

Approche statistique d'évaluation de la dynamique des débits du bassin versant du Sassandra dans un contexte de changement climatique et de modifications physiques du milieu

Sammuel Ange LIDEHI¹, Yao Alexis N'GO¹, Gneneyougo Emile SORO¹ et Tié Albert GOULA¹

Résumé

Cet article traite de la dynamique de l'écoulement de surface du bassin versant du Sassandra dans un contexte de changement climatique, de changements d'occupations et d'utilisations des sols. Différentes méthodes statistiques appliquées à dix séries hydrométriques du bassin versant du Sassandra, montrent une baisse générale de l'écoulement annuel entre 1970 et 1993. La régression de la pluviométrie sur le bassin du Sassandra à partir de 1970 a fait baisser l'écoulement annuel de 23 à 36%. Le barrage d'approvisionnement en eau potable de Séguéla et le barrage hydroélectrique de Buyo ont contribué à une inversion du régime hydrologique de la Lobo et du Sassandra. Ainsi, en période déficitaire, l'apport des basses et moyennes eaux a augmenté de 6% sur la Lobo à Nibéhibé, et de 60 et 40% sur le Sassandra à Soubré et à Gaoulou. L'apport des hautes eaux a par contre baissé de 4% sur la Lobo à Nibéhibé, et de 60 et 53% sur le Sassandra à Soubré et à Gaoulou. A partir de 1994, l'écoulement annuel de la plupart des cours d'eau du bassin versant du Sassandra est devenu excédentaire par rapport à celui des périodes déficitaires. L'écoulement du N'Zo à Kahin a été le plus excédentaire (+79%). Les contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux des cours d'eau ont augmenté de 16 à 41% tandis celles des hautes eaux sont en baisses de 6 à 27% après 1994.

Mots clés : débits, bassin versant, changement climatique, modifications physiques du milieu, Sassandra.

Abstract

Statistical approach to evaluate the dynamics of the sassandra watershed flows in a context of climate change and physical modifications of the environment

This article deals with the dynamics of surface runoff in the Sassandra catchment in a context of climate change and changes in land use and occupancy. Different statistical methods applied to ten hydrometric series of the Sassandra catchment show a general decrease in annual runoff between 1970 and 1993. The decline in rainfall in the Sassandra basin from 1970 onwards has reduced the annual runoff by 23-36%. The Séguéla drinking water supply dam and the Buyo hydroelectric dam have contributed to a reversal of the hydrological regime of the Lobo and Sassandra rivers. Thus, during the deficit period, the low and medium water input increased by 6% on the Lobo at Nibéhibé, and by 60 and 40% on the Sassandra at Soubré and Gaoulou. High water inflow, on the other hand, decreased by 4% on the Lobo at Nibéhibé, and by 60 and 53% on the Sassandra at Soubré and Gaoulou. From 1994 onwards, the annual runoff of most of the rivers in the Sassandra catchment area has been in surplus compared to deficit periods. The flow of the N'Zo at Kahin was the most surplus (+79%). The contributions to the annual flow of low and medium water streams increased from 16 to 41%, while those of high water decreased from 6 to 27% after 1994.

Key words: flows, watershed, Sassandra, climate change, physical changes in the environment.

¹Laboratoire de Géosciences et Environnement, Université NANGUI ABROGOUA, Abidjan, Côte d'Ivoire.
Auteur : Sammuélange Lidehi

Téléphone : +2250709018142 / +2250584209906

E-mail : sammuelange@gmail.com

I. INTRODUCTION

La zone ouest africaine est l'une des régions les plus vulnérables à la variabilité et au changement climatiques (Tirogo, 2016). Elle connaît une forte diminution de la pluviométrie avec une rupture nette autour des années 1970 (Paturel *et al.*, 1998 ; Le Barbé *et al.*, 2002). Les résultats obtenus par le programme d'Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRique de l'ouest non sahélienne (ICCARE) à partir des traitements statistiques et cartographiques de séries chronologiques de précipitations annuelles s'étendant sur la période 1950-1989 montrent que la sécheresse s'est amplifiée à l'ouest et dans les régions nord proches du Sahel au cours des années 1980 (Servat *et al.*, 1996). La réponse des systèmes hydrologiques à cette variabilité de la pluviométrie se caractérise par une diminution claire des débits dans une proportion plus importante que les précipitations (Mahé, 2009 ; Descroix *et al.*, 2015). Après les années 1990, s'amorce une reprise des précipitations qui demeurent cependant déficitaires par rapport à la moyenne antérieure aux années 1970 (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Lebel et Ali, 2009).

En Côte d'Ivoire, le régime pluviométrique est également caractérisé par une forte variabilité spatio-temporelle se traduisant par une baisse générale de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 (Goula *et al.*, 2006, Kouakou *et al.*, 2007, Kanohin *et al.*, 2009, Yao *et al.*, 2012, Fadika, 2012 ; N'Go, 2015 ; Yao, 2015). Ce déficit pluviométrique a engendré une sécheresse qui est à l'origine d'une forte baisse des débits des cours d'eau et des niveaux des aquifères (Kouakou, 2011 ; N'Go *et al.*, 2013 ; N'Go, 2015 ; Yao, 2015). L'intensification de la sécheresse au cours de la décennie 1980 (Santé *et al.*, 2019) surtout dans le Nord de la Côte d'Ivoire est à l'origine d'un impressionnant mouvement migratoire de populations venues pour coloniser des terres fertiles dans les régions forestières du Centre-Ouest et du Sud-Ouest (Ibo, 2007). Il s'en suit la création d'une nouvelle boucle du cacao dans la région de Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Cette démographie galopante associée aux intenses activités humaines effectuées dans ces régions a engendré une forte pression sur les ressources en eau du bassin. Aussi, les besoins en eau sont-ils devenus de plus en plus important (Yao, 2015) alors que le risque de pénurie d'eau est réel d'autant que les

besoins en eau ne cessent d'augmenter (Lang, 2011).

Des études réalisées ces dernières années sur le climat du bassin versant du Sassandra ont révélé trois périodes d'apparition de ruptures dans les séries pluviométriques du bassin du Sassandra. Il s'agit de la rupture localisée autour de l'année 1960 (Servat et Sakho, 1995 ; Brou, 1997 ; Konan, 2002) aux stations de Man et de Gagnoa où la rupture est observée en 1966, la rupture localisée autour des années 1970 (Paturel *et al.*, 1996 ; Aka *et al.*, 1996 ; Servat *et al.*, 1998, Konan, 2002) aux stations de Soubré (1970), Daloa (1971), Duékoué et Guiglo (1968-1969) et la rupture détectée autour des années 1980 (Konan, 2002 ; Ardoin, 2004) aux stations de Sassandra et d'Odienné. Ces ruptures ont également entraîné des déficits pluviométriques variant entre 16% (Daloa) et 23% (Odienné).

La dégradation du couvert végétal du bassin versant du Sassandra s'est traduite par une reprise de la dynamique des écoulements est observée au tour de 1994 (Fadika, 2012 ; Yao *et al.*, 2012 ; N'Go, 2015) alors que les pluies sont toujours en baisses à Gagnoa (1970 à 2000), Odienné (1983 à 2003) et Sassandra (1982 à 2000) par rapport à la moyenne de la période 1970-2015 (Anouman, 2020). Une reprise de la pluviométrie caractérisée par des indices pluviométriques excédentaires a été observée entre 2001 et 2015 à Gagnoa, entre 2004 et 2015 à Odienné et Sassandra et entre 2008 et 2015 par rapport à la pluie moyenne de la période 1970-2015 (Anouman, 2020).

La région de Soubré située dans le sud du bassin versant du Sassandra est le dernier front pionnier de la Côte d'Ivoire et dispose du plus grand barrage hydroélectrique du pays. Les déficits pluviométriques pénalisent fortement l'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique (Nicholson *et al.*, 1988 ; Konan, 2002 ; Brou *et al.*, 2005).

Afin de satisfaire les besoins en eau des populations pour la consommation, l'irrigation des terres agricoles, la production halieutique et d'électricité, 12 barrages ont été disposés sur toute la longueur du bassin. Parmi ceux-ci, figurent le barrage d'approvisionnement en eau potable de Séguéla mis en service en 1967 sur la Lobo et le barrage hydro-électrique de Buyo mis en fonction depuis 1981 sur le fleuve Sassandra. En aval de ce dernier, le plus grand barrage hydro-électrique de la Côte d'Ivoire d'une capacité de 275 mégawatts a été mis en service en 2017 sur le même fleuve dans la région de Soubré. A sept (7) kilomètres en aval du barrage de Buyo, le barrage hydro-électrique de Gribo Popoli d'une capacité de 112 mégawatts est en construction. Ces trois barrages ont été construits sur le fleuve Sassandra alors que la simulation du fonctionnement du bassin du Sassandra en amont de Buyo révèle d'importantes chutes de production du barrage de Buyo et un tarissement des cascades et un tronçonnement de la plupart des cours d'eau depuis 1983 (Saley, 2003). Aussi, les aménagements hydrauliques réalisés dans le but de relever les grands défis de la gestion des ressources en eau entraînent-ils en général une perte d'eau dans le chenal, principalement due à l'évaporation des eaux de surface dans les réservoirs ou à l'irrigation (Brandt, 2000 ; Ibanez et Prat, 2003 ; Graf, 2005). La modification des fluctuations des hauteurs d'eau des bassins versants a en plus des conséquences sur la morphologie des cours d'eau, des répercussions écologiques et socio-économiques importantes. Il est pour cela primordial de maîtriser le flux des cours d'eau en évaluant de façon continue leurs variations dans le temps et dans l'espace. Ce travail vise à caractériser la dynamique de l'écoulement de surface du bassin versant du Sassandra dans

un contexte des changements climatiques et des modifications physiques du milieu.

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant du Sassandra couvre une partie de la Guinée et de la Côte d'Ivoire. C'est la partie du bassin versant du Sassandra situé en Côte d'Ivoire entre la longitude 5°75' et 8°16' ouest et la latitude 5° et 9°75' nord qui constitue notre zone d'étude. Elle couvre une superficie totale de 74,500 km² et se trouve entre les bassins du Cavally à l'ouest, du Bandama à l'est et se termine au sud entre ceux des petits fleuves côtiers (Figure 1). Il est couvert par des différentes régions jouissant des quatre régimes pluviométriques observables sur l'ensemble du pays. Le régime de montagne couvre les régions montagneuses de Man, Danané et Toulepleu situées à l'Ouest de la Côte d'Ivoire avec une pluviométrie annuelle qui varie entre 1600 et 2000 mm (N'Go, 2015). Le régime équatorial de transition englobe le sud du bassin. La pluviométrie annuelle dans cette zone varie entre 1400 et 2200 mm. Le régime équatorial de transition atténué s'étend aux régions de Touba, Séguéla, Daloa et Soubré avec une pluviométrie annuelle comprise entre 1000 à 2000 mm. Le régime tropical de transition couvre la zone nord du bassin. Il est caractérisé par une pluviométrie annuelle comprise entre 1000 et 1600 mm (Soro, 2011). Le fleuve Sassandra a comme principaux affluents les rivières Bafing et N'Zo en rive droite et, les rivières Lobo et Davo en rive gauche. Les sols du bassin versant sont généralement accompagnés par le complexe de sols podzoliques rattachés à la basse Côte d'Ivoire (Perraud, 1971). L'ensemble du bassin versant du Sassandra est sur le socle ancien (formation du précambrien inférieur et moyen) et dispose de quelques pointements de dolérites et de basaltes datés du primaire (Camus, 1969). Le bassin versant du Sassandra présente un relief monotone résultant essentiellement de l'érosion des chaînes montagneuses ayant évoluées en pénéplaine. Les altitudes diminuent de manière graduelle de 500 m d'altitude au nord à moins de 50 m au Sud (Ardoin, 2004). La température moyenne annuelle dans le sud du bassin à Sassandra est de 25° C, alors que dans le nord elle est de 26°C. La végétation du bassin peut être subdivisée en deux domaines caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes : le domaine soudanais et le domaine guinéen. Le domaine soudanais comprend des formations forestières et savaniques juxtaposés dans la haute Côte d'Ivoire. Du sud vers le nord de la basse Côte d'Ivoire, le domaine guinéen est couvert de savanes de basse côte, de forêt ombrophile, de forêt mésophile et de forêt montagnard (Konan, 1990). Sur l'ensemble du bassin, au total douze barrages ayant différents usages ont été construits. Avant la mise en service du barrage hydro-électrique de Buyo en 1981, 74 % de la superficie de l'espace Buyo étaient couverts de forêts denses dont moins de 25 % étaient à peine effleurés par les activités humaines. Les encadreurs du monde rural reconnaissent que la forêt de la région de Buyo a perdu 90 % de ses ressources végétales et animale après la mise à l'eau du barrage hydro-électrique de Buyo (Agbri, 2011).

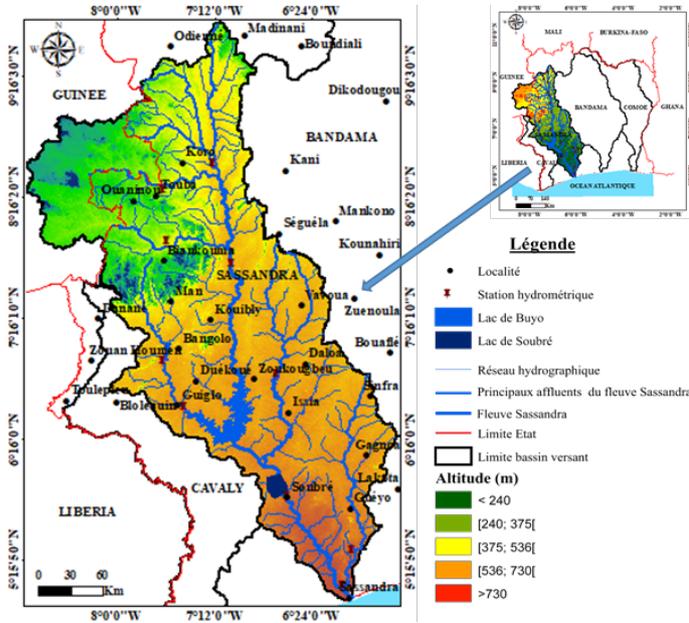


Figure 1: Localisation géographique du bassin versant du Sassandra en Côte d'Ivoire

III. DONNEES

Les données utilisées sont des débits journaliers de 10 stations disposées sur les principaux cours d'eau du bassin versant du Sassandra. Ces données sont issues de la base de données de la Direction de l'Hydrologie de Côte d'Ivoire.

IV. METHODES

L'approche méthodologique est basée sur l'analyse des tests statistiques d'homogénéité des séries hydrométriques annuelles, et le calcul des variations moyennes de l'écoulement annuel, saisonnier et journalier des périodes homogènes.

IV.1. Détection de rupture dans les séries hydrométriques annuelles par le test basé sur la distribution des sommes cumulées

L'objectif est de vérifier l'homogénéité des séries hydrométriques. Le test basé sur la distribution des sommes cumulées a été utilisé pour détecter les ruptures dans les séries hydrométriques annuelles. Ce test non-paramétrique a été utilisé par plusieurs auteurs (Rome *et al.*, 2015 ; El Fallah *et al.*, 2017 ; Qadem, 2019, Anouman *et al.*, 2019) pour détecter des changements brusques dans les séries hydroclimatiques. Ce test est basé sur l'hypothèse que le nombre de valeurs dans la série en dessous de la médiane et le nombre de valeurs au-dessus de la médiane sont les mêmes. La statistique du test est calculée à partir de la somme cumulée de la fonction signe de la différence entre les valeurs observées et la médiane est définie comme suit (McGilchrist et Woodyer, 1975) (Equation 1) :

$$|KS| = \frac{1}{n} \max_{1 \leq k \leq n} \left| \sum_{i=1}^k \text{sign}(a_i - M) \right| \quad \text{Eq: 1}$$

Avec KS : statistique du test, a_i : valeur de la variable d'étude, M : Médiane ou moyenne de la série de variable.

Considérant $X = a_i - M$, $\text{sign}(X)$ est défini par :

$$\text{Considérant } X = a_i - M, \text{ sign}(X) \text{ est défini par: } \begin{cases} \text{sing}(X) = 1, \text{ si } X > 0 \\ \text{sing}(X) = 0, \text{ si } X = 0 \\ \text{sing}(X) = -1, \text{ si } X < 0 \end{cases}$$

Le seuil de significativité du test est de 5 %.

IV.2. Caractérisation de la variabilité interannuelle des séries hydrométriques

Il s'est agi de faire ressortir les années et les périodes excédentaires, déficitaires ou normales dans les séries chronologiques de débit. Le calcul des indices de débits permet de caractériser la variabilité interannuelle et surtout de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires au sein d'une série chronologique. L'indice utilisé dans cette étude est un indice centré réduit qui se formule comme suit (Nicholson, 1980) (Equation 2) :

$$I_i = \frac{x_i - m}{\sigma_x} \quad \text{Eq: 2}$$

Avec I_i : débit annuel centré et réduit ; x_i : débit de l'année i ; m : débit moyen interannuel sur la période d'étude ; σ_x : Ecart type de la série hydrométrique sur la période d'étude.

IV.3. Caractérisation des variations mensuelles et saisonnières dans les séries de débit

Pour caractériser la variabilité saisonnière du régime hydrologique indépendamment de la valeur absolue des débits mensuels, le calcul des coefficients mensuels de débit (CMD) est nécessaire. L'expression du coefficient mensuel de débit (CMD) se note comme suit (Fadika, 2012 ; Yao, 2015) (Equations 3) :

$$CMD = \frac{q}{Q} \quad \text{Eq: 3}$$

Avec q : débit moyen mensuel ; Q : débit moyen annuel.

Le coefficient mensuel de débit (CMD) permet de déterminer la période des hautes eaux et celle de basses eaux (Yao, 2015). Le mois dont le coefficient mensuel de débit (CMD) est supérieur ou égal à 1, est identifié comme étant une période des hautes eaux et lorsqu'il est inférieur à 1 ce mois est une période des basses eaux. La période des moyennes eaux est intermédiaire à la période des basses eaux et des hautes eaux.

Le coefficient de débit peut être exprimé en pourcentage suivant l'expression (Fadika, 2012) (Equation 4) :

$$CMD = \frac{q}{12Q} \times 100 \quad \text{Eq: 4}$$

Le coefficient mensuel de débit exprimé en pourcentage est le taux de contribution de ce mois à l'écoulement annuel. Puisque Q est le débit moyen annuel, la somme des Q est égale à douze (12). Pour que la somme des taux de contribution des mois à l'écoulement annuel fasse 100%, on divise $(q/Q) \times 100$ de chaque mois par 12.

Les contributions saisonnières des basses eaux, moyennes ou hautes eaux à l'écoulement annuel correspondent à la somme des coefficients mensuels de débits (CMD) (en %) des mois appartenant à la même période (basses eaux, moyennes eaux ou hautes eaux).

IV.4. Coefficient de variation de débit moyen

Le calcul du coefficient de variation conduit à la détermination des pourcentages de variation de la moyenne des séries hydrométriques d'une sous période T_i autour de la période T considérée (Mahé et Olivry, 1995). Le coefficient de variation (C_v) est déterminé par la formule suivante (Equation 5) :

$$C_v = \frac{\bar{x}_i}{\bar{x}_j} - 1 \quad \text{Eq: 5}$$

Où \bar{x}_i : moyenne de la variable sur la sous période ; \bar{x}_j

: moyenne de la variable sur la période de référence. Dans cette étude, la période avant rupture est prise comme période de référence.

V. RESULTATS

V.1. Analyse des ruptures observées dans les chroniques de débits moyens annuels

Les tests des sommes cumulées ont permis de détecter 3 points de ruptures de stationnarité dans les séries de débits moyens annuels avec des niveaux de significativités supérieurs à 90% (Tableau 1). Il s'agit des années 1969, 1993 et 1997. La première rupture a été détectée dans les trois séries du Sassandra avec un niveau de significativité égale à 99%. Ces ruptures de stationnarité sont négatives avec des déficits compris entre 23 et 36 % (Tableau 1). Les ruptures détectées en 1993 et en 1997 sont des ruptures tardives. Elles ont été détectées dans les séries du Boa à Vialadougou, du N'Zo à Kahin et du Bagbé à N'Golodougou avec une significativité de changement supérieure à 90 %. Les excédents hydrométriques associés à ces ruptures semblent annoncer une reprise de l'écoulement moyen annuel de 50 à 79% (Tableau 1).

Tableau 1: Variations des débits moyens après rupture aux différentes stations

Stations	Période d'étude	Année de rupture	Moyenne avant Rupture (m³/s)	Moyenne après rupture (m³/s)	Coefficient de Variation (%)
N'Golodougou	1975-2015	1993	47,46	72,98	+54
Vialadougou	1970-2015	1997	27,90	41,97	+50
Guiglo	1955-1980	-	-	-	-
Kahin	1980-2015	1993	43,01	77,15	+79
Badala	1961-2015	1993	55,65	85,49	+54
Dakpadou	1969-2015	-	-	-	-
Nibéhibé	1961-2015	-	-	-	-
Sémien	1955-2015	1969	268,19	206,06	-23
Soubré	1955-2015	1969	558,96	357,30	-36
Gaoulou	1955-2015	1969	663,37	465,36	-30

V.2. Variations interannuelles des débits

Les fluctuations des indices de débits annuels du fleuve Sassandra et de ses principaux affluents permettent d'observer une alternance de périodes excédentaires, déficitaires ou normales (Figure 2). De 1970 à 1993, le ruissellement annuel a connu une baisse générale sur l'ensemble du bassin. Au cours de cette période globalement déficitaire, la plus importante baisse de l'écoulement du Boa à Vialadougou, du Bafing à Badala, de la Lobo à Nibéhibé et du Sassandra a été observée en 1983. Les déficits associés à cette baisse sont compris entre 56 et 90%. Pour le Sassandra à Soubré et le Sassandra à Gaoulou, c'est en 1984 que le débit moyen annuel le plus bas a été enregistré avec des déficits respectifs de 76 et 61%. Sur le Bagbé à N'Golodougou et la Davo à Dakpadou, les déficits hydrométriques des années 1990 et 1992 de valeurs respectives 57 et 71% sont les plus élevés de chaque série.

Avant la mise en eau du barrage de Buyo en 1981, entre 1970 et 1980, le déficit du débit moyen du fleuve Sassandra déterminé à la station de Soubré (-39%) est du même ordre que celui de Gaoulou (-38%) et supérieur à celui de Sémien (-29%) (Tableau 2). Au cours des périodes déficitaires observées après 1981, le déficit hydrométrique du Sassandra à Soubré (-47%) est supérieur à ceux de Gaoulou (-40%) et de Sémien (-42%) qui sont du même ordre.

Entre 1967 et 1993, l'écoulement annuel de la Lobo a régressé de 34% par rapport à celui de la période déficitaire 1961-1966 observée avant la mise en service du barrage d'AEP de Séguéla en 1967.

Par ailleurs, la fluctuation des indices de débits montre que l'écoulement annuel de la Davo à Dakpadou est devenu excédentaire à partir de 2003 (Figure 1). L'écoulement annuel est redevenu excédentaire un peu plus tôt en 1993 pour le Bafing à Badala ; en 1994 pour le Bagbé à N'Golodougou, la Lobo à Nibéhibé, le N'Zo à Kahin et le Sassandra à Sémien ; en 1995 pour le Sassandra à Soubré et à Gaoulou ; et 1998 pour le Boa à Vialadougou (Figure 2). La dernière période homogène 1995-2015 observée dans les séries du Sassandra à Soubré est normale tandis qu'elle est excédentaire pour le Sassandra à Gaoulou.

En effet, le débit moyen du Sassandra à Soubré (407,86 m³/s) au cours de cette séquence est très légèrement supérieur de 0,24% à la moyenne de la série (406,87 m³/s). Le débit moyen du Sassandra à Gaoulou (545,73 m³/s) de 1995 à 2015 est excédentaire de 6% par rapport à la moyenne de la série (514,06 m³/s). Néanmoins, l'écoulement annuel du Sassandra est en hausse de 30% à Soubré et à Gaoulou par rapport au débit moyen de la période déficitaire 1981-1994. Les excédents hydrométriques du N'Zo à Kahin (+79%) déterminés au cours de la période 1994-2015 et 2003-2015 est le plus important. Sur le Boa à Vialadougou, la hausse du débit moyen de 49% entre 1998 et 2015 est la plus faible. A partir de 1994 à Sémien et 1995 à Soubré et Gaoulou, l'écoulement moyen du Sassandra est déficitaire par rapport à celui de la période excédentaire 1955-1970. Pour le Sassandra à Sémien, ce déficit est 9% et est moins important que ceux du Sassandra à Gaoulou (-18%) et du Sassandra Soubré (-27%).

Sur la Lobo, l'écoulement moyen entre 1994 et 2015 est en baisse de 9% par rapport à celui de la période excédentaire 1961-1966 (Tableau 2).

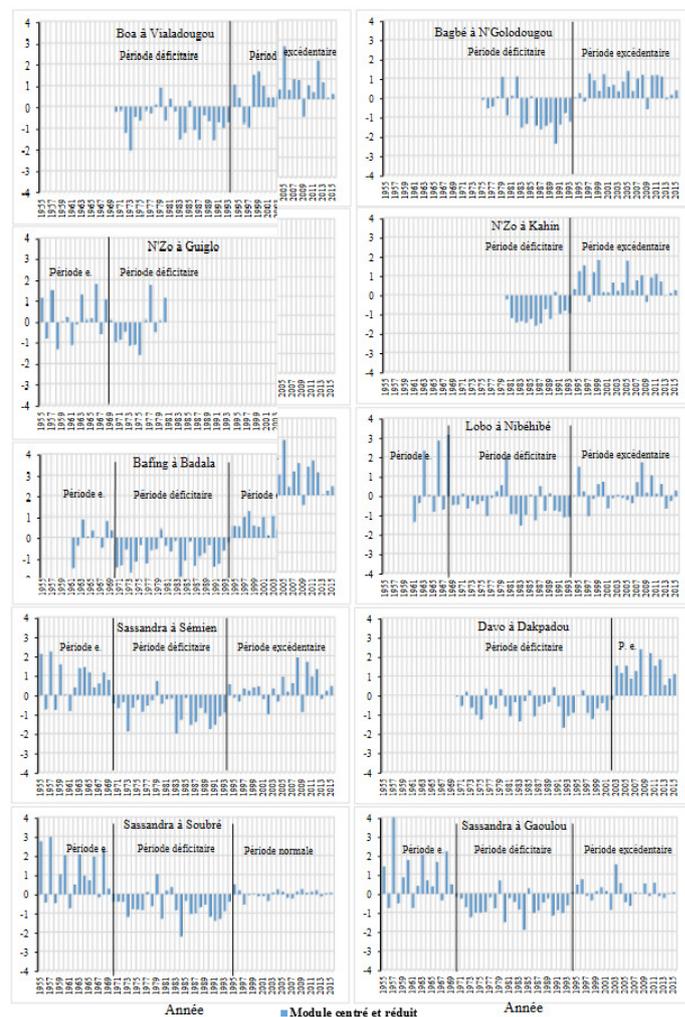


Figure 2: Fluctuations des débits moyens annuels des différentes stations

Tableau 2 : Ecart moyen entre valeurs moyennes des débits des périodes homogènes

Cours d'eau	Stations hydrométriques	Module (m³/s)	Périodes hydroclimatiques	Modules (m³/s)	Ecart moyen (%)
Boa	Vialadougou (1975-2015)	33,40	1975-1997 (déficitaire -19%)	27,05	+49
			1998-2015 (excédentaire+21%)	40,33	
Bafing	Badala (1961-2015)	67,58	1961-1993 (déficitaire -18%)	55,65	+54
			1994-2015 (excédentaire +26%)	85,49	
N'Zo	Guiglo (1955-1980)	69,27	1955-1969 (excédentaire +11%)	76,67	-23
			1970-1980 (déficitaire -15%)	59,18	
N'Zo	Kahin (1980-2015)	63,87	1980-1993 (déficitaire -33%)	43,01	+79
			1994-2015 (excédentaire +21%)	77,15	
Davo	Dakpadou (1970-2015)	38,53	1970-2002 (déficitaire -22%)	29,91	+46
			2003-2015 (excédentaire +13%)	43,72	
Lobo	Nibéhibé (1961-2015)	11,89	1961-1966 (excédentaire+26%)	14,94	-34
			1967-1993 (déficitaire -17%)	9,91	
Lobo	Sémien (1955-2015)	221,34	1994-2015 (excédentaire+10%)	243,81	-9
			1955-1969 (excédentaire+37%)	558,96	
Sassandra	Soubré (1955-2015)	406,89	1970-1980 (déficitaire -17%)	338,53	-39
			1981-1994 (déficitaire -27%)	296,19	
Sassandra	Gaoulou (1955-2015)	514,06	1995-2015 (normale +0,24%)	407,86	-47
			1955-1969 (excédentaire+29%)	663,37	
Sassandra	Gaoulou (1955-2015)	514,06	1970-1980 (déficitaire -24%)	393,18	-41
			1981-1994 (déficitaire -24%)	390,44	
Sassandra	Gaoulou (1955-2015)	514,06	1995-2015 (excédentaire +6%)	545,73	-18

NB : Les cours d'eau gras sont les cours d'eau qui ont été aménagés

V.3. Variations mensuelles et saisonnière des débits

Les saisons hydrologiques identifiées dans les séries de débits restent les même aux cours des différentes périodes homogènes dans la plupart des cas. Les écarts moyens consécutifs (en %) entre coefficients saisonnières de débit (en %) montrent une variation de la contribution des basses et moyennes eaux à l'écoulement annuel contraire à celle des hautes eaux lorsqu'on passe d'une période homogène à une autre.

V.3.1. Fluctuations mensuelles des débits au cours des différentes phases homogènes

Sur les dix séries retenues pour cette étude, seul le régime hydrologique de la Davo à Dakpadou a été modifié lorsqu'on passe d'une période homogène à une autre (Figure 3). Au cours de la période déficitaire 1970-2002, le régime hydrologique de la Davo à Dakpadou est caractérisé par deux saisons des basses et moyennes eaux (novembre à mai et août à septembre) et deux saisons des hautes eaux (juin à juillet et octobre). A partir de 2003, une seule saison des basses et moyennes eaux (novembre à août) et une seule saison des hautes eaux (septembre et octobre) sont observées dans la série de la Davo à Dakpadou. On est donc passé d'un régime hydrologique à quatre saisons en période déficitaire à un régime hydrologique à deux saisons en période excédentaire. Pour Bafing à Badala, le Bagbé à N'Golodougou, le Boa à Vialadougou, le N'Zo à Kahin et le Sassandra à Sémien, les basses et moyennes eaux s'étendent de novembre à juillet tandis que les hautes eaux ont lieu d'août à octobre (Figure 3). Pour le N'Zo à Guiglo, la Lobo à Nibéhibé, le Sassandra à Soubré et le Sassandra à Gaoulou, les basses et moyennes eaux sont plus longues. Elles débutent en novembre et prennent fin en août avant que les hautes eaux ne soient observées de septembre à octobre. Par ailleurs, le mois de juin qui était le pic de l'écoulement annuel de la Davo à Dakpadou avec un pourcentage de 21% au cours de la période déficitaire 1970-2002, est remplacé par le mois d'octobre qui contribue à 22% à l'écoulement annuel en période excédentaire (Figure 3). Le pic de l'écoulement mensuel du Sassandra à Sémien, du Bafing à Badala, du Bagbé à N'Golodougou, du Boa à Vialadougou, du N'Zo à Guiglo et du N'Zo à Kahin a été enregistré en septembre. Sur le Sassandra à Soubré et le Sassandra à Gaoulou, avant la rupture de 1969, le pic de l'écoulement mensuel était le mois de septembre. Après cette date, le pic de l'écoulement

mensuel du Sassandra à Soubré et à Gaoulou a été enregistré en octobre. Pour la Lobo à Nibéhibé, le pic des débits mensuels est maintenu en d'octobre pendant les différentes séquences homogènes.

L'évolution des coefficients mensuels des débits est quasi synchrone aux stations de Soubré et Gaoulou, mais différente de part et autre de 1981 (Figure 3). Aux stations de Soubré et Gaoulou, il y a une profonde modification saisonnière après la création du barrage en 1981. En effet, avant la création du barrage, on passait de la période des basses eaux à la période des moyennes eaux avant que la période des hautes eaux n'ait lieu. Mais après la création du barrage, la période des basses eaux disparaît tandis que des moyennes eaux on passe aux hautes eaux sans grande augmentation des débits. Ainsi, les débits sont dorénavant pratiquement constants d'un mois à un autre sauf pour les mois de septembre et octobre.

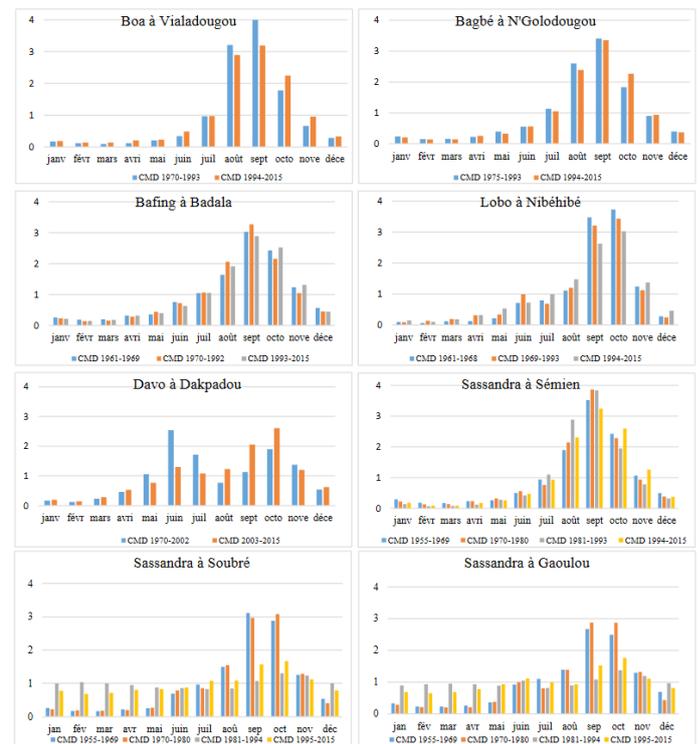


Figure 3: Coefficients mensuels de débits (CMD) au cours des périodes homogènes

V.3.2. Variations des contributions saisonnières de débits entre périodes homogènes

Les variations des contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux évoluent dans le sens contraire de celles des hautes eaux lors qu'on passe d'une période homogène à une autre (Tableau 3). Exprimé en valeur absolue, le coefficient de variation de la contribution des basses et moyennes eaux à l'écoulement annuel est supérieur à celui des hautes eaux dans la plupart des cas. En période déficitaire, les contributions à l'écoulement annuel des mois des basses, moyennes et hautes eaux de la Lobo à Nibéhibé, du Sassandra à Soubré et du Sassandra à Gaoulou présente des variations similaires en régime perturbé. Au cours de la période déficitaire 1967-1993 observée dans la série de la Lobo à Nibéhibé après la mise en service du barrage d'AEP de Séguéla en 1967, le coefficient de débit des basses et moyennes eaux de la Lobo à Nibéhibé a augmenté de 6% tandis que celui des hautes eaux a baissé de 4%. Pendant la période déficitaire 1970-1980, les apports des basses et

moyennes eaux au module annuel du N'Zo à Guiglo et du Sassandra ont baissé (de -1 à -11%) alors que ceux des hautes eaux ont augmentés (de +1 à 10%). Après la mise en service du barrage de Buyo en 1981, la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux et des hautes eaux du Sassandra a évolué de manières différentes en amont et en aval du barrage. Pendant la période déficitaire 1981-1994, les contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux du Sassandra ont fortement augmentées en aval du barrage de Buyo de 60% et 40% à Soubré et à Gaoulou tandis que la contribution à l'écoulement annuel des hautes eaux du Sassandra a par contre fortement baissée de 60 et 53% respectivement à Soubré et à Gaoulou. En amont du barrage de Buyo, une régression de la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux du Sassandra de 20% a été déterminée à Sémien entre 1981 et 1993 alors que celle des hautes eaux a augmentée de 11%.

Par ailleurs, en aval du barrage de Buyo, aux stations de Soubré et de Gaoulou, pendant la période normale 1995-2015, les contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux du Sassandra sont excédentaires de 28 à 46% respectivement par rapport à ceux de la période excédentaire 1955-1969 tandis que les contributions à l'écoulement annuel des hautes eaux sont déficitaires de 36 à 46%. En amont du barrage de Buyo, à la station de Sémien, la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux du Sassandra au cours de la période excédentaire 1994-2015 est déficitaire de 7% par rapport à celui de la période excédentaire 1955-1969 alors que la contribution à l'écoulement annuel des hautes eaux est excédentaire de 4% (Tableau 3).

Sur la Lobo à Nibéhibé, la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux de la période excédentaire 1994-2015 est en hausse de 27% par rapport à celui de la période déficitaire 1961-1966 alors que la contribution à l'écoulement annuel des hautes eaux est déficitaire de 19%.

Tableau 3: Ecart moyen (en %) entre contributions saisonnières des périodes homogènes

Stations hydrométriques	Périodes homogènes	Contribution saisonnières (%)		Coefficients variations (%)	
		Basses et moyennes eaux	Hautes eaux	Basses et moyennes eaux	Hautes Eaux
Vialadougou	1975-1997 (D)	26,92	73,08		
	1998-2015 (E)	31,27	68,73	+16	-6
N'Golodougou	1975-1993 (D)	34,65	65,35		
	1994-2015 (E)	40,34	59,66	+16	-9
Guiglo	1955-1969 (E)	38,78	61,22		
	1970-1980 (D)	34,38	65,62	-11	+7
Kahin	1980-1993 (D)	26,36	73,64		
	1994-2015 (E)	37,23	62,77	+41	-15
Badala	1961-1993 (D)	38,66	61,34		
	1994-2015 (E)	47,87	52,13	+24	-15
Dapkadou	1970-2002 (D)	54,22	45,78		
	2003-2015 (E)	66,76	33,24	+23	-27
	1961-1966 (D)	41,52	58,48		
Nibéhibé	1967-1993 (D)	43,84	56,16	+6	-4
	1994-2015 (E)	52,84	47,16	+27	-19
	1955-1969 (E)	34,63	65,37		
Sémien	1970-1980 (D)	30,87	69,13	-11	+6
	1981-1993 (D)	27,76	72,24	-20	+11
	1994-2015 (E)	32,05	67,95	-7	+4
Soubré	1955-1969 (E)	50,06	49,94		
	1970-1980 (D)	49,58	50,42	-1	+1
	1981-1994 (D)	80,23	19,77	+60	-60
Gaoulou	1995-2015 (N)	73,01	26,99	+46	-46
	1955-1969 (E)	56,95	43,05		
	1970-1980 (D)	52,08	47,92	-9	+11
	1981-1994 (D)	79,55	20,45	+40	-53
	1995-2015 (E)	72,63	27,37	+28	-36

NB : En gras les stations des cours d'eau aménagés

VI. DISCUSSION

Les débits du fleuve Sassandra ont considérablement baissé à partir de 1970. Cette baisse de l'écoulement est mise en évidence par la rupture de stationnarité détectée en 1969 dans les séries hydrométriques du Sassandra à Sémien, du

Sassandra à Soubré et du Sassandra à Gaoulou et les indices de débit devenu négatifs après cette date. Ces ruptures se situent dans la fourchette 1968-1971 au cours de laquelle d'importants changements sont survenus sur la moyenne de l'écoulement en Afrique attestés par les travaux de recherche (Aka *et al.*, 1997 ; Ardoin, 2004). Ces changements brusques traduisent une baisse des débits comme sur la majorité des cours d'eau en Afrique de l'Ouest et Centrale (Hubert *et al.*, 1989 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet *et al.*, 1997). Ce phénomène est lié au changement de moyenne qui s'est produit dans les séries pluviométriques en Afrique de l'Ouest autour de 1970 (Hubert *et al.*, 1998). Les déficits d'écoulement associés à la baisse de l'écoulement moyen du fleuve Sassandra par rapport à l'année de rupture 1969 sont compris entre 23 et 36%. Ces déficits sont inférieurs au déficit de 67% déterminé dans la série de Tortiya par Kamagaté *et al.* (2019) par rapport à la rupture de 1971, mais restent de même ordre que les déficits allant de 20% à 50% observés au niveau de certains cours d'eau en Afrique de l'Ouest et Centrale après 1970 (Servat *et al.*, 1998 ; Ardoin, 2004). Les conclusions des travaux d'Assani *et al.* (1999) portant sur l'analyse chronologique des modules annuels de la série des débits naturels de la warche aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne Belge) de 1930 à 1995 montrent qu'aucune tendance à une augmentation ou à une diminution des modules annuels n'a été observée dans le temps. Pour Sneyers *et al.* (1990), cette stationnarité du régime hydrologique est liée à la stabilité du régime pluviométrique en Belgique.

La baisse de l'écoulement annuel (23 à 36%) est plus importante pour les cours d'eau ayant régime perturbé. Le déficit hydrométrique est encore plus intense lorsqu'on se rapproche des barrages. En effet, au cours de la période déficitaire observée après la mise en service du barrage hydroélectrique de Buyo en 1981, le déficit hydrométrique du Sassandra à Soubré (station juste en aval du barrage) est de 47%. Ce déficit est supérieur à ceux du Sassandra à Gaoulou (station plus en aval du barrage) et du Sassandra à Sémien (station en amont du barrage) qui sont respectivement -40% et -42%. L'importance du déficit hydrométrique du Sassandra à Soubré prouve que l'écoulement est plus réduit à proximité du barrage de Buyo. Les résultats obtenus sont en désaccord avec ceux de Diarra et Soumaguel (1997) qui ont montré que la mise en service du barrage de Sélingué a eu un effet direct sur l'écoulement du fleuve Niger à Koulikoro. Selon ces auteurs, en présence du barrage de Sélingué, le déficit de la moyenne 1980-1993 (période la plus sèche) par rapport à celle 1952-1965 (période la plus humide) est de 41.59% pour le Niger Koulikoro (station juste en aval du barrage) et de 77.61 % pour le Bani à Douna (station plus en aval du barrage)

Les indices de débits devenus positifs ou moins négatifs à partir des années 1993 et 1994, semblent annoncer une reprise de façon générale de l'écoulement annuel du fleuve Sassandra et de ces principaux affluents à partir de ces dates. Ces résultats sont en accord avec ceux de Fadika (2012) qui a constaté une reprise de l'écoulement annuel du Nero et du Dodo en Côte d'Ivoire respectivement de 1994 à 1997 et de 2001 à 2004. Pour de nombreux cours d'eau en Afrique dont l'écoulement de surface était déficitaire à partir de 1970, l'écoulement est devenu excédentaire à partir de 1994 (Fadika, 2012). Des reprises similaires de l'écoulement annuel des cours d'eau ont déjà été observé pour le N'Zo à Kahin (Goula *et al.*, 2006) et la Lobo (Yao *et al.*, 2012) sur le Sassandra, le Chari à Mailao

et la Gambie à Mako (Ardoin, 2004) sur le Sénégal. Sur ces sous bassins, les débits augmentent alors que les pluies baissent (Mahé et Paturel, 2009 ; Mahé *et al.*, 2010). En milieu soudano-sahélien, cette tendance croissante des écoulements a également été constatée par des auteurs comme Albergel *et al.*, (1987), Janeau *et al.* (1999) et Cappelaere *et al.* (2009). Cette reprise de la dynamique de l'écoulement en ces moments de sécheresse serait imputable à une diminution de la couverture végétale naturelle, à une augmentation des zones cultivées et de la présence des sols nus sur ces bassins versants affaiblissant infiltration (Ammousou, 2010 ; Fadika, 2012).

La reprise de l'écoulement annuel sur le bassin autour de 1994 est marquée par une hausse des débits entre 30 et 80% par rapport aux périodes déficitaires.

Sur leassandra à Soubré et à Gaoulou en régime perturbé depuis 1981, cette reprise est timide à telle enseigne que les dernières séquences observées sont excédentaires que de 0,24 et 6% respectivement par rapport à la moyenne de chaque série. L'écoulement annuel duassandra enregistre néanmoins des excédents hydrométriques de 30 % à Soubré et à Gaoulou. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de N'Go (2015) qui a observé une reprise de la dynamique hydrologique de 27,26 % à la station de Gaoulou au cours de la décennie 1995-2004 par rapport à la décennie 1985-1994 qui la précède.

En période déficitaire, la contribution des mois des basses et moyennes eaux des cours d'eau ayant un régime naturel baisse tandis que celle des hautes eaux augmente. C'est par contre la situation inverse pour les cours d'eau ayant un régime perturbé pour lesquels la contribution des mois de basses et moyennes eaux augmente tandis que celle des hautes eaux baisse. En effet, entre 1970 et 1980, les apports des basses et moyennes eaux au module annuel du N'Zo à Guiglo, duassandra à Sémien, duassandra à Soubré et duassandra à Gaoulou ont baissé de 1 à 11% tandis que ceux des hautes eaux ont augmenté de 1 à 10%. Ce qui indique que l'écoulement est essentiellement alimenté par les précipitations. Des variations similaires des apports saisonniers à l'écoulement annuel des fleuves San Pedro (dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire) ont été observées en périodes déficitaires par Fadika (2012).

Après la mise en service du barrage de Buyo en 1981, en aval de l'ouvrage, une importante hausse des contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux du fleuveassandra a été déterminée à Soubré (+60%) et à Gaoulou (+40%) entre 1981 et 1994 tandis qu'en amont du barrage, une régression de la contribution à l'écoulement annuel des basses eaux de 20% du fleuveassandra a été déterminée à Sémien de 1981 à 1993. Cependant, de 1981 à 1994, la contribution à l'écoulement annuel des hautes eaux duassandra a fortement baissé de 58 et 76% respectivement à Soubré et Gaoulou alors qu'à Sémien elle a augmenté de 11% entre 1981 à 1993.

Sur la Lobo à Nibéhibé, après la mise en service du barrage d'approvisionnement en eau potable de Séguéla en 1967, la période déficitaire est marquée par une augmentation des contributions à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux de 6% et une augmentation de 4% de ceux des hautes eaux.

La hausse de la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux et la baisse des contributions à l'écoulement annuel des hautes eaux du fleuveassandra et de la rivière Lobo en aval des barrages de Buyo et de Séguéla montrent de façon indéniable que ces ouvrages sont à l'origine d'une inversion très

nette du régime hydrologique de ces cours d'eau. Les faibles variations des contributions saisonnières de la Lobo à Nibéhibé en période déficitaire par rapport à celles duassandra à Soubré et à Gaoulou, nous montrent que la régulation du barrage hydroélectrique influence plus le régime hydrologique des cours d'eau que celui du barrage d'approvisionnement en eau potable. En effet, aux stations de Soubré et Gaoulou, il y a une profonde modification saisonnière après la mise en eau du barrage de Buyo en 1981. En effet, après la création du barrage, la période des basses eaux a disparue de telle sorte que des moyennes eaux on passe aux hautes eaux sans grande augmentation des débits. Ce barrage atténue les fluctuations inter-mensuelles des débits (effet régulateur) par le relâchement d'un débit presque constant en leurs aval comme c'est le cas en aval du barrage de Matawin sur la rivière Matawin (Assani *et al.*, 2002). Cela signifie que ce barrage abaisse le niveau des hautes eaux et assure un meilleur respect de niveaux appropriés en période d'étiage (Früh et Schudel, 2013).

VII. CONCLUSION

Cet article visait à étudier la dynamique de l'écoulement de surface du bassin versant duassandra dans un contexte de changement climatique, de changements d'occupations et d'utilisations des sols.

Sur le bassin versant duassandra, l'écoulement annuel a considérablement baissé de 23 à 36% en moyenne à partir de 1970. En période déficitaire, les déficits hydrométriques duassandra à Sémien et du N'Zo à Guiglo sont compris entre 23 et 29% et sont les plus faibles. Sur ces cours d'eau ayant un régime naturel, la contribution à l'écoulement annuel des basses et moyennes eaux a baissé de 11% tandis que celle des hautes eaux a augmentée de 6 à 7% entre 1970 et 1980.

Par ailleurs, la disposition du barrage d'approvisionnement en eau potable sur la Lobo et du barrage hydroélectrique de Buyo sur leassandra, a modifié l'écoulement de surface en augmentant le déficit d'écoulement en aval de ces ouvrages : 47% pour leassandra à Soubré et 34% pour la Lobo à Nibéhibé. Une modification très nette du régime hydrologique des cours d'eau aménagés caractérisée par la disparition des basses eaux a été observée. En période déficitaire, la contribution à l'écoulement annuel de la période des basses et moyennes eaux augmente seulement de 6% sur la Lobo à Nibéhibé contre 60 et 40% respectivement pour leassandra à Soubré et leassandra à Gaoulou. L'apport au module annuel de la période des hautes eaux baisse seulement de 4% sur la Lobo à Nibéhibé contre 60 et 53% respectivement pour leassandra à Soubré et leassandra à Gaoulou à cause du relâchement du débit presque constant en aval du barrage de Buyo. La conséquence immédiate de cette importante variation sur leassandra à Soubré et à Gaoulou est que de la période des moyennes eaux, on passe aux hautes eaux sans grande augmentation des débits.

A partir de 1994, l'écoulement annuel de la plupart des cours d'eau du bassin versant duassandra est devenu excédentaire par rapport à celui des périodes déficitaires. Entre 1994 et 2015, l'excédent hydrométrique le plus élevé qui est de 79% été déterminé sur N'Zo à Kahin.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agbri L., Bamba S. B., Doumouya I. & Savane I. (2010). Bilan des flux de matières particulières et dissoutes duassandra à Gaoulou pont (Côte d'Ivoire). *Sciences & Nature*, (7) 2, 107 - 118.
- Aka A. A., Lubès-Niel H., Masson M., Servat E., Paturel J.

- E. et Kouamé B. (1997). Analyse de l'évolution temporelle des écoulements en Côte d'Ivoire. Approche statistique et caractérisation des phénomènes. *PHI*, 16, 49-63.
- Aka A., Kouamé B., Paturel J.E., Servat E., Lubès H. & Masson J.M. (1996). Analyse statistique de l'évolution des écoulements en Côte d'Ivoire. Actes de la conférence de Paris, *IAHS Publication*, 238, 167-177.
- Albergel J., Chevallier P. et Lortic B. (1987). D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso), *Hydrologie continentale*, (2) 2, 77-86.
- Amoussou E. (2010) : Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat unique, Université de Bourgogne de France, 313 p.
- Anouman D. G.-L. (2020). Etude hydroclimatique et morphostructurale du bassin versant du Sassandra : influence sur les aléas crue et tarissement des cours d'eau. Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 176 p.
- Anouman D. G.-L., N'go, Y. A., Soro, G. E., & Bi, T. A. G. (2019). Spatial and Temporal Evolution of Low Water Flows in the Sassandra River Catchment Area in Cote d'Ivoire. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7, 184-202.
- Ardoin B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 440 p.
- Assani A.A. (2002). Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des sciences de l'eau/ Journal of water science*, (15) 2, 557-574.
- Assani A.A., Petit F., Mabile G. (1999). Analyse des débits de la Warche aux barrages de Bütgenbach et de Robert-ville (Ardenne belge). *Bull. Soc. Géogr. Liège*, 36, 17-30.
- Brandt S. A. (2000). "Classification of geomorphological effects downstream of dams." *Catena*, (40) 4, 375-401.
- Bricquet J. P., Bamba F., Mahé G., Touré M. & Olivry J. C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI-V*, Unesco, Paris, 16, 83-95.
- Brou Y.T. (1997). Analyse et dynamique de la pluviométrie en milieu forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. *Thèse de Doctorat 3ème cycle*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Brou Y.T., Akindes F., Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cah Agric*, (14) 6, 533-40.
- Camus H. (1969). Hydrologie du bassin du Sassandra (note préliminaire). Office de la recherche scientifique et technique outre-mer. Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Section Hydrologie, 60p.
- Descroix, L., Genthon, P., Peugeot C., Mahé G., Abdou M. M., Vandervaere J.-P., Mamadou I., et al. (2015) Paradoxes et contrastes en Afrique de l'Ouest : Impacts climatiques et anthropiques sur les écoulements. *Géologues*, (187), 47-52.
- Diarra A. & Soumaguel A. (1997). Influence du barrage de Sélingué sur le régime hydrologique du Fleuve Niger. Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium S1April 1997). *IAHS*, 240, 277-286.
- El Fellah I. B., Cherai B., Hinaje S. & Mehdi K. (2017). La variabilité climatique et son influence sur les ressources en eau dans la partie septentrionale du moyen atlas Marocain : cas des causses de Sefrou et de l'Anoceur. *Lahryss journal*, 32 : 155 – 179.
- Fadika V. (2012). Variabilité hydro climatique et modélisation hydrologique de quelques bassins versants côtiers du sud-ouest de la côte d'ivoire. Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 164 p.
- Goula B. T. A., Savane I., Konan B., Fadika V., Kouadio G. B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, (7) 1, 12 p.
- Graf, W. L. (2005). "Geomorphology and American dams: The scientific, social, and economic context." *Geomorphology*, (71) 1-2: 3-26.
- Hubert P., Carbonel J. P. & Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.
- Hubert P., Servat E., Paturel J. E., Kouamé B., Bendjoudi H., Carbonel J.-P. & Lubès-Niel H. (1998). La procédure de segmentation, dix ans après. *IAHS Publ*, 252 : 267-273.
- Ibanez C & Prat N. (2003). "The environmental impact of the Spanish National Hydrological Plan on the lower Ebro River and delta." *International Journal of Water Resources Development*, (19) 3: 485-500.
- Ibo G J. (2007). Fronts pionniers et retraits de terres : points de vue sur la sécurisation du foncier en côte d'ivoire. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, (1), 3-19.
- Kamagaté A., Yao B K., Kouassi A M., Kouakou B D et Diallo S. (2019). Impact des évolutions climatiques sur les ressources en eau des petits bassins en Afrique sub-saharienne: application au bassin versant du Bandama à Tortiya (nord Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, (15) 9, 84-105.
- Kanohin F., Saley B. & Savané I. (2009). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les activités humaines en zone tropicale humide : cas de la région de Daoukro en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, (26) 2, 209-222.
- Konan B. (1990). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra à Soubré. Thèse (ph. D) 3eme cycle en Science et Gestion de l'Environnement, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 182p.
- Konan B. (2002). Modélisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat 3ème cycle, Université d'Abobo-Adjamé, (Côte d'Ivoire), 146 p.
- Kouakou K. E. (2011). Impact de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université Abobo Adjamé, Côte d'Ivoire, 204 p.
- Kouakou K. E., Goula B. T. A. et Savané I. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide: Cas du bassin versant

- transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, (16) 1, 31-43.
- L'Hôte, Y., Mahé G., Somé B. & Triboulet J. P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* (4) 47, 563– 572. doi:10.1080/02626660209492960
- Lang C. D. (2011). Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergéo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 571 doi : 10.4000/cyberge0.24827.
- Le Barbé L., Lebel, T. & Tapsoba, D. (2002) Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950–90. *J. Clim*, (2) 15, 187–202. doi:10.1175/1520- 0442(2002)0152.0.CO;2
- Lebel T. & Ali A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *J. Hydrol.* 375(1–2), 52–64. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030
- Mahé G & Paturel J.E. (2009). 1896-2006 Sahelian rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *CR Geosciences*, 341, 538-546.
- Mahé G. & 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. (2009). Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa. *Hydrol. Sci. J.* 54(4), 704–712. doi:10.1623/hysj.54.4.704
- Mahé G., Diello P., Paturel J.M., Barbier B., Karambiri H., Dezetter A., Dieulin C. et Rouché N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. *Sécheresse*, (21) 1, 1-6.
- McGilchrist C.A., & Woodyer K.D. (1975). Note on a distribution-free CUSUM technique. *Technometrics*, (3) 17, 321-325.
- N'Go Y. A. (2015). Hydrologie et dynamique de l'état de surface des terres dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire : impacts et moteurs de dégradation. Thèse d'Etat, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 186 p.
- N'Go Y. A., Ama-Abina J. T., Kouadio A. Z., Kouassi H. K., Savané I., 2013. Environmental Change in Agricultural Land in Southwest Côte d'Ivoire: Driving Forces and Impacts. *Journal of Environmental Protection*, 4 : 1373-1382.
- Nicholson S. E. (1980). The nature of rainfall fluctuation in subtropical West Africa. *Monthly Weather Review*, 108, 473-487.
- Nicholson S. E., Kim J. & Hoopinganier J. (1988) Atlas of African rainfall and its interannual variability. Tallahassee, Florida, USA: Florida State University.
- Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Boyer J. F, Lubès N. H. et Masson J. M. (1996). Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques. Modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *International Association of Hydrology Sciences*, 234, 99-110.
- Paturel, J.-E., Servat, E., Delattre, M. O. & Lubès-Niel, H. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* 43(6), 937– 946. doi:10.1080/02626669809492188
- Perraud A. (1971). Les sols. *Le milieu naturel de la CI, Mémoire ORSTOM*, (50) : 269-391.
- Qadem Z., Qadem A., Obda K. & Lasri M. (2019). Variabilité climatique et son impact sur l'organisation spatiotemporelle des précipitations. Cas des bassins versants des Oueds Mikkès et Fès. Maroc. *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, (4) 3, 253-260.
- Rome S., Caniaux G., Ringard J., Dieppois B. & Diedhiou A. (2015). Identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'ouest et sur le golfe de guinée. 28ème colloque international de l'AIC, Université de Liège, Belgique, 591 – 596.
- Saley M. B. (2003). Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 209 p.
- Santé N., N'Go Y A., Soro G E., Meledje N H., Goula B T A. (2019). Characterization of Meteorological Droughts Occurrences in Côte d'Ivoire: Case of the Sassandra Watershed. *Climate*, (60) 7, 1-17.
- Servat E. et Sakho M. (1995). Méthodologie simplifiée d'évaluation comparative des performances d'un système d'eau aménagé confronté à la sécheresse : exemple de l'aménagement du Sassandra en Côte d'Ivoire. *IAHS Publication*, 231, 61-69.
- Servat E., Paturel J. E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J. F., Lubès-Niel H., Fritsch J. M., Masson J. M. et Mariou B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Internationale Association of Hydrological Sciences*, 252, 323-337.
- Servat, E., Paturel, J. E. & Lubès, H. (1996). La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, 290, 24-25.
- Sneyers R., Vandiepenbeek M., Vanlierde R. & Demaree G.R. (1990). Climatic changes in Belgium as appearing from the homogenized series of observations made in Brussels-Uccle. SCHIETECAT, Contributions à l'étude des changements climatiques, *IRM, Bruxelles*, 17-20.
- Soro G. E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 172 p.
- Tirogo Y.J. (2016). Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso, Thèse de Doctorat en science et technologie de l'eau, de l'énergie et de l'environnement, institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2ie) - université pierre et marie curie (upmc), 198p.
- Yao A. B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat en Sciences et Géosciences de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 225 p.
- Yao A. B., Goula B. T. A., Kouadio Z. A., Kouakou K. E., Kane A. et Sambou S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 19, 136-157.