



**HAL**  
open science

# Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit

Ernest Amoussou

► **To cite this version:**

Ernest Amoussou. Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. 2014. halshs-01143318

**HAL Id: halshs-01143318**

**<https://shs.hal.science/halshs-01143318>**

Preprint submitted on 17 Apr 2015

**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.

## **Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie- débit**

Ernest Amoussou

N°90 | avril 2015

La récurrence d'anomalies extrêmes des précipitations entraînant des inondations ou des sécheresses est une composante normale de la variabilité naturelle du climat. Les effets néfastes des inondations ces dernières années ont de fortes incidences socioéconomiques et écologiques et ont entraîné des pertes en vies humaines et des dégâts matériels. La vulnérabilité à ces aléas naturels est élevée en Afrique de l'Ouest et dans le bassin du Mono en particulier, où les populations ont tendance à occuper de plus en plus les zones les plus exposées. L'objectif de cette étude est d'analyser la dynamique hydrométéorologique du bassin et la distribution des crues entrantes au barrage de Nangbéto grâce au modèle hydrologique GR4J au pas de temps quotidien pour apprécier les risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve.

**Working Papers Series**

# Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit

Ernest Amoussou

Avril 2015

## L'auteur

Enseignant-chercheur en Géographie physique appliquée à l'Université de Parakou (Bénin), titulaire d'une thèse de doctorat unique de l'Université de Bourgogne en 2010 axée sur « Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire dans l'hydrosystème Mono-Couffo (Bénin/Togo) ». Membre actif et chercheur au Laboratoire Pierre Pagny : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi. Chargé des cours en : "hydrologie", "statistique" et "modèles de recherche en sciences environnementales". Chargé également de cours en : "Hydroclimatologie", "Hydrosphère, géosphère et biosphère", "Risques et catastrophes naturels et humains", "Impacts des changements climatiques sur la dynamique des eaux de surface", "Hydrosystème et bassin versant" et "Gestion Intégrée des Ressources en Eau". En outre, membre du comité de rédaction de la revue *Climat et Développement* de l'Université d'Abomey-Calavi.

## Le texte

Ce texte a été rédigé dans le cadre d'une bourse Fernand Braudel IFER, du 30 avril au 30 septembre 2012 puis du 15 février au 15 juin 2013, au sein du laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM), Université Montpellier2.

## Citer ce document

Ernest Amoussou, *Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit*, FMSH-WP-2015-90, avril 2015.

© Fondation Maison des sciences de l'homme - 2014

Informations et soumission des textes :

[wpfmsm@msh-paris.fr](mailto:wpfmsh@msh-paris.fr)

Fondation Maison des sciences de l'homme  
190-196 avenue de France  
75013 Paris - France

<http://www.fmsh.fr>

<http://halshs.archives-ouvertes.fr/FMSH-WP>

<http://wpfmsm.hypotheses.org>

Les Working Papers et les Position Papers de la Fondation Maison des sciences de l'homme ont pour objectif la diffusion ouverte des travaux en train de se faire dans le cadre des diverses activités scientifiques de la Fondation : Le Collège d'études mondiales, Bourses Fernand Braudel-IFER, Programmes scientifiques, hébergement à la Maison Suger, Séminaires et Centres associés, Directeurs d'études associés...

Les opinions exprimées dans cet article n'engagent que leur auteur et ne reflètent pas nécessairement les positions institutionnelles de la Fondation MSH.

The Working Papers and Position Papers of the FMSH are produced in the course of the scientific activities of the FMSH: the chairs of the Institute for Global Studies, Fernand Braudel-IFER grants, the Foundation's scientific programmes, or the scholars hosted at the Maison Suger or as associate research directors. Working Papers may also be produced in partnership with affiliated institutions.

The views expressed in this paper are the author's own and do not necessarily reflect institutional positions from the Foundation MSH.

## Résumé

La récurrence d'anomalies extrêmes des précipitations entraînant des inondations ou des sécheresses est une composante normale de la variabilité naturelle du climat. Les effets néfastes des inondations ces dernières années ont de fortes incidences socioéconomiques et écologiques et ont entraîné des pertes en vies humaines et des dégâts matériels. La vulnérabilité à ces aléas naturels est élevée en Afrique de l'Ouest et dans le bassin du Mono en particulier, où les populations ont tendance à occuper de plus en plus les zones les plus exposées. L'objectif de cette étude est d'analyser la dynamique hydrométéorologique du bassin et la distribution des crues entrantes au barrage de Nangbéto grâce au modèle hydrologique GR4J au pas de temps quotidien pour apprécier les risques d'inondation dans la basse vallée du fleuve.

Les données utilisées couvrent la période 1961 à 2010. Il s'agit des débits journaliers ( $m^3.s^{-1}$ ), de l'évapotranspiration ( $mm/jour$ , calculé selon la méthode FAO) et les précipitations moyennes sur le bassin ( $mm/jour$ ). Les différentes méthodes d'interpolation spatiale des pluies ont été testées (linéaire, krigage, cubique, Thiessen, moyenne simple). Le modèle GR4J a servi à la modélisation des crues en amont et en aval du barrage de 1988 à 2010 pour apprécier les effets du barrage.

Les résultats montrent une variation des précipitations marquée par une augmentation des maxima annuels journaliers suivies d'une augmentation de l'ETP. Les débits enregistrés en sortie du barrage de Nangbéto sont équivalents à ceux enregistrés en entrée, en particulier lors de crues, montrant le faible rôle de régulation du barrage et la capacité très réduite de la retenue d'eau. Les maximums annuels de débits entrants au barrage peuvent être modélisés par une distribution des valeurs extrêmes (GEV) de type Fréchet, tandis que ceux mesurés en sortie du barrage suivent une loi GEV de type Weibull (bornée). Le mécanisme dominant de génération des crues dans le bassin est la montée progressive des eaux associée à l'augmentation de la saturation des sols, plutôt que des épisodes isolés de précipitations. L'analyse des débits de crue entre 1988 et 2010 a montré une absence d'augmentation de la magnitude des crues durant cette période. Enfin l'efficacité du modèle GR4J à reproduire les débits de crues a été testée montrant que les crues observées sont bien simulées en période calage. Cependant, des tests de validation sur plusieurs périodes présentant des caractéristiques climatiques différentes montrent une dégradation des critères de performance du modèle au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la période de calage, montrant l'instabilité des paramètres du modèle dans le temps. Dans ces conditions, l'utilisation d'un tel modèle pour évaluer les risques futurs de crues serait hasardeuse et il est nécessaire d'envisager d'autres types d'approches.

## Mots-clefs

Bénin-Togo, bassin Mono, barrage de Nangbéto, crues, GR4J

# Hydrometeorological analysis of floods in the watershed of Mono in West Africa with a rainfall-runoff conceptual model

## Abstract

The recurrence of extreme anomalies of precipitations involving of the floods or the droughts is a normal component of the natural variability of the climate. The harmful effects of the floods these last have strong incidences socio-economic and ecological and involved human losses of life and property damages. The vulnerability with these natural risks is high in West Africa and basin of Mono in particular, where the populations tend to occupy the most exposed zones more and more. The objective is to model the distribution of the risings entering to the dam Nangbeto thanks to hydrological model GR4J with the step of daily time to assess the risks of flood in the low valley of the river.

The data used cover the period 1961 to 2010. They is the daily outputs ( $m^3.s^{-1}$ ), the evapotranspiration (mm/jour, calculated according to method FAO) and average precipitations on the basin (mm/day). The various methods of space interpolation of the rains were tested (linear, cubic, Thiessen, simple average). Model GR4J was useful with modeling of the risings upstream and the stopping of 1988 to 2010 to appreciate the effects of the dam.

The results show a marked variation in rainfall by increasing annual maximum daily followed by an increase in ETP. The rates recorded in output Nangbéto dam are equivalent to those recorded input, especially during floods, showing the weak regulatory role of the dam and the very limited capacity of the reservoir. The annual maximum incoming flow at the dam can be modeled by an extreme value distribution (GEV) Fréchet-type, while those measured at the outlet of the dam after a GEV law Weibull (bounded). The dominant runoff generation mechanism in the basin is the gradual rising waters associated with increased saturation of the soil, rather than isolated episodes of rainfall. The analysis of flood flows between 1988 and 2010 showed no increase in flood magnitude during this period. Finally the effectiveness of the model to reproduce GR4J flood flows has been tested showing that the observed floods are simulated during calibration. However, validation tests over several periods with different climatic characteristics show a degradation of performance criteria and the model as one moves away from the calibration period, showing the instability of the model parameters in the time. Under these conditions, the use of such a model to assess future risks future flooding is risky and it is necessary to consider alternative approaches.

## Keywords

Benin-Togo, Mono Basin River, Nangbéto dam, flood, GR4J

# Sommaire

<b>Milieu d'étude</b>	<b>6</b>
<b>Données et méthodes</b>	<b>7</b>
Données utilisées	7
Méthodes	8
<b>Résultats et discussion</b>	<b>12</b>
Evolution climatique dans le bassin du Mono à Nangbéto	12
Dynamique saisonnière des crues	13
Influence du barrage Nangbéto sur les crues	14
Analyse des tendances sur les débits maximums annuels	14
Analyse fréquentielle de la période de retour des crues	16
Modélisation des débits de crues à Nangbéto	17
<b>Conclusion</b>	<b>21</b>
<b>Remerciements</b>	<b>22</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>22</b>

Le changement / 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 ; Wesselink *et al.*, 1995 ; Olivry *et al.*, 1998 ; Ouédraogo, 2001 ; GIEC, 2007 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010). Ces changements relatifs à la précipitation et à la température, 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 de la population riveraine.

Cette variabilité climatique associée à la croissance démographique et aux progrès économiques constitue aujourd'hui les facteurs de vulnérabilité des ressources naturelles. La pression démographique liée aux activités économiques dans les plaines d'inondation, sur les bassins-versants comme l'édification de bâtiments, d'infrastructures, de barrage et des champs, multiplie les risques de crues (OMM, 2009). Or, dans de nombreux cas, les plaines d'inondation et/ou bassins-versants offrent d'excellentes opportunités techniques et économiques de gagner sa vie facilement 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). Ces processus naturels et humains ont des conséquences sur les capacités des systèmes de production. Cela conduit dans plusieurs régions du monde à la dégradation des ressources naturelles liée à la destruction des écosystèmes naturel et humain et la perte de la biodiversité par le débordement des eaux (inondation) et la pression anthropique.

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 inférieur à celui des années 1960 (Amoussou, 2010), provoquant 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 Mono contre la récurrence des aléas d'inondation provoqués par les crues, il faut pouvoir disposer d'outils de prévision opérationnels et fiables, car la prévision des crues est un problème ancien, qui reste encore aujourd'hui difficile à résoudre. A cet effet, la maîtrise et la gestion rationnelle des eaux de surface nécessitent une meilleure connaissance de ces écoulements épisodiques et de l'influence des événements climatiques extrêmes et tout cela à travers une modélisation conceptuelle pluie-débit dans le bassin comme l'illustre la figure 1.

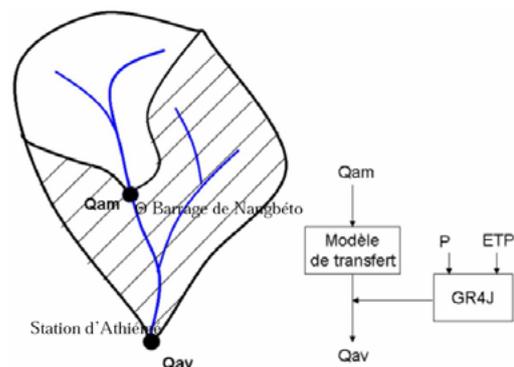


Figure 1. Représentation schématique de l'approche de modélisation

Cette figure représente schématiquement la modélisation envisagée : le débit simulé en amont et en aval du barrage.

Dans un tel contexte de changements environnementaux globaux, cette étude a pour objectif d'évaluer la stationnarité des crues à l'entrée et à la sortie du barrage de Nangbéto, par le biais de méthodes statistiques pour l'étude des tendances et d'un modèle hydrologique calibré sur plusieurs sous-périodes afin d'apprécier la variabilité temporelle des paramètres du modèle.

## Milieu d'étude

Le bassin versant du Mono situé dans la région du golfe de Guinée, est partagé entre le Bénin et le Togo dont les parties hautes et moyennes du bassin sont en grande partie sur le territoire togolais (figure 2). D'une superficie de 27 870 km<sup>2</sup>, 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). Il abrite un barrage hydroélectrique du nom de Nangbéto.

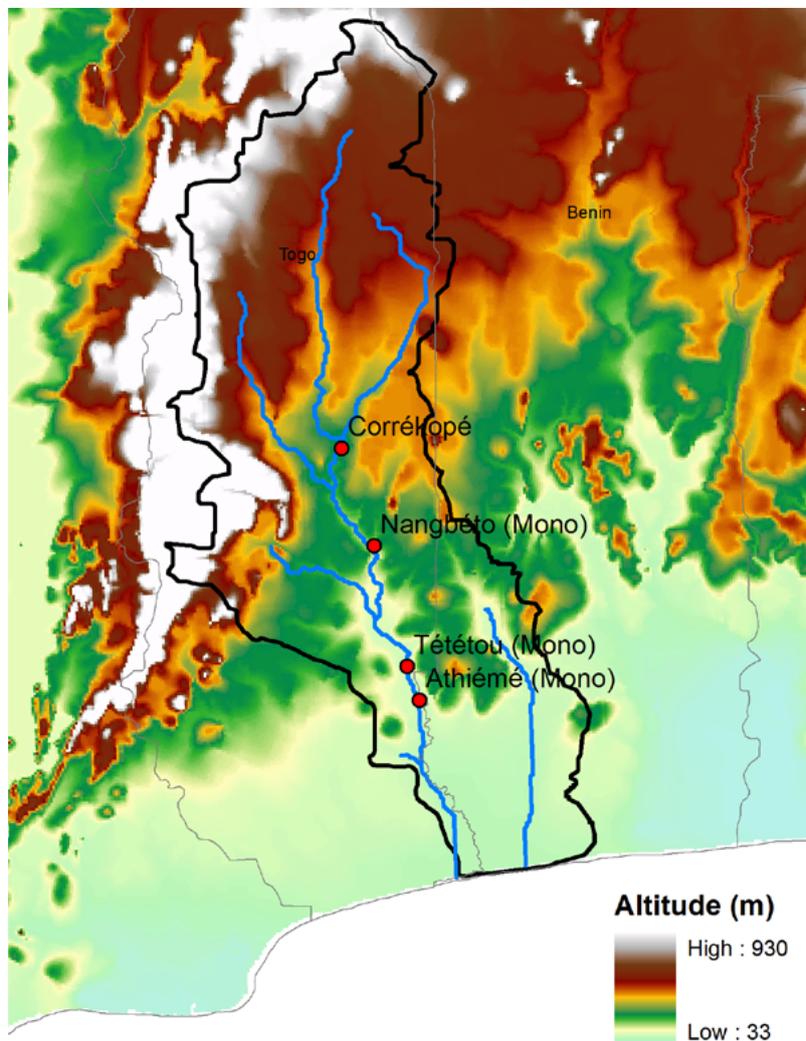


Figure 2. Le Bassin-versant du Mono

Les précipitations entre le Togo et le Bénin sont contraintes par l'organisation de la circulation atmosphérique ouest-africaine dans son ensemble, à la fois celle des basses couches (flux de mousson et d'harmattan) et celles de moyenne et haute atmosphère (respectivement jet d'est africain et jet tropical d'est) (Amoussou, 2010). Mais à l'échelle du bassin, elle est fortement liée aux gradients d'énergie entre la plaine côtière et le golfe de Guinée ou encore entre les reliefs du nord-ouest et les zones plus basses du bassin. Ainsi, deux domaines climatiques se distinguent dans le bassin : subéquatorial en aval avec deux saisons pluvieuses et deux sèches et tropical en

amont avec une saison pluvieuse et une saison sèche. Le régime hydrologique quant à lui est de type tropical conforme au climat tropical qui la commande. La dynamique de la basse vallée est subordonnée aux apports d'eau pluvieux, fluviaux et à l'intrusion marine par la « Bouche du Roi » à Grand-Popo.

Le bassin-versant comporte un bassin sédimentaire côtier au sud, modelé en plaine littorale et plateaux et des plus hauts reliefs au nord comprenant les monts Atacora et leurs prolongements méridionaux, les monts du Togo (figure 2). Le bassin inférieur du Mono a une topographie adoucie du fait de son recouvrement partiel par les alluvions sablo-argileuses. Il présente toutefois les différents paliers qui marquent sans doute des niveaux de reprise d'érosion (Amoussou, 2010). La redistribution de l'eau à la surface continentale est très contrainte par la géomorphologie et les propriétés de la surface (perméabilité du sol et sous-sol, nature et densité de végétation, etc.), comme le soulignent les exemples suivants pris sur les sites expérimentaux de l'observatoire AMMA-CATCH ([www.amma-catch.org](http://www.amma-catch.org); Lebel *et al.*, 2009). Le bassin du Mono soumis à l'emprise humaine subit un fort ruissellement engendrant certaine-

ment une forte inondation dans la basse vallée.

## Données et méthodes

### Données utilisées

Au total, trente stations pluviométriques à données journalières couvrant la période 1961 à 2010 ont été utilisées dans le bassin versant du Mono. Parmi ces stations, quatorze se situent en amont du barrage de Nangbéto (7.45 N et 1.42 E) (tableau I) et ont servi à déterminer le champ de pluie à l'amont afin de mieux comprendre le fonctionnement du barrage.

Tableau I : Stations en amont du barrage de Nangbéto

	Latitudes	Longitudes	Altitudes (m)
Agouna	7,55	1,7	240
Bassila	9,0167	1,6667	384
Savalou	7,9333	1,9833	174
Bohicon			
Tchetti	7,8167	1,6667	353
Atakpame	7,5833	1,1167	400
Nangbéto			
Kara ville	9,55	1,1833	342
Sokode	8,9833	1,1167	400
Anie	7,75	1,25	160
Niamtougou	9,7667	1,1	462
Pagouda	9,75	1,3167	430
Sotouboua	8,5667	0,9833	380
Tchamba	9,0333	1,4167	360

Les données de débits de Nangbéto (entrant et sortant) sont disponibles au pas de temps journalier entre 1988 et 2010. La température moyenne journalière est également disponible au barrage de Nagnbéto et a servi à calculer l'ETP journalière. Pour les analyses complémentaires, les débits de Corrékopé de Tététo de 1961-1991 ont été utilisés.

## Méthodes

### Interpolation des données

Pour cette étude de régionalisation des données pluviométriques, quatre (4) méthodes ont été utilisées : une simple moyenne arithmétique (1), une interpolation linéaire (2), une interpolation par polygones de Thiessen (3) et un Krigeage ordinaire par bloc (4). Mais, les plus robustes sont les méthodes 2 à 4 qui reposent sur un semis de points réguliers à 5 km généré sur le bassin de Nangbéto comme le montre la figure 3.

Le Krigeage ordinaire par bloc utilisé dans le cas de cette étude, permet l'estimation directe de la lame d'eau précipitée du bassin à partir des hauteurs de pluies journalières des quatorze (14) stations de l'amont de Nangbéto ainsi que la variance

de l'estimation. Il est aussi nécessaire de calculer un variogramme. L'avantage de cette méthode est qu'il a pris en compte lors de l'interpolation les distances entre les stations d'une part et les distances entre les stations et le point amont de la station Nangbéto d'autre part et la structure spatiale du bassin (grâce à l'analyse variographique). Ainsi, une autocorrélation spatiale des données est faite pour permettre de rapprocher les données dans l'espace pour en créer des caractéristiques similaires entre ces deux.

Dans la théorie de l'interpolation spatiale, le bassin amont de Nangbéto est appelée « *champ* », notée  $D$ . La variable régionalisée que l'on étudie est vue comme une réalisation d'une fonction aléatoire  $\{Z(s) \ s \in D\}$  ( $s$  : le vecteur des coordonnées) et toute valeur régionalisée  $z(\hat{x})$  est considérée comme une réalisation d'une variable aléatoire  $Z(\hat{x})$ .

Pour mieux appliquer ce type d'interpolation par krigeage, une analyse variographique est faite afin d'explorer la structure spatiale des données

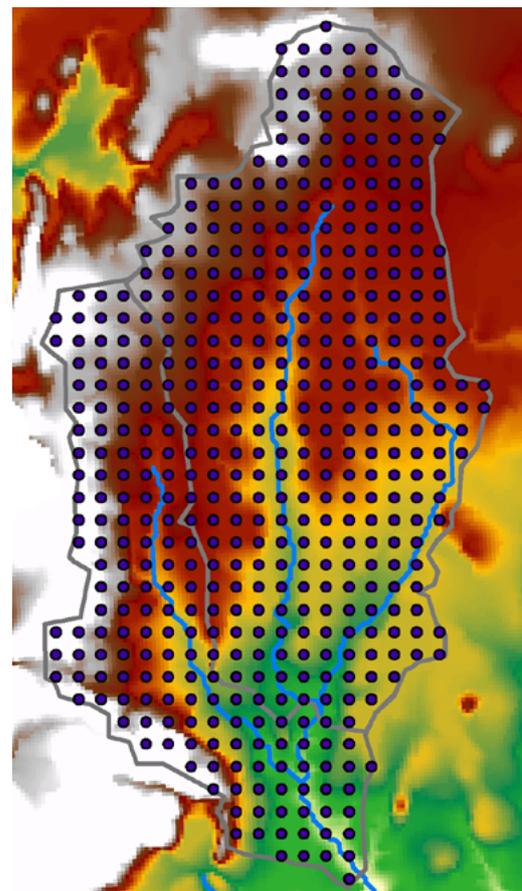


Figure 3. Points de grille sur le bassin en amont du barrage Nangbéto

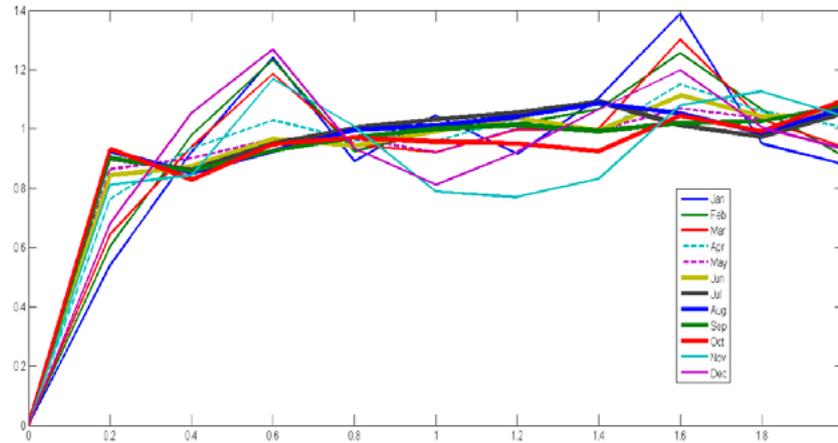


Figure 4. Variogrammes mensuels normés sur la période 1988-2010

NB : En abscisse, 0.1 = 11km environ

et de vérifier si celles-ci sont bien auto-corrélées. Ainsi, le semi-variogramme qui décrit la semi-variance en fonction de la distance entre les stations de mesures permet de lier spatialement les données. Ceci est défini de la manière suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s+h) - Z(s)) \quad \forall s \in D$$

où  $Z(\cdot)$  est la variable régionalisée étudiée,  $s$  est le vecteur des coordonnées,  $h$  est le vecteur distance et  $D$  est le domaine géographique étudié (9952 km<sup>2</sup>).

Mais, il est hasardeux de calculer un variogramme pour chaque pas de temps (incertitude dans l'estimation des paramètres causée par la variabilité du champ pluvieux), ainsi les variogrammes climatologiques (= un variogramme moyen) ont été calculés. Ils ont été testés par mois, par saisons, ou par années, avec des résultats tout à fait équivalents (figure 4), ce qui montre la « stabilité » de la variabilité spatiale des pluies en amont du bassin. Ensuite le modèle de variogramme sphérique a été ajusté sur le variogramme moyen normé tous mois confondus (portée du modèle ajusté = 65km, ce qui indique la distance « moyenne » de décorrélation des précipitations entre 2 stations).

En pratique, l'analyse variographique va se dérouler en deux étapes :

- Estimation du variogramme

Avec, la diversité des stations pluviométriques du bassin, l'estimation du variogramme est définie par la méthode des moments qui a consisté à estimer l'espérance par la moyenne

empirique. Cet estimateur est défini par la formule :

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} [z(\mathfrak{s}) - z(\mathfrak{j})]^2$$

avec :  $h$  : vecteur distance,  $z(\mathfrak{s})$  : la valeur de la variable régionalisée au point  $\mathfrak{s}$ ,  $N(h) = \{(i, j) \text{ tel que } \mathfrak{s} - \mathfrak{j} = h\}$  et  $|N(h)|$  est le nombre de paires distinctes de l'ensemble  $N(h)$ .

- Modélisation du variogramme

Il convient de le modéliser par une fonction de référence (modèle exponentiel, sphérique...), une fois le variogramme estimé (Hennequi, 2010). Ce modèle prend ainsi toutes les propriétés requises pour effectuer un krigeage sur nos données journalières de pluie de 1988 à 2010.

Face à cela, le modèle le plus couramment utilisé est le modèle Sphérique défini par :

$$\gamma(r) = \begin{cases} C_0 + c \left( \frac{3r}{2a} - \frac{1}{2} \frac{r^3}{a^3} \right) & \text{pour } 0 \leq r \leq a \\ C_0 + c & \text{pour } r > a \end{cases}$$

où :  $C_0$  correspond à l'effet pépite,  $C_0 + c$  correspond au palier et  $a$  correspond à la portée.

Le modèle de base du krigeage est de la même forme que le modèle de régression classique qui a permis d'effectuer une interpolation spatiale aux valeurs régionalisées observées. C'est une méthode stochastique qui définit la variable régionalisée comme une fonction aléatoire (Wackernagel, 2003) décomposée comme suit :  $Z(s) = \mu(s) + \delta(s)$   $s \in D$ , où  $\gamma(\cdot)$  est la structure déterministe pour l'espérance fonction de la localisation des stations utilisées et  $\delta(\cdot)$  est une

fonction aléatoire normale d'espérance nulle, de variance homogène et ne présentant pas de structure de dépendance spatiale. A cet effet  $\delta(\cdot)$  est un processus gaussien de bruit blanc représentant des erreurs de mesures indépendantes (Baillargeon, 2005). La tendance  $\gamma(s)$  peut prendre plusieurs formes dont celle utilisée est un polygone de degré  $d$  des coordonnées de formule :

$$\mu(s) = \mu(n, y) = \sum_{\ell+k \leq d} \beta_{\ell k} \cdot x^\ell y^k$$

En interpolation spatiale, le modèle de régression est appelé « surface de tendance » (Ripley, 1981). Les coefficients du modèle sont ajustés pour la prévision de la variable régionalisée  $z$  en point non échantillonné  $\mathfrak{s}$  dans le bassin par une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes. Ainsi, l'estimation non biaisée et de la variance minimale des données est définie par :

$$\hat{Z}(\mathfrak{s}_0) = a + \sum_{i \in \mathcal{V}(\mathfrak{s}_0)} \lambda_i Z(\mathfrak{s}_i)$$

où  $\mathfrak{s}_i (i=1..n)$  sont les stations pluviométriques utilisées pour l'estimation, la constante  $a$  et les poids  $\lambda_i$  sont les inconnues du problème.

La validation croisée dite «leave-one-out» est une pratique recommandée 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. Le principe consiste à séparer la base initiale (l'ensemble des stations pluviométriques utilisées) en douze sous-ensembles. La procédure consiste dans chaque échantillon à retirer une des observations  $i$  (une station), notée  $Z(\mathfrak{s}_i)$  pour ensuite la prévoir (selon la méthodologie ci-dessus, c'est-à-dire régression classique puis interpolation) à partir des autres données  $i$ , notée  $Z_{[i]}(\mathfrak{s}_i)$ . Cette opération est donc répétée douze fois. Pour chaque station, on obtient ainsi une vraie valeur que l'on compare à une valeur estimée pour vérifier si le modèle fournit des estimations plausibles.

Une fois la validation croisée effectuée, le calcul des différents critères permet de comparer deux modèles entre eux. A cet effet, les critères utilisés dans la validation croisée sont :

- Biais moyen :

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{[i]}(\mathfrak{s}_i) - Z(\mathfrak{s}_i))$$

- Moyenne des résidus issus de la validation :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{[i]}(\mathfrak{s}_i) - Z(\mathfrak{s}_i))^2$$

- Critère d'adéquation :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z_{[i]}(\mathfrak{s}_i) - Z(\mathfrak{s}_i)}{\sigma_{[i]}(\mathfrak{s}_i)} \right)^2$$

$$\text{où } \sigma_{[i]}^2(\mathfrak{s}_i) = \text{Var}(\hat{Z}_{[i]}(\mathfrak{s}_i) - Z(\mathfrak{s}_i))$$

correspond à la variance de krigeage.

- Somme des résidus :

$$PRESS = \sum_{i=1}^N (Z_{[i]}(\mathfrak{s}_i) - Z(\mathfrak{s}_i))^2$$

Pour ces quatre critères, le «meilleur» modèle est celui qui a le plus petit critère étudié. Un modèle sera d'autant plus performant si ces critères sont proches de 0.

#### Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Plusieurs chercheurs (Oudin *et al.*, 2005 ; Kay et Davies, 2008 ; Coron *et al.*, 2012 ; sperna Weiland *et al.*, 2012) ont travaillé sur le calcul de l'évapotranspiration potentielle par plusieurs méthodes. Il ressort que les formules de Penmann présentent une incertitude grandissante surtout en climat futur, où l'humidité et l'insolation ne sont pas maîtrisées. De même, comme le calcul de l'ETP par la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) sur la période 1988-2010 revêt une baisse de l'évapotranspiration, alors que la température à la station de Bohicon et de Nangbéto sont significativement à la hausse, la formule de l'estimation d'ETP de Oudin *et al.* (2005) pour la modélisation hydrologique issue des modèles de Jensen-Haise et de McGuinness ont été utilisés. Ces modèles sont généralement utilisés en climatologie prenant en compte seulement la température moyenne journalière de l'air et le rayonnement solaire qui dépend de la latitude et des 365 jours. Ils prennent généralement la forme suivante:

$$E = \frac{R_e T_a + K_2}{\gamma_\rho K_1}, \text{ si } T_a + K_2 > 0$$

$$E = 0, \text{ si } T_a + K_2 \leq 0$$

Où  $E$  : Evapotranspiration potentielle journalière (mm.j-1) ;  $R_e$  : Rayonnement solaire (MJ.m-2.j-1) ;  $T_a$  : Température moyenne

journalière (°C) ;  $\gamma$  : le flux de chaleur latente (pris égal à 2,45 MJ. Kg-1) ;  $\rho$  : la masse volumique de l'eau (kg.m-3).  $K_1$ (°C) et  $K_2$ (°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, p300).

Une comparaison des ETP mensuelles des stations synoptiques de Sokodé (amont) et de Bohicon (aval) a permis de constater qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre les données.

**Détection de tendances**

- Test de Mann-Kendall

L'analyse statistique portant sur la stationnarité des indices hydrologiques et climatiques, a permis de faire recours à un test non paramétrique. Pour mieux caractériser la distribution non particulière des indices à étudier, le test de Mann-Kendall a été utilisé. Il a permis la détection de tendances (à la hausse ou à la baisse) et d'apprécier le degré de significativité des ruptures de stationnarité (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) dans les séries hydrologiques et climatiques.

- Test de Kolmogorov-Smirnov

C'est le plus connu des tests d'adéquation basé sur la fonction de répartition empirique. La statistique  $D_n$  du test est la plus grande valeur absolue de la différence entre la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition de la distribution :  $D_n = \sup |F_n(x) - F(x)|$ . La fonction de répartition empirique est toujours très proche de la fonction de distribution, avec une bonne approximation, un argument en faveur de l'hypothèse nulle  $H_0$

- Test de Cramér-von Mises

Il a permis aussi de mesurer l'efficacité de la différence entre les deux fonctions de répartition en comparant ces fonctions sur l'intégralité de leur domaine (c'est-à-dire de  $-\infty$  à  $+\infty$ ). Il est ainsi basé sur l'intégrale du carré de la différence  $(F_n(x) - F(x))^2$  entre la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition de référence (norme  $L_2$ ). La plus simple de ces statistiques est :  $S = \int_{-\infty}^{+\infty} (F_n(x) - F(x))^2 dx$ , qui est simplement l'aire comprise entre la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition de référence. Cette statistique étant généralement impraticable, un facteur de pondération arbitraire est introduit. Ainsi, le choix le plus classique pour

$K(x)$  est  $F(x)$  elle-même. Ainsi, la statistique  $W^2$  résultant de cet ajout s'appelle la statistique de Cramér-von Mises. L'intégrale étant transformé en somme, la statistique  $W^2$  d'ordre de rang  $i$  de l'échantillon est définie comme suit :

$$W^2 = \sum_{i=1}^n \left( F(x_{(i)}) - \frac{2i-1}{2n} \right)^2 + \frac{1}{2n}$$

La distribution de  $W^2$  est inconnue, mais est la même pour toutes les  $F(x)$  et a été abondamment simulée et tabulée pour les petites valeurs de  $n$ . La fonction de répartition asymptotique de  $W^2$  est connue, mais elle est très compliquée et extrêmement difficile à établir.

**Modélisation hydrologique avec GR4J**

Le modèle GR4J (modèle Génie Rural Journalier à quatre paramètres) a servi à la modélisation des crues dans le bassin du Mono avant et après la mise en eau du barrage de Nangbéto en septembre 1987. Il présente deux paramètres de production ( $X1$ : capacité du réservoir de production et  $F(X2)$ : paramètre d'échange (gain ou perte) qui permet de prendre en compte les erreurs dues au forçage climatique (P et ETR)) et deux paramètres de transfert ( $X3$ : capacité du réservoir de routage et  $X4$ : temps de base (maximal) de l'hydrogramme unitaire). La version GR4J utilisée est celle décrite par Perrin *et al.* (2003) (figure 5).

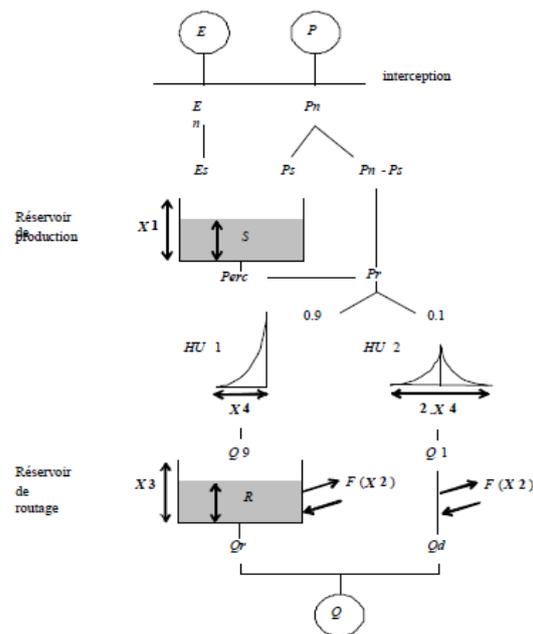


Figure 5 : Le modèle GR4J (Source : Perrin et al., 2003)

En entrée du modèle, on a deux variables :  $P$  (pluie journalière en mm) et  $E$  (évapotranspiration potentielle en mm). Le bilan d'eau du sol (Neutralisation) est déterminé par la pluie brute subissant l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Les paramètres du modèle sont calibrés de façon automatique avec un algorithme de Nelder-Mead (Simplex). La fonction multi objectifs utilisée est :

$$f = (1 - Nash) (RRMSE_{peak}) (1 + |Bias|)$$

Il combine le critère de *Nash*, l'erreur quadratique moyenne relative sur les pics de crues annuelles ( $RRMSE_{peak}$ ) et le biais sur les volumes écoulés durant toute la période (*Bias*). Le *Bias* et le *Nash* sont ajoutés pour simuler un cycle de débit réaliste et non pas seulement les crues. Le modèle est calibré en ne tenant pas compte de la première année (période de mise en route), afin que les niveaux des réservoirs atteignent une valeur réaliste au cours de cette période.

## Résultats et discussion

### Evolution climatique dans le bassin du Mono à Nangbéto

La figure 6 présente l'évolution journalière des lames d'eau précipitées et l'évapotranspiration potentielle dans le bassin du Mono à Nangbéto.

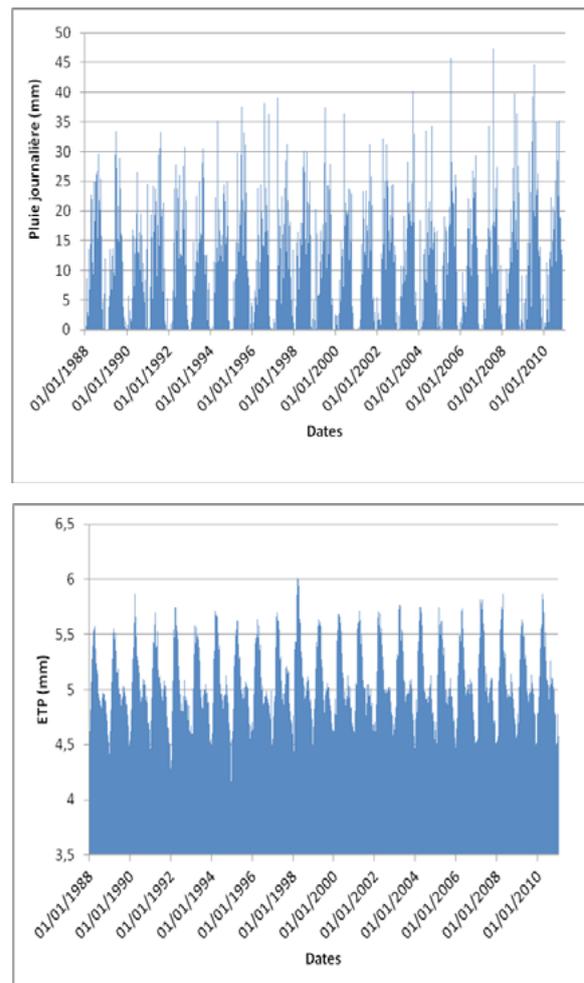


Figure 6. Variation journalière des lames d'eau précipitée et évaporée de 1988 à 2010 dans le bassin du Mono à Nangbéto

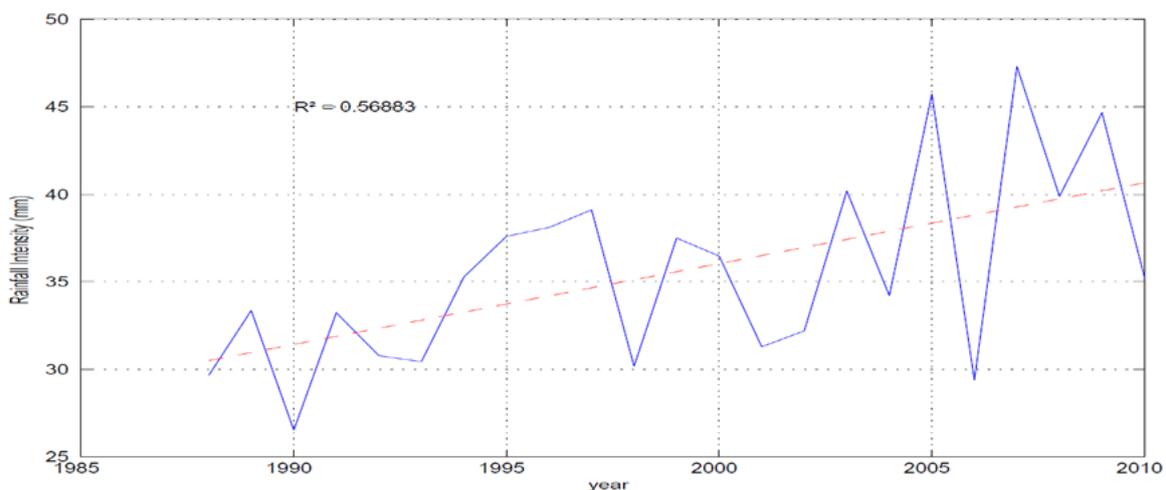


Figure 7. Variabilité interannuelle des maximums de pluies en 24 heures de 1988 à 2010 dans le bassin du Mono à Nangbéto

Il ressort de l'analyse de la figure 6, une légère baisse non significative des précipitations au cours de la fin de la décennie 2000, mais une légère augmentation des lames d'eau évaporée. Dans cette condition, on devrait s'attendre à une baisse des écoulements et par conséquent une diminution des crues et des aléas d'inondation. Mais, l'évolution des maximums annuels en 24 heures de pluies sur les vingt trois ans (figure 7) montre une nette augmentation du maximum annuel journalier des lames d'eau précipitées significative au seuil de 95 %. Ceci pourrait justifier en partie la récurrence des inondations observées de nos jours dans la basse vallée du Mono.

### Dynamique saisonnière des crues

Une analyse des rythmes saisonniers est nécessaire pour déterminer le mode d'échantillonnage des extrêmes le plus adéquat. Au niveau des stations de Corrékopé et Tététou respectivement en amont et en aval du barrage, on observe un

rythme saisonnier marqué avec la quasi-totalité des débits enregistrés durant l'été entre les mois de juin et octobre (figure 8).

Avec une telle saisonnalité de type uni-modale, les débits maximums annuels sont représentatifs des crues se produisant dans le bassin, ils peuvent donc être extraits afin d'évaluer les tendances et périodes de retour. Pour mieux apprécier l'effet du barrage, il est à noter qu'il serait également possible de procéder à un échantillonnage de type dépassement de seuil. La principale difficulté liée à cette approche est de déterminer le seuil adéquat, en respectant la contrainte d'indépendance entre deux dépassements de seuil successifs. Le seuil adéquat peut être déterminé a priori, par exemple en sélectionnant une valeur de débit critique pour la gestion du barrage, ou bien grâce à des méthodes purement statistiques. Cette méthode par seuil n'est pas testée dans le présent travail mais pourra fait l'objet d'analyses ultérieures.

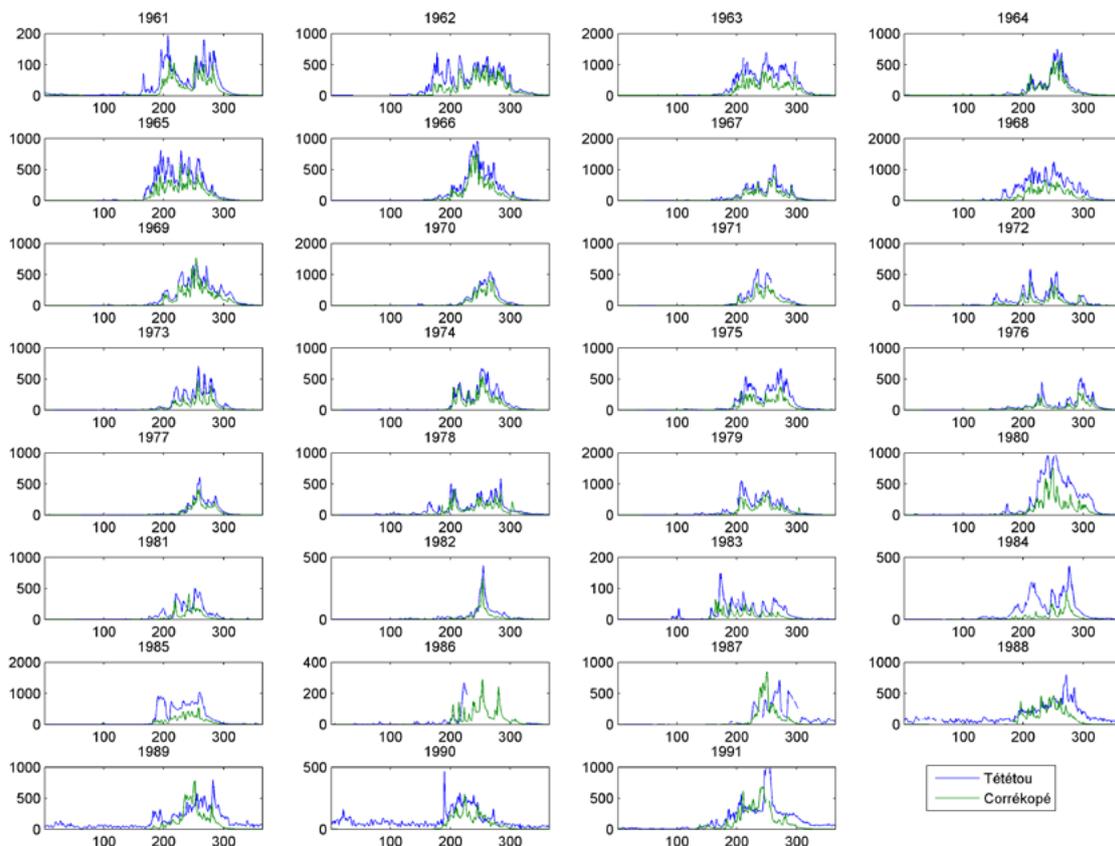


Figure 8. Cycles annuels des débits aux stations de Tététou et Corrékopé entre 1961 et 1991

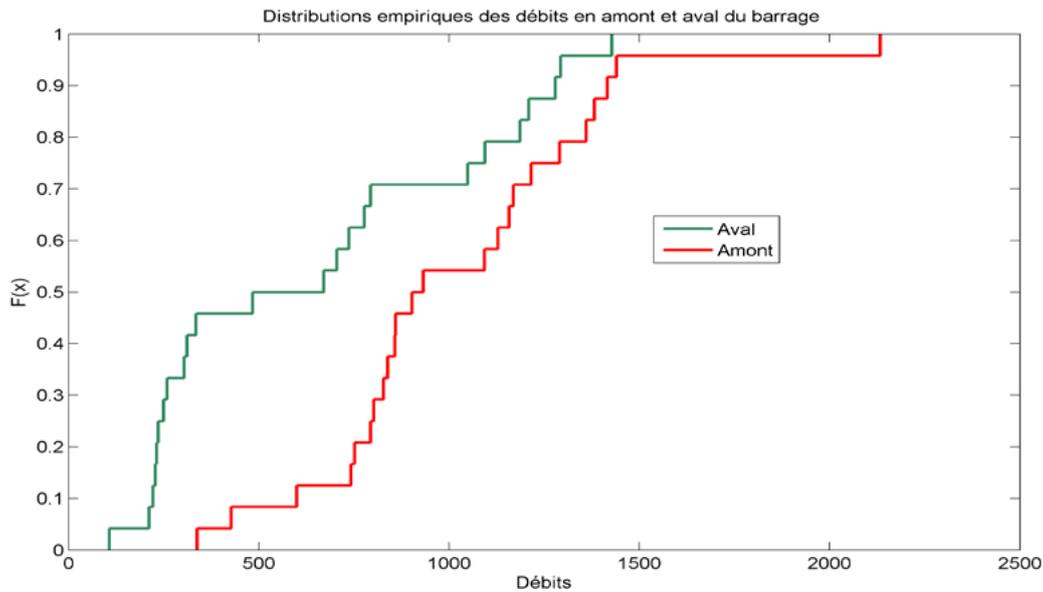


Figure 9 : Distributions empiriques des débits maximums annuels mesurés en amont et aval du barrage Nangbéto

### Influence du barrage Nangbéto sur les crues

Pour évaluer l'impact du barrage sur les crues, nous avons extrait de la base de données, les débits entrant et sortant au barrage. Pour 4 années, de 1988 à 1991, les débits journaliers sont disponibles aux 4 stations (Corrékopé, amont barrage ; Tététo, aval barrage). Les débits entre Corrékopé et la station en amont du barrage sont fortement corrélés, avec un coefficient de corrélation (Pearson)  $r=0.92$ , tandis que les débits sortants du barrage et ceux mesurés à Tététo sont moins fortement corrélés, avec  $r=0.76$ . Cette différence peut s'expliquer par la contribution du bassin en aval du barrage qui influence les débits mesurés à Tététo.

Les maximums annuels entrant et sortant du barrage ont été extraits. Il faut noter que les dates d'épisodes ne sont pas nécessairement identiques dans les 2 séries : pour une année donnée, la date du maximum annuel entrant ne correspond pas chaque fois à la date du maximum annuel sortant. Mais les distributions empiriques (valeurs triées en ordre croissant) des maximums annuels en amont et en aval du barrage (figure 9) montrent que les valeurs de débits les plus élevées sont mesurées en amont du barrage, mais aussi que la différence entre les deux distributions est la plus marquée pour les pointes de débit inférieures à  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . C'est ce qui indiquerait une plus forte influence du barrage sur ces débits de crue faibles à modérés.

Pour mieux analyser aussi l'effet du barrage, les maximums annuels en aval du barrage ont été extraits ainsi que leur date, puis les débits entrants correspondant aux mêmes dates. Les débits entrants ont également été analysés sur plusieurs jours (de J-1 jours jusqu'à J-5 jours) afin d'analyser les éventuels effets de stockage par le barrage. Les meilleures corrélations sont obtenues avec les débits entrants et sortant du même jour, avec un  $R^2=0.77$ . Il ressort donc de cette analyse que le barrage ne protège pas des crues et laisse s'écouler la quasi-totalité des crues maximales journalières, en particulier pour les plus forts débits, à l'exception de 4 épisodes de crue entre  $600$  et  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  pour lesquels la crue entrante est diminuée de moitié à l'aval du barrage.

### Analyse des tendances sur les débits maximums annuels

Les débits maximums annuels ont été extraits aux stations de Tététo, Corrékopé (Figure 10), Nangbéto amont et Nangbéto aval (Figure 11). Trois tests non paramétriques ont été appliqués, pour vérifier les hypothèses de stationnarité (test de Mann-Kendall), d'homogénéité (test de Pettitt) et d'indépendance (Wald-Wolfowitz). Les trois tests acceptent l'hypothèse nulle au seuil de significativité de 5 %, indiquant l'absence de tendances, de rupture d'homogénéité ou d'auto-corrélation dans les séries des maximums annuels (tableaux II et III).

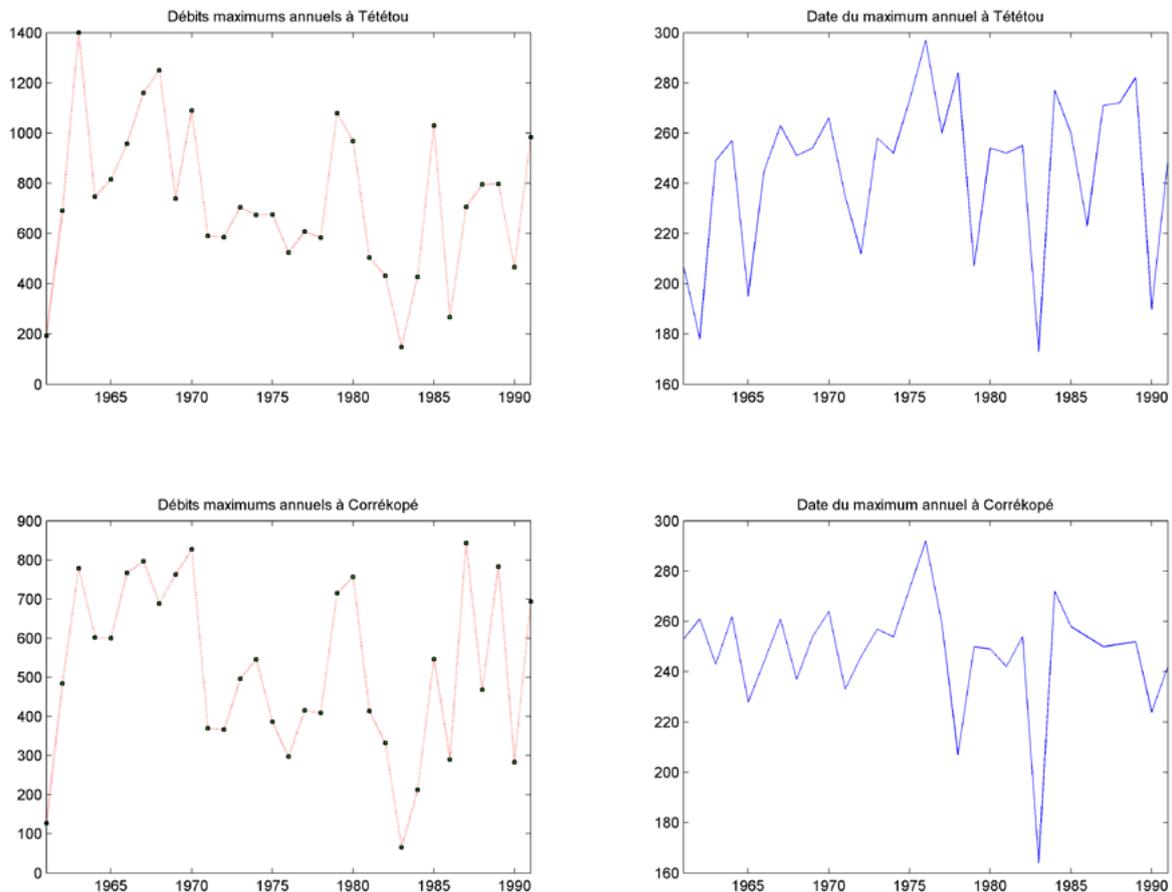


Figure 10 : Maximums annuels aux stations de Tététo et Corrékopé

On observe une baisse apparente des débits maximums annuels à Tététo entre 1970 et 1982, mais qui n'est pas statistiquement significative (test de Mann-Kendall) et une variabilité du jour du maximum annuel autour de 240 (correspondant au mois d'août). La variabilité dans les dates semble plus importante vers la fin

de la série avec des dates de maximums annuels plus fréquemment précoces, néanmoins on ne détecte pas de tendance significative.

Pour Nangbéto, on observe pour les débits entrants une tendance vers des maximums annuels plus tardifs, la tendance donnée par le

Tableau II : p-value des tests pour Tététo et Corrékopé

	Mann-Kendall	Wald-Wolfowitz	Pettitt
Tététo	0.29	0.20	0.10
Corrékopé	0.11	0.35	0.08

Tableau III : p-value des tests pour Nangbéto

	Mann-Kendall	Wald-Wolfowitz	Pettitt
Entrants	0.71	0.62	0.31
Sortants	0.82	0.76	0.70

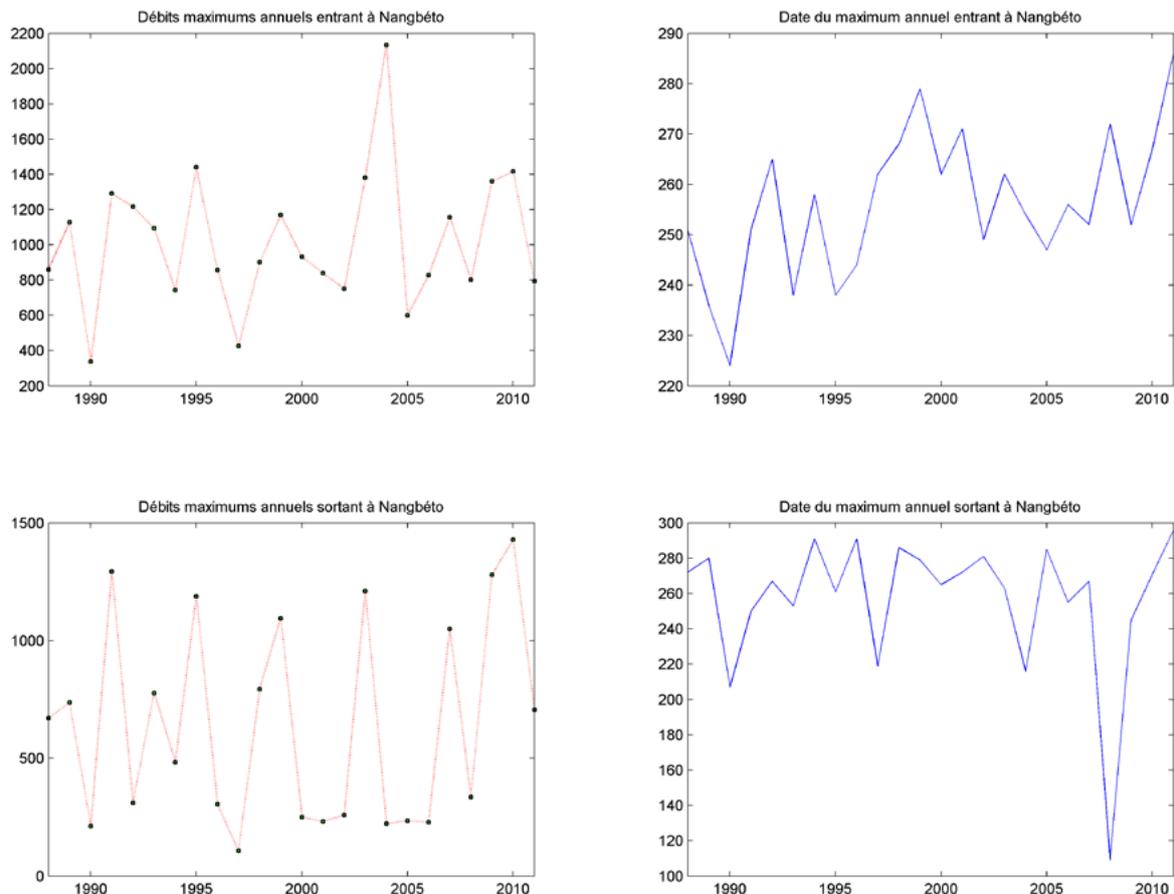


Figure 11 : Maximums annuels entrants et sortant de barrage de Nangbéto

test de Mann-Kendall est significative au seuil de 5 % avec une  $p$ -value=0.0185. Ceci indique que les maximums annuels entrants au barrage ont tendance à se produire plus tard dans l'année (de juillet-août en début des années 1990 et septembre en fin de des années 2000).

Il serait intéressant de disposer des séries à Tététo et Corrékopé sur cette même période 1988 et 2011 pour évaluer les tendances sur les tributaires amonts, mais cette information n'est pas disponible.

### Analyse fréquentielle de la période de retour des crues

Les séries des maximums annuels des stations de Corrékopé, Tététo, Nangbéto amont et Nangbéto aval ont été ajustées avec une loi Généralisée des Valeurs Extrêmes (GEV). Cette distribution à trois paramètres (tableau IV) est adaptée à la modélisation des valeurs maximales annuelles, et comprend notamment comme cas particulier la loi de Gumbel, lorsque que le paramètre de forme de la GEV est égal à 0. L'ajustement des

paramètres est réalisé par la méthode du maximum de vraisemblance, qui permet de calculer l'incertitude sur les paramètres grâce au calcul de l'inverse de la matrice de Fisher. L'ajustement est testé par le biais de 2 tests d'adéquation, le test le Kolmogorov-Smirnov et le test de Cramér-von mises. Les 2 tests valident l'hypothèse nulle, au seuil de significativité de 5 %, que la distribution GEV est adaptée aux données. Les figures 12, 13, 14 et 15 montrent les ajustements réalisés aux différentes stations.

On note qu'à l'exception de Corrékopé avec une queue de distribution lourde (domaine de Fréchet), les intervalles de confiance du paramètre de forme ( $k$ ) incluent la valeur 0, ainsi on peut assumer que le comportement asymptotique est de type Gumbel. On peut aussi se poser la question de l'indépendance des données à Nangbéto sortant, étant donné qu'il s'agit d'une station régulée par le barrage. On observe en effet pour cette station un paramètre de forme supérieur à zéro, ce qui indique une distribution de type Weibull avec un comportement asymptotique borné. Il

Tableau IV : Paramètres des distributions GEV

	Paramètres	Valeur	Bornes intervalle de confiance 95%	
Corrékopé	k	-0.67	-1.03	-0.30
	sigma	251.00	174.16	361.75
	mu	485.62	386.72	584.51
Tététo	k	-0.24	-0.49	$8.9 \cdot 10^{-4}$
	sigma	286.49	217.28	377.75
	mu	619.68	507.48	731.88
Nangbéto amont	k	-0.10	-0.33	0.13
	sigma	329.33	242.98	446.38
	mu	861.62	716.57	1006.66
Nangbéto aval	k	0.44	-0.16	1.04
	sigma	258.21	159.46	418.11
	mu	372.69	238.35	507.03

est à noter que les incertitudes sur les paramètres sont relativement importantes, avec des comportements asymptotiques différents en extrapolation, ainsi il faut être prudent avec l'analyse des

longues périodes de retour (>100 ans) comme l'illustre le tableau V.

### Modélisation des débits de crues à Nangbéto

Tableau V : Périodes de retour des débits maximums annuels

Période de retour (années)	Quantiles de débit			
	Corrékopé	Tététo	Nangbéto amont	Nangbéto aval
2	567.22	689.62	961.21	526.68
5	723.46	984.88	1330.89	914.53
10	777.88	1170.77	1577.45	1210.55
20	809.81	1342.22	1815.30	1527.97
50	833.78	1554.59	2125.15	1993.82
100	844.13	1706.95	2358.82	2388.69

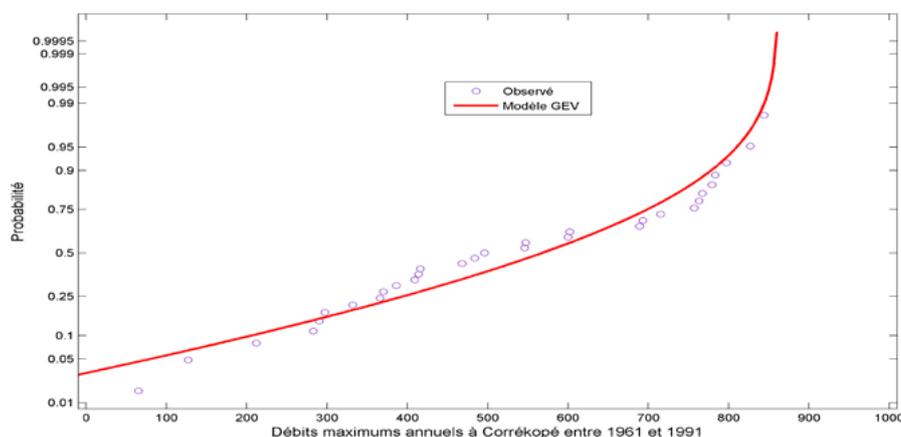


Figure 12. Ajustement GEV à Corrékopé

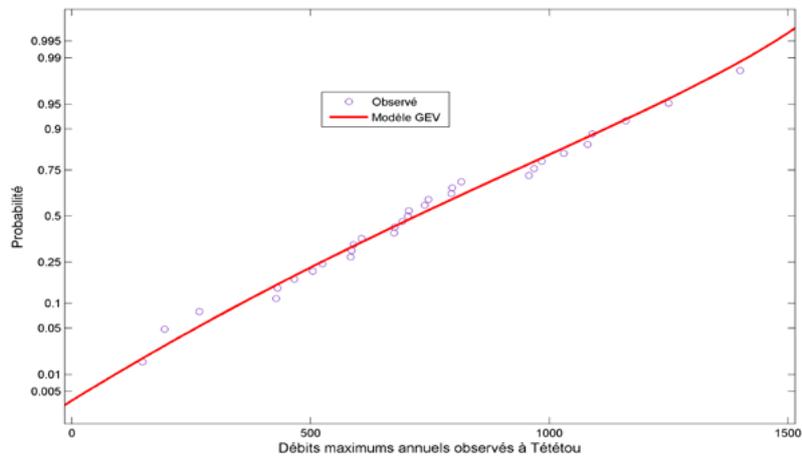


Figure 13. Ajustement GEV à Tététo

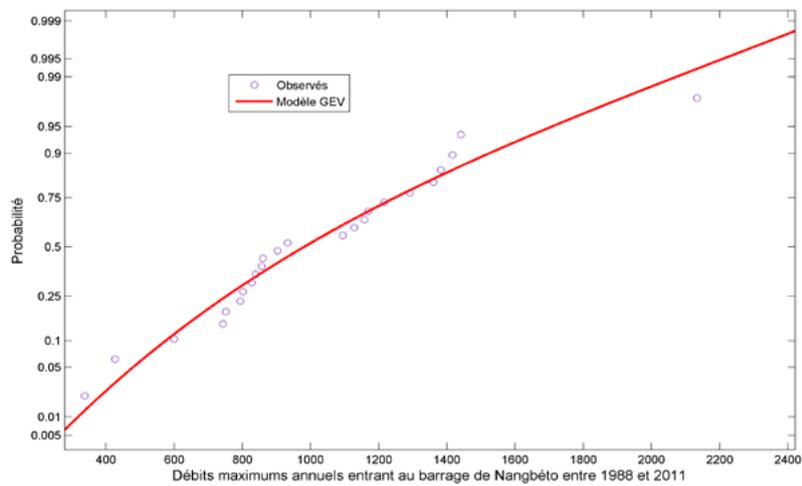


Figure 14. Ajustement GEV aux débits entrants à Nangbéto

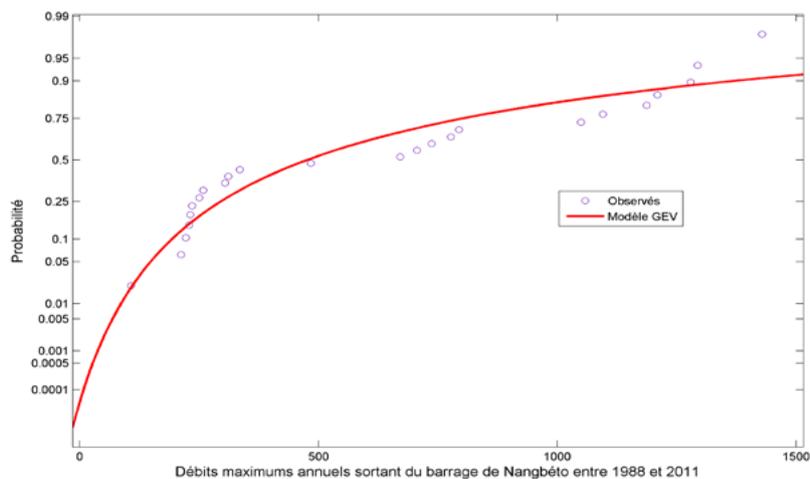


Figure 15. Ajustement GEV aux débits sortants à Nangbéto

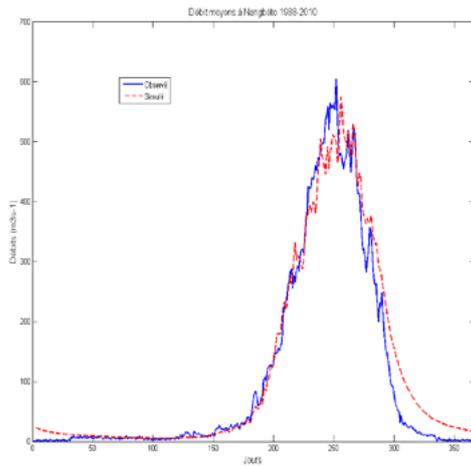


Figure 16: Débits moyens à Nangbéto de 1988 à 2010

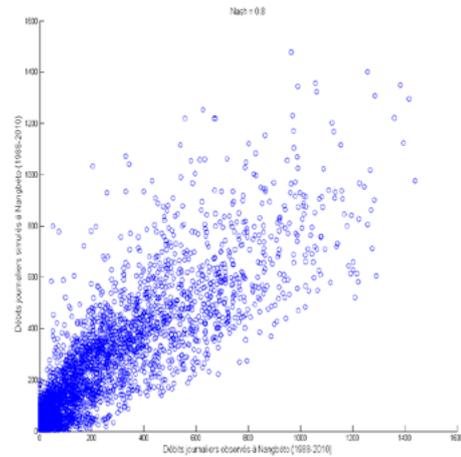


Figure 17 : Débits journaliers observés de 1988 à 2010 à Nangbéto

L'objectif est de modéliser la distribution des crues entrantes au barrage de Nangbéto grâce au modèle hydrologique GR4J au pas de temps journalier sur la période 1988-2010. La fonction critère d'optimisation utilisée pour calibrer le modèle combine le critère de Nash couramment utilisé, le biais sur les volumes écoulés et l'erreur quadratique moyenne sur les pics de crues annuelles ( $RSME_{peak}$ ). D'autres combinaisons de fonctions objectives, notamment un RMSE calculé sur l'ensemble des débits, ont également été testées mais ne produisent pas un meilleur calage. Ainsi pour respecter le principe de parcimonie la fonction critère N est retenue ici.

Les figures 16 et 17 montrent que le modèle calibré reproduit bien la dynamique saisonnière des débits ainsi que les valeurs journalières.

Les débits de crues (débits maximums annuels) ont été extraits des données observées et des données simulées par le modèle calibré. On voit que les deux distributions sont proches (figure 18). Le test de Kolmogorov-Smirnov (équivalence des distributions) a permis de constater que les deux distributions empiriques des maximums annuels ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

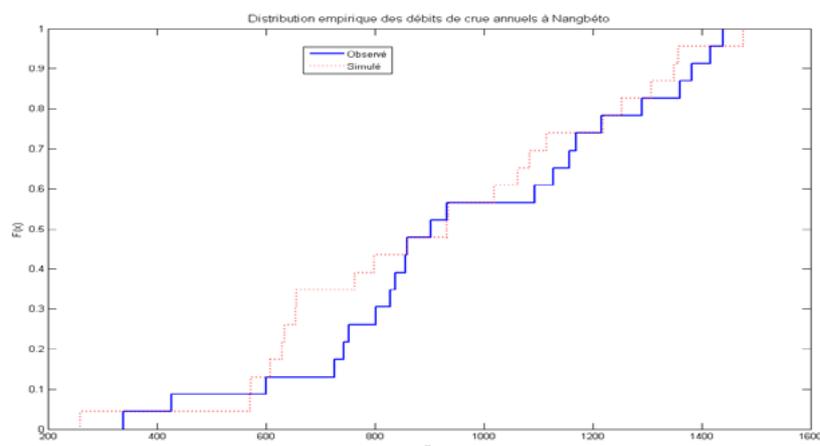


Figure 18 : Distribution empiriques des débits de crue annuels à Nangbéto

### Premier test : division de la période d'étude en deux sous périodes

Le modèle GR4J est dans un premier temps calibré sur la moitié des années (calibration, 1988-1999) et validé sur l'autre moitié (validation, 2000-2010), pour évaluer si les paramètres du modèle et son efficacité sont stables dans le temps. Les résultats sont donnés en termes de Nash, RRMSE, Bias, ainsi que la valeur de la statistique du test de Kolmogorov-smirnov et la p-value associée (tableau VI) et les paramètres associés (tableau VII). Du fait de la faible taille de l'échantillon une fois coupé en deux, les résultats du test de Kolmogorov-smirnov (KS) sont donnés de manière indicative car il n'est pas possible d'évaluer la significativité du test de manière robuste avec un si petit échantillon.

Tableau VI : Critères en calibration et validation

	Calibration	Validation
<b>NASH</b>	0,80	0,71
<b>RRMSE</b>	0,28	<b>0,57</b>
<b>BIAS</b>	0,002	<b>0,16</b>
Statistique KS	0,27	0,40
p-value	0,74	0,31

Tableau VII : Valeurs des paramètres du modèle en calibration et en validation

	x1	x2	x3	x4
<b>Calibration</b>	226,49	0,63	77,34	1,60
Validation	262,51	0,25	118,24	1,97

De ces deux tableaux (VI et VII), on peut conclure que les statistiques du modèle sont très dégradées entre la période de calibration et celle

de validation, avec un biais sur les volumes qui passe de 2 % à 16 % et surtout un RRMSE sur les pointes de crues qui passe de 28 % à 57 %. La dynamique de débit (=Nash) demeure quant à lui assez stable, de 0.8 à 0.71. La statistique du KS indique que la distance entre les distributions observées et simulées augmente entre la période de calibration (KS=0.27) et celle de validation (KS=0.4). Les p-values étant >0.05 en calibration et validation, on pourrait penser que la différence entre les distributions n'est pas significative mais il s'agit vraisemblablement d'un artefact lié à la taille réduite des échantillons. En traçant un graphique quantile-quantile (figure 19), on observe qu'en validation la distribution des maximums annuels de débits simulés s'écarte de manière importante de la distribution observée.

### Division de la période d'étude en trois sous-périodes

Le test de Pettitt indique une rupture dans l'ETP à partir de 1995. Donc on prend 3 périodes de 8 ans : 1988-1995 (calibration), 1996-2003 (validation1) et 2004-2010 (validation 2). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Récapitulatif des résultats du modèle GR4J

	Calibration	Validation1	Validation2
<b>NASH</b>	0,80	0,78	0,62
<b>RRMSE</b>	0,31	0,28	<b>0,70</b>
<b>BIAS</b>	0,00	0,04	<b>0,28</b>
Statistique KS	0,25	0,25	<b>0,57</b>
p-value	0,93	0,93	0,13

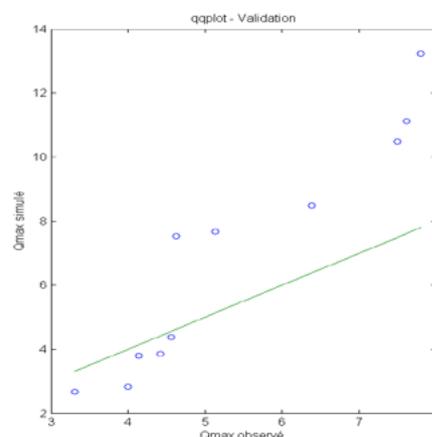
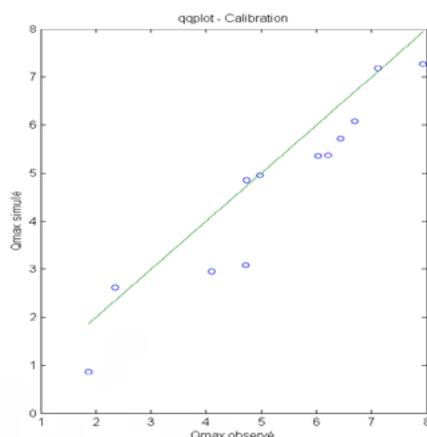


Figure 19 : Distribution quantile-quantile des maxima annuels de débits à Nangbéto

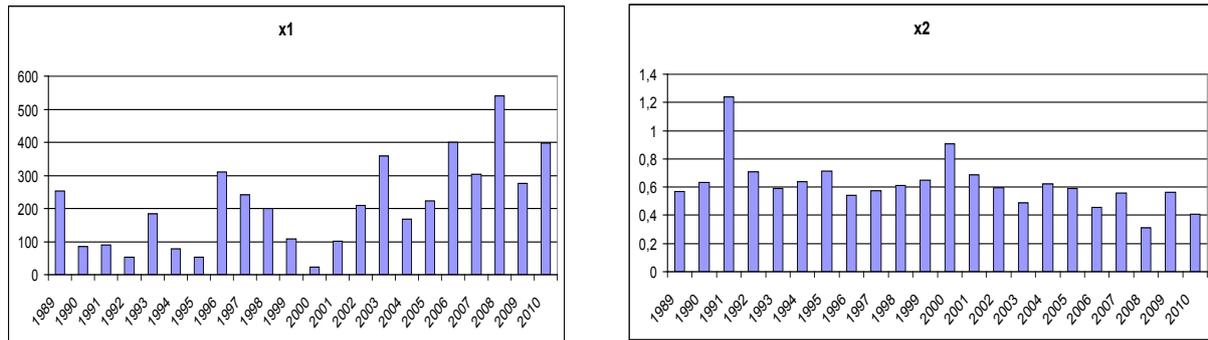


Figure 20: Evolution des paramètres x1 et x2 du modèle dans le temps et dans l'espace

Il ressort de l'analyse que, plus on s'éloigne de la période de calibration 1988-1995, plus on obtient de très mauvais résultats sur la période 2004-2010 (70 % d'erreurs sur les débits de crue, 28 % de biais sur les volumes écoulés en période de validation 2). A cet effet, l'utilisation du modèle GR4J dans ce bassin pour l'étude des impacts du changement climatique sur les maximums de débits journaliers est hasardeuse, car les paramètres du modèle pour reproduire les débits ne sont pas stationnaires dans le temps durant la période d'observation.

#### Calibration année par année

Enfin, le modèle GR4J a été calibré sur chaque année entre 1989 et 2010 (1988 n'est pas utilisée car c'est l'année de « warm up » pour initialiser les niveaux de réservoirs) afin d'évaluer la stabilité temporelle des paramètres du modèle. On observe que les paramètres x1 (capacité du réservoir de production) et x2 (coefficient d'échanges souterrains) ne sont pas stationnaires et présentent une tendance à la hausse pour x1 et à la baisse pour x2 au cours du temps (figure 20). Dans les 2 cas, les tendances sont significatives avec des p-values de 0.0041 et 0.0112, respectivement, pour x1 et x2 avec le test de Mann-Kendall.

La non-stationnarité détectée dans les paramètres du modèle est différente de celle observée par Le Lay *et al.* (2007) dans le bassin voisin de l'Ouémé de taille similaire (10050 km<sup>2</sup>). Néanmoins, ces auteurs ont utilisé une ETP moyenne sur la période 1954-2002 qui masque la hausse importante des températures depuis la décennie 1960.

## Conclusion

Il ressort de cette étude, une absence de tendances sur les débits et les précipitations de 1988 à 2010 dans le bassin du barrage de Nangbéto, mais une hausse des températures marquée depuis 1960. Il y a peu de différence entre les débits de crue enregistrés en entrée et en sortie du barrage de Nangbéto ce qui montre la faible capacité de rétention du réservoir-barrage pendant les hautes eaux. Les crues annuelles enregistrées dans le bassin sont bien mieux corrélées avec les débits moyens annuels qu'avec les pluies maximales annuelles, ce qui indique que le mécanisme de génération des crues serait plutôt la saturation progressive des sols que des épisodes pluvieux intenses.

Les crues maximales annuelles sont enregistrées au cours de l'été durant la saison pluvieuse. Les débits maximaux entrants au barrage ont tendance à se produire de plus en plus tard dans l'année entre 1988 et 2010, même si les différents tests statistiques utilisés indiquent une absence de tendances ou de ruptures sur la courte série étudiée (1988-2010). La distribution GEV est adaptée aux données entrantes et sortantes du barrage, de type Fréchet sur les crues entrantes et de type Weibull pour les crues en sortie.

Le modèle GR4J reproduit bien les débits de crues sur l'ensemble de la période en calibration. Néanmoins les trois tests de validation montrent qu'en validation au fur et à mesure que la période de validation s'éloigne de la période de calage, on note une dégradation en particulier dans la reproduction des débits de crues, confirmant l'instabilité des paramètres du modèle dans le temps. A cet effet, il serait difficile de prévoir les débits de crues avec un tel modèle en particulier sur

des horizons lointains pour évaluer par exemple les impacts du changement climatique. Ainsi, d'autres méthodes sont nécessaires pour évaluer les impacts hydrologiques des changements climatiques dans ce bassin.

## Remerciements

Fondation Maison des sciences de l'Homme (FMSH), Commission Européenne, Docteur Yves TRAMBLAY, Chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Montpellier, Professeur Gil MAHE, Directeur de Recherches IRD, Professeur Eric SERVAT, Directeur du laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM) de l'Université de Montpellier 2, Professeur Pierre CAMBERLIN du Centre de Recherche de Climatologie (CRC) de l'Université de Bourgogne (Dijon) et Professeur Michel BOKO, Directeur du laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) et Professeur Barthélémy BIAO, Recteur de l'Université de Parakou (Bénin).

## Bibliographie

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 56, FAO, Rome.

Amoussou E., Trambly 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* (2014) DOI:1080/02626667.2013.871015.

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

Amoussou, E., Camberlin, P. et Mahé, G., 2012. Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 805-817.

Chevallier, P., et Rodier, J., 1996. *Les bassins versants de recherche tropicaux: historique des études menées par l'Orstom*. IAHS Publ. no. 238, 1996. 13.

Coron, L., Andréssian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., and Hendrickx F., 2012. Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments, *Water Resour. Res.*, 48, W05552, doi:10.1029/2011WR011721.

Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.-L., Sighomnou, D., Vauclin, M., 2012. Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Global and Planetary Change*, Volumes 98–99, December 2012, pp.18-30, ISSN 0921-8181, 10.1016/j.gloplacha.2012.07.009.

Di Baldassarre G., Montanari A., Lins H., Koutsoyiannis D., Brandimarte L., Blöschl G., 2010. Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22402, DOI: 10.1029/2010GL045467.

Douglas I., Kurshid A., Maghenda M., McDonnell Y., McLean L., Campbell J., 2008. Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa. *Environment and Urbanization* 20 (1), 187–205.

Dubreuil, P. L., Chaperon, P., Guiscafré, J. et Herbaud, J., 1972. *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux: années 1951-1969*. Orstom, Paris.

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) p. 35-50

Fisher, R.A., Tippett, L.H.C., 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, v. 24, 180-190.

Frieda, S. S. and Eisenhart C., 1943. Tables for testing randomness of grouping in a sequence of alternatives. *Annals of Mathematical Statistics*, 14, 66-87.

Giertz, S., Diekkrüger, B., and Steup, G., 2006. Physically-based modelling of hydrological processes in a tropical headwater catchment (West Africa) – process representation and multi-criteria validation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 829-847, doi:10.5194/hess-10-829-2006, 2006.

Jenkinson, A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81, 158–171.

- 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
- Katz, R.W., Parlange, M.B., and Naveau P., 2002. Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, 1287–1304.
- 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.
- Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th ed., Charles Griffin: London.
- Le Lay, M. & Galle S., 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien, *Hydrological Sciences Journal*, 50:3, -524
- Le Lay, M., S. Galle, G. Saulnier, M. and Braud I., 2007. Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: A case study in West Africa. *Water Resour. Res.*, 43, W07420, DOI: 10.1029/2006WR005257.
- Le Lay, M., Saulnier, G.-M., Galle, S., Seguis, L., Métadier, M. and Peugeot, Ch., 2008. Model representation of the Sudanian hydrological processes: Application on the Donga catchment (Benin), *Journal of Hydrology*, Volume 363, Issues 1–4, 15 December 2008, pp.32–41.
- Lebel, T, Laborde, J-P., 1988. A geostatistical approach for areal rainfall statistics. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 2: 245–261.
- Lebel, T., Bastin, G., Obled, C., Creutin, J.D., 1987. On the accuracy of areal rainfall estimation. *Water Resources Research*, 23: 2123–2134.
- Lebel, T., Parker, D.J., Flamant, C., Bourles, B., Marticorena, M., Mougin, E., Peugeot, C., Diedhiou, A., Haywood, J.M., Ngamini, J.B. Polcher, J., Redelsperger, J.-L. and Thorncroft, C. D., 2009. The AMMA field campaigns: Multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(s1): 8–33.
- Libiseller, C. et Grimvall, A., 2002. Performance of partial Mann-Kendall tests for trends detection in the presence of covariates. *Environmetrics*, 13, 71–84.
- Liéno, G. *et al.*, 2008. Changements des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact du changement climatique en Afrique équatoriale ? *Hydrological Sciences Journal*, 53 (2), 479–484.
- Mahé, G. et Olivry, J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6 (1), 109–117.
- Mahé, G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Paris: ORSTOM, *Colloques, Etudes et Thèses*.
- Mann, H. B., 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.
- Morton, F.I., 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology* 66 (1/4), 1–76.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V., 1970. River Flow Forecasting through conceptual models: part I - A: discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Nelder, J. A. and Mead, R., 1965. A simplex for function minimization, *Computer J.*, 7:308–313, 1965.
- 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.
- Paturel, J.E. *et al.*, 2003. Influence of the spatialization of data on the modelling of monthly river regimes in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 48 (6), 881–890.
- Payan, J.-L., 2007. *Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit*. Thèse de Doctorat de L'ENGREF, CEMAGREF, Antony, France.
- Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279:275–289.
- Perrin, C., Oudin, L., Andréassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C. & Mathevet, T., 2007.

Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall runoff models. *Hydrol. Sci. J.*, 52(1), 131–151.

Pettitt, A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statistics*, 28(2), 126-135.

Rodier et Auvray, 1965. *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique Occidentale*. Orstom-CIEH, Paris.

Rodier, J., 1955. Etudes de crues sur les petits bassins versants de l'AEF et du Cameroun. In: *Annuaire hydrologique de la France d'outre-mer: année 1953*, 11-14. Orstom, Paris.

Rossi, G., 1996. L'impact des barrages de la vallée du Mono (Togo-Benin). *La gestion de l'incertitude. Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Octobre 1996, vol. 2, n°2. pp. 55-68.

Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J.-L., Galle, S., Peugeot, C., Gosset, M., Le Barbé, L., Malinur, F., Van Exter, S., Arjounin, M., Boubkraoui, S., Wubda, M., 2011. Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa): Inter-annual variability of water budget, *Journal of Hydrology*, Volume 402, Issues 1–2, 13 May 2011, Pages 1-13, ISSN 0022-1694, 10.1016/j.jhydrol.2011.01.054.

Smirnov, N. V., 1939. "On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples" (Russian) *Bull. Moscow Univ.*, 2, 3-16.

SpernaWeiland, F. C., Tisseuil, C., Dürr, H. H., Vrac M., and van Beek, L. P. H., 2012. Selecting the optimal method to calculate daily global reference potential evaporation from CFSR reanalysis data for application in a hydrological model study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 983–1000.

Wald, A. and Wolfowitz, J., 1940. "On a test whether two samples are from the same population". *Annals of Mathematical Statistics*, 11, 147-162.

## Working Papers : la liste

- Hervé Le Bras, Jean-Luc Racine & Michel Wieviorka, *National Debates on Race Statistics: towards an International Comparison*, FMSH-WP-2012-01, février 2012.
- Manuel Castells, *Ni dieu ni maître : les réseaux*, FMSH-WP-2012-02, février 2012.
- François Jullien, *L'écart et l'entre. Ou comment penser l'altérité*, FMSH-WP-2012-03, février 2012.
- Itamar Rabinovich, *The Web of Relationship*, FMSH-WP-2012-04, février 2012.
- Bruno Maggi, *Interpréter l'agir : un défi théorique*, FMSH-WP-2012-05, février 2012.
- Pierre Salama, *Chine – Brésil : industrialisation et « désindustrialisation précoce »*, FMSH-WP-2012-06, mars 2012.
- Guilhem Fabre & Stéphane Grumbach, *The World upside down, China's R&D and innovation strategy*, FMSH-WP-2012-07, avril 2012.
- Joy Y. Zhang, *The De-nationalization and Re-nationalization of the Life Sciences in China: A Cosmopolitan Practicality?*, FMSH-WP-2012-08, avril 2012.
- John P. Sullivan, *From Drug Wars to Criminal Insurgency: Mexican Cartels, Criminal Enclaves and Criminal Insurgency in Mexico and Central America. Implications for Global Security*, FMSH-WP-2012-09, avril 2012.
- Marc Fleurbaey, *Economics is not what you think: A defense of the economic approach to taxation*, FMSH-WP-2012-10, mai 2012.
- Marc Fleurbaey, *The Facets of Exploitation*, FMSH-WP-2012-11, mai 2012.
- Jacques Sapir, *Pour l'Euro, l'heure du bilan a sonné : Quinze leçons et six conclusions*, FMSH-WP-2012-12, juin 2012.
- Rodolphe De Koninck & Jean-François Rousseau, *Pourquoi et jusqu'où la fuite en avant des agricultures sud-est asiatiques ?*, FMSH-WP-2012-13, juin 2012.
- Jacques Sapir, *Inflation monétaire ou inflation structurelle ? Un modèle hétérodoxe bi-sectoriel*, FMSH-WP-2012-14, juin 2012.
- Franson Manjali, *The 'Social' and the 'Cognitive' in Language. A Reading of Saussure, and Beyond*, FMSH-WP-2012-15, juillet 2012.
- Michel Wieviorka, *Du concept de sujet à celui de subjectivation/dé-subjectivation*, FMSH-WP-2012-16, juillet 2012.
- Nancy Fraser, *Feminism, Capitalism, and the Cunning of History: An Introduction*, FMSH-WP-2012-17, august 2012.
- Nancy Fraser, *Can society be commodities all the way down? Polanyian reflections on capitalist crisis*, FMSH-WP-2012-18, august 2012.
- Marc Fleurbaey & Stéphane Zuber, *Climate policies deserve a negative discount rate*, FMSH-WP-2012-19, september 2012.
- Roger Waldinger, *La politique au-delà des frontières : la sociologie politique de l'émigration*, FMSH-WP-2012-20, septembre 2012.
- Antonio De Lauri, *Inaccessible Normative Pluralism and Human Rights in Afghanistan*, FMSH-WP-2012-21, september 2012.
- Dominique Méda, *Redéfinir le progrès à la lumière de la crise écologique*, FMSH-WP-2012-22, octobre 2012.
- Ibrahima Thioub, *Stigmates et mémoires de l'esclavage en Afrique de l'Ouest : le sang et la couleur de peau comme lignes de fracture*, FMSH-WP-2012-23, octobre 2012.
- Danièle Joly, *Race, ethnicity and religion: social actors and policies*, FMSH-WP-2012-24, novembre 2012.
- Dominique Méda, *Redefining Progress in Light of the Ecological Crisis*, FMSH-WP-2012-25, décembre 2012.
- Ulrich Beck & Daniel Levy, *Cosmopolitanized Nations: Reimagining Collectivity in World Risk Society*, FMSH-WP-2013-26, february 2013.
- Xavier Richet, *L'internationalisation des firmes chinoises : croissance, motivations, stratégies*, FMSH-WP-2013-27, février 2013.
- Alain Naze, *Le féminisme critique de Pasolini, avec un commentaire de Stefania Tarantino*, FMSH-WP-2013-28, février 2013.
- Thalia Magioglou, *What is the role of "Culture" for conceptualization in Political Psychology? Presentation of a dialogical model of lay thinking in two cultural contexts*, FMSH-WP-2013-29, mars 2013.
- Byasdeb Dasgupta, *Some Aspects of External Dimensions of Indian Economy in the Age of Globalisation*, FMSH-WP-2013-30, april 2013.
- Ulrich Beck, *Risk, class, crisis, hazards and cosmopolitan solidarity/risk community – conceptual and methodological clarifications*, FMSH-WP-2013-31, april 2013.
- Immanuel Wallerstein, *Tout se transforme. Vraiment tout ?*, FMSH-WP-2013-32, mai 2013.
- Christian Walter, *Les origines du modèle de marche au hasard en finance*, FMSH-WP-2013-33, juin 2013.
- Byasdeb Dasgupta, *Financialization, Labour Market Flexibility, Global Crisis and New Imperialism – A Marxist Perspective*, FMSH-WP-2013-34, juin 2013.
- Kiyomitsu Yui, *Climate Change in Visual Communication: From 'This is*

- Not a Pipe' to 'This is Not Fukushima', FMSH-WP-2013-35, juin 2013.
- Gilles Lhuilier, *Minerais de guerre. Une nouvelle théorie de la mondialisation du droit*, FMSH-WP-2013-36, juillet 2013.
- David Tyfield, *The Coal Renaissance and Cosmopolitized Low-Carbon Societies*, FMSH-WP-2013-37, juillet 2013.
- Lotte Pelckmans, *Moving Memories of Slavery: how hierarchies travel among West African Migrants in Urban Contexts (Bamako, Paris)*, FMSH-WP-2013-38, juillet 2013.
- Amy Dahan, *Historic Overview of Climate Framing*, FMSH-WP-2013-39, août 2013.
- Rosa Rius Gatell & Stefania Tarantino, *Philosophie et genre: Réflexions et questions sur la production philosophique féminine en Europe du Sud au XX<sup>e</sup> siècle (Espagne, Italie)*, FMSH-WP-2013-40, août 2013.
- Angela Axworthy *The ontological status of geometrical objects in the commentary on the Elements of Euclid of Jacques Peletier du Mans (1517-1582)*, FMSH-WP-2013-41, août 2013.
- Pierre Salama, *Les économies émergentes, le plongeon ?*, FMSH-WP-2013-42, août 2013.
- Alexis Nuselovici (Nouss), *Lexil comme expérience*, FMSH-WP-2013-43, septembre 2013.
- Alexis Nuselovici (Nouss), *Exilience : condition et conscience*, FMSH-WP-2013-44, septembre 2013.
- Alexis Nuselovici (Nouss), *Exil et post-exil*, FMSH-WP-2013-45, septembre 2013.
- Alexandra Galitzine-Loumpet, *Pour une typologie des objets de l'exil*, FMSH-WP-2013-46, septembre 2013.
- Hosham Dawod, *Les réactions irakiennes à la crise syrienne*, FMSH-WP-2013-47, septembre 2013.
- Gianluca Manzo, *Understanding the Marriage Effect: Changes in Criminal Offending Around the Time of Marriage*, FMSH-WP-2013-48, GeWoP-1, octobre 2013.
- Torkild Hovde Lyngstad & Torbjørn Skarðhamar, *Understanding the Marriage Effect: Changes in Criminal Offending Around the Time of Marriage*, FMSH-WP-2013-49, GeWoP-2, octobre 2013.
- Gunn Elisabeth Birkelund & Yannick Lemel, *Lifestyles and Social Stratification: An Explorative Study of France and Norway*, FMSH-WP-2013-50, GeWoP-3, octobre 2013.
- Franck Varenne, *Chains of Reference in Computer Simulations*, FMSH-WP-2013-51, GeWoP-4, octobre 2013.
- Olivier Galland & Yannick Lemel, avec la collaboration d'Alexandra Frenod, *Comment expliquer la perception des inégalités en France ?*, FMSH-WP-2013-52, GeWoP-5, octobre 2013.
- Guilhem Fabre, *The Lion's share : What's behind China's economic slowdown*, FMSH-WP-2013-53, octobre 2013.
- Venni V. Krishna, *Changing Social Relations between Science and Society: Contemporary Challenges*, FMSH-WP-2013-54, novembre 2013.
- Isabelle Huault & Hélène Rainelli-Weiss, *Is transparency a value on OTC markets? Using displacement to escape categorization*, FMSH-WP-2014-55, janvier 2014.
- Dominique Somda, *Une humble aura. Les grandes femmes au sud de Madagascar*, FMSH-WP-2014-56, janvier 2014.
- Débora González Martínez, *Sur la translatio de miracles de la Vierge au Moyen Âge. Quelques notes sur les Cantigas de Santa Maria*, FMSH-WP-2014-57, janvier 2014.
- Pradeep Kumar Misra, *The State of Teacher Education in France: A Critique*, FMSH-WP-2014-58, janvier 2014.
- Naeem Ahmed, *Pakistan's Counterterrorism strategy and its Implications for domestic, regional and international security*, FMSH-WP-2014-59, janvier 2014.
- Anatole Fogou, *Histoire, conscience historique et devenir de l'Afrique : revisiter l'historiographie diopienne*, FMSH-WP-2014-60, janvier 2014.
- Pierre Salama, *Les classes moyennes peuvent-elles dynamiser la croissance du PIB dans les économies émergentes?*, FMSH-WP-2014-61, février 2014.
- Marta Craveri & Anne-Marie Losonczy, *Growing up in the Gulag: later accounts of deportation to the USSR*, FMSH-WP-2014-62, february 2014.
- Philippe Steiner, *The Organizational Gift and Sociological Approaches to Exchange*, FMSH-WP-2014-63, GeWoP-6, february 2014.
- Françoise Bourdarias, Jean-Pierre Dozon & Frédéric Obringer, *La médecine chinoise au Mali. Les économies d'un patrimoine culturel*, FMSH-WP-2014-64, février 2014.
- Ilan Bizberg, *The welfare state and globalization in North America*, FMSH-WP-2014-65, may 2014.
- Philippe Steiner, *Cartographie des échanges*, FMSH-WP-2014-66, GeWoP-7, mai 2014.
- Olga Stepanova, *Le roman, la pièce de théâtre et le film : traits communs et particularités*, FMSH-WP-2014-67, mai 2014.
- Flavia Buzzetta, *Adaptations de thèmes magico-cabalistiques juifs médiévaux par le Quattrocento italien*, FMSH-WP-2014-68, mai 2014.
- Frédéric Landy, *Quelle sécurité alimentaire en Inde ? Dilemmes économiques, socio-politiques et environnementaux. Une mise en miroir francilienne*, FMSH-WP-2014-69, juin 2014.
- Hafidha Chekir, *Le combat pour les droits des femmes dans le monde arabe*, FMSH-WP-2014-70, juin 2014.
- Géraldine Thiry, Philippe Roman, *The Inclusive Wealth Index. A*

- Sustainability Indicator, Really?*, FMSH-WP-2014-71, juin 2014.
- Michael Cronin, *Représenter l'exil: le sujet du non-exil*, FMSH-WP-2014-72, juin 2014.
- Marc Goldschmit, *L'écriture de l'exil et l'hypothèse du Marrane (Kafka, Benjamin, Derrida et au-delà)*, FMSH-WP-2014-73, juin 2014.
- Boris Chukhovich, *Le street art, un genre exilique ?*, FMSH-WP-2014-74, juin 2014.
- Palanigounder Duraisamy, *Who Wins in the Indian Parliament Election? Criminals, Wealthy or Incumbents*, FMSH-WP-2014-75, august 2014.
- Denis Kondakov, *Francophonie en Biélorussie aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles*, FMSH-WP-2014-76, août 2014.
- Isabel Lustosa, *Le séjour de don Pedro 1<sup>er</sup> à Paris et la presse française (1831/1832)*, FMSH-WP-2014-77, août 2014.
- Lucas Chancel, Géraldine Thiry, Damien Demailly, *Les nouveaux indicateurs de prospérité : pour quoi faire ? Enseignements de six expériences nationales*, FMSH-WP-2014-78, septembre 2014.
- Alex M. Nading, *Local Biologies and the Chemical Infrastructures of Global Health*, FMSH-WP-2014-79, september 2014.
- Maria Conterno, *"Intercultural Transmission" and Oral Circulation of Historical Knowledge in the Seventh century Near East: some remarks on the so-called "circuit de Théophile d'Édesse"*, FMSH-WP-2014-80, september 2014.
- Jean-Luc Racine, *Penser l'Inde émergente : de l'altérité orientaliste au post-postcolonialisme*, FMSH-WP-2014-81, septembre 2014.
- Brinda J. Mehta, *Fractures historiques, trauma et résistance dans l'écriture féministe algérienne : Maïssa Bey, Assia Djebar et Leïla Sebbar*, FMSH-WP-2014-82, novembre 2014.
- Sadia Chérif, *Construire la résilience au changement climatique par les connaissances locales : le cas des régions montagneuses et des savanes de Côte d'Ivoire*, FMSH-WP-2014-83, novembre 2014.
- Géraldine Thiry, Léa Sébastien, Tom Bauler, *Ce que révèle le discours des acteurs officiels sur un « au-delà du PIB »*, FMSH-WP-2014-84, novembre 2014.
- Sophie Roche, *The faithful assistant. Mubiddin Faizulloev's life and work in the light of Soviet ethnography*, FMSH-WP-2014-85, novembre 2014.
- Mala Singh, *Re-thinking Knowledge and Social Change in South Africa*, FMSH-WP-2014-86, novembre 2014.
- Georges Corm, Christiane Veauvy, *Proche-Orient et conscience historique, entretien*, FMSH-WP-2015-87, janvier 2015.
- Dominique Boullier, *Les sciences sociales face aux traces du big data ? Société, opinion et répliques*, FMSH-WP-2015-88, février 2015.
- Christian Walter, *Les deux quantifications de la théorie financière. Contribution à une histoire critique des modèles financiers*, FMSH-WP-2015-89, février 2015.
- Ernest Amoussou, *Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin-versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit*, FMSH-WP-2015-90, avril 2015.

Retrouvez tous les working papers et les position papers sur notre site, sur [hypotheses.org](http://hypotheses.org) et sur les archives ouvertes halshs

<http://www.fmsh.fr/fr/ressources/working-papers>

<http://halshs.archives-ouvertes.fr/FMSH-WP>

<http://wpfmsh.hypotheses.org>