

APPLICATION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL À L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE DES CRUES DANS UN BASSIN-VERSANT EN MILIEU TROPICAL HUMIDE : CAS DU FLEUVE MONO

AMOUSSOU E.^(1&2), TOTIN VODOUNON S. H.^(1&2), HOUESSOU S.⁽³⁾, TRAMBLAY Y.⁽⁴⁾, CAMBERLIN P.⁽⁵⁾, HOUNDENOU C.⁽²⁾, BOKO M.⁽²⁾, MAHE G.⁽⁴⁾ & PATUREL J-E.⁽⁴⁾

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

⁽²⁾Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE) /Université d'Abomey-Calavi, 03 BP1122, Cotonou, Bénin, [constant500@yahoo.fr, bokomichel@gmail.com]

⁽³⁾Chef service environnement, Communauté Electrique du Bénin (CEB), BP 1368 Lomé (Togo), Tél (00228) 22216132, [shouessou@cebnet.org]

⁽⁴⁾IRD- HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5-France. [ytrambly@gmail.com, gil.mahe@msem-univ-montp2.fr, jean-emmanuel.paturel@msem.univ-montp2.fr]

⁽⁵⁾Centre de Recherches de Climatologie (CRC), Biogéosciences, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, F-21000, Dijon, France, [camber@u-bourgogne.fr]

Résumé - L'objectif de cette étude est d'analyser la dynamique hydrométéorologique du bassin et la distribution des crues entrantes au barrage de Nangbéto afin d'apprécier les risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve. Les données utilisées sont : les débits journaliers du Mono ($m^3.s^{-1}$) à Nangbéto et à Athiéme, l'évapotranspiration (mm/jour, calculée selon la méthode Oudin et al., 2005) et les précipitations moyennes sur le bassin (mm/jour) couvrant la période de 1988-2010. La méthode d'interpolation spatiale des pluies testée est celle du krigeage ordinaire par bloc. Le modèle GRP a servi à la modélisation des crues en amont du barrage de 1988 à 2010 pour apprécier l'ampleur de la disponibilité en eaux douces. Les résultats obtenus montrent une augmentation des maxima annuels journaliers de pluie, une presque équivalence des débits d'entrée et de sortie du barrage de Nangbéto surtout lors des crues et l'efficacité du modèle GRP à reproduire les débits de crues observées et simulées en période de calage et de validation.

Mots clés : Bassin Mono, événements hydrométéorologiques, modèle conceptuel, GRP, crues.

Abstract - *Application of a conceptual model to analysis of dynamic hydrometeorological flood in a pool - side in tropical moist environment : the case of Mono river.* The objective of this study is to analyze the dynamics of the basin hydrometeorological and distribution of incoming flood dam Nangbéto to assess the risk of flooding in the lower valley of the river. The data used are: daily flows of Mono ($m^3.s^{-1}$) and Nangbéto Athiéme, evapotranspiration (mm / day, calculated according to the method Oudin et al., 2005) and the average precipitation over the basin (mm / day) covering the period 1988- 2010. The method of spatial interpolation of rainfall tested is that of ordinary kriging block. The GRP model was used for modeling flood upstream of the dam 1988 to 2010 to assess the extent of the availability of fresh water. The results show an increase in the annual daily maxima of rain, almost equivalence of input and output flows of the dam Nangbéto especially during floods and effectiveness of the GRP model to reproduce the observed rates of floods and simulated period timing and validation.

Keywords: Mono Basin, hydrometeorological events, conceptual model, GRP, floods.

Introduction

La variabilité climatique se traduit par une modification du régime et du rythme des précipitations (fréquence et intensité), affectant ainsi directement l'importance et la synchronisation de l'écoulement et de l'intensité des crues, des inondations et des sécheresses (Mahé et Olivry, 1995 ; Olivry *et al.*, 1998 ; Ouédraogo, 2001). Cette modification relative aux précipitations et aux températures, ainsi que les effets non linéaires sur l'humidité, l'évapotranspiration et le sol, ont des conséquences sur la quantité et la qualité des ressources en eau, l'agriculture, la pêche et l'élevage (GIEC, 2007) et donc sur la vie des populations riveraines. Or, dans de nombreux cas, les plaines d'inondation et/ou bassins-versants offrent d'excellentes opportunités techniques et économiques comme c'est le cas dans les basses vallées du Mono et de l'Ouémé au Bénin. Mais, le réchauffement global de la planète et les prévisions météorologiques relèvent un risque croissant des événements extrêmes (excès de pluie et de température). Depuis la fin des années 1990, la légère reprise des précipitations en Afrique de l'Ouest en général et au Bénin-Togo en particulier, dans un environnement de plus

en plus anthropisé, a entraîné une augmentation du niveau de l'eau dans les cours et plans d'eau par rapport aux décennies 1970 et 1980. Mais cette reprise qui est inférieure à celui des années 1960 (Amoussou, 2010), provoque néanmoins des crues qui sont de plus en plus catastrophiques.

La crue étant définie comme une montée du niveau d'eau ou du débit d'un cours d'eau, son augmentation se caractérise par les paramètres descriptifs des aléas tels que l'intensité, la fréquence, la durée, le volume ... (Vinet, 2010). Tangara (2005) souligne qu'en cette période de vulnérabilité accrue de nos sociétés aux inondations, il existe une forte demande sociale pour prévenir et prévoir ces catastrophes naturelles qui posent de graves menaces humaines et économiques. Ainsi, pour protéger les populations riveraines du bassin du Mono contre la récurrence des aléas d'inondation provoqués par les crues, il faut pouvoir disposer d'outils de prévision opérationnels et fiables. La prévision des crues est un problème ancien, qui reste encore aujourd'hui difficile à résoudre. L'objectif de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance de la maîtrise et la gestion rationnelle des eaux de surface dans le bassin du Mono à travers une connaissance des écoulements épisodiques et de l'influence des événements climatiques extrêmes et ceci avec un modèle conceptuel pluie-débit.

Le bassin-versant du Mono situé dans la région du golfe de Guinée, est partagé entre le Bénin et le Togo dont les hautes et moyennes altitudes du bassin sont en grande partie sur le territoire du Togo (figure 1) et bénéficie d'un climat tropical humide. Il prend en compte les fleuves Mono et Couffo. D'une superficie de 27 870 km², il s'étend sur 560 km du Nord au Sud et plus précisément entre 06°16' et 09°20'N et 0°42' et 2°25'E (Amoussou, 2010). Le fleuve Mono qui fait l'objet de l'étude, a sur son cours le barrage hydroélectrique de Nangbéto. De plus, un second barrage à Adjarala (entre Tététo et Athiémé) est déjà en projet de construction. Ce bassin s'étend au sud sur un bassin sédimentaire côtier, formé d'un modelé en plaine littorale et plateaux. Au Nord, les hauts reliefs comprennent les monts Atacora et leurs prolongements méridionaux, de même que les monts du Togo (Amoussou, 2010).

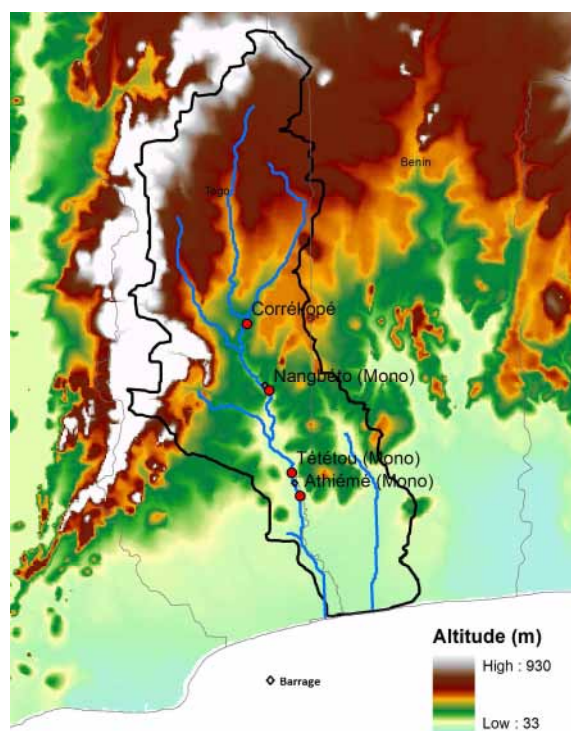


Figure 1. Le bassin versant du Mono

1. Données et méthodes

Les données pluviométriques journalières de trente stations ont été utilisées dans le bassin-versant du Mono. Pour une meilleure harmonisation des données, la période 1988-2010 a été retenue pour l'étude. Mais, parmi ces stations retenues, quatorze se situent en amont du barrage de Nangbéto (7°45 N et 1°42 E) et ont servi à déterminer le champ de pluie à l'amont afin de mieux comprendre l'influence du barrage dans le fonctionnement hydrologique du bassin. Les données de débits de Nangbéto (entrant et sortant) sont retenues au pas de temps journalier entre 1988 et 2010. La température moyenne journalière dans le bassin à Nangbéto a servi à calculer l'ETP journalière.

Pour le traitement des données pluviométriques, l'interpolation par krigeage ordinaire par

bloc a été réalisée pour l'estimation directe de la lame d'eau précipitée journalière de 1988-2010 en amont du barrage de Nangbéto ainsi que sa variance. Pour mieux appliquer cette interpolation par krigeage, une analyse variographique est réalisée. Une autocorrélation spatiale des données est prise en compte également pour permettre de rapprocher les données dans l'espace pour en créer une synergie entre elles. Une validation croisée dite « leave-one-out » qui est une pratique recommandée, a été effectuée pour valider l'estimation et le choix des échantillons de voisinage pour l'interpolation. Cette dernière consiste à effectuer une validation croisée afin de comparer la qualité prédictive des modèles sur la base d'un critère d'erreur.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer l'ETP. La méthode adoptée est celle de Oudin *et al.* (2005), déjà testée par plusieurs autres chercheurs (Kay et Davies, 2008 ; Amoussou *et al.*, 2014). Elle consiste en l'estimation de l'ETP journalière pour la modélisation hydrologique. Elle est issue des modèles de Jensen-Haise et de McGuinness. Ces modèles généralement utilisés en climatologie prennent en compte seulement la température moyenne journalière de l'air et le rayonnement solaire qui dépend de la latitude et des 365 jours de l'année. Ils prennent généralement la forme suivante:

$$PE = \frac{R_e T_a + K_2}{\gamma_p K_1}, \text{ si } T_a + K_2 > 0,$$

$$PE = 0$$

Où PE : Evapotranspiration potentielle journalière (mm.j^{-1}) ; R_e : Rayonnement solaire ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$) ; T_a : Température moyenne journalière ($^{\circ}\text{C}$) ; γ : le flux de chaleur latente (pris égal à $2,45 \text{ MJ.Kg}^{-1}$) ; ρ : la masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}). K_1 ($^{\circ}\text{C}$) et K_2 ($^{\circ}\text{C}$) sont des paramètres fixes du modèle car ils sont ajustés au cours de l'échantillon de l'ensemble du bassin et ne sont pas spécifiquement calibré pour chaque bassin-versant (Oudin *et al.*, 2005).

Quant à la modélisation hydrologique, le modèle GRP (Génie Rural pour la prévision journalière de crues) illustré par la figure 2 (Tangara, 2005) a été utilisé. Ce modèle est issu du modèle GR4J (modèle Génie Rural Journalier à quatre paramètres). Il a servi à la modélisation des crues dans le bassin du Mono. La version utilisée est celle de Tangara (2005) que Perrin m'a aidé à mettre à jour conformément au bassin du Mono en mai 2013.

Désigné par $O(j)$ le débit observé le jour j et par $Q(j)$ le débit prévu la veille de ce même jour en utilisant la procédure décrite précédemment. On va vérifier si l'erreur relative effectuée le jour précédent ($j-1$) se maintient en partie pour le jour j . On propose ainsi de corriger la prévision $Q_p(j)$ pour fournir la valeur $\hat{Q}(j)$ par la relation suivante :

$$\hat{Q}(j) = Q_p(j) * \left(\frac{O(j-1)}{Q(j-1)} \right)^{\beta}$$

L'exposant β peut être, dans une première étape, considéré comme un paramètre supplémentaire.

Selon Tangara (2005), cette nouvelle procédure a permis d'obtenir un gain net supplémentaire de +2,1% (31,0% au lieu de 28,9%). En prenant une valeur fixe de **0,25** pour cet exposant β (toujours dans le but de nous ramener à seulement trois variables optimisables), nous n'avons qu'une perte de - 0,4% sur le résultat précédent (30,6% au lieu de 31,0%)

L'objectif de cette modélisation est de tester la robustesse du modèle GRP à reproduire les crues en simulation et en prévision en calage comme en validation. Les données utilisées pour cette modélisation sont : les sorties de pluies krigées, l'ETP calculée (méthode de Oudin *et al.*, 2005) et les débits à l'entrée du barrage de Nangbéto. Deux sous-périodes ont été ainsi

distinguées : la sous-période 1989-1999 (calage) et celle de 2000-2010 (validation) pour tourner le modèle.

Ce modèle est composé de :

- ➔ trois paramètres variables (X1, X2, X3) calés directement en mode prévision :
 - * le paramètre X1 est le coefficient d'échanges ;
 - * le paramètre X2 est la capacité à un jour du réservoir de transfert R ;
 - * le paramètre X3 est la caractéristique de l'hydrogramme unitaire HU4 dérivable en son sommet ;
- ➔ une fonction d'échanges non conservative ;
- ➔ une correction des débits en sortie ;
- ➔ la capacité de son réservoir sol S est fixe et égale à 650 mm
- 650 mm ;
- ➔ son réservoir de transfert R est du type quadratique ;
- ➔ un report partiel (exposant 0,25) de l'erreur de prévision constatée au pas de temps précédent.

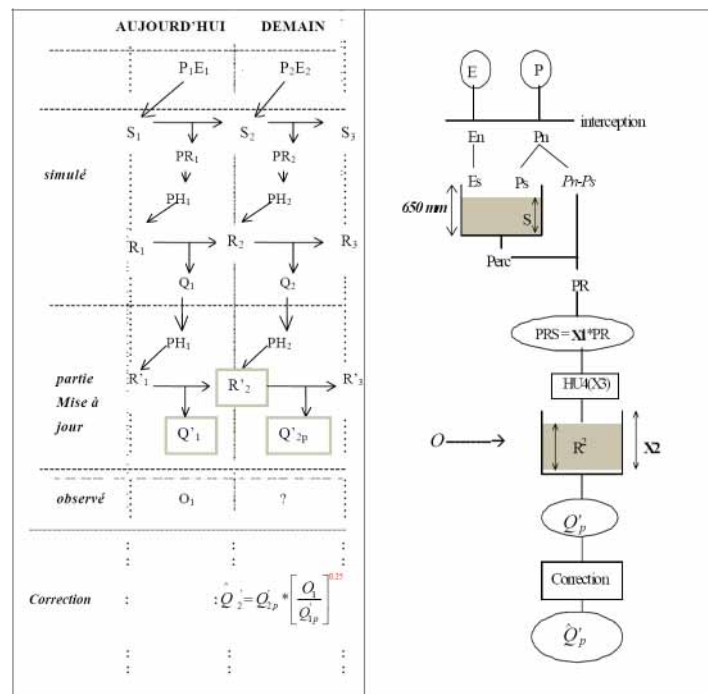


Figure 2. Schéma de fonctionnement du modèle GRP (Tangara, 2005)

2. Résultats et discussion

2.1. Evolution climatique dans le bassin du Mono à Nangbéto

La figure 3 présente l'évolution journalière des lames d'eau précipitées et de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin du Mono à Nangbéto.

De façon générale, il ressort de la figure 3 une légère augmentation des précipitations de 1988 à 2010 et une légère baisse de la demande évaporatoire. Mais, il faut noter une légère baisse non significative des précipitations de la fin de la décennie 2000, avec une légère augmentation des lames d'eau évaporée. Dans ces conditions, une baisse des écoulements devrait survenir et être suivie d'une baisse marquée des crues et des inondations. Mais, l'évolution des maxima annuels en 24 heures de pluies sur les vingt-trois ans (figure 4) montre une nette augmentation significative du maximum annuel journalier des pluies au seuil

de 95 %. Ceci pourrait justifier en partie la récurrence des inondations observées de nos jours surtout dans la basse vallée du Mono.

Cette augmentation de l'intensité pluviométrique dans un environnement en dégradation comme l'ont signalé Amoussou *et al.* (2014) et Trambly *et al.* (2014) serait un facteur amplificateur des ruissellements de surface et par conséquent des inondations observées dans le bassin du Mono.

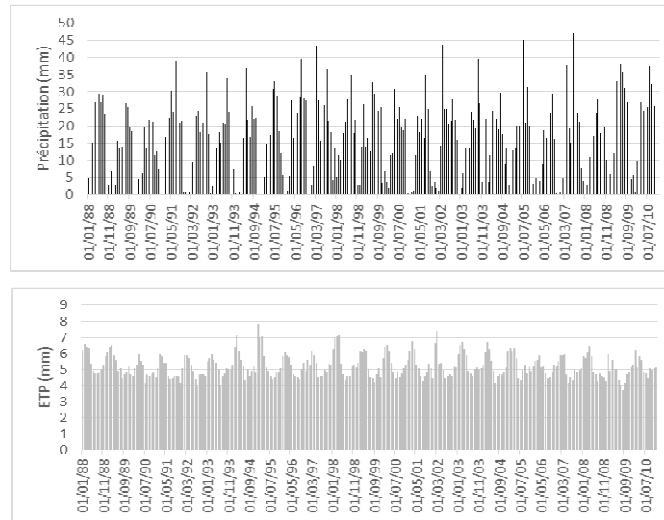


Figure 3. Variation journalière des lames d'eau précipitée (haut) et évaporée (bas) de 1988 à 2010 dans le bassin du Mono à Nangbéto

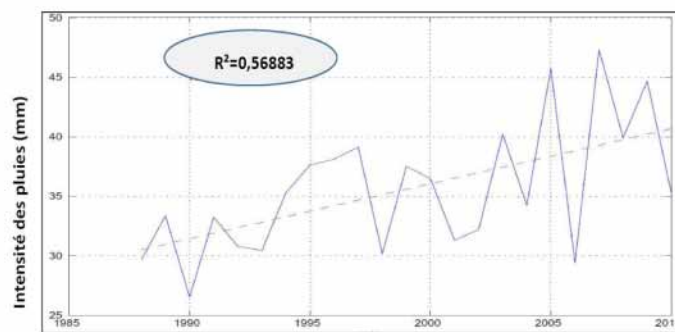


Figure 4. Variabilité interannuelle des maximums de pluies en 24 heures de 1988 à 2010 dans le bassin du Mono à Nangbéto

2.2. Dynamique pluvio-hydrologique des crues

Une analyse des débits journaliers entrant et sortant (figure 5) est nécessaire pour déterminer le mode le plus adéquat d'échantillonnage des extrêmes. Des différences peu importantes existent entre les débits entrants et sortants à l'exception des débits de crue. C'est ce qui indique que le barrage semble peu réguler l'écoulement, en particulier pour les plus fortes valeurs de débits (Amoussou *et al.*, 2014). Cependant, en 1992, 2000 et 2008, une différence importante a été observée avec des débits sortants plus faibles que ceux entrants.

La variation des pluies décadaires et de l'intensité des débits dans le bassin du Mono à l'entrée de Nangbéto est illustrée par la figure 6. Il ressort de cette analyse que les faibles hauteurs décadaires de pluie entraînent un faible débit optimum au cours de l'année comme c'est le cas en 1990, 1997 (où l'optimum enregistré est en moins de $400 \text{ m}^3/\text{ce jour}$ or que les forts débits moyens varient entre 650 et $900 \text{ m}^3/\text{s}$), 2004 et 2005.

En outre, les débits de crue annuelle les plus élevés enregistrés à l'entrée de Nangbéto surviennent avec un décalage de 10 jours de pluie au cœur de la saison dans le domaine tropical et qui totalisent en moyenne 90 à 100 mm de pluie. Les débits maximaux de pointe sont ainsi enregistrés si les hauteurs décennales de pluie sont supérieures à 100 mm. Cependant, ce n'est pas seulement les pluies maximales qui donnent nécessairement les débits maximaux comme en 1991 et 2003. Ceci corrobore avec les résultats de Vinet (2010) qui affirment que les mêmes pluies d'une année à l'autre ne produisent pas les mêmes crues et donc pas les mêmes aléas d'inondation.

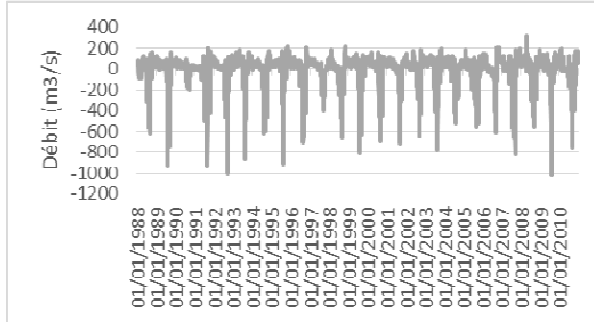


Figure 5. Variation des débits journaliers (débits sortants - débits entrants) du barrage de 1988 à 2010

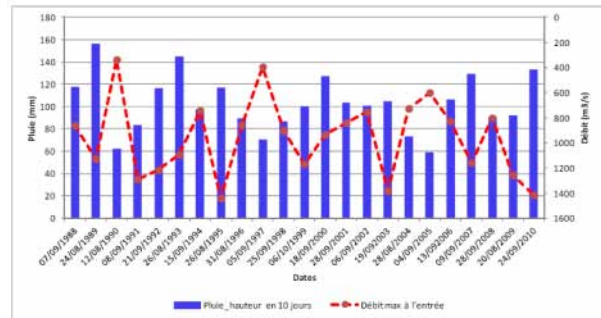


Figure 6. Variation pluie décennale et débit de crue extrême dans le bassin du Mono à Nangbéto de 1988 à 2010

En dehors de l'intensité des pluies, la crue dans un bassin est liée non seulement à la quantité d'eau précipitée, mais à sa répartition dans le temps et dans l'espace et certainement aussi aux états de surface, qui jouent un rôle primordial dans l'évaporation, le ruissellement et l'infiltration comme l'ont déjà signalé Viné (1997) et Amoussou (2010) dans certains bassins (mare d'Oursi, Couffo, ...) de l'Afrique de l'Ouest.

2.3. Modélisation pluie-débit à l'entrée du barrage avec le modèle GRP

L'objectif de cette modélisation est de tester la robustesse du modèle GRP à reproduire les crues en simulation et en prévision sur la période 1988 à 2010 en calage comme en validation pour une meilleure analyse. Les résultats du modèle en simulation et en prévision sont présentés par les figures 7 et 8.

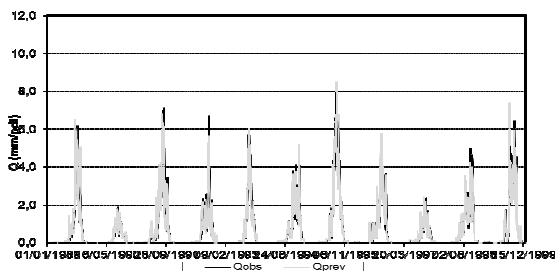


Figure 7. Variabilité de la prévision des crues en calage (1989-1999)

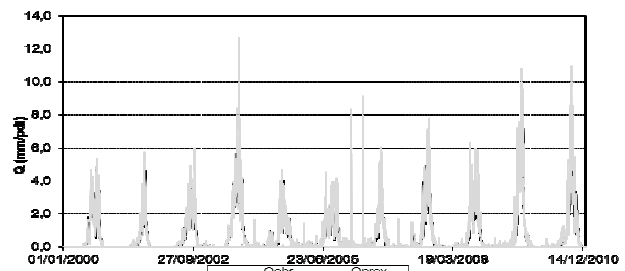


Figure 8. Variabilité de la prévision des crues en validation (2000-2010)

De façon générale, en calage, le modèle reproduit mieux les débits de crues en simulation et encore mieux en prévision. Cela se justifie par le fort critère de Nash-Sutcliffe (0,81) avec un bon critère de persistance (52 %). Ce que confirme la corrélation en prévision d'un jour de $r^2=0,91$. Par contre, en validation, les débits de crues ne sont pas très bien simulés. Une sursimulation des débits de crue (figure 8) est en évidence et justifiée d'ailleurs par les biais observés au niveau de la corrélation où les points qui s'écartent de la droite de régression. Cependant, en prévision la corrélation est meilleure qu'en simulation avec un $r^2=0,86$ contre un critère de Nash-Sutcliffe de 0,68.

Conclusion

La variabilité des précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP) dans le temps est marquée vers la décennie 2000, par une légère augmentation des pluies dans le bassin du Mono. Ainsi, l'augmentation des extrêmes de pluies dans le bassin de 1988 à 2010 suivie d'une légère augmentation de l'ETP a entraîné une recrudescence des crues d'une année à l'autre avec des inondations dans la basse vallée comme c'est le cas en 1999, 2007, 2009 et 2010.

La prévision de crue étant fondamentalement un problème hydrologique, la modélisation pluie-débit en est l'outil obligatoire pour anticiper les conséquences hydrométriques des pluies observées ces dernières années. Le modèle GRP utilisé a montré son efficacité à simuler et à prédire les crues dans la perspective d'une gestion des hydrocatastrophes. Ce modèle est un outil opérationnel fiable et assez performant pour les besoins réels des gestionnaires et des prévisionnistes, c'est-à-dire un outil permettant d'escompter globalement le meilleur succès de prévision, surtout à court terme.

Références

- 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.
- 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.
- GIEC, 2007 : *Bilan des changements climatiques*, Résumé à l'intention des décideurs.
- Jensen M.E and Haise H. R., 1963 : Estimation of evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, **89**: 15-41.
- Kay A.L. and Davies H.N., 2008 : Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology*, **358**, 221-239.
- Mahé, G. et Olivry, J.C., 1995 : Variations des précipitations et des 670 écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, **6** (1), 109-117.
- Olivry J.-C., Bricquet J. P. et Mahé G., 1998 : Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire (November 1998), *IAHS*, Publ. n° 252, pp 189-197.
- OMM, 2009 : Troisième conférence mondiale sur le climat. *Nouvelles du climat mondial*, **34**, janvier (www.wmo.ch) .
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F. and Loumagne, C., 2005 : Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, **303**(1-4), 290-306.
- Ouedraogo M., 2001 : *Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 257 p.
- Tangara M., 2005 : *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de l'EPHE, Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Antony, Ecole pratiques des hautes études de Paris, France, 374 p.
- Tramblay Y., Amoussou E., Dorigo W. and Mahé G., 2014 : Flood risk under future climate: linking extreme value models and flood generating processes. *Journal of Hydrology*, **519**, 549-558.
- Viné P., 1997 : Apport de la télédétection à l'étude des zones contributives aux écoulements. Cas du site de la mare d'Oursi (Burkina-Faso). '*Télédétection et ressources en eau*', Laboratoire commun de télédétection CEMAGREF-ENGREF, Montpellier, France, 17 p. (<http://www.fao.org/docrep/w7320b/w7320b34.htm>).
- Vinet F., 2010 : *Le risque inondation: Diagnostic et gestion*. Edition Tec & Doc Lavoisier, 318 p. (<http://norois.revues.org/3575>).