

PRÉDÉTERMINATION RÉGIONALE DES PLUIES D'OCCURRENCE FRÉQUENTE À EXCEPTIONNELLE. APPLICATION AU POURTOUR MÉDITERRANÉEN FRANÇAIS.

C. FOUCHIER⁽¹⁾, J. LAVABRE⁽¹⁾, Y. GREGORIS⁽²⁾, B. SOL⁽²⁾, C.
DESOUCHES⁽²⁾ et A. FAURE-SOULET⁽³⁾

(1) Cemagref, B.P. 31 - Le Tholonet - 13612 Aix-en-Provence cedex 1,
catherine.fouchier@cemagref.fr

(2) Météo-France, - 2 boulevard du Château Double, 13098 Aix-en-Provence cedex 1 ;

(3) CETE Méditerranée – BP 37000, 13791 Aix-en-Provence cedex 3 ;

Résumé

Un générateur stochastique de pluies horaires est mis en œuvre dans le cadre d'une méthode originale de prédétermination des débits de crue : la méthode SHYPRE (Simulation d'HYdrogrammes pour la PREdétermination des crues). Ce générateur de pluies est paramétré par deux grandeurs caractéristiques de la pluie journalière facilement accessibles. Leur régionalisation sur le littoral méditerranéen français met en œuvre une régression multiple sur des caractéristiques du relief. La connaissance des quantiles de pluie de toutes durées (entre 1 heure et 72 heures heures ainsi que sur la journée) pour des périodes de retour comprises entre 2 et 1 000 ans est alors possible en tout point de la zone d'étude. Les performances du modèle sont évaluées sur sa capacité à reproduire les quantiles de pluie journalière aux postes de calage. Les résultats de la simulation sont ensuite confrontés aux estimations des pluies horaires et journalières rencontrées dans la littérature.

Mots-clés : Simulation stochastique, pluie, hyétogrammes horaires, régionalisation, région méditerranéenne française.

Abstract

A stochastic model for generating hourly hyetographs has been developed for a flood-predetermination method called SHYPRE (Simulated Hydrographs for the PREdetermination of floods). Two parameters, representative of the daily rainfall and easily available, are needed for the hourly rainfall simulator. The regionalization of these two parameters on the French Mediterranean seaboard has been carried out using a regression method on topographic information. This regionalization has led to the knowledge of rainfall height for various durations (from 1 hour to 72 hours and also the daily height) and various return periods (from 2 years to 1,000 years) on every point of the studied area. The model is judged on his ability to give correct rainfall estimations on the calibration points, compared to the observed data. Its results are then compared to hourly and daily rainfall estimations available in other studies.

Keywords : Stochastic model, rainfall, hourly hyetographs, regionalization, French Mediterranean seaside.

Introduction

Le Cemagref a développé un générateur stochastique de pluies horaires couplé à une modélisation de la pluie en débit. La régionalisation de cette méthode dénommée SHYPRE (Simulation d'HYdrogrammes pour la PREDétermination des crues) lui ouvre des applications intéressantes en hydrologie opérationnelle. La finalité de la version SHYPRE régionalisée, dénommée SHYREG, est en effet de fournir des estimations des débits de crue, de différentes durées et périodes de retour, pour tout cours d'eau, qu'il soit jaugé ou non.

Une autre application intéressante de la méthode, que nous développons ici, est la fourniture, à partir des résultats intermédiaires issus du générateur de pluie, de cartographies des pluies maximales sur différentes durées associées à différentes probabilités d'apparition. Les résultats présentés ci-après proviennent d'un travail de régionalisation du générateur de pluies horaires de SHYPRE sur les régions Languedoc-Roussillon (LR) et Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Il s'insère dans le cadre d'une étude de synthèse plus large dédiée à la connaissance des débits de crue sur ces deux régions et financée par le Ministère de l'écologie et du développement durable, le Cemagref, Météo-France et le CETE Méditerranée.

1. Le modèle stochastique de pluies horaires

Le modèle de génération de pluie utilisé s'appuie sur une description géométrique du signal temporel de pluie au pas de temps horaire. Elaboré initialement sur les postes pluviographiques du Bassin Versant Représentatif Expérimental du Réal-Collobrier géré par le groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref (Cernesson, 1993), il a été calé localement sur une cinquantaine de postes du pourtour méditerranéen français (Arnaud, 1997).

1.1 La paramétrisation locale

Les événements pluvieux décrits sont sélectionnés sur une base de temps journalière. Un événement comporte une ou plusieurs précipitations journalières de plus de 20 mm, encadrée par des pluies journalières de plus de 4 mm. L'analyse, au pas de temps horaire, de la forme de ces événements a conduit à la définition de 9 variables et de leurs lois de probabilités (tableau 1 et figure 1). Ces lois nécessitent le calage de 21 paramètres (Cernesson, 1996 ; Arnaud, 1997). Deux distinctions sont introduites :

- la première entre les saisons été (juin à novembre) et hiver (décembre à mai) ;

- la seconde entre l'averse principale et les averses ordinaires d'un même événement pluvieux. L'averse principale est l'averse qui apporte la plus grande quantité d'eau au cours d'un événement, toutes les autres averses de l'événement sont considérées comme ordinaires.

Variable	Définition	Loi de distribution
NE	Nombre d'événements pluvieux (définis au pas de temps journalier) par saison	Loi de Poisson
TSE	Origine de l'événement dans la journée	Loi géométrique
NG	Nombre de périodes pluvieuses (succession continue d'heures pluvieuses) par événement	Loi géométrique
NA	Nombre d'averses (caractérisées par un seul extremum relatif) par période pluvieuse	Loi géométrique
DIA	Durée sèche séparant deux périodes pluvieuses à l'intérieur d'un même événement	Loi géométrique tronquée ou uniforme selon la durée
HMA	Intensité moyenne horaire des averses	Loi exponentielle pour l'averse principale de la période pluvieuse, loi double exponentielle pour les autres averses
DA	Durée des averses	Loi de Poisson tronquée ou loi uniforme selon la durée et en fonction de la saison pour l'averse principale de la période pluvieuse, selon la durée uniquement pour les autres averses
RX	Rapport entre l'intensité maximale et l'intensité moyenne de l'averse	Loi exponentielle
RPX	Position relative du maximum (heure du maximum sur la durée de l'averse)	Loi normale tronquée entre 0 et 1

Tableau 1 : Variables locales du modèle stochastique de simulation de pluies horaires. *Local variables of the stochastic hourly rainfall simulator.*

Les hyétogrammes horaires sont construits à partir des valeurs de ces variables descriptives, générées par un tirage aléatoire selon un processus de Monte Carlo dans leur loi de distribution, suivant un ordre précis. La liaison observée entre la durée et l'intensité moyenne des averses est respectée par le biais de la génération conditionnelle de ces deux variables (Arnaud, 1997 ; Arnaud et al, 1998). Les pluies maximales de différentes durées sont extraites de ces scénarios. Leur report sur un graphique de fréquence permet l'estimation des quantiles de pluie, sans hypothèse sur une loi de probabilité en raison de la grande taille des échantillons simulés.

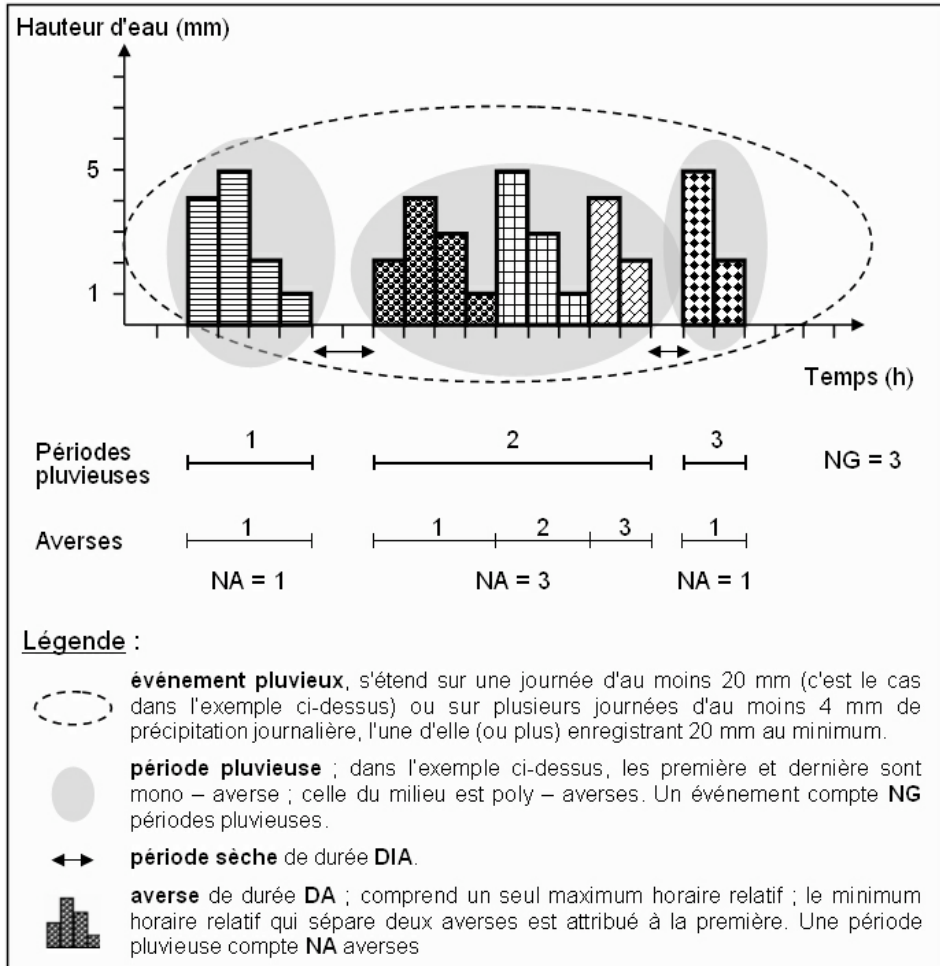


Figure 1 : Description d'un événement pluvieux au pas de temps horaire. *Description of a rainfall event at the hourly time step.*

1.2 La paramétrisation régionale

Le modèle initial a été simplifié par le blocage des paramètres ayant peu d'effets sur les résultats de la modélisation. L'ensemble de la variabilité est reportée sur 6 paramètres de lois significatifs : les paramètres de la loi de Poisson associée aux variables NE et NG, le paramètre de la loi géométrique associée à NA, les moyennes des deux variables HMA des averse principales et des averse ordinaires, le paramètre de la loi reliant les variables HMA et DA pour les averse principales. Des tests de sensibilité ont montré que cette simplification n'altérerait pas les performances du modèle (Arnaud et al, 1997). Du fait de la meilleure disponibilité spatiale de l'information pluviométrique journalière, un lien a été recherché entre les paramètres issus de la description

de la pluie au pas de temps horaire et des caractéristiques de la pluie journalière. La détermination du paramètre de la loi de NE est implicite car directement déduite des chroniques de pluie journalières. Pour la région Corse, on a exprimé linéairement les 5 paramètres restants en fonction de la moyenne saisonnière **Pjmax** des pluies journalières maximales de chaque événement (Lavabre et al, 2000). La démarche retenue pour les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur est décrite au paragraphe suivant.

2. Mise en œuvre du modèle sur les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur avec une paramétrisation régionale

2.1 Calage

Météo-France a élaboré les données météorologiques nécessaires au calage sur 556 postes du pourtour méditerranéen présentant 20 années de mesure de la pluie journalière entre 1980 et 1999. Les tolérances sur les lacunes sont un nombre maximum de 140 observations manquantes, soit moins de 2% du nombre total possible d'observations, ainsi qu'une continuité d'observations d'au moins 15 années. La zone couverte dépasse les deux régions d'étude pour limiter les perturbations liées aux effets de bords lors de la régionalisation des paramètres. Les grandeurs caractéristiques de la pluie au pas de temps journalier déterminées en chaque poste pour les deux saisons sont :

- **NE**, le nombre moyen d'événement pluvieux,
- **PJmax**, la moyenne des pluies journalières maximales des épisodes de la saison considérée,
- les quantiles de la pluie journalière maximale de période de retour 2, 5 et 10 ans, calculés par ajustement statistique sur une loi de Gumbel, selon la méthode des moments, à partir des chroniques de pluie journalière.

Les performances du modèle régional sont contrôlées sur les quantiles de la pluie journalière. Les résultats sont corrects pour la saison hiver avec des critères de Nash, calculés entre quantiles simulés et quantiles issus des chroniques observées, supérieurs à 80%. Les critères de Nash sont moins satisfaisants pour la saison été où ils sont de l'ordre de 65%. On décide alors d'optimiser la valeur de PJmax en minimisant l'écart quadratique moyen entre la valeur des quantiles simulés et celle des quantiles estimés à partir des observations. Cette valeur optimisée est appelée **PRIMS** (Paramètre Régional Indicateur du Modèle Stochastique). Ce mode de détermination du paramètre PRIMS conduit à une amélioration de la restitution des quantiles de la pluie journalière (tableau 2).

Pluie journalière de période de retour			
Saison	2 ans	5 ans	10 ans
- été	82.5 %	99.5 %	98.5 %
- hiver	74.3 %	99.7 %	99.0 %

Tableau 2 : Performances du modèle régional évaluées par le critère de Nash calculé entre les quantiles de calage et les quantiles issus des simulations. Modélisation avec les valeurs locales des paramètres NE et PRIMS aux postes de calage. *Nash criterion calculated for the daily rainfall with a 2, 5 and 10-year return period, between the calibration data and the estimates of the SHYPRE model used with the local values of NE and PRIMS parameters at the calibration stations.*

La figure 2 montre de manière graphique, pour la pluie journalière décennale, les performances du modèle régional utilisé avec les valeurs locales des paramètres NE et PRIMS. Les quantiles de calage sont portés en abscisse ; ceux issus de la simulation sont portés en ordonnée. Les saisons hiver (a) et été (b) sont représentées.

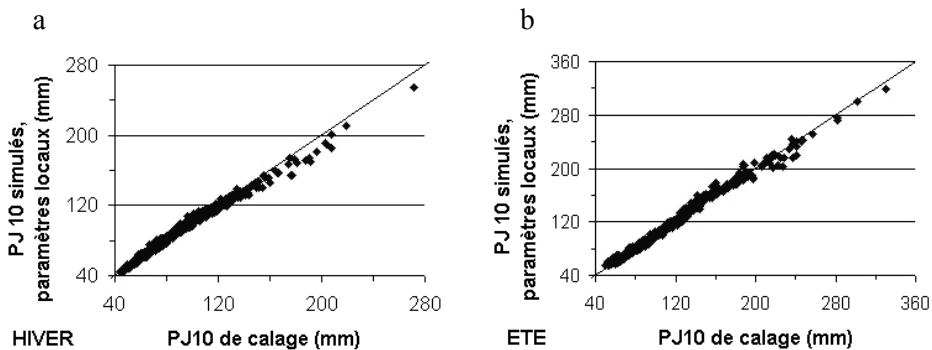


Figure 2 : Performances du modèle régional avec les paramètres locaux sur la pluie journalière décennale PJ10 (en mm) aux 556 postes de calage ; (a) : saison hiver ; (b) : saison été. *10-year return period daily rainfall (PJ10 in mm) given by the regionalized model with the local parameters (Y-axis), comparison with the observed data of the 556 calibration points (X-axis). (a): winter season (December to May); (b): summer season (June to November).*

2.2 Régionalisation des paramètres journaliers

La mise en œuvre du modèle sur l'ensemble de la zone d'étude implique une spatialisation des paramètres NE et PRIMS. La maille de travail retenue est le km^2 . La technique de régionalisation utilisée par Météo-France s'inspire de la méthode Aurhély (Bénichou et Lebreton, 1987). Elle s'appuie sur deux hypothèses :

- la pluviométrie est influencée par l'environnement géographique,

- cette influence doit se retrouver sur les paramètres du modèle.

L'environnement géographique est défini comme la somme d'un environnement local constitué par le relief, un environnement régional représenté par des zones soumises à un même régime pluviométrique et des facteurs susceptibles d'influencer les précipitations comme la proximité de la mer ou de montagnes. Il est représenté en chaque km² par un ensemble de 18 descripteurs :

- l'altitude lissée du point considéré, issue d'un MNT de maille carrée de 250 m de côté,
- 12 composantes principales du relief issues d'une analyse en composantes principales des altitudes dans un carré de 30 km de côté autour du point considéré,
- la distance à la mer,
- les distances absolue et relative à la ligne de crête des Cévennes,
- la distance à la ligne de crête des Pyrénées,
- la distance au Rhône,

Pour tenir compte de l'environnement régional, 4 zones sont définies : Pyrénées, vallée du Rhône, Cévennes et Alpes. Chacune de ces zones est supposée présenter une homogénéité interne du point de vue du régime des précipitations. En chacune de ces zones, une régression multiple est construite entre chaque paramètre et un certain nombre des descripteurs géographiques. Le coefficient de régression obtenu est satisfaisant pour la majorité des paramètres. Il varie ainsi de 0,7 pour le paramètre NE hivernal sur les Cévennes à 0,9 pour le NE estival sur la vallée du Rhône (tableau 3).

	NE été	NE hiver	PRIMS été	PRIMS hiver
Pyrénées	6 variables R = 0,7	4 variables R = 0,6	4 variables R = 0,8	4 variables R = 0,9
Cévennes	5 variables R = 0,8	6 variables R = 0,7	4 variables R = 0,9	5 variables R = 0,8
Vallée du Rhône	3 variables R = 0,9	3 variables R = 0,9	3 variables R = 0,6	5 variables R = 0,8
Alpes	5 variables R = 0,8	9 variables R = 0,7	4 variables R = 0,8	4 variables R = 0,6

Tableau 3 : Synthèse des équations de régression pour les 4 paramètres et les 4 zones géographiques (nombre de variables explicatives retenues et coefficient de corrélation multiple). *Summary of the regression equations calculated for the 4 parameters within the 4 geographical areas (number of predicting variables and correlation coefficient).*

On dispose, pour chaque paramètre saisonnier, de 4 équations de régression zonales. Ces équations sont ensuite mises en œuvre en chaque maille de 1 km² de leur zone de définition. Pour disposer d'une cartographie continue des paramètres sans rupture au passage d'une zone à l'autre, une interpolation fonction de la distance inverse est effectuée sur quelques kilomètres à la jonction de deux zones. Les résidus calculés aux postes de calage sont enfin krigés et bornés, puis ajoutés à la valeur géographique pour définir la valeur régionale du paramètre en chaque km² des deux régions étudiées (figure 3).

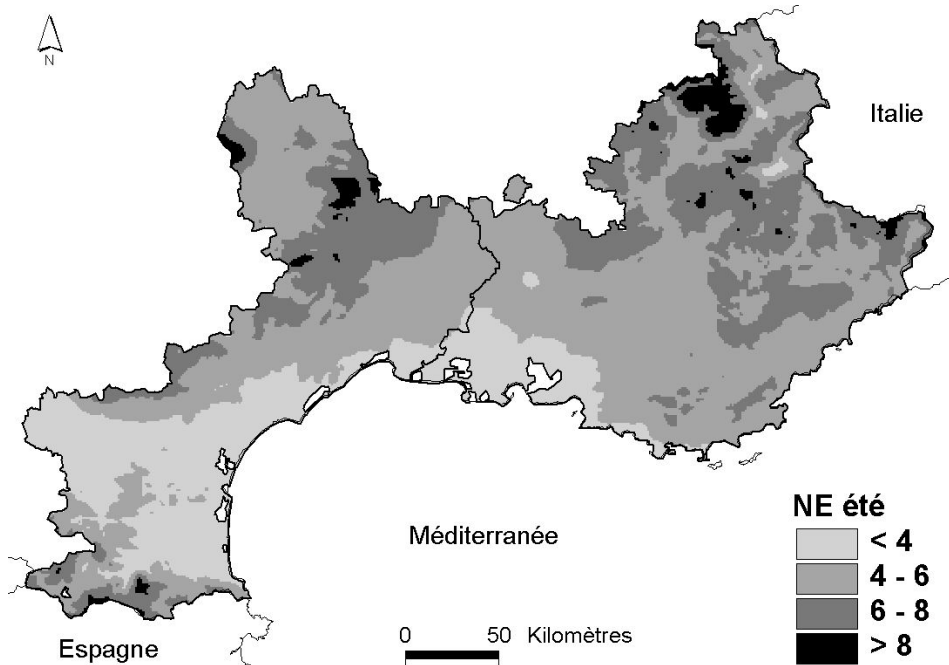


Figure 3 : Régionalisation du paramètre NE d'événements pluvieux pour la saison été. *Map of the regionalized NE parameter (number of rainfall events) for the summer season (June to November).*

La connaissance des paramètres journaliers NE et PRIMS en chaque km² des deux régions méditerranéennes permet la mise en œuvre du générateur stochastique de pluies horaires sur chacune des mailles. Au total, 1 000 chroniques de 500 ans sont simulées pour une valeur unique de NE et pour différentes valeurs du paramètre PRIMS couvrant la gamme de variation des valeurs régionales. Le calcul des fréquences d'apparition empiriques (méthode de Hazen) des pluies maximales de ces chroniques permet de déterminer les quantiles de pluie associés à chaque combinaison de paramètres simulée. Il est ensuite possible d'en déduire les quantiles de pluie, pour chaque maille de 1 km², par recalage et interpolation à partir de la valeur de ses paramètres propres. Les résultats sont présentés sous la forme de cartes de précipitations

estimées pour des durées allant de 1 heure à 72 heures et pour des périodes de retour comprises entre 2 et 1 000 ans (figure 4).

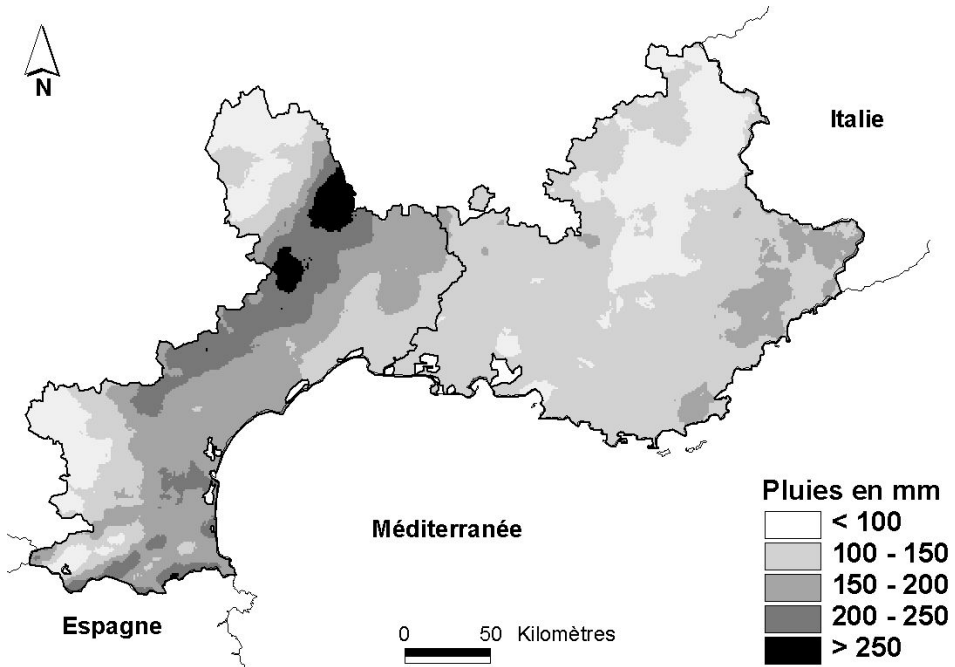


Figure 4 : Cartographie des quantiles de la pluie journalière maximale annuelle décennale estimés avec la méthode SHYREG. *Map of the 10-year return period daily maximal annual rainfall given by the regionalized SHYPRE method.*

3. Contrôle des performances du modèle

3.1 Performances aux points de calage

La régionalisation des paramètres détériore la restitution des quantiles de la pluie journalière mais les résultats restent satisfaisants avec un critère de Nash de 89 % et 90 % pour la pluie journalière décennale des saisons hiver et été (figure 5). Pour les deux saisons confondues, le modèle restitue plus de 93% des pluies journalières décennales dans un intervalle de ± 20 % autour des observations. Des résultats très semblables sont obtenus pour les précipitations journalières de périodes de retour 2 et 5 ans.

3.2 Performances en dehors des points de calage

Les quantiles des pluies journalières et horaires décennales issus des simulations par SHYREG ont été confrontés aux résultats des études disponibles sur la même zone d'étude. Pour les pluies journalières décennales, les écarts observés entre les résultats de SHYREG et les estimations données par ces études sont comparables aux écarts entre les données utilisées pour caler

SHYREG et ces estimations et ce, quelle que soit l'étude de comparaison (Météo-France, 1999, Kieffer Weisse, 1998). Les différences observées semblent imputables à des méthodes d'ajustement statistiques différentes entre les données de calage et celles des études de comparaison ou encore à des chroniques de pluie journalière différentes (figure 6).

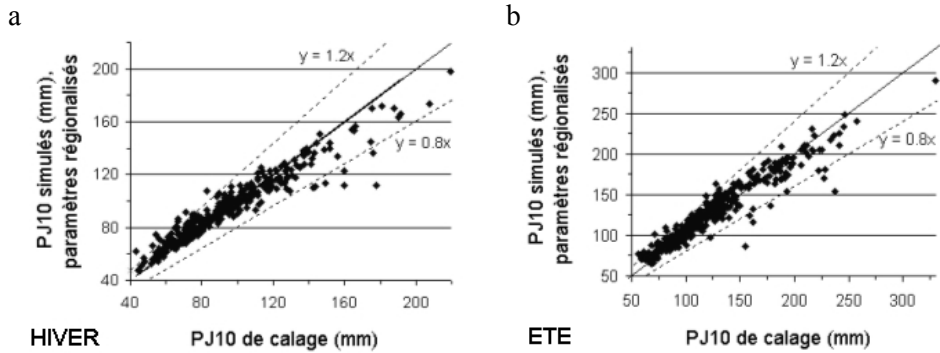


Figure 5 : Performances du modèle régional avec les paramètres régionalisés sur la pluie journalière décennale PJ10 (en mm) aux 342 postes des régions LR et PACA ; (a) : saison hiver ; (b) : saison été. *10-year return period daily rainfall (PJ10 in mm) given by the regionalized model with the regionalized parameters (Y-axis), comparison with the observed data (X-axis) of the 342 calibration points in the 2 studied administrative areas. (a): winter season (December to May); (b): summer season (June to November).*

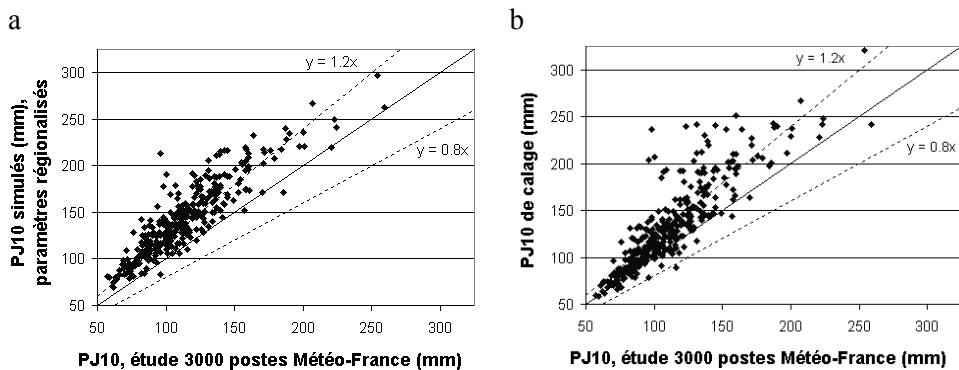


Figure 6 : Confrontation des quantiles de la pluie journalière décennale (mm) modélisés par le méthode SHYREG (a) et des quantiles de calage (b), aux estimations issues d'un ajustement selon la méthode du renouvellement à partir d'une chronique de pluies journalières sur la période 1961-1998 (Météo-France, 1999). *10-year return period daily rainfall (PJ10 in mm), comparison with the estimates of a previous study (Météo-France, 1999) along the X-axis. Along the Y-axis: (a), estimates of the regionalized model with the regionalized parameters; (b): calibration data.*

La validation des résultats de SHYREG sur des pluies de durées inférieures à la journée est délicate du fait du peu de données disponibles (Météo-France,

1998 ; Kieffer Weisse, 1998 ; Nguyen TPT, 1993) et de la variabilité des estimations selon la méthode d'ajustement retenue (figure 7).

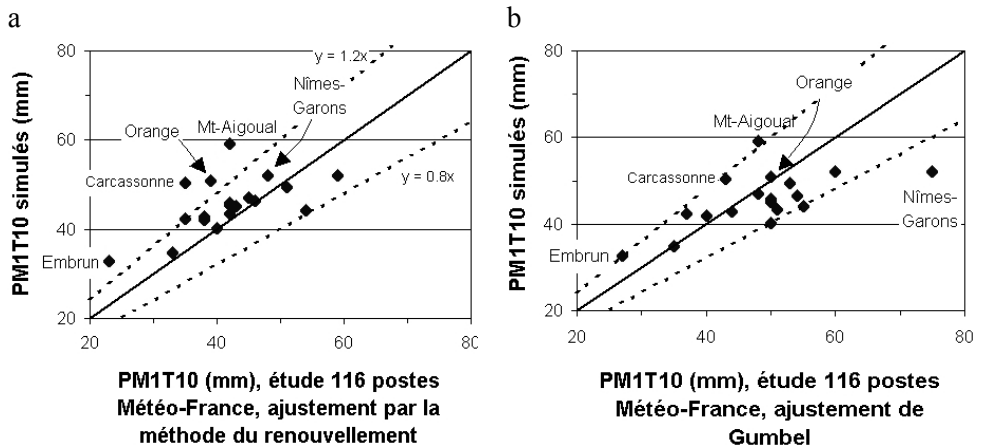


Figure 7 : Pluies horaires maximales décennales annuelles en mm. En abscisses : estimations locales par ajustement statistique (Météo-France, 1998) selon (a) la méthode du renouvellement ou (b) par ajustement de Gumbel selon la méthode des moments ; en ordonnées : simulations du modèle régional. En pointillés : intervalle $\pm 20\%$ par rapport aux observations. *10-year return period hourly rainfall (PMIT10 in mm) given by the regionalized model with the regionalized parameters (Y-axis), comparison along the X-axis with the estimates of a previous study (Météo-France, 1998) given by two different estimation methods : (a) renewal processes method; (b) Gumbel adjustment.*

Conclusion

L'une des originalités de la régionalisation du modèle de génération stochastique de pluies horaires est le nombre restreint de cartographies mises en œuvre. En effet, seuls deux paramètres (NE et PRIMS ou NE et P_{Jmax}) sont nécessaires pour estimer les pluies de toutes durées et de toutes fréquences. Une part importante de la variabilité spatiale de ceux-ci est expliquée par des critères géographiques. C'est l'une des forces de la méthode par rapport aux approches classiques qui proposent des cartographies obtenues par des méthodes de géostatistique sans prise en compte des caractéristiques physiques du milieu.

Par ailleurs, les problèmes d'échantillonnage susceptibles d'apparaître peuvent être facilement réglés par une simple correction du paramètre PRIMS. Ceci représente un deuxième avantage par rapport aux méthodes géostatistiques où les cartographies des différentes durées et périodes de retour fournies ne sont pas nécessairement cohérentes entre elles du fait d'une très grande sensibilité de ces méthodes à l'échantillonnage.

Le Cemagref finalise actuellement une adaptation du générateur stochastique de pluies horaires pour une extension géographique de son domaine de validité. Cette extension concerne les climats tropical (île de la Réunion) et tempéré

(métropole). L'objectif est de proposer, en tout point du territoire national, des hyétogrammes de forme réaliste utilisables pour l'obtention d'hydrogrammes de crues.

Bibliographie

- ARNAUD P., 1997 : *Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation. Extension de sa zone de validité, paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps*, Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 258 p. + annexes.
- ARNAUD P., PICARD S., LAVABRE J., DOUGUEDROIT A., 1997 : Modélisation stochastique des pluies horaires. Application à la région méditerranéenne française. *Communication au 10^{ème} colloque international de l'Association Internationale de Climatologie*, Québec, 9-12 sept. 1997, 10 p.
- ARNAUD P., LAVABRE J., MASSON J.M., 1998 : Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétogrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français, *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/2, pp 251-271.
- BENICHOU P., LE BRETON O., 1987 : Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques, *La Météorologie*, 7ème série, n° 19, pp. 23-34.
- CERNESSON F., 1993 : *Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens*, Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 240 p. + annexes.
- CERNESSON F., LAVABRE J., MASSON J.M., 1996 : Stochastic model for generating hourly hyetographs, *Atmospheric Research*, n° 42, pp. 149-161.
- KIEFFER WEISSE A., 1998 : *Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises), méthode de cartographie des précipitations extrêmes*, Thèse de doctorat de l'INPG, LTHE, Grenoble. 314 p. + annexes.
- LAVABRE J., FOLTON N., ARNAUD P., PASQUIER C., 2000 : Prédétermination régionale des débits de crue. Exemple d'application à la Corse, Programme Hydrologique International, Documents Techniques en hydrologie n° 51. *Actes du Colloque FRIEND AMHY*, 11-13 octobre 2000, Montpellier, p. 357-365.
- METEO-FRANCE, 1999 : *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 à 10 jours sur 3000 postes français, méthode du renouvellement*, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, DPPR, SDPRM. 463 p.
- METEO-FRANCE, 1998 : *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumul de 1 heure à 24 heures sur 116 postes en France*, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, DPPR. 36 p. + annexes.
- NGUYEN TPT., 1993 : Analyse statistique des valeurs extrêmes de précipitation. Application dans la région Cévennes-Vivarais, 180 p.