

FACULTE DES LETTRES, ARTS ET SCIENCES HUMAINES
Laboratoire Pierre PAGNEY
Climat, Eau, Ecosystème et Développement
(LACEEDE)



CLIMAT ET DEVELOPPEMENT

Numéro 15

Décembre 2013



Laboratoire Pierre PAGNEY –Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE)
B.P. : 526 Cotonou, Tél. (229) : 21 36 00 74 Poste 148 (République du Bénin)

CLIMAT ET DEVELOPPEMENT

Revue scientifique semestriel éditée par

Laboratoire Pierre PAGNEY Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE)

Directeur de Publication

Pr. Michel BOKO

Rédacteur en Chef

Dr. François TCHIBOZO

Conseiller Scientifique

Pr. Christophe S. HOUSSOU

Comité de Rédaction

Pr. Constant HOUNDENOU

Pr. Fulgence AFOUDA

Dr. Ignace TOSSA

Pr. Placide CLEDJO

Pr. Euloge OGOUWALE

Dr. Expédit W. VISSIN

Dr. Ibouaïma YABI

Dr. Léocadie ODOULAMI

Dr. Ernest AMOUSSOU

Dr. Henri S. V. TOTIN

Dr. Cyr Gervais ETENE

Comité scientifique

Pr. Michel BOKO (Bénin)

Pr. Joseph SAMBA KIMBATA
(Congo Brazzaville)

Pr. Pierre CAMBERLIN (France)

Pr. Tiou TCHAMIE (Togo)

Pr. Michel MAKOUTODE (Bénin)

Pr. Brice SINSIN (Bénin)

Pr. Yves RICHARD (France)

Pr. Téléspore BROU (France)

Pr. Adoté Blim BLIVI (Togo)

Pr. Akpovi AKOEGNINO (Bénin)

Pr. Abel AFOUDA (Bénin)

Pr. Patrick A. EDORH (Bénin)

Pr. Odile DOSSOU-GUEDEGBE (Bénin)

Pr. Brice TENTE (Bénin)

Editeur : LACEEDE

ISSN: 1840-5452

ISBN-10: 99919-58-64-9

B.P.: 526 Cotonou,

Tél. (229) : 21 36 00 74 Poste 148

(République du Bénin)

Portable (229) 97 08 11 06

SOMMAIRE / CONTENTS

5. Modélisation des indicateurs sociaux de gestion des ouvrages hydrauliques villageois au Bénin

(YETONGNON ERIC, BIAOU GAUTHIER & BOKO MICHEL)

15. Analyse de quelques caractéristiques des pluies journalières dans le Bénin Central

(YABI IBOURAÏMA, CHABI AYEDEGUE B. PHILIPPE & AFOUDA FULGENCE)

28. Les changements climatiques et ses effets sur la rivière Fourigninkère à Natitingou au Bénin : perceptions et adaptations paysannes

(YEHOUENOU A. P. ELISABETH, DARBOUX A. P. EMMANUEL, TENTE BRICE, HOUANYE ARMAND, AFOUDA ABEL & BOKO MICHEL)

38. L'emprise humaine actuelle sur le milieu naturel du département de l'Alibori, au Nord-est du Bénin

(IBOURAIMA SAFIRI, OYEDE L. MARC & SINSIN BRICE)

46. Analyse des débits de crues et d'etiages dans le bassin versant du fleuve sénégal en amont du barrage de Manantali

(BODIAN ANSOUMANA, DACOSTA HONORÉ & DEZETTER ALAIN)

57. Sensibilité de la pluviométrie à la TSO en août dans le Bénin méridional et central (golfe de Guinée)

(VISSIN EXPEDIT W.)

67. La climatologie fondamentale malade de ses moyens : la recherche climatologique au Bénin en question.

(AFOUDA FULGENCE)

81. Accès à l'eau pour usage domestique dans les quartiers informels de Ouagadougou : variations saisonnières et réponses adaptatives

(SOURA ABDRAMANE, DOS SANTOS STEPHANIE, OUEDRAOGO FRANÇOIS DE CHARLES, SANOU BAKARY, YAKA PASCAL, LANKOANDE BRUNO1 & MILLOGO ROCH)

96. Erosion pluviale et stratégies endogènes d'adaptation des populations dans la ville de Covè

(VIGNINOUS TOUSSAINT, ZANNOU SANDÉ & ZOGLOBOSSOU B. PARFAIT)

108. Caractérisation phyto-écologique de l'habitat du buffle (*Syncerus caffer Sparman 1779*) dans la partie Sud et Centre du Bénin

(AZANLIN S. MAURICE, TENTE BRICE & SINSIN BRICE)

ANALYSE DES DEBITS DE CRUES ET D'ÉTIAGES DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SENEGAL EN AMONT DU BARRAGE DE MANANTALI

BODIAN ANSOUMANA¹, DACOSTA HONORÉ² & DEZETTER ALAIN³

- (1) Laboratoire Leïdi « Dynamique des territoires et développement » Université Gaston Berger (UGB), BP 234 Saint Louis, Sénégal, Courriel : ansoumana.bodian@ugb.edu.sn/bodianansoumana@gmail.com
 (2) Faculté des Lettres et des sciences Humaines, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, DAKAR, SÉNÉGAL, Courriel : honore.dacosta@ucad.edu.sn
 (3) IRD, UMR HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier 2, case MSE, place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER cedex 5, FRANCE, Courriel : Alain.Dezetter@ird.fr

Résumé :

Pour atténuer les effets de la péjoration climatique, assurer une meilleure maîtrise des ressources en eaux, et impulser des actions de développement, deux barrages ont été réalisés sur le fleuve Sénégal par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). La gestion de ces ouvrages et des ressources en eau nécessite une bonne caractérisation des formes extrêmes des écoulements que constituent les crues et les étiages. Ainsi, cet article a pour objectif d'analyser les débits de crues et d'étiages du Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal, en amont du barrage de Manantali. Les données hydrologiques exploitées proviennent de la banque de données de l'OMVS et couvre la période 1954-2005 pour Dakka Saidou et 1962-2005 pour Bafing Makana. La méthodologie utilisée s'articule autour des points suivants: (i) constitution d'un échantillon des débits maximums journaliers et calcul des puissances de crue; (ii) ensuite calcul des probabilités de dépassement des débits et des volumes écoulés correspondants; (iii) enfin, calcul des coefficients de tarissement annuels et des volumes d'eaux correspondants ainsi que leurs probabilités de dépassement. L'analyse des résultats montre que l'évolution des chroniques de débits maximums journaliers est pratiquement calquée sur celle de l'écoulement annuel. La valeur moyenne des maxima annuels sur la période d'étude est de 1256 m³/s et 1479,3 m³/s respectivement à Dakka Saidou et à Bafing Makana. Les maxima maximorum sont enregistrés en 1955 et 1967 avec respectivement un débit de 2568 m³/s à Dakka Saidou et de 2428 m³/s à Bafing Makana. Quant aux minima des maxima annuels, ils sont enregistrés pour les deux stations en 1984 avec des valeurs de débits oscillant entre 510 m³/s et 509 m³/s. Les coefficients de puissance de crue sont tous faibles et compris entre 3,5 et 20,6 au niveau des différentes stations et partout inférieurs à 60. Les probabilités de dépassements montrent qu'un débit maximum de 1692,5 m³/s et de 1980 m³/s est dépassé à 10 % respectivement à Bafing Makana et Dakka Saidou lors des crues, et pour les volumes annuels totaux, ils sont dépassés à 10 % entre 10 km³ à Bafing Makana et 9,5 km³ à Dakka Saidou. Les coefficients de tarissement sont proportionnels à la vitesse de vidange des nappes. Les valeurs moyennes autour desquelles oscillent les coefficients de tarissement sont respectivement de 0,022 j⁻¹ à Bafing Makana et 0,013 j⁻¹ à Dakka Saidou. Les valeurs des coefficients de tarissement et des volumes d'eau correspondants à la phase de tarissement ont augmenté durant ces dernières années, ce qui implique une amélioration de la recharge des nappes même si cela n'est pas visible au niveau de l'hydraulicité générale des cours d'eau. Tout comme les débits d'étiages ont été soutenus quelques années au début de la sécheresse par la vidange des réservoirs naturels, il faut à présent quelques années afin de les restaurer. Les probabilités de dépassement à 50 % des volumes écoulés durant la période d'étiage varient entre 2,7 km³ et de 1,3 km³ à Bafing Makana et Dakka Saidou.

Mots-Clés : Fleuve Sénégal, barrage de Manantli, crue, étiage.

Abstract

To reduce the effects of climatic deterioration, improve the management of water resources, and lend impetus to actions of development, the Senegal River Basin Development Authority has built two dams on the Senegal River. The management of these hydraulic structures and water resources requires a good characterization of extreme forms of flows that are floods and low flows. Hence, this article analyzes the flood flows and low flows Bafing, the main tributary of the Senegal River, upstream from Manantali. Hydrological data used are drawn from the Senegal River Basin Development Authority database and covers the period 1954-2005 for Dakka Saidou and 1962-2005 for Bafing Makana. The methodology used is based on the following points: (i) selection of a representative sample of daily maximum flows and power flood calculation, (ii) then calculation flows exceedance probabilities and corresponding flowing volumes, (iii) finally, calculation of coefficients values of the depletion corresponding and their matching probabilities of exceeding water. The analysis of the results has shown that the development of chronic daily maximum flows is practically modeled on the annual flow. As for the absolute minimum of annual maxima, they are recorded in the two stations in 1984 with flow values varying between 510 m³/s and 509 m³/s. The power coefficients of water rising are all rather low and between 3.5 and 20.6 in all sites and they are below 60. The probabilities of exceedance calculated shows that a maximum throughput of 1980 m³/s and 1692.5 m³/s is exceeded and can be estimated by 10 % respectively at Bafing Makana and Dakka Saidou during floods. As for the total annual volumes, their level of excess is 10 % between 10 km³ and 9.5 km³ in Bafing Makana and Dakka Saidou. The depletion coefficients calculated are proportional to the rate of water emptying. Average values around which vary recession coefficients are 0,022 j⁻¹ in Bafing Makana and 0,013 j⁻¹ in Dakka Saidou. There is an increase of the coefficients values of the depletion corresponding to a phase of depletion noticed in recent years volumes of water. This implies an improvement of groundwater recharge during these years even if it cannot be seen at the general runoff streams. Similarly as low flow rates were supported in

recent years (at the beginning of the drought) by emptying natural reservoirs, there must be few years now before they are restored. The exceedance probabilities at 50% for discharged water during the low period vary between 2.7 km³ in Bafing Makana and 1.3 km³ in and Dakka Saidou.

Key-Words: Senegal River, Manantli dam, flood, low water.

Introduction

Long de 1700 km, le fleuve Sénégal draine un bassin versant d'une superficie de 300 000 km², partagé d'amont en aval, par la Guinée, le Mali, le Sénégal et la Mauritanie. Il est formé de plusieurs affluents, dont les principaux sont le Bafing, le Bakoye et la Falémé (figure 1). Ces trois affluents prennent leurs sources en Guinée et forment le haut bassin, qui produit plus de 80 % des apports du fleuve à Bakel (Bamba et Baldé, 2005). Le Bafing, considéré comme la branche mère, prend sa source à 15 km de Mamou dans le massif du Fouta Djallon en Guinée, où l'altitude moyenne est de 1200 m (Noguierma et Niang, 2006).

Le bassin du fleuve Sénégal, situé dans la zone intertropicale a connu une variabilité climatique depuis les années 1970 marquée par une baisse des précipitations. Cette modification climatique se traduit par un accroissement de l'irrégularité interannuelle des pluies et des écoulements de surface (Bodian, 2011). Ainsi, à partir d'un siècle de données de débits annuels de la station de Bakel (considérée comme la station de référence du fleuve Sénégal car étant située à l'aval du dernier affluent important la Falémé) allant de 1904 à 2003, Hubert *et al.* (2007) ont pu identifier quatre grandes ruptures dans les séries chronologiques de débits : la première en 1921-1922 (augmentation de débit), la deuxième en 1938-1939 (diminution de débit), la troisième en 1949-1950 (augmentation de débit) et la quatrième en 1967-1968 (diminution de débit). Cette dernière a entraîné une diminution importante des écoulements de surface avec parfois des situations très sèches comme les années 1983 et 1984 où l'écoulement a même cessé à Bakel en 1984. Les répercussions de la baisse des écoulements a impacté négativement de très nombreux secteurs d'activités tels que : la production agricole, l'industrie, l'hydro-électricité, le tourisme, la santé, l'alimentation en eau potable, la navigation, la conservation de l'écosystème aquatique, etc. (Bodian, 2011).

Pour remédier aux effets des conditions climatiques défavorables, atténuer la réduction dramatique des écoulements, assurer une meilleure maîtrise des ressources en eaux, et impulser des actions de développement, d'importants travaux d'aménagement ont été réalisés sur le fleuve Sénégal. Ainsi, l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) qui regroupe le Mali, la Mauritanie, le Sénégal et depuis 2006 la Guinée Conakry, y a construit deux barrages en 1986 et en 1988 (figure 1).

Le barrage de Diama, à l'embouchure, empêche la remontée d'eau salée et maintient un certain niveau d'eau dans le bief amont de l'ouvrage tandis que celui de Manantali, qui est édifié sur le cours du Bafing, constitue un vaste réservoir permettant la régulation des débits écoulés et la production électrique (Bonneau, 2001). A peine mise en service, la centrale hydroélectrique de Manantali est saturée, du fait de la pression de la demande de plus en plus croissante des utilisateurs. Devant cette situation, l'OMVS a engagé le processus de réalisation des ouvrages de seconde génération (figure 1), des barrages destinés à accroître le potentiel hydro-électrique du bassin et à réguler les affluents non contrôlés.

La mise en place et la gestion de ces ouvrages nécessitent une connaissance des écoulements sous plusieurs contextes climatiques. Ainsi, l'objectif de cet article est d'analyser les débits de crues et d'étiages (les extrêmes de l'écoulement) du Bafing, principal affluent du fleuve Sénégal qui représente entre 40 et 60 % des apports du fleuve Sénégal (Bader *et al.*, 2003). Cela revêt une importance capitale car les crues constituent le risque naturel contre lequel il faut se protéger aussi bien par la prévention que par la prévision. En outre,

l'édification des ouvrages de protection nécessite la détermination du maximum probable des crues que ces ouvrages doivent contrôler (par exemple les hauteurs de digue, les dimensions d'évacuateurs de crues des barrages, la détermination des zones vulnérables aux inondations...etc.). L'étude du tarissement permet de connaître les disponibilités en eau durant les périodes de pénuries pour une meilleure planification de gestion de ces ressources.

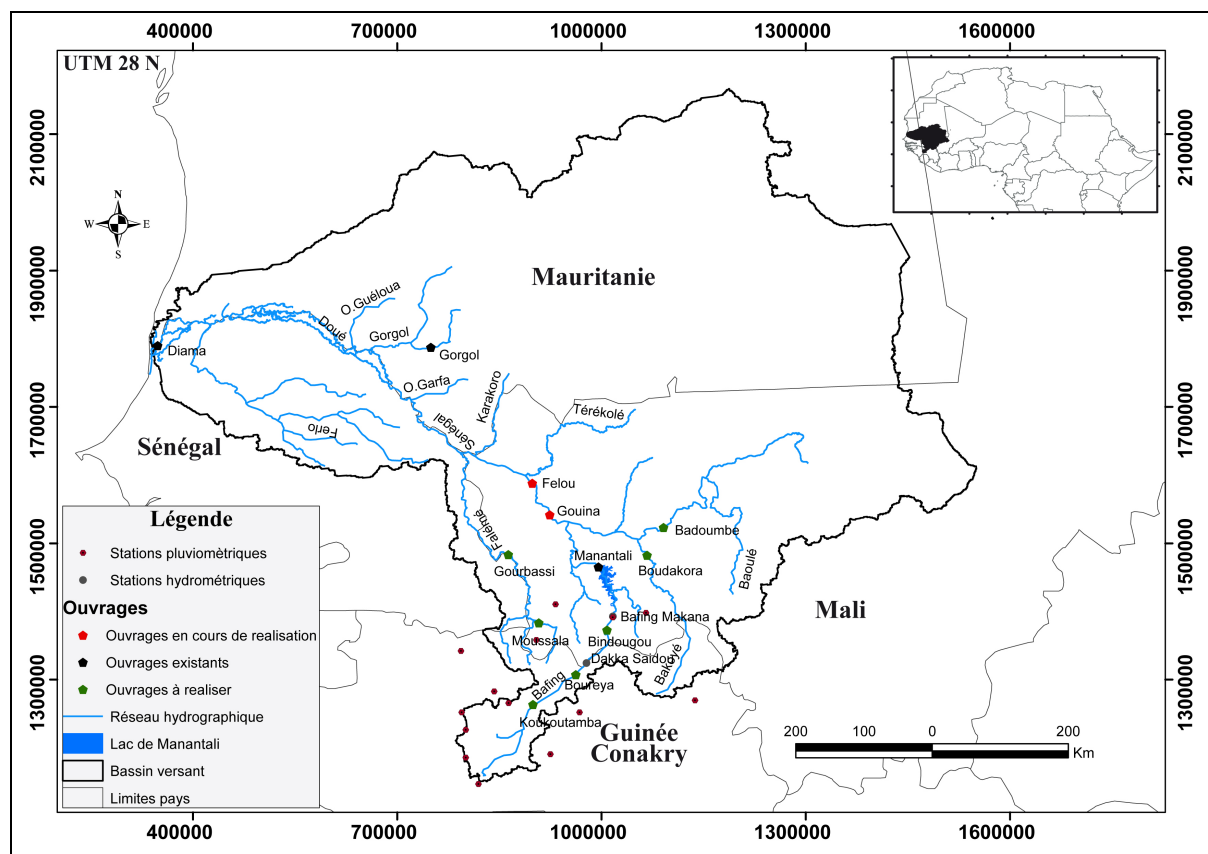


Figure 1: Bassin du fleuve Sénégal, réseau hydrographique, stations hydrométriques et principaux ouvrages

1. Secteur d'étude

Le cadre d'étude s'étend sur la Guinée Conakry et le Mali avec une superficie de 21 290 km² et 15 660 km² respectivement à la station hydrométrique de Bafing Makana et de Dakka Saidou (figure 1). Les traits généraux de cet espace ont été présentés par Bodian *et al.* (2012). Ils se caractérisent par une végétation dense mais qui présente des signes de dégradation due aux effets conjugués des facteurs naturels (sécheresse et érosion) et anthropiques (défrichement, feux de brousse, surexploitation des ressources forestières, surpâturages) (CSE, 2006). La présence d'aquifères est en rapport avec les linéaments (fissures, diaclases...) et le niveau d'altération liés aux processus physico-chimiques (Coly, 1996). A ce titre, Dione (1996) signale que dans le Fouta Djallon, la tectonique et l'altération, assez fréquentes, se traduisent par des réseaux de fractures, de diaclases et de fissures susceptibles d'abriter des aquifères. D'une manière générale, la valeur des indices de pente des deux bassins versants (*indice de compacité de Gravélius*; *longueur du rectangle équivalent*; *largeur du rectangle équivalent*; *indice de pente de Roche*; *indice de pente globale*; *dénivelée spécifique*), calculés à partir des données SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 90 m de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (Farr & Kobrick, 2000; Werner, 2001) par Bodian *et al.* (2012), décroît de l'amont vers l'aval, traduisant l'importance du volume montagneux du Fouta Djallon et la forte incision du relief (tableau I).

Tableau I : Caractéristiques morphologiques des bassins versants (Bodian *et al.*, 2012) : (Kc : indice de compacité de Gravélius ; L (km) : longueur du rectangle équivalent ; I (km) : largeur du rectangle équivalent ; Ip : indice de pente de Roche ; IG (m/km) : indice de pente globale ; Ds (m) : dénivelée spécifique).

Stations	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Kc	L (km)	I (km)	Ip	IG (m/km)	Altitude max, (m)	Altitude min, (m)	Ds (m)
Bafing Makana	Bafing	21290	1092	2,09	468,3	45,5	1,70	2,3	1389	215	336
Daka Saidou	Bafing	15660	868	1,94	218,5	71,7	2,48	4,95	1389	306	619

Du point de vue climatique, le haut bassin du fleuve Sénégal appartient à la zone guinéo-soudanienne caractérisée par une seule saison des pluies d'avril à octobre (Dione, 1996 ; Bodian, 2011 ; Bodian *et al.*, 2012). La pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1923-2005 varie entre 2000 mm au sud du bassin et 1200 mm au nord (figure 2).

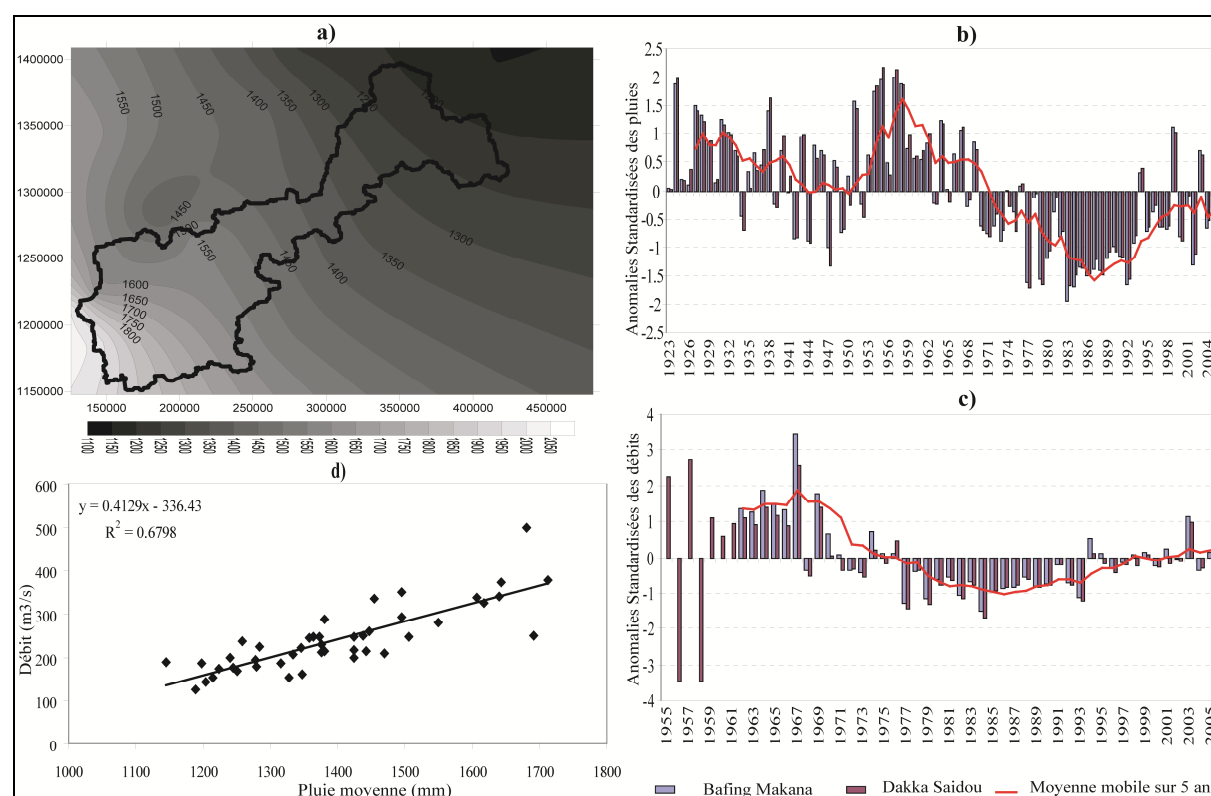


Figure 2: (a) Répartition spatiale de la pluie moyenne annuelle calculée par la méthode du Krigeage pour la période 1923-2005 à partir de 14 stations pluviométriques. (b) évolution inter-annuelle de la pluie moyenne calculée par la méthode du Krigeage. (c) évolution inter-annuelle des modules annuels. (d) corrélation entre la pluie moyenne annuelle et le débit annuel à la station de Bafing Makana.

Elle est due au déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) du sud vers le nord induisant la pénétration de la mousson ouest africaine. Cette dernière est régie par le contraste thermique entre la mer et le continent (Bodian *et al.*, 2012). Sur le plan aérologique, deux masses d'air se confrontent (Dione, 1996): l'un chaud et sec, l'harmattan, provenant du Sahara qui dirige un flux de Nord-Est en saison sèche et l'autre chaud et humide, la mousson venant du golfe de Guinée au Sud-Ouest. Le régime hydrologique du haut bassin est essentiellement pluvial. Ainsi, l'incidence des déficits pluviométriques a été largement amplifiée dans le régime hydrologique (Olivry, 1994).

2. Données et méthodes

2.1. Données

Les données pluviométriques annuelles de 14 stations pluviométriques (figure 1) couvrant la période 1923-2005 proviennent des Directions de la Météorologie Nationale (DMN) de la Guinée et du Mali. Les données hydrologiques utilisées sont issues de la banque de données de l'OMVS et couvrent la période 1952-2005 pour la station de Dakka Saidou et 1961-2005 pour celle de Bafing Makana (voir la carte de localisation des stations hydrométriques à la figure 1). La station de Dakka Saidou présente quatre années incomplètes (1952, 1953, 1956 et 1958) et celle de Bafing Makana une seule année (1961). Ces années lacunaires ne sont pas prises en compte dans la suite de l'étude.

2.2. Méthodes

La crue et l'étiage sont caractérisés par les hautes eaux et les basses eaux. Mais, selon Frécaut (1982), la crue et les hautes eaux diffèrent par leur fréquence, leur durée et les valeurs de débits écoulés ; de même que l'étiage où les très basses eaux se différencient des basses eaux ordinaires ou habituelles par leur gravité, leur durée et leur fréquence.

2.2.1. Les crues

L'étude sur les crues a été menée à l'échelle des débits maximums journaliers. Selon Frécaut (1982), il n'est pas abusif de considérer le maximum annuel atteint comme une variable caractérisant le régime des crues des grands hydrosystèmes qui intègrent la répartition spatio-temporelle des précipitations et des caractéristiques physiographiques des bassins. Ainsi, après la constitution de l'échantillon des débits maximums journaliers, les puissances de crue ont déterminées par le coefficient de Myer-Coutagne-Pardé (Pardé, 1962) ou encore coefficient de puissance de crue noté A dont la formule est la suivante :

$$A = \frac{Q_{(m^3/s)}}{\sqrt{S}}$$

Où $Q_{m^3/s}$ est le débit maximal de la crue, S, la superficie du bassin versant. En effet, en diminuant l'influence de la dimension des surfaces réceptrices, ce quotient rend plus significatives les comparaisons d'un bassin à l'autre (Ketrouci *et al.*, 2012). Ensuite, les probabilités de dépassement ont été calculées, aussi bien pour les débits que pour les volumes écoulés correspondants, pour chaque seuil, en utilisant le logiciel CPT (*Climate Predictability Tool*) mis au point par IRI (*International Research Institute for climate prediction*) de l'Université de Columbia et en libre service sur la toile (<http://iri.columbia.edu/outreach/software/>)

2.2.2. Les étiages

La séparation des écoulements n'est guère possible pour un grand cours d'eau et seule l'analyse du tarissement principal (Figure 3), peut rendre compte de l'importance des volumes restitués par les nappes du bassin (Olivry, 1996). Celui-ci correspond à la période où la vidange des nappes souterraines (Mahé *et al.*, 2000) durant laquelle tout écoulement dans le cours d'eau provient des ressources d'eau souterraine (car il y a absence de précipitation durant cette période). Pour les cours d'eau tropicaux, cette décroissance des débits suit une loi exponentielle classique (Olivry, 1996 ; Bamba *et al.*, 1996 ; Malanda Nimy, 1999 et 2009 ; Vamoryba *et al.*, 2008) qui est de la forme :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

Avec Q_0 : débit au jour j du tarissement (à t_0) ; Q_t : débit au jour $j+t$; α : coefficient de tarissement. Le coefficient de tarissement dépendant des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère qui a la dimension de l'inverse d'un temps. Il est alors possible d'estimer approximativement l'évolution du volume (V_0) d'eau du bassin hydrogéologique de drainage par le cours d'eau grâce à la relation suivante (Malanda Nimy, 2009):

$$V_0 = \frac{Q_0}{\alpha}$$

Ce volume représente la quantité d'eau que la nappe souterraine donnerait au cours d'eau si la période des basses eaux se poursuivait indéfiniment. Ces différentes lois intégrées dans le logiciel Hydraccess (Vauchel, 2000 et 2004) ont permis de calculer les coefficients de tarissement annuels et les volumes d'eaux correspondants. Enfin, les probabilités de dépassement des volumes écoulés pendant l'étiage ont été calculées pour chaque seuil en utilisant, comme pour les crues, le logiciel CPT.

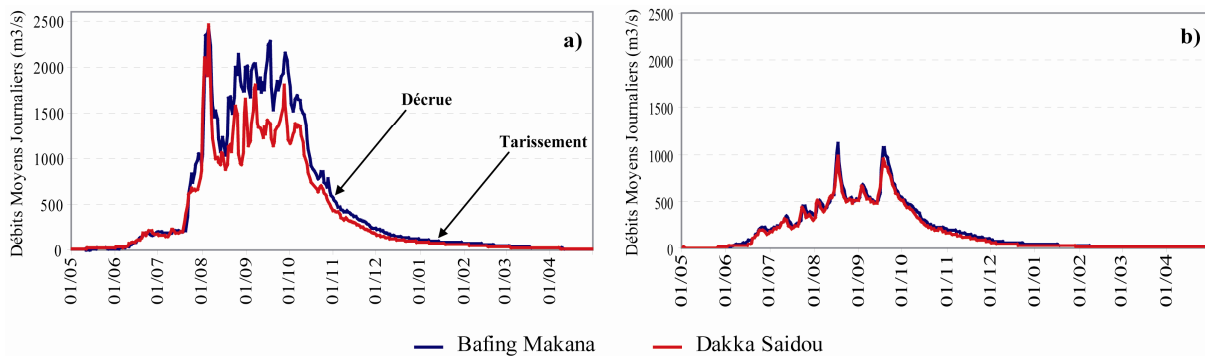


Figure 3: Hydrogramme du Bafing à la station de Bafing Makana et Dakka Saidou en forte (a) et faible (b) hydraulicité

3. Résultats

3.1. Evolution interannuelle des crues et des volumes d'eau correspondants

La variabilité interannuelle des crues a été mise en évidence par l'analyse de la courbe d'évolution des débits de crues des deux sous-bassins versants (figure 4). La valeur moyenne des débits maximums journaliers sur la période d'étude est de 1479,3 m³/s et 1256 m³/s respectivement à Bafing Makana et à Dakka Saidou. Les maxima annuels journaliers ont été enregistrés en 1955 et 1967 avec respectivement 2568 m³/s à Dakka Saidou et 2428 m³/s à Bafing Makana (Figure 4). Quant aux minima annuels journaliers, ils sont enregistrés pour les deux bassins en 1984 avec des valeurs entre 510 m³/s et 509 m³/s. La chronique de débits maximums annuels montre une évolution historique pratiquement calquée sur celle de l'écoulement annuel (Figure 4).

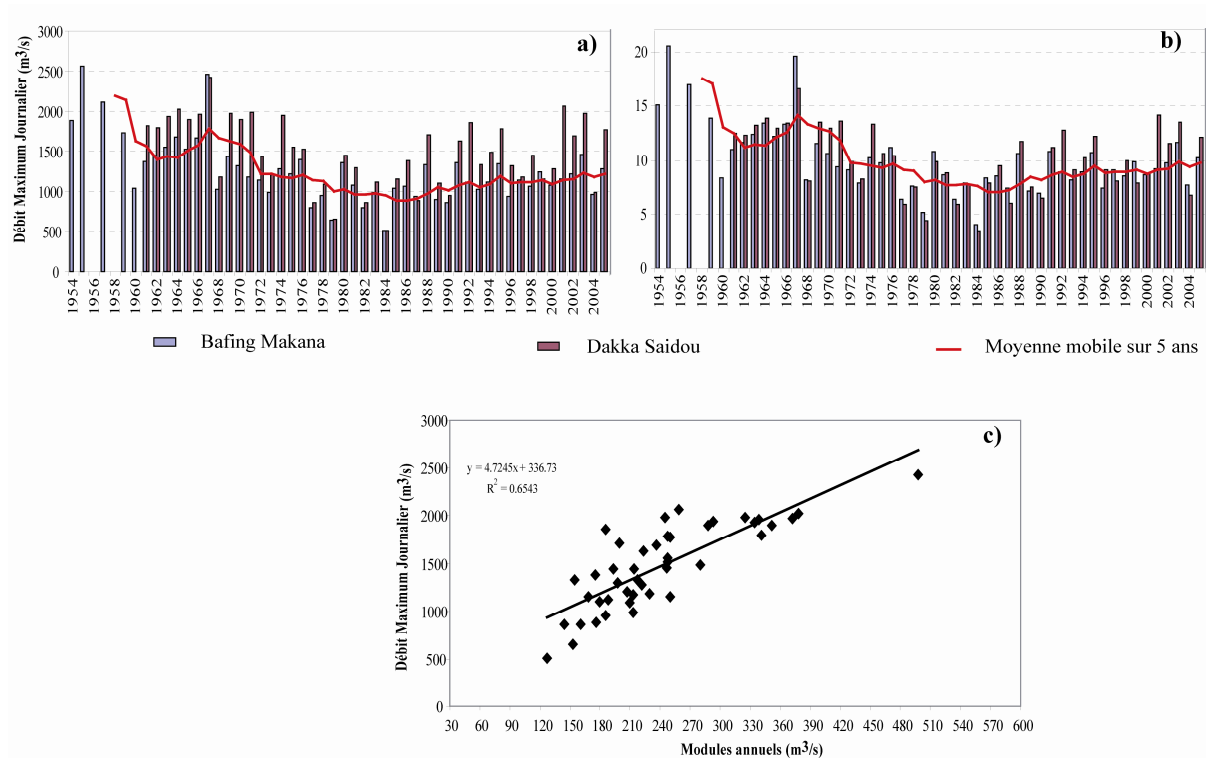


Figure 4: (a) Variation des débits maximum journaliers. (b) Variation de la puissance des crues. (c) corrélation entre les débits maximums journaliers et les modules annuels

Les coefficients de puissance de crue sont tous faibles au niveau des stations du haut bassin. Ils sont compris entre 3,5 et 20,6 aux différentes stations (figure 4) et partout inférieurs à 60. Suivant la qualification de Myer, Coutagne et Pardé (Pardé, 1962), une crue est considérée comme médiocre quand elle a un coefficient A inférieur à 60. Cette médiocrité de la puissance des crues est une caractéristique du continent africain aussi bien en Afrique sèche qu'en Afrique humide. En Afrique sèche les précipitations restent modestes et l'aptitude à l'écoulement du bassin versant est faible. En Afrique humide, les précipitations plus abondantes produisent une onde de crue largement étalée dans le temps du fait de la végétation dense des bassins (Olivry, 1994). Au cours de la période sèche, l'affaiblissement de la puissance des crues n'a fait que s'accroître par rapport aux valeurs moyennes. Les probabilités de dépassements calculées (figure 5) montrent qu'un débit maximum de 1980 m³/s et de 1692,5 m³/s est dépassé à 10 % respectivement à Bafing Makana et à Dakka Saidou lors des crues. Les volumes annuels totaux sont dépassés à 10 % entre 10 km³ à Bafing Makana et 9,5 km³ à Dakka Saidou.

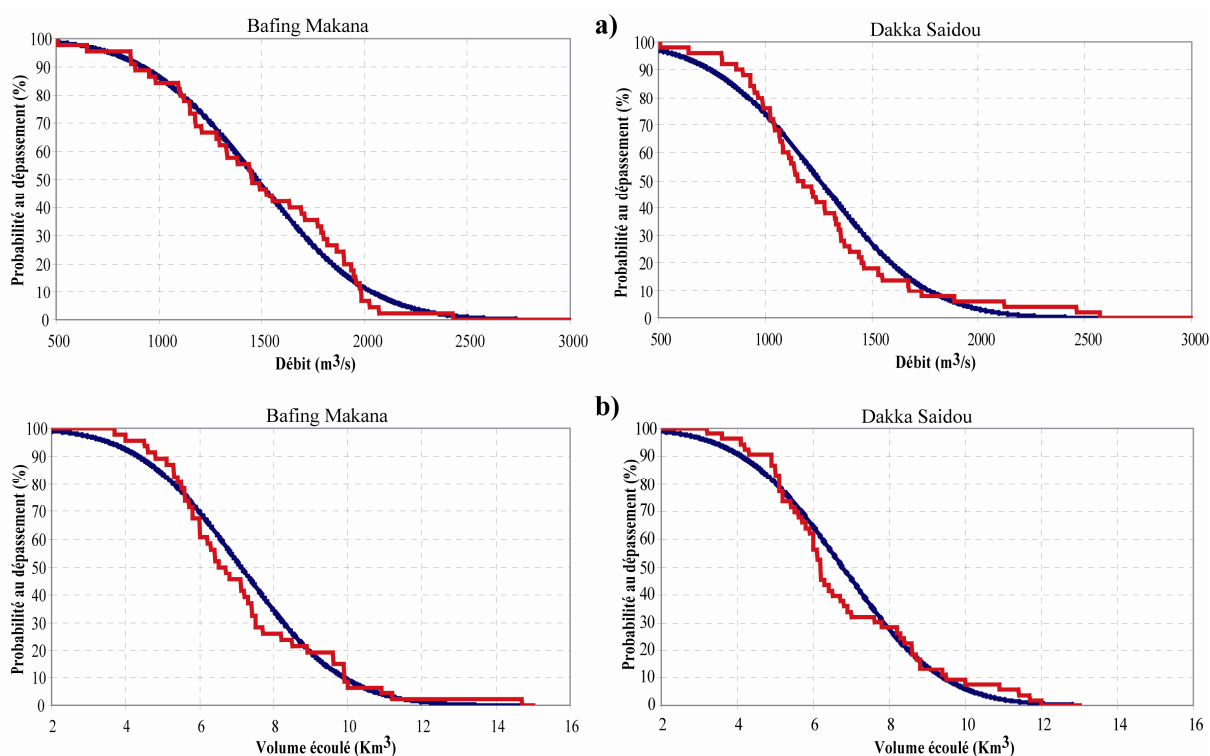


Figure 5: (a) Probabilité de dépassement des débits maximums journaliers. (b) probabilité de dépassement des volumes écoulés en période de crue

3.2. Evolution interannuelle des coefficients de tarissement et des volumes des réserves correspondantes

L'évolution des coefficients de tarissement annuels fait ressortir trois phases pour la station de Bafing Makana (figure 6): la période 1962-1971 avec une moyenne de $0,020 \text{ j}^{-1}$, la période 1972-1994 avec une moyenne de $0,025 \text{ j}^{-1}$ et enfin la période 1995-2005 avec une moyenne de $0,022 \text{ j}^{-1}$. Par contre, à la station de Dakka Saidou, qui a la série chronologique la plus longue, l'évolution des coefficients de tarissement fait ressortir deux périodes : une première période allant de 1952 à 1977 avec une moyenne de $0,013 \text{ j}^{-1}$ et une seconde période allant de 1978 à 2005 avec une moyenne de $0,014 \text{ j}^{-1}$. Les courbes de tendance montrent que les coefficients de tarissement varient faiblement d'une manière générale sur l'ensemble de la période d'étude avec cependant une légère tendance à la hausse pour les deux stations. Toute augmentation des coefficients de tarissement s'accompagne d'une diminution plus rapide des réserves d'eau susceptible d'être drainées par le fleuve pendant la période de tarissement (figure 6).

L'évolution des coefficients de tarissement traduit une plus grande sollicitation des réserves d'eau souterraine entre 1977-1991. Cela est une conséquence de la sévérité du déficit pluviométrique sur le haut bassin pendant cette période (Bodian *et al.*, 2011) qui a entraîné une diminution du volume des réserves dans les nappes souterraines. Le coefficient de tarissement est proportionnel à la vitesse de vidange de la nappe. Il augmente en période de sécheresse et diminue quand il y a recharge de la nappe. Les valeurs des coefficients de tarissement et des volumes d'eau correspondants à la phase de tarissement ont augmenté au cours des dernières années. La figure 6 donne aussi les probabilités de dépassement des volumes écoulés durant la période d'étiage. Sur l'ensemble de la période, un volume total annuel de $2,7 \text{ km}^3$ et de $1,3 \text{ km}^3$ est dépassé à 50 % respectivement à Bafing Makana et Dakka Saidou.

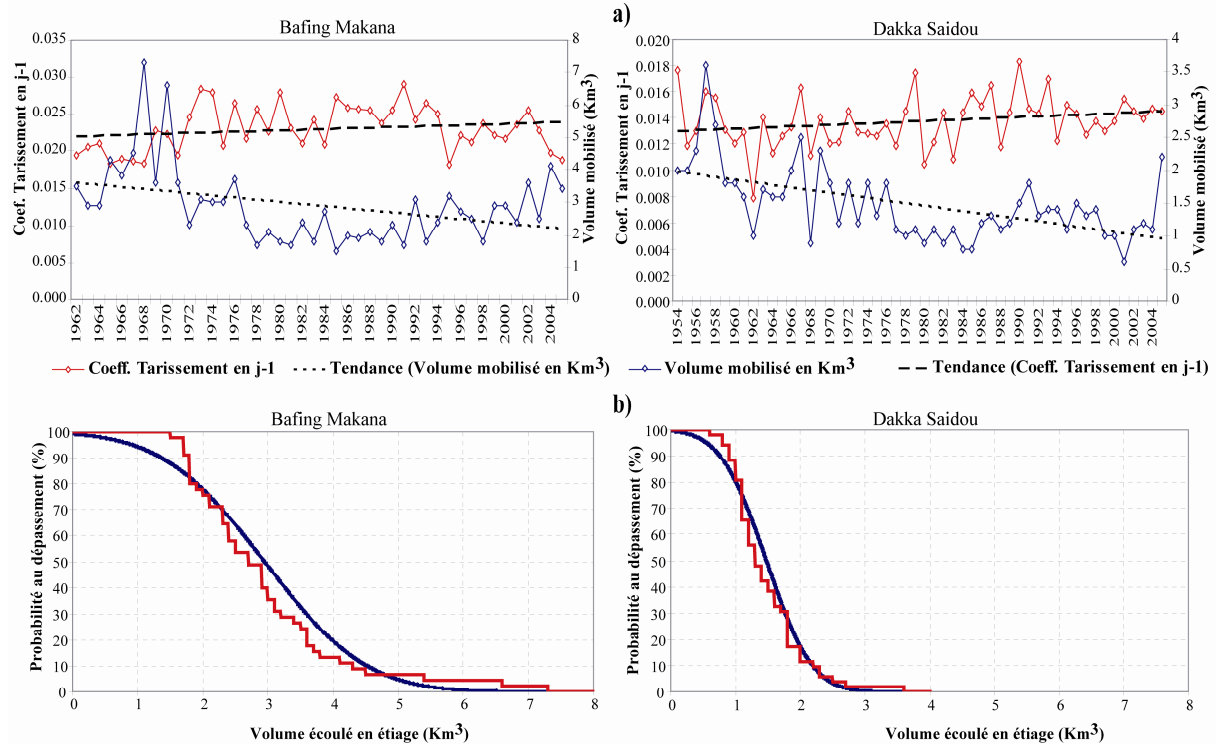


Figure 6: (a) Variabilité inter-annuelle des coefficients de tarissements et des volumes mobilisés (b) Probabilité de dépassement des volumes écoulés en étiage

Conclusion et discussion

Cette étude a permis de caractériser les débits de crues et d'étiages du Bafing en amont du barrage de Manantali a des fins d'exploitation pour une meilleure gestion des événements hydrologiques extrêmes. L'analyse des crues montre que leur valeur moyenne varie entre 1479,3 m³/s à Bafing Makana et 1256 m³/s à Dakka Saidou. Les coefficients de puissance de crue sont tous médiocres selon la qualification de Myer, Coutagne et Pardé (Pardé, 1962) car inférieurs à 60. Un débit maximum de 1980 m³/s et de 1692,5 m³/s est dépassé à 10 % respectivement à Bafing Makana et Dakka Saidou en période de crues. Ces débits correspondent à un volume annuel de 10 km³ à Bafing Makana et de 9,5 km³ à Dakka Saidou.

Pour cette analyse des crues une méthode d'échantillonnage classique a été utilisée. Elle consiste à retenir uniquement le débit le plus élevé mesuré chaque année appelé « série annuelle ». Toutefois, Ketrouci *et al.*, (2012), soulignent que ce type d'échantillonnage présente plusieurs inconvénients : (i) l'échantillon obtenu n'est pas toujours représentatif des plus fortes crues et il peut ne pas être homogène ; (ii) le fait de retenir un nombre identique de valeurs par une période fixe (une valeur par an) peut conduire à sélectionner des valeurs peu intéressantes lors des années sèches et ignorer des valeurs qui ont eu la « malchance » d'arriver en deuxième ou troisième position durant les années humides (Lang, 1996) ; (iii) il interdit l'étude des crues survenant plus d'une fois par an (Lang, 1996). Les différentes limites de ce type d'échantillonnage ont conduit ces auteurs à s'intéresser dans leur étude à la méthode des valeurs supérieures à un seuil, encore appelé méthode des excès ou méthode *Peaks Over Threshold* (POT) (Ketrouci *et al.*, 2012). Selon eux l'intérêt de cette méthode, par rapport à la méthode d'échantillonnage utilisée dans cette étude est une estimation plus précise des quantiles de crue. Cependant, Lang (1996) précise qu'avec une série de taille suffisante (au moins dix années d'observations), comme il en est dans le cas de cette étude avec 49 ans pour la station de Dakka Saidou et 43 ans pour la station de Bafing Makana, des résultats fiables peuvent être obtenus pour l'analyse des crues avec un échantillon constitué des débits maximums journaliers.

Les coefficients de tarissement sont proportionnels à la vitesse de vidange des nappes. Ils varient entre $0,022 \text{ j}^{-1}$ à Bafing Makana et $0,013 \text{ j}^{-1}$ à Dakka Saidou. Toute augmentation des coefficients de tarissement s'accompagne d'une diminution plus rapide des réserves d'eau susceptible d'être drainées par le fleuve pendant la période de tarissement. Cette évolution des coefficients de tarissement traduit une plus grande sollicitation des réserves d'eau souterraine entre 1977-1991. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Malanda Nimy (2009) sur le bassin versant de la Gambie à Kédougou, Olivry *et al.* (1993) sur le Mali et Amoussou *et al.*, (2012) sur le bassin du Couffo à Lanta au Bénin. Ils témoignent de l'effet cumulé des déficits pluviométriques des décennies 1970 et 1980 et de la sensibilité des réserves d'eau souterraines aux variations de pluie (Amoussou *et al.*, 2012).

Bibliographie

- Amoussou E, Camberlin P, Mahé G, 2012 : Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Afrique de l'Ouest), *Hydrological Sciences Journal*, DOI : **10.1080/02626667.2011.643799**
- Bader J.C, Lamagat J.P, Guigen N, 2003 : Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrological Sciences Journal*, **vol.48** (4) 525-538
- Bamba F, Baldé C, 2005 : Etude du système guinéen actuel de contrôle des ressources en eau (quantité/qualité) en général et du fleuve Sénégal en particulier. Rapport OMVS, Dakar, 111 pages
- Bodian A, Dezetter A, Dacosta H, 2012 : Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Climatologie*, **vol. 9** (2012), 109-125
- Bodian A., 2011 : Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 288 pages
- Bodian A., Dacosta H., Dezetter A., 2011 : Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo*, **V**, 116-133.
- Bonneau M, 2001 : Besoins en eau de l'agriculture irriguée et de l'agriculture de décrue dans la vallée du fleuve Sénégal. Rapport de stage ; *IRD* ; 113 pages
- Coly A, 1996 : Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée. Thèse 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 308 pages
- CSE, 2006 : Etude d'impacts des feux de brousses sur l'eau, les sols et la végétation dans la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal. Rapport OMVS Dakar, 133 pages
- Dione O, 1996 : Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, France, 477 pages
- Farr T.G, Kobrick M, 2000: Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *Amer. Geophys. Union Eos*, **81**, 583-585
- Hubert P, Bader J.C, Benddjoudi H, 2007: Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal, *Journal des Sciences Hydrologiques*, **52** (1) février 2007
- Ketrouci K, Meddi M, Abdesselam B, 2012 : Etude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin-versant de la Tafna. *Sécheresse* **23**: 297-305. Doi : 10.1684/ sec.2012.0353
- Lang M, 1996: Présentation du thème crue du projet Friend-Amhy. XXII^e Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 10-11 octobre, (non publié)
- Mahé G, Olivry J.C, Dessouassi R, Orange D, Bamba F, Servat E, 2000 : Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, *Sciences de la Terre et des planètes*, **330**, 689-692
- Malanda E.N, 1999 : Etude du régime hydrologique du fleuve Gambie : Caractérisation des étiages et statistique des déficits. Mémoire de D.E.A FST, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal, 73 pages

- Malanda E.N, 2009 : Etude statistique et modélisation pluie-débit à la l'aide des modèles conceptuels globaux GR4J et GR2M : Applications sur le bassin versant du fleuve Gambie à la station de Kédougou. Thèse 3^{ème} cycle, FST, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal, 195 pages
- Nonguierma A, Niang A, 2006 : Etude cartographique de la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal. Identification des besoins cartographiques et élaboration des TDR pour la cartographie et l'interprétation. Rapport OMVS Dakar, 85 pages
- Olivry J.C, 1996 : Etude régionale sur les basses eaux ; les effets durables du déficit des précipitations sur les étiages et les tarissements en Afrique de l'ouest et du centre. XII^{èmes} journée hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, 10-11 oct, 14 pages
- Olivry J.C, 1994 : De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. In : Vivian H, ed. Potamologie d'hier et d'aujourd'hui, aménagements et cours d'eau. Grenoble : Institut de Géographie Alpine
- Olivry J.C, Bricquet J.P, Mahé G, 1993 : Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? In. J.S. Gladwell, ed., Hydrology of warm humid region. Wallingford, UK; IAHS Press, IAHS Publ. **216**, 67-78
- Pardé M, 1962 : Sur les crues exorbitantes qu'éprouvent certaines rivières des Etats-Unis, notamment au Texas. *International Association of Scientific Hydrology*, **Bulletin 7**, 17-33
- Vamoryba F, Goula B.T.A, Kouassi F.W, Doumouya I, Koffi K, Kamagaté B, Savané I, Srohomou B, 2008 : Variabilité interannuelle et saisonnière de l'écoulement de quatre cours d'eau de l'ouest côtier de la Côte 'Ivoire (Tabou, Dodo, Néro et San Pédro) dans un contexte de baisse de la pluviométrie en Afrique de L'Ouest. *European Journal of Scientific Research*. ISSN 1450-216X **Vol. 21 N° 3**, 406-418
- Vauchel P, 2000-2004. Hydraccess : Base de données hydrométriques sous Access 2000. Dakar, IRD , 21 pages.
- Werner M, 2001: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview. *J. Telecom. (Frequenz)*, **55**, 75-79