et cinquantennales pour ces stations à partir de ces 3 périodes de mesures (1961-1990, 1981-2010 et 1961-2010).

Par contre, les précipitations journalières centennales estimées à partir des périodes de mesures 1911-1940 et 1911-1960 sont plus basses de 11 à 12% par rapport aux valeurs maximales mesurées durant les 100 dernières années pour l'ensemble des stations. Cette sous-estimation atteint 10 à 30% pour 42 à 48% des stations et 30 à 50% pour 9 à 11% des stations. Enfin, les précipitations journalières centennales estimées à partir de la période de mesures 1931-1960 et 1911-2010 sont plus basses de 7% par rapport aux valeurs mesurées



Figure 3.—Comparaison entre les précipitations journalières maximales mesurées sur le terrain de 1961 à 2010 et les précipitations journalières estimées par les analyses de Gumbel pour plusieurs temps de retour.

Prec. mes. = Précipitations journalières maximales mesurées de 1961 à 2010.

Prec. T 50 ans = Précipitations journalières maximales estimées pour un temps de retour T de 50 ans.

Comparison between daily maximal precipitation measured from 1961 to 2010 and daily precipitation estimated from Gumbel analyses for several return times.

Prec. max. mes. = Daily maximal precipitation measured from 1961 to 2010

Prec. T 50 ans = Daily maximal precipitation estimated for a return time T of 50 years.

Tableau 3.—Comparaison entre les précipitations journalières cinquantennales estimées à partir des mesures pour la période 1961-2010 et celles pour la période 1901-1970 (= *Prec. T 500 ans* 1961-2010 / 1901-1970: rapport exprimé en % entre les 2 périodes).

Comparison between daily precipitation with a return time of 500 years estimated from measurements for the period 1961-2010 and from measurements for the period 1901-1970 (= *Prec. T 500 ans* 1961-2010 / 1901-1970: ratio in % between 2 periods).

<i>Prec. T 500 ans</i> 1961-2010 / 1901-1970	Fréquence d'apparition	Fréquence cumulée
-20 à -10 %	3.3 %	3.3 %
-10 à 0 %	14.5%	18.2 %
0 à +10 %	22.3 %	40.5 %
10 à 20 %	28.9 %	69.4 %
20 à 30 %	20.7 %	90.1 %
30 à 40 %	7.9 %	97.9 %
40 à 50%	0.8 %	98.8 %
> 50%	1.2 %	100 %

durant les 100 dernières années pour l'ensemble des stations. Ceci rejoint les observations faites précédemment.

Les précipitations journalières centennales plus basses obtenues à partir des séries de mesures pour les périodes 1911-1940 et 1931-1960 ne résultent pas d'une efficacité moins grande des analyses de Gumbel pour ces 2 périodes, car les coefficients R^2 sont tout aussi élevés que pour les autres périodes étudiées. Elles s'expliquent par des valeurs journalières maximales globalement plus basses mesurées durant ces 2 périodes (1911-1940 et 1931-1960) comparativement à celles enregistrées durant les périodes 1961-1990 et 1981-2010. Les précipitations journalières maximales de ces 100 dernières années (1911-2010) ont été mesurées durant la période 1981-2010 pour plus de la moitié (52%) des 151 stations étudiées, contre seulement 13% et 17% de ces stations pour les périodes 1911-1940 et 1931-1960. Les précipitations journalières maximales par an tendent effectivement à augmenter de 1911 à 2010 pour 90% des 151 stations et cette augmentation est statistiquement significative pour 34% de ces stations (FALLOT 2011). Ainsi, l'estimation de valeurs extrêmes avec des temps de retour plus grands qu'une série de mesures ne dépend pas seulement des méthodes statistiques utilisées, mais aussi de la représentativité des valeurs maximales contenues dans une telle série.

Le tableau 4 révèle également que les précipitations journalières centennales estimées avec la loi de Gumbel à partir des séries de mesures 1961-1990 et 1981-2010 sont plus élevées de 10 à 30% que les valeurs maximales mesurées durant les 100 dernières années pour 25 à 32% des stations. Cela représente un plus grand nombre de stations que celles tendant à sous-estimer les précipitations journalières centennales pour ces 2 périodes-là. Les critiques formulées à l'encontre de la loi de Gumbel concernent davantage une sous-estimation qu'une surestimation et d'autres lois ont été proposées pour remédier à cette sous-estimation (KOUTSOYIANNIS 2004). Il convient de vérifier que ces autres lois n'entraînent pas une surestimation des précipitations journalières extrêmes pour un plus grand nombre de stations en Suisse, en particulier celles où les valeurs sont déjà surestimées avec les analyses de Gumbel.

La figure 4 présente la carte des précipitations journalières cincentennales extrapolées à partir de la loi de Gumbel et des mesures effectuées de 1961 à 2010. Ces précipitations extrêmes atteignent des valeurs significativement plus élevées au Sud des Alpes (jusqu'à 555 mm au Centovalli), car ce versant est très exposé aux afflux d'air doux et humide de la Méditerranée pouvant 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 2 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. Une dépression ou un front froid favorise une forte convection en saison chaude qui renforce l'effet de barrage (FALLOT 2000).

Tableau 4.—Comparaison entre les précipitations journalières centennales estimées par les analyses de Gumbel pour plusieurs périodes de mesures in situ et les précipitations journalières maximales mesurées de 1911 à 2010 pour 151 stations en Suisse.

Comparison between daily precipitation with a return time of 100 years estimated from Gumbel analyses for several time-series and daily maximal precipitation measured from 1911 to 2010 at 151 locations in Switzerland.

T100 ans / Prec. max. mes.	-50 à -30%	-30 à -10%	-10 à +10%	10 à 30%	Moyenne
1911-1940	11.3%	47.7%	35.1%	6.0%	-12.5%
1931-1960	6.6%	34.4%	49.0%	9.9%	-7.0%
1961-1990	0.7%	18.5%	55.6%	25.2%	1.2%
1981-2010	0.7%	15.9%	51.0%	32.5%	2.4%
1911-1960	9.3%	42.4%	42.4%	6.0%	-11.3%
1961-2010	0.0%	18.5%	63.6%	17.9%	0.3%
1911-2010	0.7%	29.1%	66.2%	4.0%	-5.9%

T100 ans = Précipitations journalières centennales estimées à partir des mesures sur le terrain pour la période considérée.

Prec. max. mes. = Précipitations maximales journalières (24 heures) mesurées de 1911 à 2010.

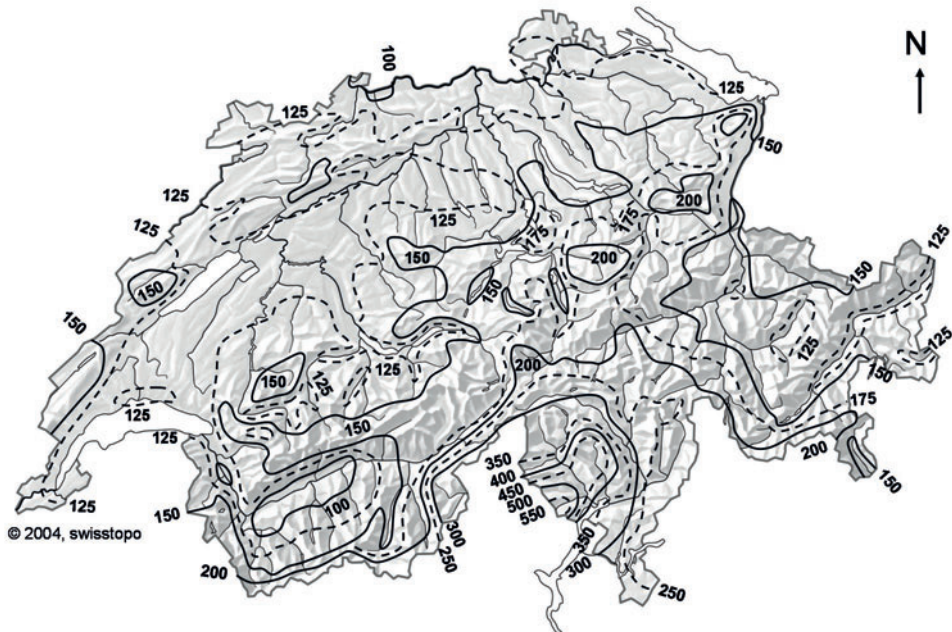


Figure 4.—Précipitations journalières cincentennales estimées en Suisse à partir de la loi de Gumbel et des mesures in situ effectuées à 429 endroits de 1961 à 2010.

Daily precipitation with a return time of 500 years estimated from Gumbel law and field measurements carried out at 429 locations from 1961 to 2010.

CONCLUSION

Les analyses de Gumbel effectuées sur les séries de mesures de précipitations à 429 endroits pour la période 1961-2010 ont permis d'estimer les précipitations journalières extrêmes avec un temps de retour de 500 ans pour la plupart des stations en Suisse sur la base des tendances observées durant les 50 dernières années. Les précipitations journalières cinquentennales obtenues pour la période 1961 à 2010 sont globalement plus élevées de 15% que celles estimées à partir des séries pluviométriques de 1901 à 1970 pour l'ensemble des stations en Suisse. Pour 30% de ces stations, les valeurs journalières cinquentennales extrapolées à partir des mesures pour la période 1901-1970 se réduisent à des valeurs centennales (ou à un temps de retour encore plus bas) pour les séries de mesures 1961-2010.

Les séries de mesures pluviométriques disponibles pour les 100 dernières années à 151 endroits montrent aussi que les précipitations journalières maximales tendent à augmenter de 1911 à 2010 pour la plupart des stations (90%). Plus de la moitié de ces stations ont enregistré les précipitations journalières les plus élevées de ces 100 dernières années durant la période 1981-2010. Ceci confirme clairement que les valeurs extrêmes des précipitations ont augmenté durant le 20^{ème} siècle et qu'elles pourraient remettre en cause le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues dans certaines régions de Suisse.

Cette tendance à la hausse devrait se poursuivre durant le 21^{ème} siècle selon les modèles climatiques (FREI *et al.* 2006, BENISTON *et al.* 2007, IPCC 2007). On peut penser que les précipitations journalières cinquentennales estimées à partir des séries de mesures 1961-2010 seront également trop basses par rapport aux pluies extrêmes qui seront mesurées durant le 21^{ème} siècle. Dans ces conditions, les analyses de Gumbel tendent à sous-estimer les précipitations journalières avec un temps de retour supérieur aux séries de mesures disponibles et il conviendrait de tester d'autres outils statistiques proposés par certains auteurs (KOUTSOYIANNIS 2004) dans ce genre de situation.

RÉFÉRENCES

- AELI (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).
- 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.
- FALLOT J.-M., 2000. Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20^{ème} siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13: 100-109.
- FALLOT J.-M., 2010. Evolution de l'intensité moyenne et de la fréquence des précipitations en Suisse de 1900 à 2009. *Actes du 23^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, 1-4.09.2010: 215-220.
- 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, 6-10.09.2011: 243-248.
- 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., SCHMIDL J. & VIDALE P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.

- 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.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007. The physical science basis. Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p.
- JENKINSON A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) value of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81: 158-171.
- LIVADA I., CHARALAMBUS G. & ASSIMAKOPOULOS M.N., 2008. Spatial and temporal study of precipitation characteristics over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 93: 45-55.
- 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., 1980. *Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrand-Gebiet*. Office fédéral de l'étude des forêts, de la neige et du paysage (WSL), anciennement Institut Fédéral de Recherche Forestière (FNP), Birmensdorf.