ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES DANS LE BASSIN VERSANT DU MONO (BÉNIN-TOGO) EN CONTEXTE DE VARIABILITÉ / CHANGEMENT CLIMATIQUE

AMOUSSOU E. [(1, 2)], CAMBERLIN P. [(3)], TOTIN VODOUNON S. H. [(1, 2)], TRAMBLAY Y. [(4)], HOUNDENOU C. [(2)], MAHÉ G. [(4)], PATUREL J.-E. [(4)], BOKO M. [(2)]

(1) Département de Géographie et Aménagement du Territoire de l'Université de Parakou, BP 123, Parakou, Bénin [ajernest@yahoo.fr ; ernestamoussou@gmail.com]

(2) Laboratoire Pierre Pagney, Climat, Eau, Écosystème et Développement (LACEEDE) / Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Cotonou, Bénin [constant500@yahoo.fr ; bokomichel@gmail.com]

(3) Centre de Recherches de Climatologie (CRC), Biogéosciences /UMR CNRS 6282, Université de Bourgogne, 6 bd Gabriel, 21000, Dijon, France [pierre.camberlin@u-bourgogne.fr]

(4) IRD HydroSciences Montpellier, UMR5569, Université de Montpellier 2, Case courrier MSE, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5, France [yves.tramblay@ird.fr ; gilmahe@hotmail.com ; jean-emmanuel.paturel@msem.univ-montp2.fr]

Résumé – *Dans le golfe de Guinée et dans le bassin du Mono, au Bénin-Togo, en particulier, la population est de plus en plus exposée aux événements de précipitations extrêmes ou à l'intensité de ces événements causant des inondations de plus en plus récurrentes dans un environnement où on assiste à une croissance démographique galopante. L'objectif de cette étude est : 1) d'analyser l'évolution des précipitations extrêmes dans le bassin au cours de la période 1988-2010 à partir de données pluviométriques krigées ; 2) d'effectuer une comparaison avec les simulations régionales à 50 km de résolution produites par les modèles MPI, ICT, SMH et METO dans le cadre du projet Européen ENSEMBLES ; 3) d'étudier les extrêmes pluvieux futurs dans les simulations produites par ces mêmes modèles pour la période 2028-2050. Les données pluviométriques sont soumises à des méthodes de traitement statistique afin de déterminer les maxima annuels de précipitation, la distribution fréquentielle des 99[e] centiles de précipitations journalières et les périodes de retour des extrêmes de pluies à partir de la loi GEV. Il ressort de cette étude une augmentation significative de l'intensité des pluies maximales journalières entre 1988 et 2010 dans le bassin du Mono, pouvant engendrer des risques d'inondation. L'ajustement de la loi GEV, ici de type Weibull, se révèle bien adapté pour la simulation des événements pluvieux extrêmes, avec des périodes de retour très marquées entre deux et dix ans dans les données observées et entre deux et vingt ans dans les données simulées.*
Mots-clés : *bassin versant du Mono, simulations régionales du climat, précipitations extrêmes, loi GEV.*

Abstract – Evolution of extreme precipitation in the watershed of mono (Benin-Togo) in a context of variability / climate change. *In the Gulf of Guinea and in the Mono basin (Benin-Togo) in particular, populations are getting more and more exposed to extreme precipitation events or the intensity of these events causing more recurrent flooding in an environment where there is a rapid population growth. The objective of this study is: 1) to analyze the evolution of extreme precipitation in the basin over the period 1988-2010 from kriged rainfall data, 2) to perform a comparison with regional climate simulations at 50km resolution produced by MPI, ICT, METO and SMH models within the European ENSEMBLES project, 3) to explore future extreme rainfall in the simulations produced by these models for the period 2028-2050. Statistical processing methods are applied onto the rainfall data in order to determine the maximum annual precipitation, the frequency distribution of the 99th percentile of daily precipitation and return periods of extreme rainfall from the GEV law. It appears from this study a significant increase in the intensity of the maximum daily rainfall between 1988 and 2010 in the Mono Basin, which can lead to flooding. The adjustment of the GEV law, here of Weibull type, appears to be well suited for the simulation of extreme rainfall events with very marked return periods between two and ten years in the observed data and between two and twenty years in the simulated data.*
Keywords: *Mono basin, regional climate simulations, extreme precipitation, GEV law.*

Introduction

En Afrique tropicale et dans le golfe de Guinée en particulier, les événements hydroclimatiques extrêmes tels que les précipitations violentes, les inondations et les sécheresses ne sont pas sans conséquence sur la population et son environnement socioéconomique. La question de l'évolution future de la fréquence ou de l'intensité de ces événements, sous l'effet notamment de l'accroissement des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, est donc majeure (Mladjic *et al*., 2011 ; Crétat *et al*., 2013). La région du golfe de Guinée où se situe le bassin versant du Mono (Fig. 1) est à cet égard particulièrement concernée car, outre la forte vulnérabilité de ses populations, les phénomènes hydroclimatiques, parmi les différents risques naturels, y sont ceux qui de très loin causent le

plus grand nombre de victimes. À cet effet, il est donc important de caractériser les changements futurs de ces événements extrêmes en relation avec l'évolution globale des concentrations des gaz à effet de serre.

Le bassin versant du Mono, à cheval sur le Togo et le Bénin, dont la majeure partie se situe sur le territoire togolais (Fig. 1), bénéficie de deux nuances climatiques : l'une au sud (climat subéquatorial) et l'autre sur le nord (climat tropical humide) du bassin. Ces variations climatiques sont contraintes par l'organisation de la circulation atmosphérique ouest-africaine dans son ensemble, à la fois celle des basses couches et celle en moyenne et haute atmosphère (Amoussou, 2010). C'est d'ailleurs ce qui détermine la saisonnalité climatique dans le bassin, caractérisée de nos jours par une succession de sécheresses et d'inondations dues aux précipitations intenses de courte durée. En sera-t-il ainsi dans le temps sur cet espace ?

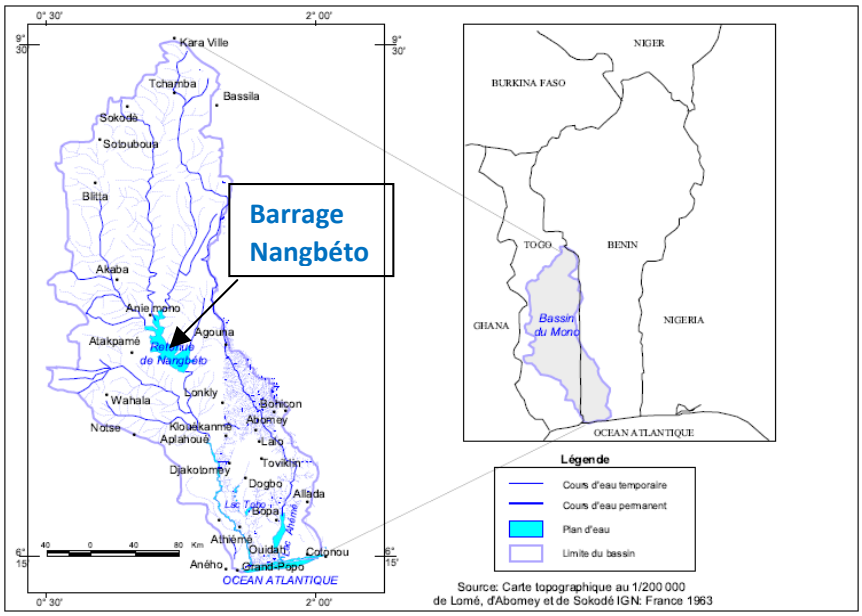


Figure 1 : Localisation du bassin versant du fleuve Mono entre le Bénin et le Togo

1. Données et méthodes

Les précipitations journalières observées dans trente-quatre stations sont réparties dans le bassin et sa proche périphérie sur la période 1961-2010. Pour comparer les données stationnelles observées à celles en points de grille des modèles régionaux de climat (RCMs ; voir ci-après), une spatialisation des lames d'eau précipitées a été opérée avec les trente-quatre stations pluviométriques en utilisant la méthode dite de Krigeage ordinaire par bloc (Amoussou *et al.*, 2014). Un variogramme climatologique a été considéré et l'ajustement a été réalisé avec un modèle de variogramme sphérique (Lebel *et al.*, 1987). Ici, la portée du modèle ajusté est égale à 65 km, correspondant à la distance *moyenne* de décorrélation des précipitations entre deux stations.

Les données de précipitation provenant de quatre RCMs participant au projet Européen ENSEMBLES (Hewitt, 2004), listés dans le tableau 1, sont extraites de la base de données AMMA-ENSEMBLES (Ruti *et al.*, 2011). Ces simulations régionales, centrées sur l'Afrique de l'Ouest (19,8°S-35,2°N et 35,2°W-31,2°E), ont une résolution horizontale de 50 km et couvrent au moins la période 1951-2050 (1980-2050 pour le modèle de l'ICTP). Ces quatre RCMs sont alimentés à leurs frontières par des données de simulations produites par deux modèles globaux (GCMs) différents : le modèle ECHAM5 pour MPI et ICTP, et le modèle HadCM3 pour HC et SMHI. Ces données qui sont au pas de temps quotidien sont extraites sur une fenêtre géographique allant de 5 à 14°N et de 1,2°W à 3°E.

Tableau 1 : Présentation des différents modèles régionaux de climat (RCMs) utilisés pour la comparaison et l'étude des extrêmes pluvieux futurs

Centres	RCM	GCM	Abréviation
Max Planck Institute (MPI)	REMO	ECHAM5	Mpi
International Centre for Theoretical Physics (ICTP)	RegCM	ECHAM5	Ict
Hadley Centre (HC)	HadRM3	HadCM3	Meto
Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	RCA	HadCM3	Smh

Dans le cadre de ce travail, ce sont les projections climatiques relevant du scénario A1B du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) qui ont été choisies pour l'étude des extrêmes pluvieux futurs. Ce scénario qui décrit une augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) de 25 à 90 % (équiv.CO_2) entre 2000 et 2030 (IPCC, 2007), conduit à une augmentation de la température globale de 1.5° à 2.5°C à l'horizon 2050 par rapport à 1980-1999.

Les données de débit en entrée du barrage de Nangbéto n'étant disponibles que sur la période 1988-2010, nous avons retenu comme période de référence les années 1988 à 2010 (vingt-trois ans) et comme période de projection les années 2028 à 2050 (vingt-trois ans) pour mieux apprécier le climat futur.

La contribution des différentes classes d'intensité de pluies journalières dans le total des précipitations enregistrées dans le bassin est déterminée à partir du calcul des quintiles. La détermination du 99[e] centile est également réalisée pour évaluer l'importance des fortes pluies dans le bassin. Ces différents calculs ont été faits sur l'ensemble des valeurs journalières de pluies (pluie > 1 mm). Les périodes de retour calculées à l'aide du modèle GEV (El Adlouni et Ouarda, 2008) sont définies par la fonction de distribution cumulative (CDF) $F(x)$, et la fonction de densité de probabilité (PDF) $f(x)$, données par les formules :

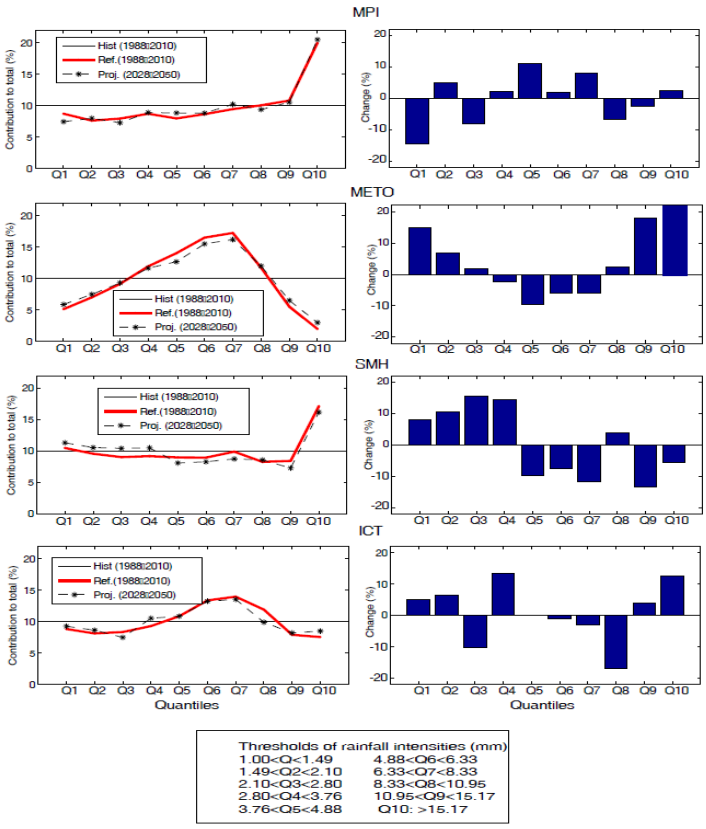
$$F(x)=\Pr[X\leq x] \quad et \quad f(x)=\frac{dF(x)}{dx}$$

avec *Pr* la probabilité d'apparition d'un événement et *X* la variable aléatoire qui est ici les maxima annuels journaliers de pluies extrêmes. La période de retour est déterminée à partir des maxima annuels journaliers.

2. Résultats

2.1. Analyse de la distribution fréquentielle des précipitations dans le bassin à Nangbéto

La figure 2 présente la répartition des précipitations dans les modèles régionaux de climat en fonction des seuils (en bas sur la figure) des dix quantiles calculés à partir des observations. Il ressort de l'analyse de cette figure, qu'à l'exception du modèle SMH, les modèles sous-estiment la contribution des faibles valeurs de précipitation au cumul précipité dans le bassin (quatre premiers quantiles), par rapport aux observations, traduisant leur difficulté à simuler la fréquence des pluies de faible intensité. Du 5[e] au 8[e] quantile, les modèles MPI et SMH simulent des contributions au cumul précipité proches des valeurs observées. Les modèles ICT et METO quant à eux, surestiment les lames d'eau précipitées dans le bassin de manière plus marquée avec le modèle METO qu'avec celui ICT. Cependant, ces deux modèles sous-estiment les fortes pluies (Q9 et Q10) dans le bassin, contrairement aux modèles SMH et MPI qui surestiment l'augmentation des fortes intensités journalières (Q10) dans le bassin.



Les changements observés entre les périodes de projection (2028-2050) et de référence (1988-2010) montrent une relative stabilité de la distribution des quantiles de pluies dans les sorties des modèles MPI et ICT, et une diminution marquée dans celles du modèle SMH à partir du 5[e] quantile. Le modèle METO quant à lui produit une augmentation des épisodes pluvieux de forte intensité.

Figure 2 : Comparaison en climat présent et futur (scénario A1B) et pour les quatre modèles de la contribution au cumul précipité des différentes classes de précipitations journalières, définies par les dix quantiles des données observées (à gauche), et changements obtenus entre la période de référence et la période de projection (à droite)

2.2. Précipitations extrêmes (99[e] centile) en climat présent et futur

L'importance hydrologique et sociétale des pluies de forte intensité, ajoutée aux disparités entre les différents modèles RCMs en ce qui concerne la reproduction des pluies journalières du dernier quantile (supérieures à 15 mm) nécessite une étude plus détaillée des 99[e] centiles de pluies pour mieux comprendre la dynamique des fortes pluies dans le bassin. Ainsi, le tableau 2 présente les 99[e] centiles de précipitations pour les deux périodes analysées (1988-2010 et 2028-2050).

Tableau 2 : Valeurs des 99[e] centiles de précipitations dans le bassin du Mono

Précipitation (mm)	Hist	MPI	METO	SMH	ICT
Ref_1988-2010					
99[e] centile	**29.92**	86.66	17.98	75.22	31.32
Proj_2028-2050					
99[e] centile	-	85.70	19.36	71.39	38.11

Il ressort de l'analyse du tableau 2 que le bassin enregistre près de 30 mm de pluies équivalent aux 99[e] centiles, c'est-à-dire 1 % des jours de précipitations selon les données historiques. Ces intensités journalières de pluies suivies ou précédées de jours de pluies pourraient déclencher les fortes crues dans le bassin. Les fortes pluies simulées par le modèle ICT se rapprochent de l'observé ; en revanche, le modèle METO les sous-estime. Les modèles SMH et MPI simulent des extrêmes pluvieux beaucoup trop élevés par rapport à l'observation. Un 99[e] centile supérieur à 75 mm/jour est irréaliste à l'échelle d'un bassin versant de 15 680 km^2. En simulation comme en projection, les modèles simulent les fortes pluies (MPI, SMH et ICT) et les faibles pluies (METO), même si l'évolution est presque identique quelque soit le modèle.

Une analyse des événements pluvieux journaliers dans le bassin à Nangbéto est nécessaire pour mieux comprendre l'évolution des maxima de pluie dans le bassin et son impact potentiel sur la survenue des crues dans le bassin du Mono en amont du barrage, et des inondations.

2.3. Analyse des périodes de retour des extrêmes de précipitation par le modèle GEV

La figure 3 présente l'évolution des maxima annuels de pluie en 24 heures de 1988 à 2010. Il ressort de l'analyse de cette figure, une nette augmentation du maximum annuel journalier des lames d'eau précipitées, significative au seuil de 95 %. Cependant, les crues ne sont pas en augmentation (Amoussou *et al.*, 2014), ce qui pourrait se justifier par l'augmentation des températures et par conséquent une forte perte évaporatoire, minimisant l'impact d'une augmentation du maximum annuel journalier sur les fortes crues. De même, les fortes pluies ne sont pas reliées aux crues dans le bassin mais plutôt aux mécanismes de saturation des sols (El Adlouni et Ouarda, 2008).

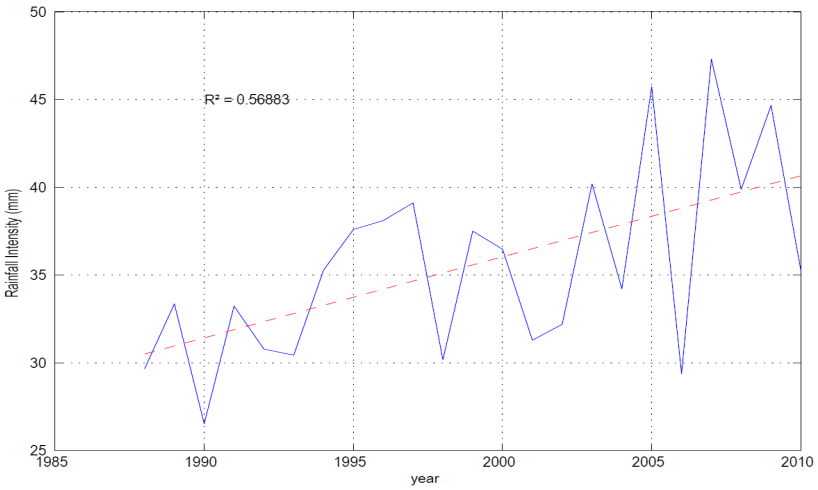


Figure 3 : Variabilité interannuelle des maxima de pluie en 24 heures de 1988 à 2010 dans le bassin du Mono à Nangbéto

Les maxima annuels journaliers de précipitations moyennes du bassin en amont de Nangbéto (valeurs observées et valeurs simulées) ont été ajustés avec une loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV). Les résultats obtenus confirment l'évolution des débits maxima entrants du barrage de 1988 à 2010, qui montre une tendance à l'augmentation des maxima annuels, significative au seuil p = 0.0185 selon le test de Mann-Kendall (Amoussou *et al.*, 2014).

Le tableau 3 présente les périodes de retour des maxima annuels en 24 heures simulés avec le modèle ICT, le plus fidèle des quatre quant à la reproduction des pluies intenses. On voit malgré tout que les événements les plus rares, donc les plus intenses, restent médiocrement simulés, comme l'illustre la divergence des valeurs de récurrence décennale (45 mm dans l'observation, 77 mm dans le modèle). Néanmoins, les projections font apparaître une augmentation remarquable des intensités pluvieuses pour l'ensemble des périodes de retour décrites dans le tableau 3. Les quantités de fortes pluies en projection en période de retour sont inquiétantes et confirment l'abondance des pluies à l'avenir démontrée par les modèles climatiques (Crétat *et al.*, 2013 ; Paeth *et al.*, 2011).

Tableau 3 : Période de retour des maxima annuels de précipitation journalière (mm) dans le bassin

Périodes de retour (ans)	Hist	ICT_Ref	ICT_Proj
1	32.5	40	90
2	35	48	100
5	40	52.5	120
10	45	77	200
20	47.5	89	289

Conclusion

En termes d'événements pluvieux intenses, le bassin du fleuve Mono à Nangbéto a enregistré entre 1988 et 2010 une augmentation significative de l'intensité des pluies maximales journalières moyennées sur le bassin versant, pouvant être facteur de risques.

Les données du modèle ICT sont les plus proches de l'observation, en termes de reproduction des cumuls précipités et de distribution fréquentielle journalière des pluies ; elles sont donc les plus pertinentes pour l'analyse des événements pluvieux intenses et, *in fine*, pour la prévision des crues dans le bassin.

Le modèle GEV simule bien les fortes pluies. Ces fortes précipitations pourrait être à l'origine des fortes crues et des inondations enregistrées dans le bassin. L'ajustement de la loi GEV de type Weibull ici est bien adapté pour la simulation des événements pluvieux extrêmes.

Remerciements

La Fondation Maison des sciences de l'Homme (FMSH), la Commission Européenne, le Pr. Éric Servat, Directeur du laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM) de l'Université de Montpellier 2, le Pr. Yves Richard, Directeur du Centre de Recherches de Climatologie (CRC), Biogéosciences de l'Université de Bourgogne, Dijon.

Références bibliographiques

Amoussou E., 2010 : *Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest).* Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne, Dijon, France, CRC-CNRS UMR5210, 313 p.

Amoussou E., Tramblay Y., Totin V.S.H., Mahé G. et Camberlin P., 2014 : Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono (Togo/Bénin). *Hydrological Sciences Journal*, DOI :1080/02626667.2013.871015 (sous presse).

Crétat J., Vizy K.E. and Cook H.K., 2013: How well are daily intense rainfall events captured by current climate models over Africa? *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-013-1796-7.

El Adlouni S. et Ouarda T.B.M.J., 2008 : Comparaison des méthodes d'estimation des paramètres du modèle GEV non-stationnaire. *Revue des Sciences de l'Eau*, **21(1)**, 35-50.

Hewitt C.D., 2004: Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts, *Eos Trans. AGU*, **85(52)**, 566-566, doi:10.1029/2004EO520005.

IPCC, 2007: *The Physical Science Basis*. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergouvernmental Panel on Climate Change*, edited by: Solmon S., Qin D., Manning M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 p.

Lebel T., Bastin G., Obled C., Creutin J.D., 1987: On the accuracy of areal rainfall estimation. *Water Resources Research*, **23**, 2 123-2 134.

Mladjic B., Sushama L., Khaliq M.N., Laprise R., Caya D., Roy R., 2011: Canadian RCM Projected Changes to Extreme Precipitation Characteristics over Canada. *Journal of Climate*, **24(10)**, 2 565-2 584. Doi: 10.1175/2010JCLI3937.1.

Paeth H. and Coauthors, 2011: Progress in regional downscaling of west African precipitation, *Atmos. Sci. Let.*, **12**, 75-82.

Ruti P.M. and Coauthors, 2011: The West African climate system: a review of the AMMA model inter-comparison initiatives. *Atmos. Sci. Let*., **12**, 116-122.