



HAL
open science

Schadex method for extreme flood estimation : overview, applications and perspectives

E. Paquet, M. Lang, J.C Carré

► **To cite this version:**

E. Paquet, M. Lang, J.C Carré. Schadex method for extreme flood estimation : overview, applications and perspectives. 24th ICOLD Congress, Jun 2012, Kyoto, Japan. 29 p. <hal-00861194>

HAL Id: hal-00861194

<https://hal.science/hal-00861194v1>

Submitted on 12 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

SCHADEX METHOD FOR EXTREME FLOOD ESTIMATION : OVERVIEW, APPLICATIONS AND PERSPECTIVES¹

Emmanuel PAQUET
Hydrologist, EDF-DTG

Michel LANG
Hydrologist, IRSTEA-Lyon

Jean-Claude CARRE
Hydrologist, ARTELIA-SOGREAH

FRANCE

1. FROM GRADEX TO SCHADEX

For more than 40 years, the GRADEX method [1] has been used to compute extreme flood risk for dam spillway design, in particular by EDF. Since its origins at the end of the 1960's, GRADEX has known numerous methodological evolutions, with its main concepts being taken up by related methods (AGREGEE [2], SPEED [3]).

Thereby, several hundreds of dam design floods have been computed with GRADEX and related methods, mainly in France and North Africa. The method has been often used by hydrologists. Its clarity and its relative simplicity of use have been widely appreciated, but its use outside the French engineering community has not been massive.

However, since about fifteen years, GRADEX has been the subject of recurring questions from study authors and reviewers [4]. The more frequent were about the under-estimation of extreme precipitation in some regions, the roughness of the rainfall-runoff transformation (based on the parallelism between distributions beyond a given return period), the peak-to-volume ratio used for extreme floods. These questions and recent enhancements in hydrology (e.g. rainfall-runoff modeling, extreme value analysis) led EDF to start about ten years ago the development of a new method for extreme flood estimation.

This new method, called SCHADEX (French abbreviation for Climato-Hydrological Simulation Model for Extreme Discharge Estimate), shares some important concepts with GRADEX, but differs significantly on others. The first public presentation of the method took place in a 2006 conference of the Société Hydrotechnique de France [5]. The first studies have been issued by EDF the

¹ Paquet, E., Lang, M., Carré, J.C., 2012. SCHADEX method for extreme flood estimation: overview, applications and perspectives. *24th ICOLD Congress - Q.94. ICOLD-CIGB, Kyoto.*

same year, and at the end of 2008 SCHADEX became EDF's reference method of extreme flood estimation for its dams.

Until 2008, most of the methodological development has been carried out by EDF hydrologists. A Ph-D. thesis, driven by EDF and CEMAGREF, has been undertaken between 2009 and 2011 to check, document and refine the methodological options of SCHADEX [6]. Two other Ph-D. thesis are underway to about its application in non-stationary context and in ungauged sites.

2. METHOD OVERVIEW

- 1.
- 2.

2.1. GENERAL CONCEPTS

SCHADEX is a probabilistic method for extreme floods estimation which combines a weather pattern based rainfall probabilistic model and a conceptual rainfall-runoff model, within a stochastic event simulation framework. It has been designed to compute 10^2 to 10^4 years return level floods for several to thousands square kilometers watersheds, in mountainous areas.

The hydrological states variability is described using an hydrological model with a significant record of precipitation and temperature, without statistical hypothesis on the dry / wet spells. Each observed rainy event is replaced by a simulated one whose value (and not its probability) is randomly drawn. This allows an efficient simulation of numerous heavy rainy events occurring in all hydrological conditions.

The study is done at an appropriate time step, close to the characteristic duration of floods produced by heavy rainfall events (typically, such as the peak-to-volume ratio of majors floods is around 1.5).

SCHADEX works with an areal rainfall (linear combination of raingages in or close to the watershed), which allows to account for the areal reduction of heavy events. Simulated rainy events are described over three timesteps : the *central rainfall* has the highest depth, it is preceded and followed by two lower depths, the *adjacent rainfalls*. This makes up a *centered rainy event* (Fig.1).

Figure 1

2.2. DATA REQUIREMENTS

A minimum of 20 years of continuous rainfall record at the study time step is required to fit properly the extreme rainfall probabilistic model. To use the MEWP weather pattern based distribution (cf. infra), a weather pattern classification suitable for the watershed climatology has to be established. A

record of at least 15 years of natural discharge at the outlet of the watershed is necessary to calibrate the hydrological model and assess the simulated floods. Hydrographs of significant floods (ideally 30 to 50) are required to compute the peak-to-volume ratio. Those data are completed by air temperature for the modeling of evapotranspiration and snow.

2.3. RAINFALL PROBABILISTIC MODEL

SCHADEX uses the Multi-Exponential Weather Patterns (MEWP) distribution for the probabilistic description of central rainfall [7]. Eight typical but contrasted atmospheric circulations for France (so called weather patterns, WP) have been identified, and each day since 1948 has been affected to one of those WP.

Figure 2

For the studied areal rainfall, three to four relevant seasons are defined within the year, then seasonal rainfall records are split into supposedly more homogeneous sub-samples corresponding to each WP. An exponential law is fitted on high quantiles of each WP sub-sample (generally over the 70% quantile of non-zero values). The MEWP distribution is the composition, for a given season, of all WP sub-sample marginal distributions, weighted by the relative frequency of occurrence of each WP.

Figure 3

The MEWP distribution has been assessed on a wide dataset [8]. *Reliability* (the model assigns a « correct » probability to high observed values) and *robustness* (the model gives similar estimates even if a slight perturbation of data is introduced) have been studied and compared to other common models : exponential, Generalized Pareto (GP), etc. The computed scores underline the benefits of a weather pattern sub-sampling, and show the good performances of exponential laws used in this context. Moreover, with an equivalent reliability, the MEWP distribution appears more robust than its equivalent MGPWP build with GP laws.

2.4. RAINFALL-RUNOFF MODEL

SCHADEX has been developed (and so far used) with the MORDOR hydrological model [9]. MORDOR is a conceptual, lumped, reservoir model. Its input data are an areal rainfall, and an air temperature. It represents the main hydrological processes : evapotranspiration, direct and indirect runoff, ground water, snow accumulation and melt, transfer function. It is used by EDF since more than 15 years for hydrological studies and operational forecasts.

For each study, the model parameters are optimized by an automatic calibration procedure under user assessment, to fit the observed runoffs on a representative period. Good agreement is specially sought for the seasonality, high quantiles distribution and major recorded floods.

2.5. SIMULATION PROCESS

Each centered rainy event of the simulation record (minimum of 15 years of areal rain and temperature) is alternatively replaced by a simulated event : the central rainfall is randomly drawn up to an extreme value, and adjacent rainfalls are computed with adjacent / central ratios randomly drawn among their empirical distribution. The three observed values of the rainy event are then substituted by the simulated values in the record, the rest remaining unchanged. A simulation is computed with this modified record through the hydrological model, and the maximum simulated value for this event is stored.

Figure 4

This process is repeated several hundreds times (with different drawings) for each observed rainy event, which allows to finally simulate several millions floods. The probability affected to each simulated flood is the probability of the simulated rainy event, which combines the probability of the central rainfall (according to the MEWP distribution) and the one of the adjacent / central ratio.

At the end of the simulation, the cumulative distribution function of simulated flood volumes is computed and compared to empirical distribution. Flood peaks are then computed using the peak-to-volume ratio. Like previously, the cumulative distribution function of simulated flood peaks is computed and compared to the empirical one. Extreme quantiles values (usually, from 10^2 to 10^4 years) are then extracted.

Figure 5

3. SCIENTIFIC EVALUATION

Since the beginning of its development, an intense work of scientific evaluation of SCHADEX is done parallel to its industrial application :

- Research carried out within Ph.D works in collaboration with renowned scientific teams.
- Publications in peer-reviewed scientific journals, presentation at conferences and symposiums (e.g. [10])
- Comparison with contemporaries methods, within projects aiming at confront results on well-defined data and scoring methods, and at clearly defining their application domain, their strengths and weaknesses. Projects currently underway are French project EXTRAFLU [11], European COST Action

FloodFreq [12] and “Comparison of Flood Hazard Estimation Methods for Dam Safety” driven by the Dam Safety Interest Group of CEATI.

- Beyond the studies on French watersheds, complete and documented applications in various climatological contexts (Italy, Austria, British Columbia, Norway...)

This legitimization project is a long-drawn-out task, necessary considering the considerable stakes of the flood hazard estimation. Strengths and limits of the method are pointed out by papers reviewers and comparison projects partners, allowing to steer the future enhancements of the method.

4. INDUSTRIAL APPLICATION

Through various projects, EDF is committed since several years in the verification of the design flood value of many of its dams. The SCHADEX method has been quickly applied industrially for watersheds of various scales and climatology. This short transition had the following constraints :

- Definition of a methodological stage for the industrial applications : SCHADEX has been used in the same methodological frame since 2007. This doesn't prevent to integrate new features in the reference version from time to time, but these updates must not affect the coherency of issued results.
- Development of robust and user-friendly software tools, writing of detailed and pedagogic technical documentation for users. It is an important topic since the data treatment process is more complex than for GRADEX, and no commercial software is available.
- Upholding of a strong involvement of SCHADEX designers in assisting and assessing closely the ongoing studies, to ensure that the method is properly applied and that the results are coherent.

In 2009, a partnership has been organized between EDF and SOGREAH for the realization of SCHADEX studies. It has two objectives :

- Outsourcing of part of the important number of SCHADEX studies to be made for EDF dams.
- Training of SOGREAH engineers to disseminate the SCHADEX method outside of EDF.

Late 2011, fifteen EDF and SOGREAH engineers have been trained to the method. For EDF dams, more than sixty complete studies have been carried out, and documented in more than fifty reports.

5. SCHADEX-GRADEX COMPARISON

3.

4.

5.

5.1. PRESENTATION

Several hundreds GRADEX studies have been issued for EDF dams since the late 1960's. Most of recent extreme flood studies can then be compared to an anterior study, dating for some from 40 years ago. The difference on the extreme flood estimations are often significant, and sometimes considerable, but a raw comparison may be misleading for several reasons :

- The GRADEX method changed significantly between the end of the 1960's and 2000. Some of these evolutions are linked to the progress in computerized data treatment.
- Because of measurement network evolution and study engineer's choices, selected gauges and stations may differ from one study to the next.
- Even with the same set of stations, time series have different lengths. This is an issue for the climatic or hydrological representativeness, and for accounting for significant recent events.

The updating of many studies is then an opportunity to evaluate rigorously the difference induced by the methodological shift from GRADEX to SCHADEX, with equivalent data. The GRADEX method has been applied as described in [1]. We will focus in this report on the difference between 1000-years return time peak flood estimations.

5.2. DATASET

It gathers the results computed on 60 French watersheds during studies issued between 2006 and 2011. This dataset shows a great diversity of scales (basin area between 5 and 4975 km², median altitude between 95 and 2780 m, cf. Fig. 6) and climatologies (mean annual rain between 800 and 2300 mm, mean annual runoff between 200 and 1900 mm).

Figure 6

Rainfall and discharge time series are the same for the two methods as well as the peak-to-volume ratio. In the following, the GRADEX estimation computed with the data of the SCHADEX study will be called *homologous GRADEX*. The estimation of the "old" study, when available (28 studies within the 60), will be called *historical GRADEX*.

5.3. SCHADEX-GRADEX DIFFERENCE FOR THE 1000-Y FLOOD ESTIMATION

The Fig.7 shows the 1000-years specific discharges estimation of SCHADEX against the corresponding GRADEX values, and the distribution of the differences (SCHADEX - GRADEX peak flood values, divided by GRADEX value).

Figure 7

The median difference for 1000-years peak flood estimations is -1%. For 47 of the 60 estimations (78% of the sample), the absolute value of the difference is less or equal to 15%. The 5 biggest differences (in absolute value) are positive and higher than 20%. The average “methodological impact” on the 1000-years flood estimation is therefore low, but significant in some cases.

Differences between SCHADEX and homologous GRADEX are very dependent on scale, climatology, available data, and therefore difficult to foresee. However, some explanations can be provided :

- Most of the studied watersheds stand at high altitude. Recent works on the orographic intensification of precipitations have been carried out at EDF [13]. For studies where the rain gauges are much lower than the watershed, these works justified the use of a correction factor on the areal rain computed with valley rain gauges : for half of the 60 studies, this factor is greater than 1, and in 10% of the cases, it is greater than 1.5.
- The MEWP distribution combines exponential distributions, its asymptotic behavior is then exponential. So to compare the MEWP distribution and the historical “sum of two exponential” distribution (SUM_EXP), we can compare the gradex value (i.e. distribution slope in Gumbel plot for extreme return levels) of the season-at-risk. The median difference is +25%, and 75% of the differences are greater than +12%. The extreme rainfall hazard estimated by the MEWP distribution is then significantly higher than the SUM_EXP. It is to be noted that, for a given distribution, the increase of the areal rain leads to a corresponding increase of the gradex.
- Conversely, the “efficiency” of extreme rainfall, represented by the hydrological model through the simulation process of SCHADEX, is asymptotically smaller than the one of the GRADEX (100% by hypothesis). This effect often damps the increase of the extreme rainfall probability induced by the use of the MEXP distribution and the orographic increase effect.

However, these figures should not be generalized : the 60 watersheds of the dataset are not evenly spread, neither in scale nor in climatology. They are more likely the image of EDF priorities for the update of the flood hazard studies. The uncertainty of the application of the GRADEX method was one of them, therefore studies have been rather upgraded with SCHADEX in places where the use of GRADEX was an issue.

Moreover, for the 28 watersheds where an historical GRADEX was available, the median difference between homologous GRADEX and historical GRADEX 1000-years flood estimations is +6%. For 20 of these 28 studies (75% of the historical studies), the absolute value of this difference is less or equal to 15%. The three highest differences (in absolute value) are positive and higher than 50%. The differences of estimation due to the choice of representative gages, length of time series used and the version of GRADEX is of the same order than the one due to the methodological shift from GRADEX to SCHADEX.

6. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

The SCHADEX method combines most of the climatologic and hydrologic informations available on a watershed. It takes into account a lot of factors conditioning heavy rainfall events and floods : season, weather types, soil saturation, snowmelt etc. It brings answers to questions about GRADEX, with a better description of extreme rainfall distribution and a more reliable modeling of rainfall-runoff transformation. Its simulation framework is flexible: the MEWP and MORDOR models may be easily substituted by other tools.

The method has been quickly applied on many industrial studies, allowing to :

- Standardize the data treatments, tools and documents, thus to apply the method in a very stable and controlled way for several tens of studies.
- Test the applicability of SCHADEX in very different hydrologic contexts and data availability.
- Point out recurring problems encountered by the study engineers and the comments of the external reviewers of the studies (regulation authorities and scientific partners), thus steering properly the future enhancements.

For a dam holder, the stakes of a methodological shift for the flood hazard estimation are huge. In particular, they imply to:

- Present, document and legitimate the new method to the relevant regulation and safety authorities.
- Check constantly the regional coherency of the results issued.
- If necessary, explain the significant differences with the old studies.

SCHADEX has been applied to a wide range of watersheds. It generates interest of scientific and industrial partners. Some complementary developments are still underway : variable peak-to-volume ratio, application on ungauged watersheds, use in non-stationary climatic context.

7. REFERENCES

- [1] GROUPE DE TRAVAIL DU CFGB - Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX - Design flood determination by the GRADEX method. *Bulletin du Comité Français des Grands Barrages - 18^e Congrès CIGB / ICOLD - N° 2*, 1994.
- [2] MARGOUM M. Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle Agregee. *Hydrologie Continentale, vol. 9, n°1, pp. 85-100*, 1994.
- [3] CAYLA O. Probability calculation of design floods and inflows – SPEED. *The 1995 International Conference on Hydropower. Part 3 (of 3), San Francisco*, 1995.
- [4] GARCON R. Modélisation des crues : retour d'expérience sur le GRADEX. *Colloque Technique du Comité Français des Grands Barrages, Le Bourget du Lac*, 2001.
- [5] PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R. Evolution de la méthode du GRADEX: approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche, 5, 80–90*, 2006.
- [6] GARAVAGLIA F. Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes. *PhD thesis. Université de Grenoble*, 2011.
- [7] GARAVAGLIA F., GAILHARD J., PAQUET E., LANG M., GARCON R., BERNARDARA P. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 951-964*, 2010.
- [8] GARAVAGLIA F., LANG M., PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R., RENARD B. Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 519-532*, 2011.
- [9] GARCON R. Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues. *La Houille Blanche, N°7-8, 88-95*, 1999.
- [10] GARAVAGLIA F., LANG M., PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R. Semi-continuous simulation for design flood estimation: the SCHADEX method, *EGU General Assembly, Vienna*. 2010
- [11] PROJET EXTRAFLO : <https://extraflo.cemagref.fr/>
- [12] FLOODFREQ COST ACTION ES0901 : <http://www.cost-floodfreq.eu/>
- [13] GOTTARDI F. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. *PhD Thesis. Polytechnic Institute of Grenoble*, 2009.

8. SUMMARY

Due to recurring questions about the GRADEX method (used for almost 40 years) EDF has developed the SCHADEX method. It is a probabilistic method for extreme floods estimation which combines, within a stochastic simulation framework, a probabilistic model of extreme rainfall based on weather patterns, and a conceptual hydrological model.

Late 2008, SCHADEX has become the reference method for EDF dams, and has since been applied to several dozen watersheds. Since its origin, the method has been subject of scientific evaluation activities, in particular within

national and international inter-comparison projects. The performance of the probabilistic model of extreme rainfall has been proven on a large dataset of rainfall.

The results of the SCHADEX method have been compared on 60 watersheds with those of GRADEX, both methods being applied with the same data. It shows that the difference of 1000-years flood estimations is low on average but can be significant in some cases, especially for small mountain basins.

Further developments of the method are still underway, in particular the use of variable peak-to-volume ratios, and the application of SCHADEX in non-gauged watersheds or non-stationary context.

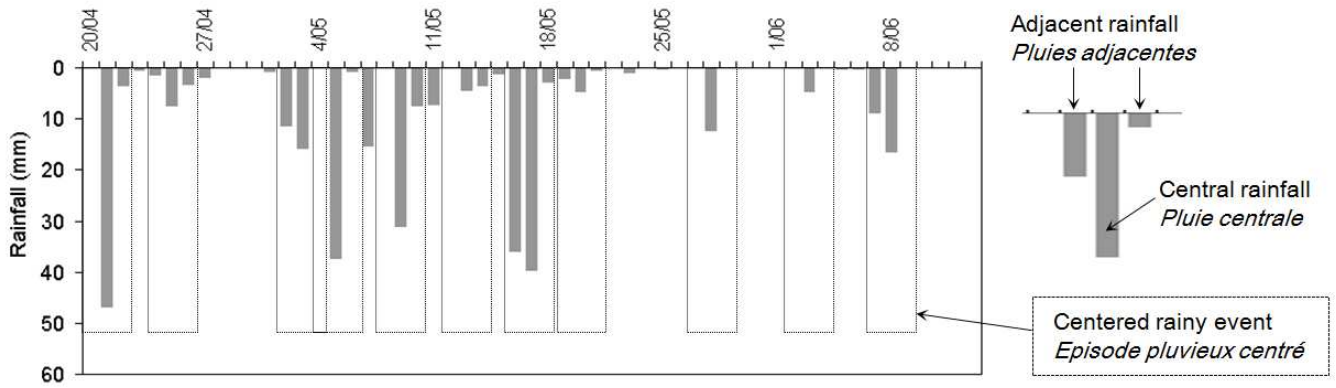


Fig. 1
Épisode pluvieux centré
Centered rainy event

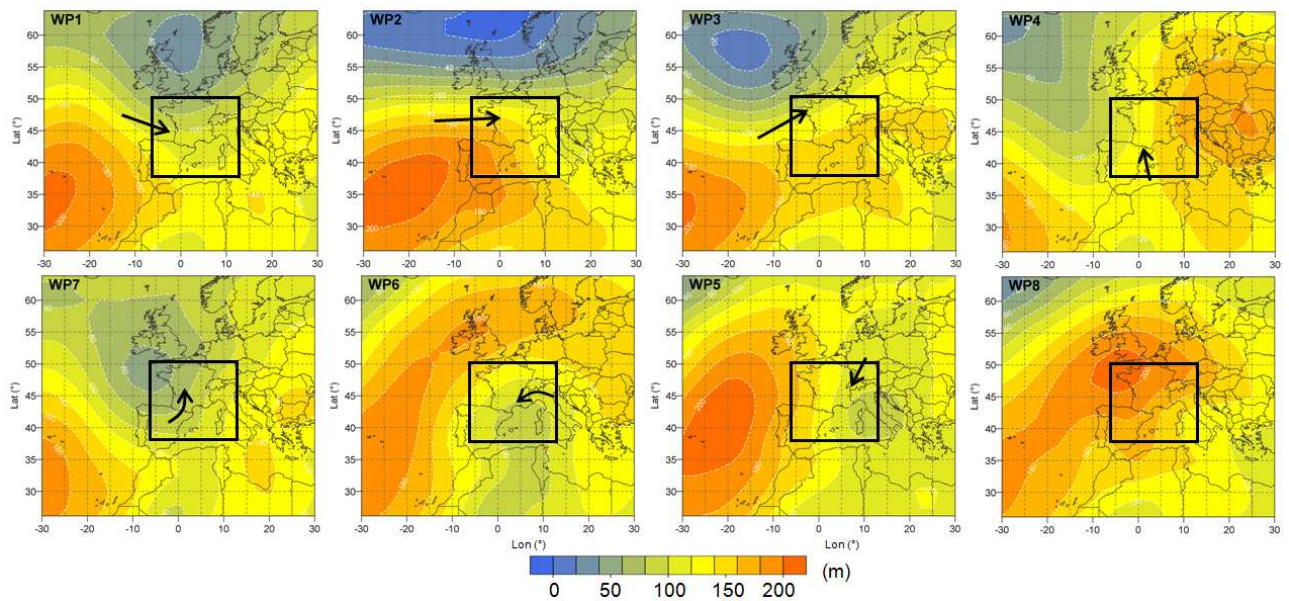


Fig. 2
Weather patterns for the MEWP distribution – average 1000 hPa
geopotential fields
*Types de temps de la distribution MEWP – champs géopotentiels 1000hPa
moyens*

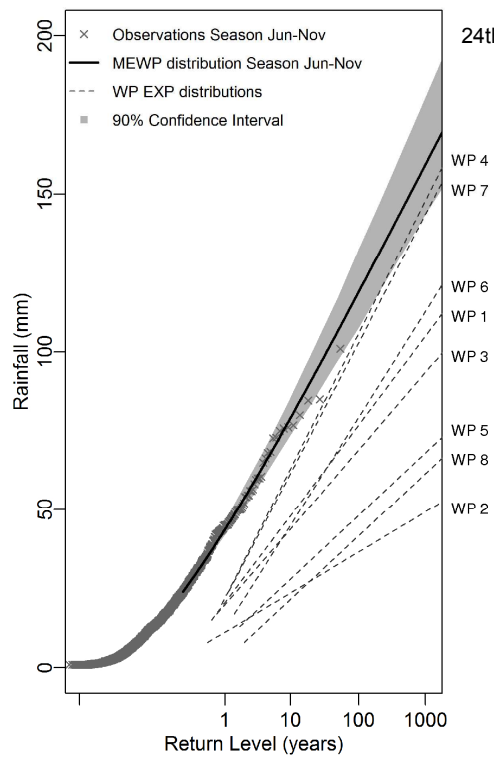


Fig. 3

MEWP distribution June-November rainfall at Lyon (1953-2005)
Distribution MEWP des pluies de Juin à Novembre à Lyon (1953-2005)

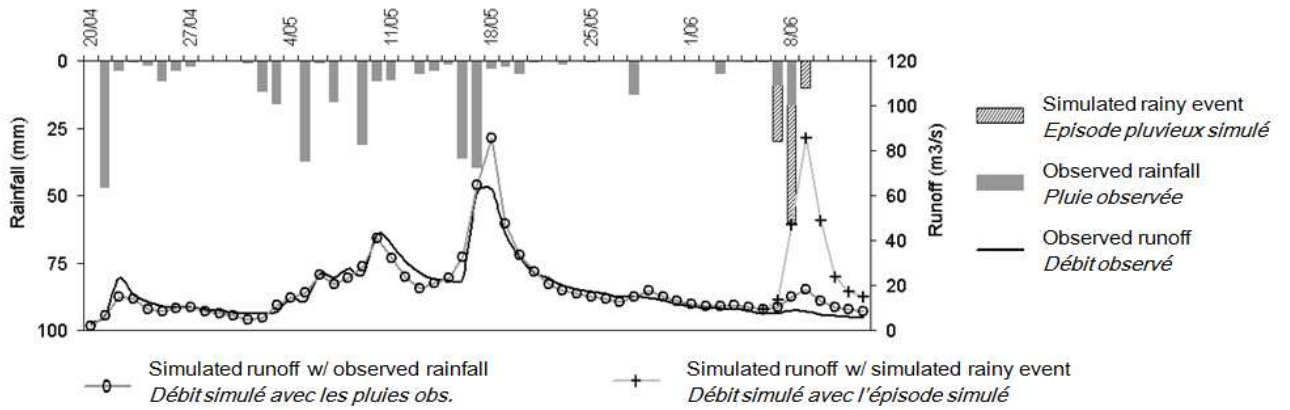


Fig. 4

Overview of rainfall-runoff SCHADEX flood simulation
Principe de la simulation de crues SCHADEX

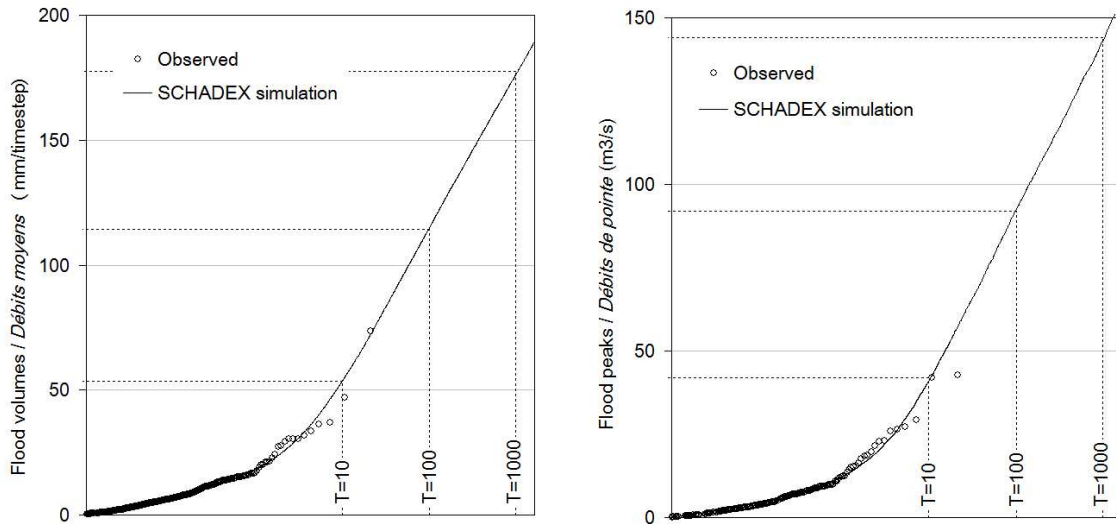


Fig. 5
 Distribution of observed and SCHADEX simulated flood volumes and peaks
Distributions de volumes et de débits de pointe observés et simulés par SCHADEX

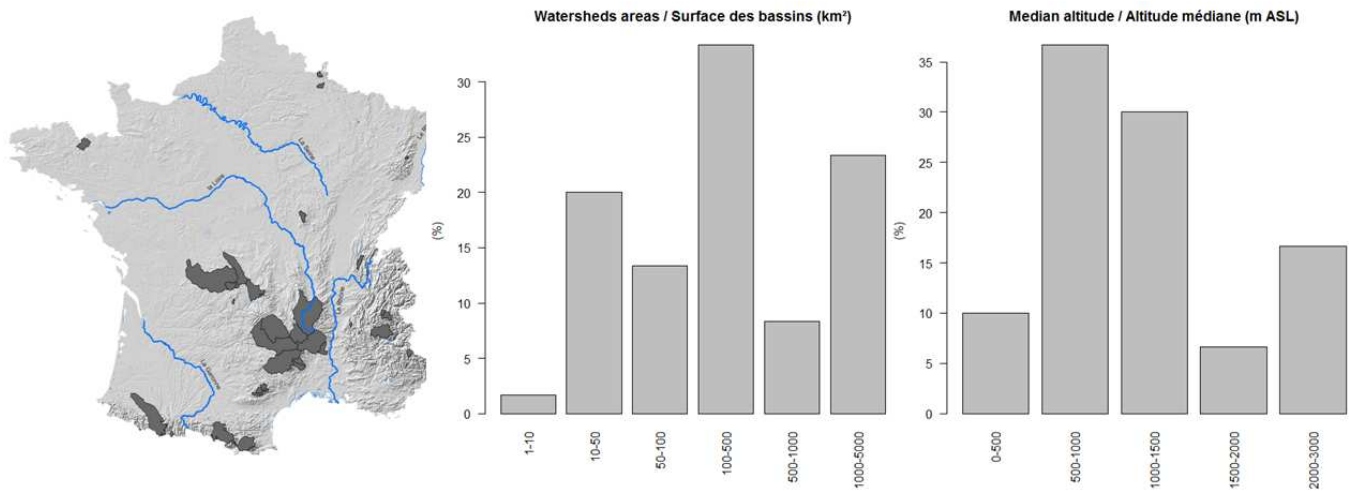


Fig. 6
 Distribution, areas and altitude of the dataset watersheds
Répartition, surfaces et altitudes des bassins du jeu de données

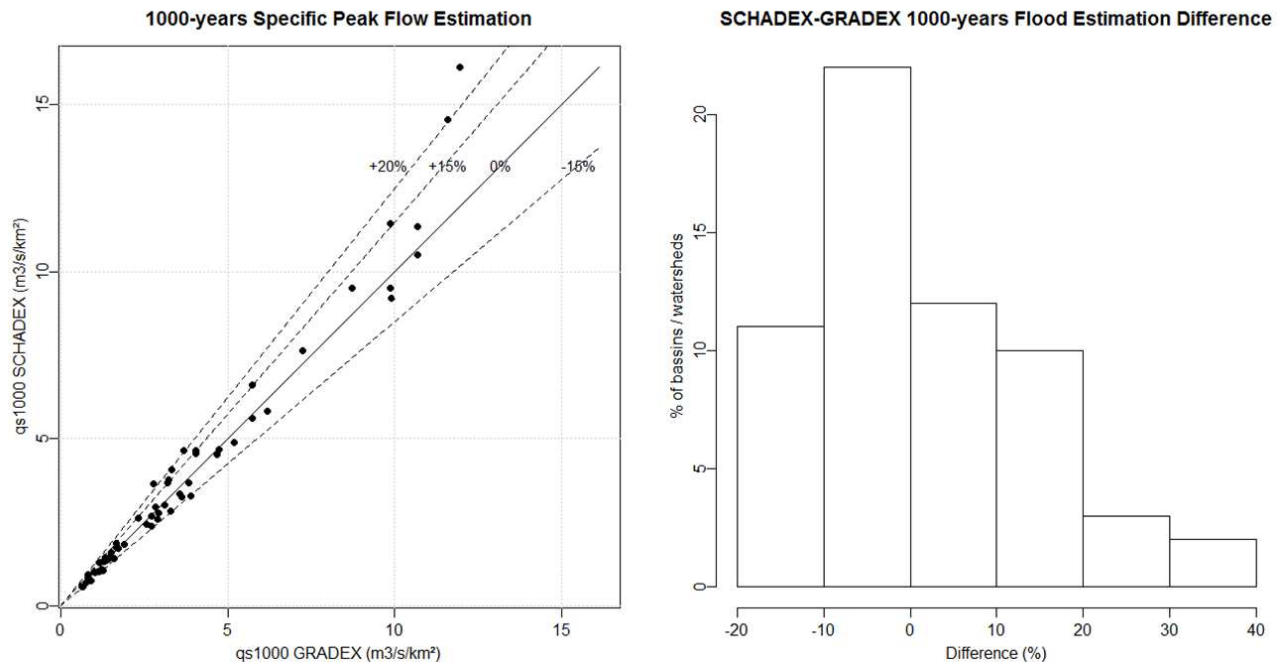


Fig.7

T=1000 specific peak flows comparison and difference distribution
Comparaison des débits spécifiques millénaux et distribution des écarts

METHODE SCHADEX DE PREDETERMINATION DES CRUES EXTREMES : PRESENTATION, APPLICATIONS ET PERSPECTIVES¹

Emmanuel PAQUET
Hydrologue, EDF-DTG

Michel LANG
Hydrologue, CEMAGREF-Lyon

Jean-Claude CARRE
Hydrologue, ARTELIA-SOGREAH

FRANCE

1. DE GRADEX A SCHADEX

Pendant près de 40 ans, la méthode GRADEX [1] a été utilisée pour calculer le risque de crue extrême pour le dimensionnement des barrages, notamment par EDF. Depuis ses origines à la fin des années 1960, GRADEX a fait l'objet de nombreuses évolutions méthodologiques, ses principaux concepts ont par ailleurs été repris par d'autres méthodes « cousines » (AGREGEE [2], SPEED [3]).

Ainsi, plusieurs centaines d'ouvrages ont été dimensionnés vis-à-vis du risque crue grâce à GRADEX et à ses méthodes cousines, principalement en France et en Afrique du Nord. La méthode a également été souvent utilisée par la communauté scientifique hydrologique. La clarté de ses concepts et sa relative simplicité d'utilisation ont été largement reconnues, même si sa diffusion hors du périmètre de l'ingénierie française n'a pas été massive.

Cependant, GRADEX faisait depuis une quinzaine d'années l'objet de questionnements récurrents de la part des rédacteurs et des vérificateurs d'études [4]. Parmi ces questions, les plus fréquentes portaient sur la sous-estimation des pluies extrêmes dans certaines régions, la rusticité du passage pluie-débit (basé sur un parallélisme direct entre distributions au-delà d'une période de retour), le coefficient de forme de passage des volumes aux pointes de crues extrêmes. Ces interrogations, ainsi que des évolutions récentes de la science hydrologique (e.g. modélisation pluie-débit, statistique des valeurs extrêmes), ont conduit EDF à entreprendre le développement d'une nouvelle méthode d'estimation des crues extrêmes à partir du début des années 2000.

¹ Paquet, E., Lang, M., Carré, J.C., 2012. SCHADEX method for extreme flood estimation: overview, applications and perspectives. *24th ICOLD Congress - Q.94. ICOLD-CIGB, Kyoto.*

La nouvelle méthode, appelée SCHADEX (Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits Extrêmes), partage certains concepts importants avec la méthode GRADEX, mais s'en éloigne significativement sur d'autres. La première présentation publique de la méthode a été faite en 2006 lors d'un colloque de la Société Hydrotechnique de France [5]. Les premières études ont été diffusées par EDF la même année, et SCHADEX est devenue fin 2008 la méthode de référence d'EDF pour l'évaluation des crues extrêmes au droit de ses barrages.

Jusqu'en 2008, l'essentiel du développement de SCHADEX a été pris en charge par les hydrologues d'EDF. Une thèse co-encadrée par EDF et le CEMAGREF a ensuite été menée entre 2009 et 2011 pour en vérifier, documenter et raffiner les choix méthodologiques [6]. Deux autres thèses sont en cours sur son application en contexte non-stationnaire, ainsi qu'en site peu pourvu en données hydro-climatologiques.

2. PRESENTATION DE LA METHODE

1.

2.

2.1. PRINCIPES GENERAUX

SCHADEX est une méthode probabiliste d'estimation des crues extrêmes qui combine, au moyen d'une simulation stochastique événementielle, un modèle probabiliste de pluies extrêmes basé sur des types de temps et un modèle hydrologique conceptuel. La méthode a été développée pour estimer les crues de temps de retour de 10^2 à 10^4 ans pour des bassins de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers, en zone de relief.

En parcourant avec le modèle hydrologique une longue chronique observée de précipitations et températures, on décrit la variabilité des états de saturation du bassin, sans faire d'hypothèse sur l'alternance de séquences sèches / humides. On remplace chaque épisode de pluie observé par un événement simulé dont la valeur (et non la probabilité) a été tirée au hasard, ce qui permet de simuler efficacement de nombreux épisodes pluvieux intenses survenant dans toutes les conditions hydrologiques possibles.

L'étude est menée à un pas de temps approprié, proche de la durée typique des crues issues d'événements pluvieux intenses (typiquement tel que le rapport pointe / volume des plus grosses crues soit voisin de 1.5).

SCHADEX travaille avec une pluie spatiale, combinaison linéaire de pluies observées sur ou autour du bassin, qui permet de prendre en compte l'abattement spatial des événements intenses. Les événements pluvieux simulés sont définis sur trois pas de temps : la *pluie centrale* a la valeur la plus forte, elle

est suivie et précédée de deux valeurs plus faibles, les *pluies adjacentes*. Ceci constitue un *événement pluvieux centré* (Fig. 1).

Figure 1

2.2. DONNEES REQUISES

Un minimum de 20 ans d'observations pluviométriques au pas de temps de l'étude est nécessaire à l'ajustement robuste du modèle probabiliste des pluies. Pour l'utilisation de la distribution par type de temps MEWP (cf. infra), un catalogue des types de temps applicable à la climatologie du bassin devra être établi. Une chronique d'au moins 15 ans de débits moyens naturels à l'exutoire du bassin est requise pour la calibration du modèle hydrologique et la validation des crues simulées. Des hydrogrammes de crues significatives (idéalement 30 à 50 crues) sont en outre nécessaires au calcul du coefficient de forme. Ces données sont complétées par une chronique de température de l'air pour la modélisation de l'évapotranspiration et de la neige.

2.3. MODELE PROBABILISTE DE PLUIE

SCHADEX utilise la distribution MEWP (Multi-Exponential Weather Patterns) pour la description probabiliste des pluies centrales [7]. Huit circulations atmosphériques typiques mais contrastées (les types de temps) ont été identifiées pour la France et, et chaque journée depuis 1948 a été affectée à l'un de ces types de temps.

Figure 2

Pour la pluie spatiale étudiée, trois à quatre saisons sont définies, puis la chronique pluviométrique est divisée en sous-échantillons, supposés plus homogènes, correspondant à chaque type de temps. Sur chaque distribution marginale par type de temps, une loi exponentielle est ajustée sur les quantiles élevés (généralement au dessus du quantile 70% des pluies non nulles). La distribution MEWP est la composition des huit lois marginales, pondérées par la fréquence d'occurrence relative de chaque type de temps.

Figure 3

Les performances de la distribution MEWP ont été étudiées sur une vaste base de données pluviométriques [8]. Sa *fiabilité* (capacité d'attribuer une probabilité correcte aux plus fortes observations) et sa *robustesse* (stabilité des résultats à des modifications des données d'entrée) ont été étudiées, en comparaison avec d'autres modèles courants : exponentielle, Pareto Généralisée (GP), etc. Les statistiques établies prouvent l'intérêt d'un échantillonnage par type de temps et montrent les bonnes performances de lois exponentielles

utilisées dans ce contexte. En particulier, à fiabilité équivalente, la distribution MEWP est plus robuste que son équivalente MGPWP construite avec des lois GP.

2.4. MODELE PLUIE-DEBIT

SCHADEX et a été développé et majoritairement appliqué avec le modèle hydrologique MORDOR [9]. C'est un modèle conceptuel global, à réservoirs. Ses données d'entrées sont, au pas de temps de l'étude, une pluie spatiale et une température de l'air. Il représente les principaux processus hydrologiques : évapotranspiration, ruissellement rapide et retardé, vidange de nappe, accumulation et fonte de neige, etc. Il est utilisé par EDF depuis près de 15 ans en études et prévisions opérationnelles hydrologiques.

Pour chaque étude, les paramètres du modèle sont optimisés automatiquement et expertisés par le chargé d'études, pour représenter au mieux les débits observés d'une période représentative. Une attention particulière est portée à la saisonnalité des débits représentés, à la distribution des quantiles élevés et aux plus grandes crues observées.

2.5. PROCEDE DE SIMULATION

Chaque épisode pluvieux centré de la chronique de simulation (15 ans au minimum de pluie et température) est remplacé tour à tour par un épisode simulé : la pluie centrale est tirée au hasard entre 1 et une valeur extrême, et les pluies adjacentes sont calculées à partir de ratios pluies adjacentes/centrales tirés au hasard selon leur distribution empirique. Les trois pluies de l'épisode simulé sont alors substituées aux valeurs observées dans la chronique, le reste de la chronique restant inchangé. Une simulation à partir de cette chronique modifiée est réalisée avec le modèle hydrologique, et le volume maximal simulé pour cet événement est stocké.

Figure 4

Ce procédé est répété plusieurs centaines de fois (avec des tirages différents) pour chaque épisode pluvieux observé, ce qui permet de simuler plusieurs millions de crues au total. La probabilité affectée aux crues simulées est la probabilité de l'épisode pluvieux générateur, qui combine la probabilité de la pluie centrale générée (au sens de la distribution MEWP) et celle des ratios entre la pluie centrale et les pluies adjacentes.

A l'issue de la simulation, la fonction de répartition des volumes de crues simulées est calculée et comparée à la distribution des crues observées. Les débits de pointe sont ensuite calculés en appliquant un rapport pointe-volume (coefficient de forme) identifié sur une sélection de crues observées. Comme pour les volumes, la fonction de répartition des débits de pointe simulés est

établie et confrontée aux observations. Les valeurs aux quantiles extrêmes (couramment, de 10^2 à 10^4 ans) sont finalement identifiées.

Figure 5

3. EVALUATION SCIENTIFIQUE

SCHADEX fait l'objet depuis le début de son développement d'actions de d'évaluation scientifique en parallèle à son application industrielle :

- Développements menés dans le cadre de thèses co-encadrées par des équipes reconnues du domaine.
- Publications dans des revues scientifiques à comité de lecture et présentations à des colloques et congrès (e.g. [10]).
- Confrontation à d'autres méthodes du domaine avec des protocoles et des jeux de données bien définis, pour bien cerner leurs champs d'applications, leurs forces et faiblesses relatives. Les projets en cours fin 2011 sont le projet français EXTRAFLO [11], l'action COST européenne FloodFreq [12], le projet « Comparison of Flood Hazard Estimation Methods for Dam Safety » mené par le Dam Safety Interest Group du CEATI.
- Au-delà des études réalisées en France, applications complètes et documentées dans des contextes climatiques variés (Italie, Autriche, Colombie Britannique, Norvège...)

Ce travail de légitimation est une action de longue haleine, indispensable compte-tenu des enjeux considérables liés aux résultats des études de crue extrême. Les remarques des relecteurs des articles et les résultats des projets d'inter-comparaison pointent sans complaisance les forces et les faiblesses de la méthode, ce qui contribue à orienter les développements futurs.

4. APPLICATION INDUSTRIELLE

Depuis quelques années, EDF s'est engagé, au travers de plusieurs projets, dans la vérification d'une grande partie des valeurs de dimensionnement de ses ouvrages vis-à-vis du risque de crue. La méthode SCHADEX a rapidement du être appliquée à des échelles et des climatologies variées, avec des durées d'études raisonnables. C'est une transition rapide pour une méthode jeune, qui a dû être faite avec les contraintes suivantes :

- Figer un palier méthodologique pour les applications industrielles : la méthode est appliquée dans le même périmètre méthodologique depuis 2007. Ceci n'interdit pas d'intégrer périodiquement des innovations dans la version de référence, mais ces « mises à jour » ne mettent pas en défaut la cohérence des résultats émis.

- Développer un ensemble d'outils informatiques robustes et conviviaux et rédiger une documentation pédagogique à l'attention des chargés d'études : c'est un problème important car la chaîne de traitement de données est plus complexe que pour GRADEX, et l'offre logicielle commerciale est quasiment inexistante dans le domaine.
- Entretenir une implication importante des développeurs pour suivre et vérifier au plus près les études en cours pour s'assurer de l'application correcte de la méthode et de la cohérence des résultats émis.

Depuis 2009, un partenariat entre EDF et SOGREAH a été organisé pour la réalisation d'études SCHADEX. Le but de ce partenariat est double :

- Sous-traitance d'une partie du volume très important des études SCHADEX à mener pour les ouvrages EDF.
- Formation de chargés d'études SOGREAH à la méthode SCHADEX, pour une diffusion de celle-ci hors de l'ingénierie EDF.

Fin 2011, quinze chargés d'étude EDF et SOGREAH ont été formés à la méthode. Pour le parc EDF, plus de soixante calculs complets ont été menés à bien, et détaillés dans plus de cinquante rapports d'étude.

5. COMPARAISON SCHADEX-GRADEX

- 3.
- 4.
- 5.

5.1. PRINCIPE

Plusieurs centaines d'études GRADEX ont été réalisées pour les barrages EDF depuis la fin des années 1960. Une grande partie des études réalisées récemment sur le parc EDF peuvent donc être comparées à une étude GRADEX antérieure, datant parfois de près de 40 ans. Les écarts constatés sur l'estimation des crues extrêmes sont parfois significatifs, voire importants, mais une comparaison brute peut être trompeuse pour les raisons suivantes :

- La méthode GRADEX a évolué sensiblement de la fin des années 1960 à 2000. Ces évolutions étaient pour certaines liées à l'augmentation des capacités de traitement informatiques.
- Du fait de l'évolution des réseaux de mesure, des choix du chargé d'étude, les postes ou stations retenus peuvent différer d'une étude à l'autre.
- A postes ou stations équivalents, les séries de données ont des durées différentes. Ceci pose d'évidents problèmes de représentativité

climatologique ou hydrologique, et de prise en compte d'événements significatifs récents.

La reprise récente d'un grand nombre d'études a donc été l'occasion d'évaluer rigoureusement l'écart induit par le passage de GRADEX à SCHADEX, à panier de données et choix de stations équivalents. La méthode GRADEX a été appliquée telle que décrite dans [1]. On se concentrera dans cet article sur les écarts entre les estimations des débits de pointe millénaux.

5.2. JEU DE DONNEES

Il rassemble les calculs réalisés sur 60 bassins versants français, à l'occasion d'études éditées entre 2006 et 2011. L'échantillon de bassins ainsi constitué présente une grande diversité d'échelles (surfaces comprises entre 5 et 4975 km², altitudes médianes entre 95 et 2780 m, cf. fig. 6) et de climatologies (pluies moyennes annuelles comprises entre 800 et 2300 mm, écoulements annuels moyens compris entre 200 et 1900 mm).

Figure 6

Dans tous les cas, les chroniques de pluie et de débit utilisées pour les deux méthodes sont identiques, ainsi que le coefficient de forme. Dans ce qui suit, le calcul GRADEX réalisé avec les données de l'étude récente sera nommé *GRADEX homologue*. Le résultat de l'étude ancienne, quand elle existe (28 cas sur les 60), sera le *GRADEX historique*.

5.3. ECART SCHADEX-GRADEX POUR LA CRUE DE TEMPS DE RETOUR 1000 ANS

La figure 7 présente les débits spécifiques millénaux calculées par SCHADEX en fonction des valeurs issues de GRADEX, ainsi que la distribution des écarts correspondants (différence des débits de pointe entre SCHADEX et GRADEX normée par la valeur GRADEX).

Figure 7

Il en ressort que l'écart médian sur les 60 estimations de la crue millénales est de -1%. Pour 47 des 60 calculs (78% de l'échantillon), la valeur absolue de l'écart est inférieure ou égale à 15%. Les 5 écarts les plus importants sont positifs et supérieurs à 20%. L'impact « méthodologique » sur l'estimation de la crue millénales est donc faible en moyenne sur l'échantillon, mais significatif dans certains cas.

Les écarts entre SCHADEX et le GRADEX homologue sur l'estimation des crues extrêmes sont très dépendants de l'échelle, de la climatologie, des

données disponibles, et donc difficilement prévisibles *a priori*. Pour autant, on peut en donner quelques éléments d'explication :

- Une grande partie des études porte sur des bassins d'altitude. Des travaux récents menés à EDF ont permis de préciser l'intensification orographique des précipitations [13]. Pour des études où les postes pluviographiques sont plus bas que le bassin, ces travaux ont justifié d'appliquer un facteur correctif à la pluie spatiale calculée à partir des postes de vallées : dans la moitié des 60 cas, une majoration a été appliquée, et dans 10% des cas, cette majoration est supérieure à 50%.
- La distribution MEWP est une composition de lois exponentielles, son comportement asymptotique est exponentiel. Pour comparer les distributions MEWP et somme de deux exponentielles (DEXP), on peut donc comparer, sur la saison à plus fort risque de précipitations, les valeurs de gradex asymptotique (i.e. la pente des distributions pour les temps de retour élevés). L'écart médian vaut +25%, et 75% des écarts sont supérieurs à +12%. L'estimation du risque de pluie extrême proposé par la distribution MEWP est donc significativement plus forte que celle de DEXP. A noter qu'à mode d'ajustement équivalent, la majoration de la pluie spatiale entraîne une majoration équivalente des gradex.
- A l'inverse, le « rendement » des pluies extrêmes, représenté par le modèle hydrologique via le procédé de simulation SCHADEX, est asymptotiquement inférieur à celui du calcul GRADEX (par hypothèse 100%), ce qui a souvent pour effet de « tempérer » l'augmentation de la probabilité des pluies extrêmes induite par la distribution MEWP et la majoration orographique.

Il faut de plus se garder généraliser ces chiffres : l'échantillon de 60 études n'est pas uniformément réparti, ni en échelle de bassin, ni en climatologie. Il est plutôt le reflet des critères de priorisation qu'EDF a appliqué ces dernières années dans sa démarche de réactualisation des études. L'incertitude liée à la méthode GRADEX est l'un de ces critères, les études réactualisées avec SCHADEX l'ont donc plutôt été aux endroits où l'application de GRADEX était problématique.

Par ailleurs, sur les 28 bassins où une étude ancienne est disponible, l'écart médian entre les estimations de la crue millénaire par le GRADEX homologue et le GRADEX historique vaut +6%. Pour 20 des 28 calculs (75% des études anciennes), la valeur absolue des écarts est inférieure ou égale à 15%. Les trois écarts les plus importants, sont positifs et supérieurs à 50%. Les écarts liés aux choix et à la période historique des données considérées, ainsi qu'à la « version » de GRADEX utilisée, sont donc exactement du même ordre de grandeur que ceux liés au passage de GRADEX à SCHADEX.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthode SCHADEX combine la plupart des informations climatologiques et hydrologiques disponibles sur un bassin versant. Elle tient compte d'un grand nombre de facteurs conditionnant les pluies et crues extrêmes : saison, type de temps, saturation des sols, fonte des neiges, etc. Elle apporte des réponses aux questionnements sur GRADEX, par une meilleure description de la distribution des pluies extrêmes et une modélisation plus fidèle de la transformation pluie-débit. Son cadre de simulation est flexible : les modèles MEWP et MORDOR peuvent être substitués facilement par d'autres outils.

L'industrialisation rapide de la méthode, sur un volume important d'études a permis de :

- Forcer la standardisation des traitements, outils et documents, et donc d'appliquer la méthode de manière très stable et contrôlée sur plusieurs dizaines d'études.
- Tester l'applicabilité de la méthode à des bassins aux caractéristiques hydrologiques et à la disponibilité de données très différentes.
- Pointer les difficultés récurrentes des chargés d'étude et les remarques de relecteurs extérieurs de nos études (Autorités de Contrôle et partenaires scientifiques), et ainsi orienter les développements futurs de la méthode.

Pour un gestionnaire d'ouvrages, les enjeux d'un changement de méthode de calcul du risque hydrologique sont considérables. Ils impliquent notamment de :

- Présenter, documenter et légitimer la nouvelle méthode auprès des autorités de contrôle et de régulation compétentes.
- Vérifier constamment la cohérence régionale des résultats présentés.
- Le cas échéant, expliquer les écarts importants avec les études anciennes.

La méthode SCHADEX a été appliquée à une large gamme de bassins, et suscite l'intérêt de partenaires scientifiques et industriels. Elle continue à faire l'objet de développements complémentaires, notamment sur l'utilisation de coefficients de forme variables, sa mise en application sur des bassins pas ou peu jaugés, et son utilisation en contexte climatique non-stationnaire.

7. REFERENCES

- [1] GROUPE DE TRAVAIL DU CFGB - Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX - Design flood determination by the GRADEX method. *Bulletin du Comité Français des Grands Barrages - 18^e Congrès CIGB / ICOLD - N° 2*, 1994.
- [2] MARGOUM M. Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle Agrégée. *Hydrologie Continentale, vol. 9, n° 1, pp. 85-100*, 1994.
- [3] CAYLA O. Probability calculation of design floods and inflows – SPEED. *The 1995 International Conference on Hydropower. Part 3 (of 3), San Francisco*, 1995.

- [4] GARCON R. Modélisation des crues : retour d'expérience sur le GRADEX. *Colloque Technique du Comité Français des Grands Barrages, Le Bourget du Lac*, 2001.
- [5] PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R. Evolution de la méthode du GRADEX: approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche*, 5, 80–90, 2006.
- [6] GARAVAGLIA F. Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes. *PhD thesis. Université de Grenoble*, 2011.
- [7] GARAVAGLIA F., GAILHARD J., PAQUET E., LANG M., GARCON R., BERNARDARA P. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 951-964, 2010.
- [8] GARAVAGLIA F., LANG M., PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R., RENARD B. Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 519-532, 2011.
- [9] GARCON R. Modèle global pluie-débit pour la prévision et la prédétermination des crues. *La Houille Blanche*, N°7-8, 88-95, 1999.
- [10] GARAVAGLIA F., LANG M., PAQUET E., GAILHARD J., GARCON R. Semi-continuous simulation for design flood estimation: the SCHADEX method, *EGU General Assembly, Vienna*. 2010
- [11] PROJET EXTRAFL0 : <https://extraflo.cemagref.fr/>
- [12] FLOODFREQ COST ACTION ES0901 : <http://www.cost-floodfreq.eu/>
- [13] GOTTARDI F. Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. *PhD Thesis. Polytechnic Institute of Grenoble*, 2009.

8. RESUME

Suite à des questionnements récurrents sur la méthode GRADEX, utilisée depuis près de 40 ans, EDF a développé la méthode SCHADEX. C'est une méthode probabiliste de prédétermination des crues extrêmes qui combine, au moyen d'une simulation stochastique, un modèle probabiliste de pluies extrêmes basé sur des types de temps et un modèle hydrologique conceptuel.

SCHADEX est devenue fin 2008 la méthode de référence pour les barrages d'EDF, et a été appliquée depuis sur plusieurs dizaines de bassins. La méthode fait l'objet depuis son origine d'actions d'évaluation scientifique au sein notamment de projets nationaux et internationaux d'inter-comparaison. La performance de son modèle probabiliste de pluies extrêmes a été prouvée sur une vaste base de données pluviométriques.

Les résultats de la méthode SCHADEX ont été comparés à ceux de GRADEX sur 60 bassins, les deux méthodes étant appliquées avec les mêmes données. Il en ressort que l'écart sur les estimations de débit millénal est faible

en moyenne, mais peut être significatif dans certains cas, notamment pour de petits bassins de montagne.

La méthode continue à faire l'objet de développements complémentaires, notamment sur l'utilisation de coefficients de forme variables, l'application en bassin non-jaugés ou en contexte non-stationnaire.

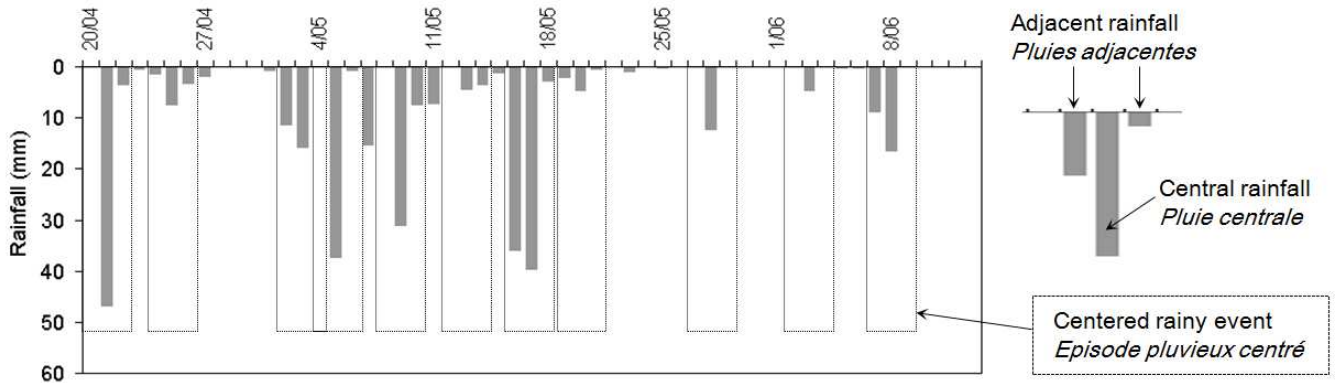


Fig. 1
Épisode pluvieux centré
Centered rainy event

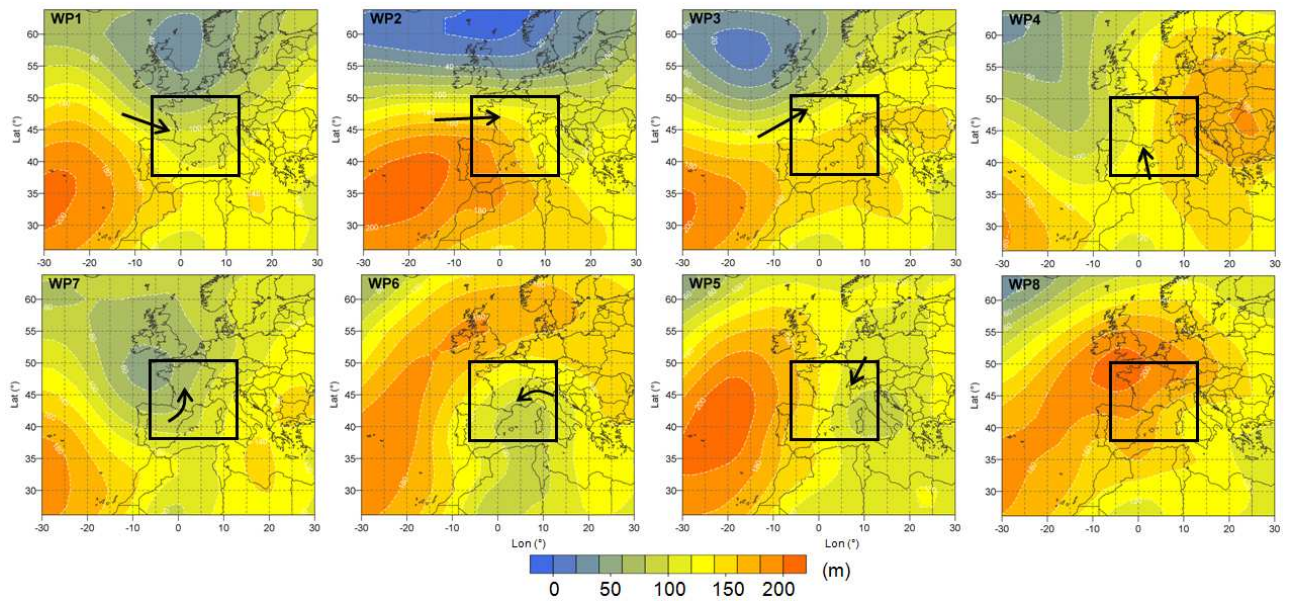


Fig. 2
Weather patterns for the MEWP distribution – average 1000 HPa
geopotential fields
Types de temps de la distribution MEWP – champs géopotentiels 1000HPa
moyens

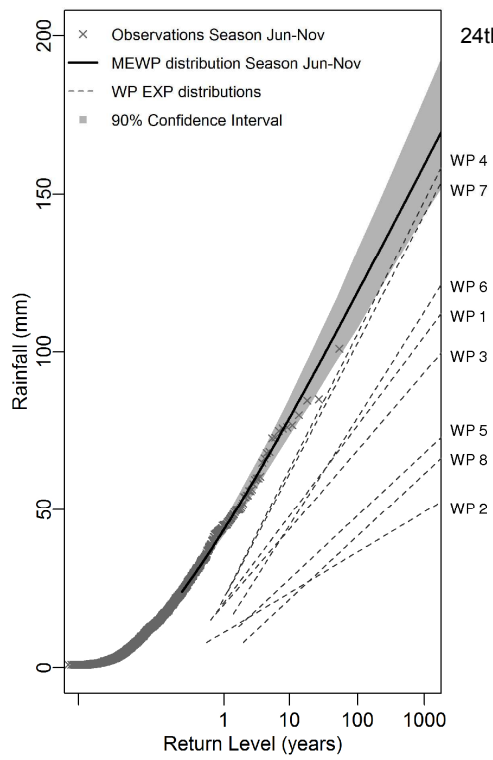


Fig. 3

MEWP distribution June-November rainfall at Lyon (1953-2005)
Distribution MEWP des pluies de Juin à Novembre à Lyon (1953-2005)

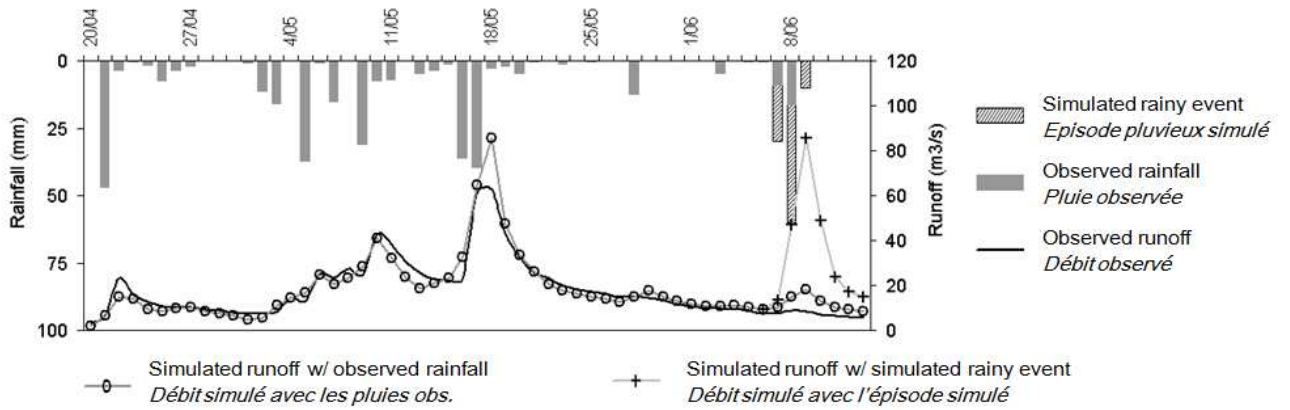


Fig. 4

Overview of rainfall-runoff SCHADEX flood simulation
Principe de la simulation de crues SCHADEX

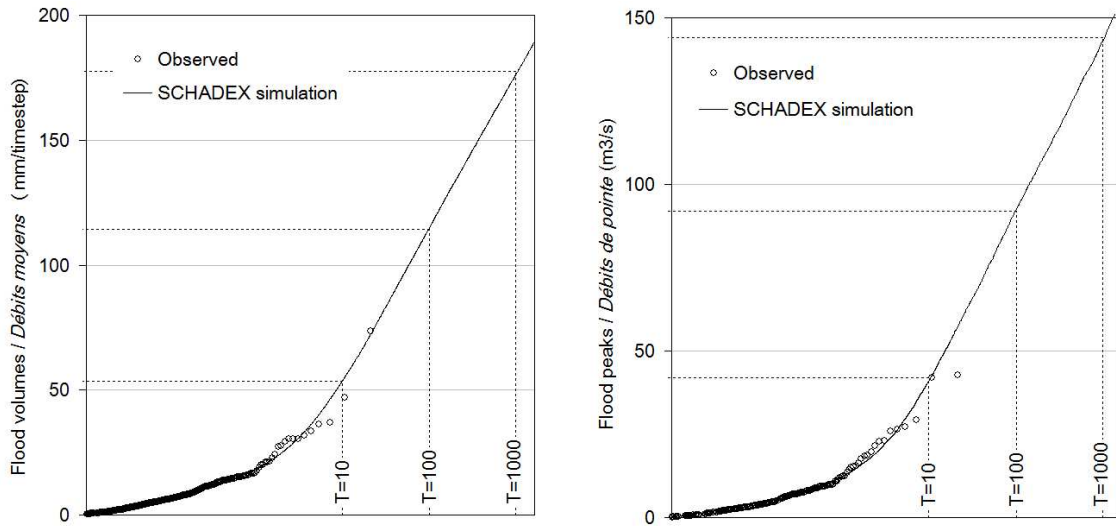


Fig. 5
 Distribution of observed and SCHADEX simulated flood volumes and peaks
Distributions de volumes et de débits de pointe observés et simulés par SCHADEX

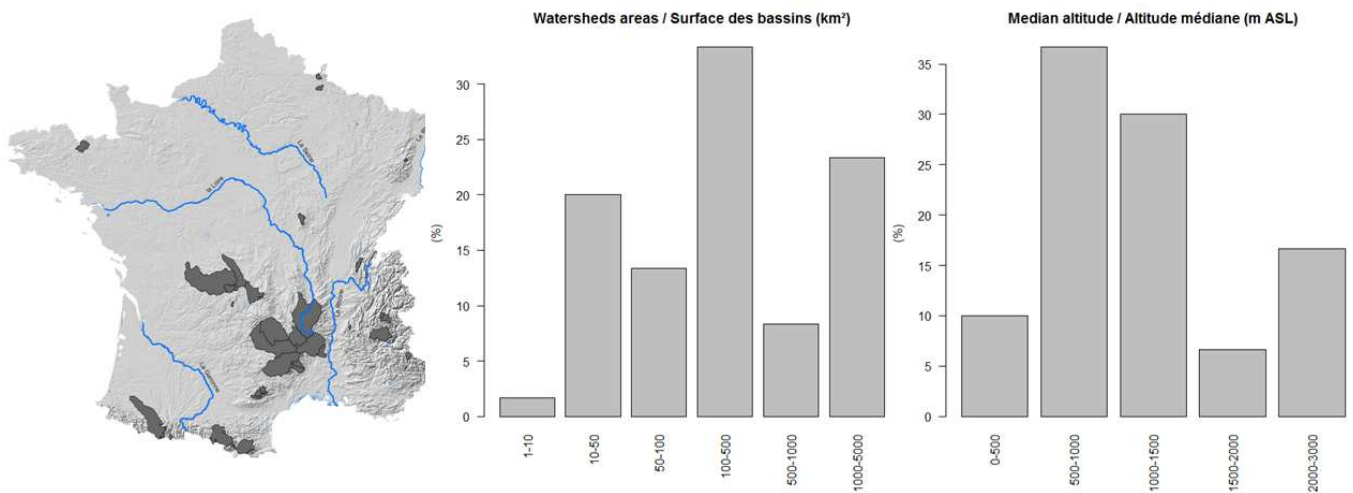


Fig. 6
 Distribution, areas and altitude of the dataset watersheds
Répartition, surfaces et altitudes des bassins du jeu de données

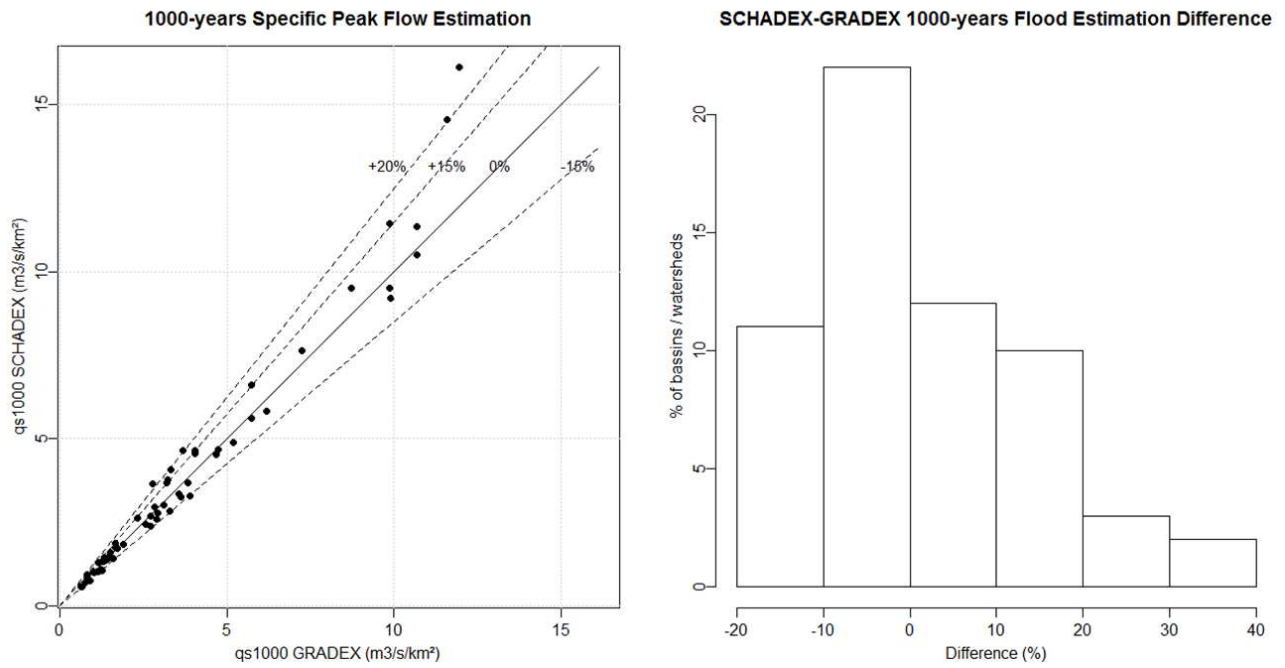


Fig.7
T=1000 specific peak flows comparison and difference distribution
Comparaison des débits spécifiques millénaux et distribution des écarts