

Dynamique hydroclimatique de l'Oubangui amont à Mobaye, République Centrafricaine : étude comparée du rôle de la savane et de la forêt équatoriale

Didier Orange¹

¹IRD

November 22, 2022

Abstract

The rainfall reduction in the 1970s, less marked in Central Africa than in West Africa, still had a major impact on the hydrological regimes of the region's large rivers. The study of the hydropluviometric behavior of the Ubangi at Mobaye has the advantage of studying a basin excluding anthropogenic impact. Forest cover and population density have not changed since at least 1970. Statistical analysis of the breaks in the long rainfall time series from Ubangi at Mobaye (1935-2015) confirms a long period of drought from 1969 to 2006 corresponding to a reduction of -8% in rainfall. And the study of the corresponding hydrological series indicates a second downward break in 1981, few years after the rainfall increase. This period points an exceptional hydrological drought period until 2013, which is the first year with an increase of flows. The statistical study of the annual rainfall/flow series of the upstream basins over the period 1951-1995 (the Kotto at Kembé and Bria, the Mbomu at Bangassou and Zémio, the Uélé + Bili hydrographic system) highlights different hydrological behaviors related to the vegetation cover. The savanna basins show a continuous hydrological deficit marked by a runoff coefficient (CE) that fell to 5% only from the 1990s. On the other hand, the basins under forest show a runoff increase since 1990 marked by CE above 10%. Under savannah, the part of the flow infiltrating to recharge the aquifer would have decreased faster than under forest, which results in a runoff coefficient CE very significantly negatively correlated with the savanna area present in the studied watershed.



AGU Books

**Dynamique hydroclimatique de l'Oubangui amont à Mobaye,
République Centrafricaine : étude comparée du rôle de la
savane et de la forêt équatoriale**

Journal:	AGU Books
Manuscript ID	2020-May-CH-1260.R1
Wiley - Manuscript type:	Chapter
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Nguimalet, Cyriaque Rufin ; University of Bangui, Geography Orange, Didier; IRD, Eco&Sols Waterendji, Jean-Pascal; Université de Bangui Yambélé, Athanase; Direction Nationale de la Météorologie
Primary Index Term:	1833 - Hydroclimatology < 1800 - HYDROLOGY
Index Term 1:	1836 - Hydrological cycles and budgets (1218 , 1655) < 1800 - HYDROLOGY
Index Term 2:	1843 - Land/atmosphere interactions (1218 , 1631 , 3322) < 1800 - HYDROLOGY
Index Term 3:	232 - Impacts of climate change: ecosystem health < 200 - GEOHEALTH
Index Term 4:	1869 - Stochastic hydrology < 1800 - HYDROLOGY
Keywords:	Hydropluviometry, Break, Drought, Vegetation cover, Ubangui River, Forest
Abstract:	<p>The rainfall reduction in the 1970s, less marked in Central Africa than in West Africa, still had a major impact on the hydrological regimes of the region's large rivers. The study of the hydropluviometric behavior of the Ubangi at Mobaye has the advantage of studying a basin excluding anthropogenic impact. Forest cover and population density have not changed since at least 1970. Statistical analysis of the breaks in the long rainfall time series from Ubangi to Mobaye (1935-2015) confirms a long period of drought from 1969 to 2006 corresponding to a reduction of -8% in rainfall. And the study of the corresponding hydrological series indicates a second downward break in 1981, marking an exceptional hydrological drought with an increase of flows in 2013, few years after the rainfall increase. The statistical study of the annual rainfall/flow series of the upstream basins over the period 1951-1995 (the Kotto in Kembé and Bria, the Mbomou in Bangassou and Zémio, the Uélé + Bili hydrographic system) highlights different hydrological behaviors related to the vegetation cover. The savanna basins show a continuous hydrological deficit marked by a runoff coefficient (CE) that fell to 5% only from the 1990s. On the other hand, the basins under forest show a runoff increase since 1990 marked by CE above 10%. Under savannah,</p>

	<p>the part of the flow infiltrating to recharge the aquifer would have decreased faster than under forest, which results in a runoff coefficient CE very significantly negatively correlated with the savanna area present in the studied watershed.</p>

SCHOLARONE™
Manuscripts

Dynamique hydroclimatique de l'Oubangui amont à Mobaye, République Centrafricaine : étude comparée du rôle de la savane et de la forêt équatoriale

Cyriaque Rufin NGUIMALET^{(1)*}, Didier ORANGE^{(2)*}, Jean-Pascal WATERENDJI⁽¹⁾,
Athanase YAMBELE⁽³⁾

Corresponding authors : didier.orange@ird.fr and cyrunguimalet@gmail.com

⁽¹⁾ Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, B.P. : 1037 - Bangui (République Centrafricaine) - E-mail: cyrunguimalet@gmail.com

⁽²⁾ Eco&Sols, IRD, Univ. Montpellier, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Montpellier, France - E-mail: didier.orange@ird.fr

⁽³⁾ Direction Nationale de la Météorologie, Ministère des Transports et de l'Aviation Civile, Bangui, République Centrafricaine.

Résumé : La réduction pluviométrique des années 1970, moins marquée en Afrique Centrale qu'en Afrique de l'Ouest, a tout de même largement impacté les régimes hydrologiques des grands cours d'eau de la région. L'étude du comportement hydropluviométrique de l'Oubangui à Mobaye a pour avantage d'étudier un bassin hors impact anthropique. Le couvert forestier et la densité de population n'ont pas évolué depuis au moins 1970. L'analyse statistique des ruptures de la longue série temporelle pluviométrique de l'Oubangui à Mobaye (1935-2015) confirme une longue période de sécheresse de 1969 à 2006 correspondant à une réduction de -8% de la pluviométrie. Et l'étude de la série hydrologique correspondante indique une seconde rupture à la baisse en 1981, marquant une sécheresse hydrologique exceptionnelle avec une reprise des débits en 2013 quelques années après la reprise des pluies. L'étude statistiques des séries annuelles pluies/débits des bassins amont sur la période 1951-1995 (la Kotto à Kembé et Bria, le Mbomou à Bangassou et Zémio, le système hydrographique Uélé+Bili) met en évidence une différence de comportement hydrologique en fonction du couvert végétal. Les bassins de savane montrent un déficit hydrologique continue marqué par un coefficient d'écoulement (CE) tombé à 5% seulement à partir de la décennie 1990. A l'opposé les bassins sous forêt montrent une reprise des écoulements depuis 1990 marqué par CE au-dessus de 10%. Sous savane, la part de l'écoulement s'infiltrant pour recharger l'aquifère aurait diminué plus vite que sous forêt, ce qui se traduit par un coefficient d'écoulement CE très significativement corrélé négativement avec la superficie de savane présente dans le bassin versant.

Mots clés : Hydropluviométrie, Rupture, Sécheresse, Hydrologie, Couvert végétal, Forêt, Oubangui, Kotto, Mbomou, Uélé.

Dynamics of rainfall and discharge over the Ubangi River at Mobaye, Central African Republic: antagonist roles of the savannah and the equatorial forest

Summary: The rainfall reduction in the 1970s, less marked in Central Africa than in West Africa, still had a major impact on the hydrological regimes of the region's large rivers. The study of the hydropluviometric behavior of the Ubangi at Mobaye has the advantage of studying a basin excluding anthropogenic impact. Forest cover and population density have not changed since at least 1970. Statistical analysis of the breaks in the long rainfall time series from Ubangi to Mobaye (1935-2015) confirms a long period of drought from 1969 to 2006 corresponding to a reduction of -8% in rainfall. And the study of the corresponding hydrological series indicates a second downward break in 1981, marking an exceptional hydrological drought with an increase of flows in 2013, few years after the rainfall increase. The statistical study of the annual rainfall/flow series of the upstream basins over the period 1951-1995 (the Kotto in Kembé and Bria, the Mbomou in Bangassou and Zémio, the Uélé + Bili hydrographic system) highlights different hydrological behaviors related to the vegetation cover. The savanna basins show a continuous hydrological deficit marked by a runoff coefficient (CE) that fell to 5% only from the 1990s. On the other hand, the basins under forest show a runoff increase since 1990 marked by CE above 10%. Under savannah, the part of the flow infiltrating to recharge the aquifer would have decreased faster than under forest, which results in a runoff coefficient CE very significantly negatively correlated with the savanna area present in the studied watershed.

Keywords: Hydropluviometry, Break, Drought, Hydrology, Vegetation cover, Forest, Ubangui, Kotto, Mbomu, Uele.

1. Introduction

La cassure pluviométrique des années 1970 a été moins marquée en Afrique Centrale qu'en Afrique de l'Ouest. Elle a tout de même largement impacté les régimes hydrologiques des grands cours d'eau de la région (Wesselink et al., 1996 ; Orange et al., 1997 ; Laraque et al., 1998, 2001 ; Paturol et al., 1998, 2007 ; Olivry et al., 1998 ; Servat et al., 1999 ; Sighomnou et al., 2007 ; Nguimalet et Orange, 2013). Sur l'Oubangui à Bangui, grand bassin à dominante de savane, la faible baisse pluviométrique de 5 à 6% a engendré -21% de déficit hydrologique sur la période 1983-2013 (Orange et al., 1994). Sur le Congo, Laraque et al. (2013) ont noté qu'après un déficit hydrologique observé dans la décennie 1980, l'écoulement est revenu à la normale depuis 1990. Selon Nguimalet et Orange (2019), la pluviosité sur le bassin de l'Oubangui à Bangui a montré une hausse significative depuis 2009, mais qui reste encore sans réel impact hydrologique sur le cours de l'Oubangui à Bangui. Récemment, Nguimalet et Orange (2020) ont montré que les comportements hydrologiques sur des petits bassins de 2 500 à 5 000 km² du nord de Centrafrique, en zone de savane soudanienne, étaient tous impactés par la sécheresse de 1970, à des niveaux différents et sans aucune période hydroclimatique commune. Il reste à savoir si cela est spécifique des bassins du Nord à végétation de savane, par contraste avec les bassins du Sud sous forêt équatoriale. C'est pourquoi nous proposons ici d'étudier l'évolution hydropluviométrique du bassin de l'Oubangui à l'exutoire de Mobaye et de ses bassins hydrologiques constitutifs, Mobaye étant situé à 380 km à l'amont de Bangui sans gros affluents entre ces deux stations hydrologiques (Orange et al., 1995). Le bassin de l'Oubangui à Mobaye est sans aucune influence anthropique. Il est couvert par moitié d'une savane drainée par 2 grandes rivières (la Kotto et le Mbomou), et d'une forêt dense drainée par l'Uélé (Orange, 1996).

L'évolution couplée de la pluviométrie (P) et des débits (Q) annuels sur le bassin amont de l'Oubangui à Mobaye est étudiée afin de discuter du rôle de la forêt comparativement à la savane sur le comportement hydropluviométrique des bassins de la Kotto, du Mbomou et de l'Uélé, afin d'apprécier le comportement des aquifères dans ce contexte hydropluviométrique déficitaire enregistré depuis 1970 dans la région. Nous abordons cette analyse par la recherche de périodes hydroclimatiques homogènes de la séquence 1935-2015 sur l'Oubangui à Mobaye, et sur la période 1951-1995 pour ses trois affluents majeurs que sont la Kotto, le Mbomou et l'Uélé.

2. Présentation de la zone d'étude : le bassin amont de l'Oubangui à Mobaye

L'exutoire de Mobaye sur l'Oubangui est situé à 151 km de la confluence du Mbomou (RCA) et de l'Uélé (RDC), confluence d'où naît la rivière Oubangui à Kemba (Fig. 1). L'Oubangui est le plus gros affluent de rive droite du Congo et une frontière naturelle entre la République Centrafricaine (RCA) au nord et la République Démocratique du Congo (RDC) au sud. L'Oubangui à Mobaye a un bassin-versant de 403 800 km². Les extrémités SE (Haut-Uélé) et Nord (Haut-bassin de la Kotto) du bassin sont dominées par des montagnes d'altitudes respectives de 1700 m et 1300 m, emboîtées deux plateaux (le Plateau gréseux de l'Uélé au Sud et la Surface Centrafricaine au Nord), puis la plaine du piémont de l'Oubangui assez étroite, confinant les vallées aval du Mbomou, de la Bili et de l'Uélé jusqu'à Mobaye, y compris la vallée aval de la Kotto. Dans notre étude, la Bili de seulement 21 400 km² est intégrée dans le bassin de l'Uélé (*i.e.* Orange, 1996).

Le gradient pluviométrique décroît du Sud au Nord, de 1 700 mm sur l'Uélé à 1 000 mm en moyenne sur le haut-bassin de la Kotto (Nguimalet et Ndjendolé, 2008). Le bassin de l'Oubangui à Mobaye marque une stratification latitudinale bien marquée des étages édaphiques (Fig. 2). Du Sud au Nord, on observe la forêt tropophile domaine de la forêt équatoriale avec 15% de forêt primaire (Global Forest Watch, 2019), puis la zone de savane

boisée, successivement arborée, arbustive et herbeuse à l'extrême Nord (Nguimalet, 2017). Les derniers relevés de 2018 faits par Global Forest Watch confirment qu'en Centrafrique et Nord Congo la superficie de forêt a très peu diminuée (-1,5 % entre 2001 et 2018), avec une perte légèrement plus importante de la forêt primaire (-1,9%). On considérera dans cette étude que la superficie de forêt n'a pas changé. Ainsi selon Orange et Ghiloufi (1996), on retiendra que le bassin de l'Uélé (et Bili comprise) est couvert à 70% de forêt tropophile et 30% de savane boisée et arborée, celui du Mbomou à 10% seulement de forêt tropophile et 30% de savane boisée (selon Orange, 1996), et celui de la Kotto est représentatif de la savane arborée et arbustive (Fig. 2). La forêt humide représente donc 30% du bassin de l'Oubangui à Mobaye.

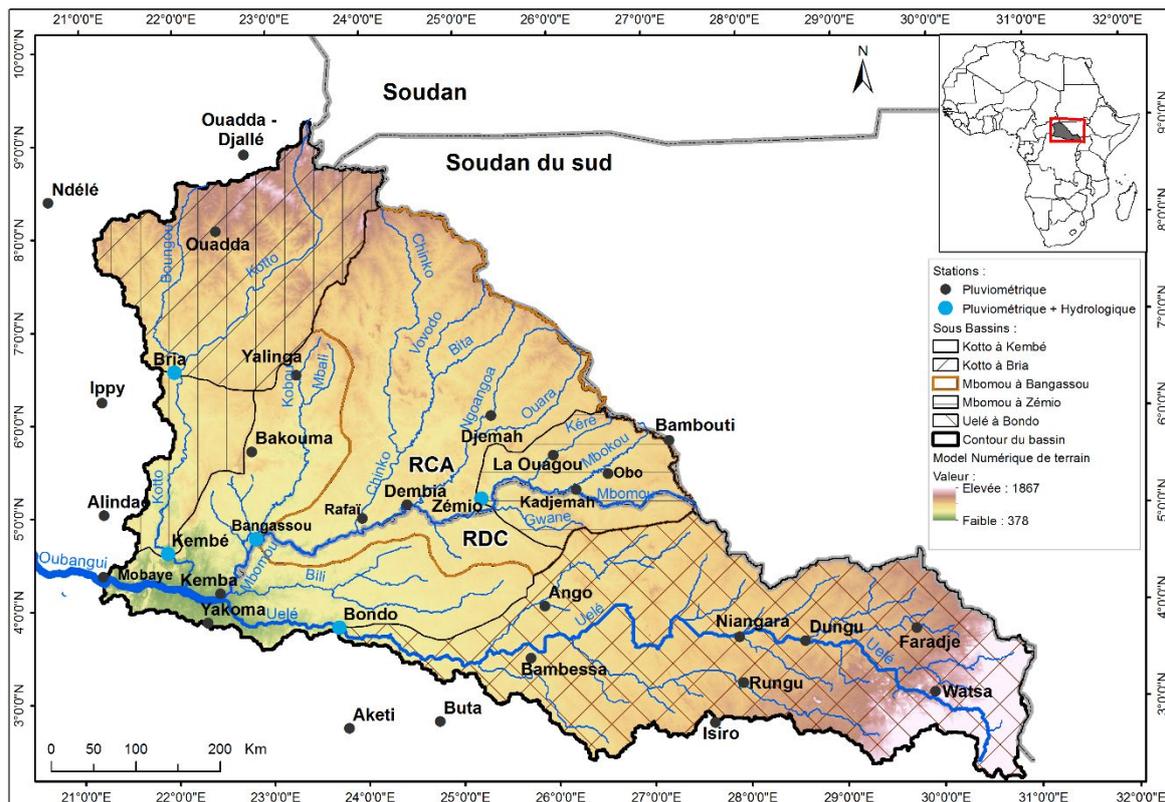


Fig. 1. Carte topographique du bassin de l'Oubangui à Mobaye, et du réseau hydropluviométrique étudié, avec la limite des 5 sous-bassins versants étudiés (aux exutoires de Bondo pour l'Uélé, Zémio et Bangassou pour le Mbomou, Bria et Kembé pour la Kotto).

Dans la région, la croissance démographique est faible : l'effectif de la population à Bangassou sur le Mbomou, capitale de région, est passée de 902.205 habitants en 2006 à 1.126.730 habitants en 2015, soit une augmentation de seulement 2,5% par an. L'ensemble du bassin de l'Oubangui à Mobaye reste donc une zone peu peuplée, avec une densité de population variant entre 10 hab/km² et 3,3 hab/km². Dans le bassin de l'Uélé, la densité de population était de 7 hab/km² en 2008 (Haut-Uélé, 2020). Les activités humaines sont essentiellement primaires (agriculture itinérante sur brûlis, exploitation minière artisanale, production de bois de chauffe et de charbon de bois, etc.), concentrées autour des vallées de l'Oubangui, de l'Uélé et du Mbomou ; ces activités ont peu évolué depuis 1970 (Orange et Ghiloufi, 1996 ; Nguimalet et Orange, 2019 ; Haut-Uélé, 2020).

Lorsque les données mensuelles sont manquantes ponctuellement, la reconstitution mensuelle du mois i est faite par la méthode des moyennes des mois i de deux années encadrant le manquant. Sur les périodes 1977-1985 et 1995-2015, les données manquantes de débit journalier à l'exutoire de Mobaye ont été reconstituées à partir de la station de Bangui en considérant que le débit spécifique est inchangé entre Mobaye et Bangui. Enfin, pour les années manquantes complètes, les données de la Kotto et du Mbomou ont été reconstituées à partir de la station hydrologique de proximité, selon la formule (Jacob et al., 2006 ; Azouka, 2011) :

$$q = Q (A / a)^{0,8}$$

avec :

- q , le débit recherché ;
- Q , le débit à la station de proximité ;
- A , la superficie du bassin à la station de proximité
- a , la superficie du bassin de la station étudiée.

Tableau 1 : Présentation des lacunes des données hydrologiques

Stations hydrométriques	Période	Mensuelles manquant	Annuelles manquant	Périodes manquantes
Oubangui / Bangui	1938-2015 (77 ans)	Aucunes	Aucunes	Aucunes
Oubangui / Mobaye	1938-2015 (77 ans, 924 mois)	475 mois (51%)	21 années + 20 ans en partie (53%)	1938, 1950, 1958-1969 1971, 1975-2014
Kotto / Kembé	1948-1995 (47 ans, 564 mois)	256 mois (45%)	14 années + 16 ans en partie (64%)	1949-1952, 1956, 1965- 1969, 1976-1994
Kotto / Bria	1948-1995 (47 ans, 564 mois)	242 mois (43%)	17 années + 5 ans en partie (47%)	1948-1953, 1964, 1967, 1968, 1977-1989
Mbomou / Bangassou	1951-1995 (44 ans, 528 mois)	274 mois (52%)	14 années + 20 ans en partie (77%)	1951-1954, 1956-1962 1964-1973, 1976-1986, 1992, 1994
Mbomou / Zémio	1951-1995 (44 ans, 528 mois)	100 mois (19%)	4 années + 13 ans en partie (39%)	1951-1953, 1957-1961, 1969, 1976, 1979-1982 1984, 1985, 1993
Uélé + Bili	Reconstitution	<i>Non avénu</i>	<i>Non avénu</i>	

Les données pluviométriques proviennent de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar (ASECNA) à Bangui pour la RCA et de la banque de données IRD pour le Congo. Les données de pluie annuelle ont été recueillies sur 8 stations en RCA et 3 stations au Congo, réparties sur l'ensemble du bassin de l'Oubangui à Mobaye (Fig. 1), sur la base des travaux de Orange et al. (1994). On trouve d'Ouest en Est (Fig.2) : Ippy, Mobaye, Bria, Ouadda Djellé, Yalinga, Bangassou, Rafai et Obo en RCA ; Bondo, Niangara et Watsa au Congo. Les deux stations pluviométriques de Yalinga et Obo sont complètes de 1951 à 1995 ; et la plupart des autres stations ont des données communes entre 1972 et 1992 (Tableau 2). La reconstitution des manquants a été faite par analyse des corrélations annuelles entre stations, selon les travaux de Orange et al. (1994).

Tableau 2 : Présentation des lacunes des données pluviométriques

Stations pluviométriques	Période	Années manquantes	Périodes manquantes
Yppi (1)	1951-1995 (44 ans)	11 ans (25%)	1951-1959, 1993, 1994
Mobaye	1951-1995 (44 ans)	23 ans (48%)	1951-1971, 1993, 1994
Bria	1951-1995 (44 ans)	11 ans (25%)	1951-1959, 1993, 1994
Ouadda Djellé (1)	1951-1995 (44 ans)	11 ans (25%)	1951-1959, 1993, 1994
Yalinga	1951-1995 (44 ans)	<i>aucune</i> (0%)	
Bangassou	1951-1995 (44 ans)	11 ans (25%)	1951-1959, 1993, 1994
Rafai	1951-1995 (44 ans)	27 ans (61%)	1951-1971, 1989-1994

Obo	1951-1995 (44 ans)	<i>aucune</i> (0%)	
Bondo	1951-1995 (44 ans)	27 ans (61%)	1951-1971, 1989-1994
Niangara	1951-1995 (44 ans)	27 ans (61%)	1951-1971, 1989-1994
Watsa	1951-1995 (44 ans)	33 ans (75%)	1951-1971, 1983-1994

(1) *Yppi et Bambari sont assimilées ; Ouadda Djellé et Birao sont assimilées*

Les données pluviométriques (P) et hydrologiques (Q) ont été disposées selon l'année hydrologique qui commence le 1^{er} avril. La pluviométrie annuelle de chaque sous bassin a été calculée par la méthode de Thiessen (Orange *et al.*, 1994). Les indices annuels pluviométriques et hydrologiques (respectivement *rainfall index* et *flow index*) sont des indices normés. Ils sont calculés à l'exutoire de chaque bassin versant étudié selon la formule suivante : $\text{Index} = (X_i - X_m) / S_i$ où X_i est la valeur de la variable X pour une année i ; X_m et S_i sont respectivement la moyenne et l'écart type de la variable X observée pour la durée de la série étudiée. Les variables considérées sont la lame d'eau précipitée annuelle P (exprimée en mm) et l'écoulement annuel Q (exprimée en m³/s). Cet indice permet de définir la sévérité de la sécheresse. Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide (Ardoin *et al.*, 2003).

3.2- Les tests de ruptures hydropluviométriques

Les tests de rupture sur les séries pluviométriques P et hydrométriques Q ont été faits avec le logiciel *Khronostat 1.01* (IRD, 1998) pour caractériser les périodes de stabilité de ces deux longues chronoséquences, en établissant si possible des sous-séquences d'écoulement homogènes, ou périodes hydroclimatiques. On a appliqué les tests de rang de Pettitt, de Lee et Heghinian, et la segmentation de Hubert (Hubert et Carbonnel, 1987). La combinaison de ces diverses méthodes se justifie par le fait que les deux premières méthodes (de Pettitt, et de Lee et Heghinian) sont des tests d'homogénéité dont l'hypothèse nulle est qu'une série temporelle est homogène entre 2 dates données et selon deux lois de distributions différentes. Ces tests sont réputés pour leur robustesse mais ne permettent pas de détecter plus d'une rupture dans une série chronologique. Par contre, le test de Hubert donne l'année des différentes ruptures constatées sur la série avec les moyennes et écarts-types des différents segments. Cette méthode a fait l'objet de nombreuses publications dans différentes régions d'Afrique (Servat *et al.*, 1999 ; Ardoin *et al.*, 2003 ; Bodian *et al.*, 2011) et en Centrafrique (Nguimamet et Orange, 2020). Ces tests n'ont pas été appliqués sur les séries temporelles de l'Uélé, qui sont des séries déduites des bassins alentours.

3.3- Le calcul des coefficients de tarissement

Les coefficients de tarissement de l'Oubangui à Mobaye et le volume mobilisé par l'aquifère du bassin ont été calculés à partir des données journalières (selon Savané *et al.*, 2001 ; Cosandey *et al.*, 2003 ; Goula *et al.*, 2006 ; Nguimalet et Orange, 2019). Mais de nombreuses lacunes, dans la décennie 1960 à pluviométrie exceptionnelle et après 1976 ont raccourci la série. Cette approche permet d'apprécier la contribution de l'écoulement de surface sur la recharge des aquifères, par période hydropluviométrique homogène dans ce contexte déficitaire.

L'expression mathématique du tarissement s'écrit :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt}$$

où :

Q_t = débit à l'instant t donné, Q_0 = débit initial (débit au début du tarissement) et k = coefficient de tarissement de Maillet. La loi de Maillet a pour modèle un seul réservoir, qui

<i>Oubangui à Mobaye (403800 km²)</i>	1 506	1969	1969	1938-1968 : 1 568 1969-2006 : 1 436 2007-2013 : 1 583	109 88 81	Humidité Sèche Humidité	+4 -5 +5
<i>Mbomou à Bangassou (115000 km²)</i>	1 491	1970		1951-1994 : 1 851			
<i>Mbomou à Zémio (29 300 km²)</i>	1 421	1970		1951-1994 : 1 748			
<i>Kotto à Kembé (77 500 km²)</i>	1 348	1969	1969	1948-1980 : 1 458 1981-1991 : 1 306 1992-1993 : 1 577	94 89 32	Humide Sèche Humide	+2 -8 +11
<i>Kotto à Bria (61 500 km²)</i>	1 348	1967	1967	1948-1966 : 1 436 1967-1991 : 1 267 1992-1993 : 1 515	94 105 83	Humide Sèche Humide	+7 -7 +12

Tableau 4. Segmentation statistique des débits annuels de l'Oubangui à Mobaye (1948-1995) et sur les bassins amonts de 1951 – 1995 (du Mbomou à Bangassou et Zémio, de la Kotto à Kembé et Bria).

Rivières	Moyenne interannuelle (m ³ /s)	Petit	Lee et Heghinian	Segmentation de Hubert (m ³ /s)	Ecart-type	Tendances hydroclimatiques	Rapport Q à la moyenne interannuelle (%)
<i>Oubangui à Mobaye (403 800 km²)</i>	3 059	1970	1970	1948-1953 : 2 925 1954-1967 : 3 804 1968-1968 : 5 524 1969-1980 : 2 986 1981-1994 : 2 208	232 513 0 414 288	Sèche Humide Hyper humide Sèche Plus sèche	-4 +24 +81 -2 -28
<i>Mbomou à Bangassou (115 000 km²)</i>	782		1975	1951-1960 : 731 1961-1969 : 1051 1970-1993 : 706	129 187 185	Sèche Hyper humide Sèche	-7 +34 -10
<i>Mbomou à Zémio (29 300 km²)</i>	171	1981	1981	1951-1961 : 165 1962-1968 : 249 1969-1980 : 180 1981-1993 : 128	22 49 37 35	Sèche Hyper Humide Humide Plus sèche	-4 +46 +5 -25
<i>Kotto à Kembé (77 500 km²)</i>	360	1970		1948-1965 : 401 1965-1969 : 651 1970-1984 : 345 1985-1993 : 169	67 38 43 27	Humide Plus Humide Sèche Plus Sèche	+11 +81 -4 -53
<i>Kotto à Bria (61 500 km²)</i>	244	1985		1948-1984 : 268 1985-1993 : 134	40 22	Humide Plus Sèche	+10 -45

4.2- Evolution interannuelle de la pluviosité et des débits annuels des sous-bassins de l'Oubangui à Mobaye

Les séries pluviométriques des bassins de l'Uélé et de la Mbomou à Bangassou ont une évolution similaire à celle de l'Oubangui à Mobaye, et dans une moindre mesure de même que la série de la Kotto à Kembé. Par contre, les séries pluviométriques du Mbomou à Zémio et de la Kotto à Bria ne montrent pas une séparation nette entre une phase humide et une phase sèche (Fig. 4). Ces 2 derniers bassins drainent la savane arborée et arbustive, alors que les 2 premiers sont d'extension Est-Ouest et drainent une partie importante de forêt tropophile. Globalement, sur tous ces bassins, les années 1960 sont humides, les années 1980 sont sèches et il semble y avoir une reprise pluviométrique depuis le début des années 1990, peut-être plus marquée sur l'Uélé.

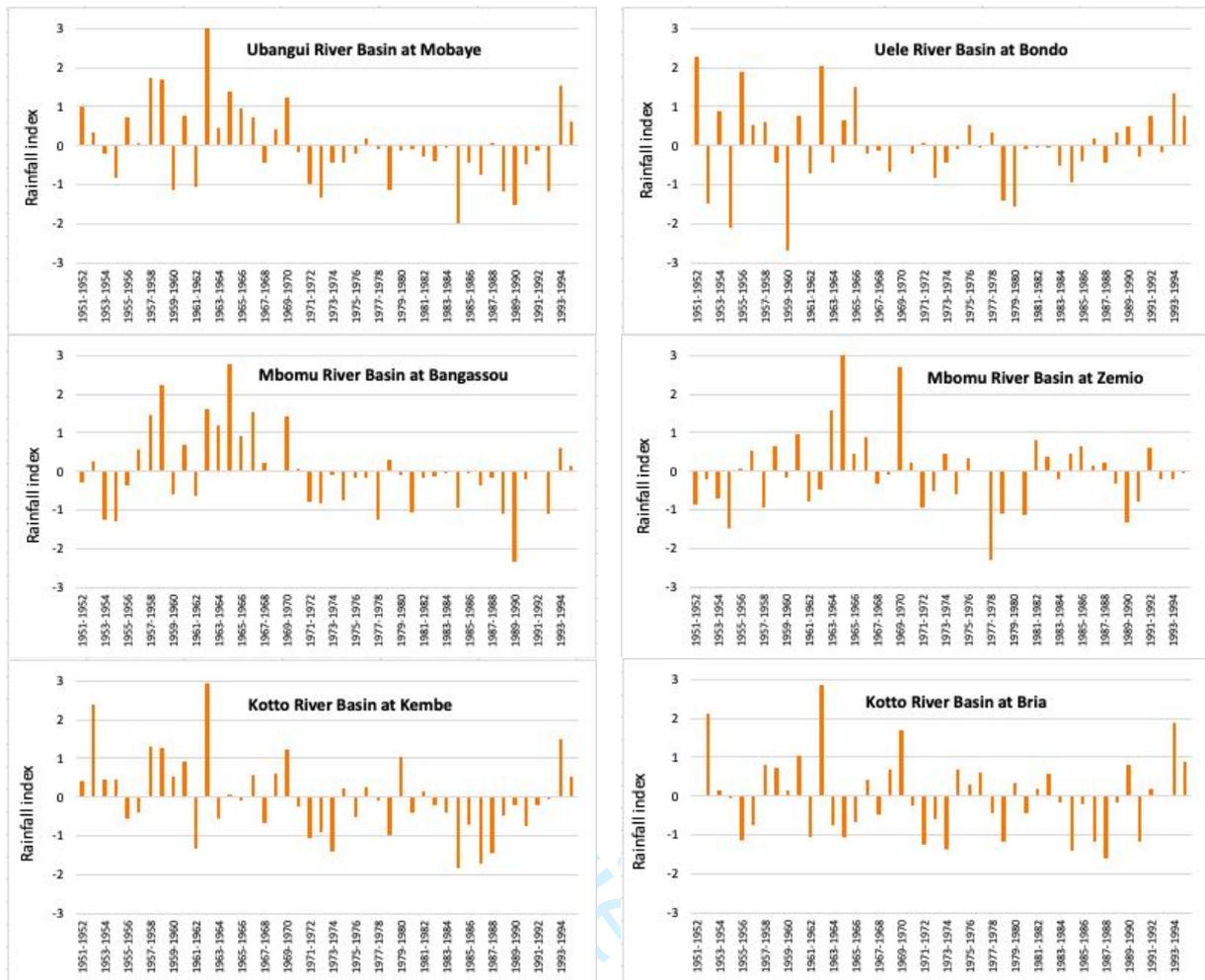


Fig. 4. Index pluviométriques des bassins amont de l'Oubangui à Mobaye de 1951 à 1995.

Les tests statistiques ne montrent des ruptures pluviométriques que sur les deux bassins de la Kotto, la segmentation de Hubert faisant apparaître 3 périodes pluviométriques homogènes à des dates différentes, seule la période récente 1992-1993 est notée humide. Par contre, la rupture pluviométrique de 1970 caractéristique du continent d'Afrique centrale (Laraque et al., 2001) n'est pas confirmée. On ne la retrouve que sur l'analyse de la série temporelle pluviométrique de la Kotto à Bria pour laquelle la période sèche est marquée sur une durée de près de 25 ans (de 1967 à 1991) avec une péjoration pluviométrique importante de -12%. La Kotto à Bria est le bassin le plus au Nord des 6 bassins étudiés.

Il est remarquable que seul le test de Pettitt détecte une rupture pluviométrique en 1970 sur le bassin du Mbomou aussi bien à Bangassou qu'à Zémio. Cette absence de rupture dans les sous-bassins du Mbomou serait due à l'impact du couvert forestier qui régule les systèmes pluviométriques, telle qu'observée aussi pour le bassin de la Tomi à Sibut dans le Centre-Nord de la RCA (Nguimalet et Orange, 2020).

Les séries temporelles des débits annuels de l'Oubangui à Mobaye et de la Kotto à Kembé et Bria montrent une décroissance globale continue de 1948 à 1994, sans aucun semblant de reprise des débits dans les années 1990, au contraire des bassins de la Mbomou à Bangassou et Zémio (Fig. 5). Les débits sont globalement au-dessus de la moyenne jusqu'en 1988 avant de plonger brusquement. La reconstitution des débits du complexe hydrologique Uélé+Bili montre une image intermédiaire qui ne permet pas d'identifier un comportement hydrologique spécifique qui pourrait être lié à la présence importante de la forêt tropophile.

L'analyse des ruptures statistiques (Tab. 4) permet d'identifier les deux bassins amont (Kotto à Bria et Mbomou à Zémio) qui ne montrent pas de cassure hydrologique en 1970, mais seulement en 1985 à Bria et 1981 à Zémio. Par contre, les bassins de la Kotto à Kembé et de la Mbomou à Bangassou ont, tous les deux, été impactés par une rupture hydrologique en 1970, avec une séquence sèche continue de 1970 à 1993, cette séquence étant plus accentuée sur la Kotto à Kembé depuis 1985. Le déficit hydrologique est largement plus marqué sur les bassins de la Kotto, domaine de la savane : -50% à Bria et -74% à Kembé. Sur les bassins de la Mbomou, les déficits hydrologiques sont de -49% à Zémio et -33% à Bangassou.

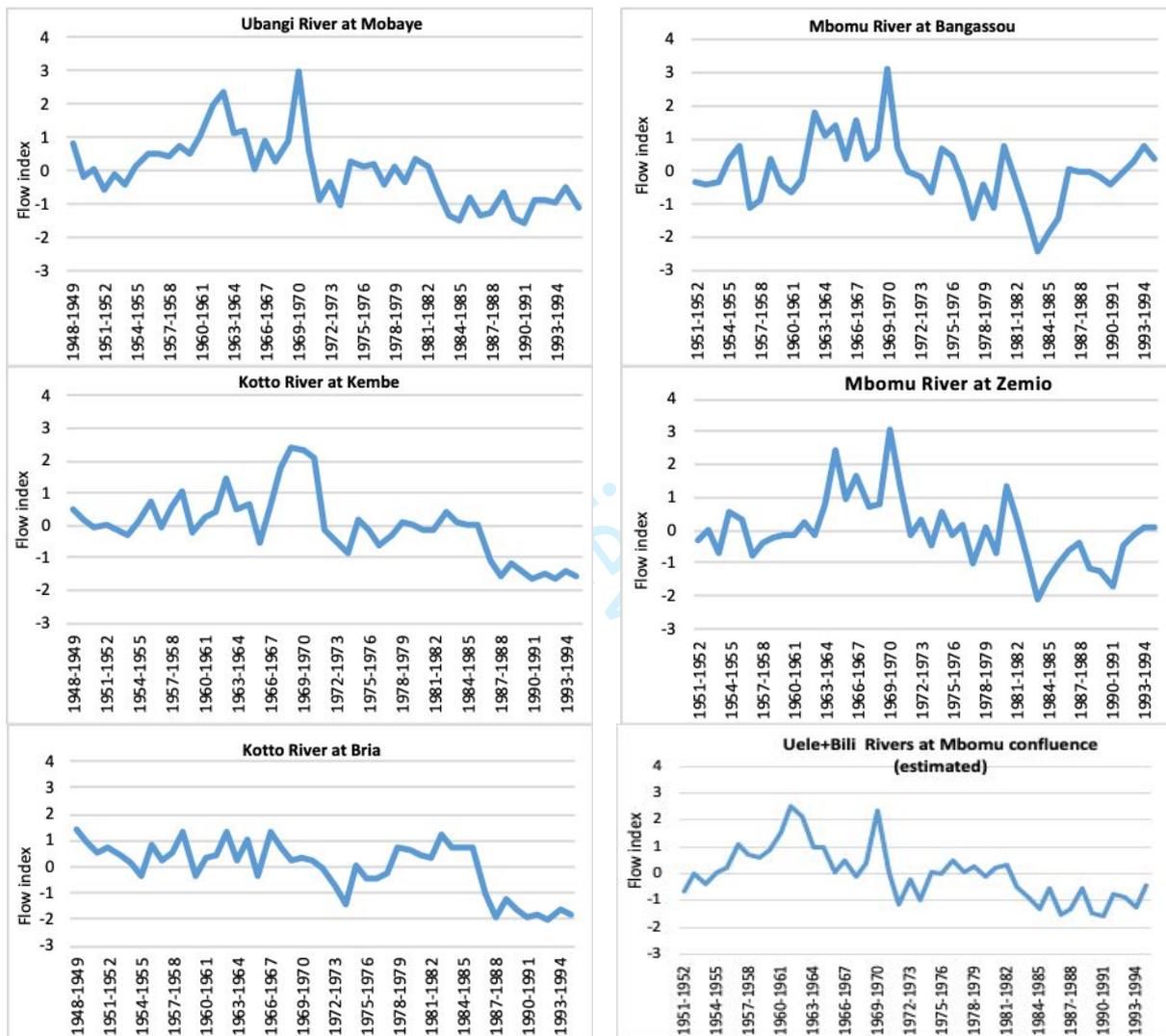


Fig. 5. Index hydrologiques de 1948 à 1995 sur les bassins de l'Oubangui à Mobaye, de la Kotto à Kembé et Bria, et de 1951 à 1995 sur les bassins de la Mbomou à Bangassou et à Zémio, estimation de l'index hydrologique de la somme Uélé+Bili à la confluence avec le Mbomou.

5. Discussion

5.1- Evolution interannuelle comparée de l'Oubangui à Mobaye avec l'Oubangui à Bangui

L'évolution interannuelle de la lame d'eau écoulee de l'Oubangui à Mobaye est similaire à celle de l'Oubangui à Bangui (Fig. 6), avec une rupture hydrologique très marquée en 1971 et un semblant de reprise des écoulements à partir de 2013 (Nguimalet et Orange, 2019). Le déficit d'écoulement sur l'Oubangui à Bangui est légèrement plus marqué qu'à Mobaye, avec

une valeur moyenne de l'index hydrologique autour de -1 pour Bangui et de -0,8 pour Mobaye. Ainsi le déficit hydrologique de l'Oubangui à Bangui est de -27% entre la période humide 1960-1970 (4877 m³/s) et la première période sèche de 1971-1982 (3577 m³/s), alors que le déficit est légèrement inférieur à Mobaye, de -24% entre la période humide de 1957-1968 (3919 m³/s) et la période sèche de 1969-1980 (2986 m³/s). Le début de reprise des écoulements enregistré en 2013 intervient comme sur l'Oubangui à Bangui quelques années après la reprise pluviométrique de 2008 (Fig.3), mais avec une année d'avance (Nguimalet et Orange, 2019). Ce décalage d'une année indique une différence de comportement hydrologique amont-aval de l'Oubangui : le soutien hydrologique des débits est mieux assuré sur le bassin amont.

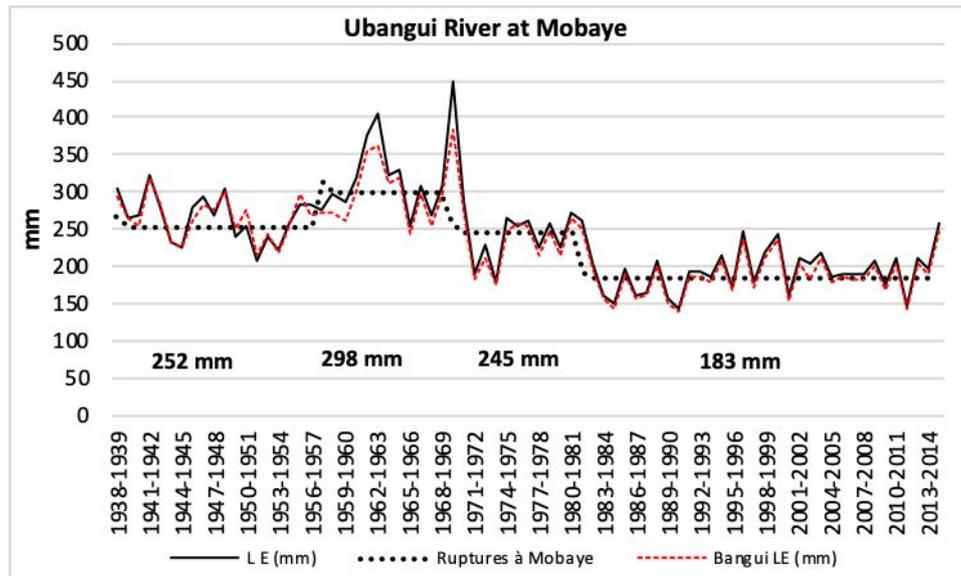


Fig. 6. Evolution comparée interannuelle de la lame d'eau écoulée (LE) du bassin l'Oubangui à Mobaye et à Bangui (de 1938 à 2015). Les périodes 1950, 1958-1969, 1971, 1975-2014 ont été reconstituées à partir des débits de l'Oubangui à Bangui.

5.2- Diversité de ruptures climatiques majeures dans le bassin de l'Oubangui à Mobaye

Sur la période étudiée 1951-1995, seuls les 2 bassins de la Kotto (à Bria et Kembé) montrent une tendance à la baisse de leurs écoulements malgré la reprise des pluies au début des années 1990 (Fig. 5 et 4). Par contre, les débits des années 1990 des 2 bassins du Mbomou augmentent et semblent expliquer la hausse observée sur l'Oubangui à Mobaye. Ce constat s'expliquerait par l'impact du couvert forestier sur le régime hydrologique du Mbomou, comparé à l'environnement savanien que draine la Kotto. Par ailleurs, les résultats montrent des déficits hydrologiques beaucoup plus marqués sur la Kotto que le Mbomou.

L'analyse couplée des séries pluviométriques et hydrologiques a montré une précocité de la rupture climatique dans le bassin de l'Oubangui à Mobaye et donc de la sécheresse actuelle d'une année, soit en 1968 et 1969 respectivement, face à la cassure majeure de 1970 unanimement admise en Afrique centrale et de l'Ouest. Mais cette rupture n'est pas explicite sur les deux bassins amont étudiés, que sont la Kotto à Bria et la Mbomou à Zémio. Par ailleurs, la rupture de 1968 dans la série pluviométrique est intervenue à la fin d'une période homogène humide (1938-1968), enregistrant seulement un excédent de +4% par rapport à la moyenne interannuelle. Cette période pluviométrique humide a engendré deux périodes homogènes de débits annuels, l'une moyennement humide avec un excédent hydrologique de +10% (1938-1956) et l'autre de décennie très humide avec un écoulement excédentaire de +32% (1957-1968). Cela témoigne d'un exemple de disparité de réponse de l'écoulement face à la variable pluie, du fait du bon fonctionnement des réserves aquifères à cette époque,

comme annoncé par Orange et al. (1997) à partir de l'étude des bilans hydrologiques par sous-bassin. La longue période de sécheresse a modifié de manière différente les mécanismes d'infiltration entre la zone de savane au Nord et la zone de forêt tropophile au Sud. Sous savane, la part de l'écoulement s'infiltrant pour recharger l'aquifère aurait diminué plus vite que sous forêt.

La disponibilité des données hydrologiques journalières a permis le calcul du coefficient de tarissement sur l'Oubangui à Mobaye de 1938 à 1974 (Fig. 7). Sur cette période, le coefficient de tarissement moyen interannuel est de $0,019 \text{ jour}^{-1}$, avec un maximum de $0,026 \text{ jour}^{-1}$ (1972-1973) et un minimum de $0,015 \text{ jour}^{-1}$ (1968-1969). Ces coefficients de tarissement sont légèrement supérieurs à ceux calculés pour l'Oubangui à Bangui, de 1935 à 2015 (Nguimalet et Orange, 2019). A Bangui, les coefficients de tarissement ont commencé à augmenter à partir $0,018 \text{ jour}^{-1}$ à la fin des années 1960 pour atteindre un maximum de $0,025 \text{ jour}^{-1}$ en 2000, pour ensuite diminuer quelque peu. Ces chiffres confirment que les dynamiques de tarissements de l'Oubangui à Mobaye et à Bangui sont similaires. On peut donc présumer des étiages maximaux à partir des années 2000. A partir des données enregistrées, le volume moyen mobilisé par l'aquifère du bassin de l'Oubangui à Mobaye serait de $36,3 \text{ km}^3$, le maximum enregistré étant de 62 km^3 en 1968-1969 et le minimum de 20 km^3 en 1972-1973 (Fig. 7). Par identification avec l'Oubangui à Bangui, on estime le minimum de contribution à 17 km^3 depuis 2000.

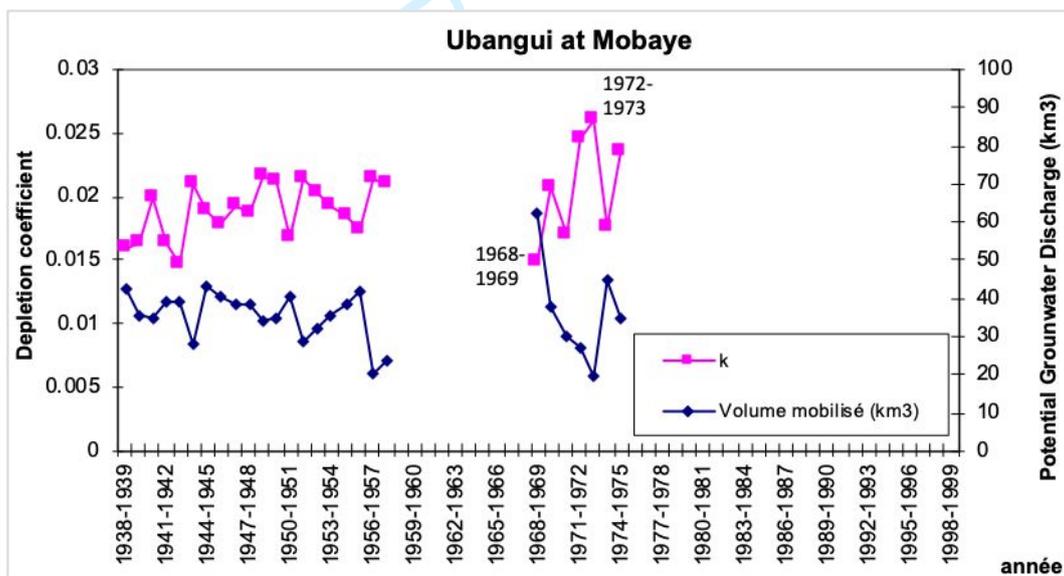


Fig. 7. Evolution interannuelle du coefficient de tarissement de l'Oubangui à Mobaye et du volume mobilisé par l'aquifère de son bassin versant (1938-1976)

5.3- Rôles antagonistes de la savane et de la forêt sur la dynamique hydropluviométrique des sous-bassins de l'Oubangui à Mobaye

L'examen concerté des ruptures statistiques des séries temporelles pluviométriques et hydrologiques des sous-bassins constitutifs de l'Oubangui à Mobaye met en évidence une différence de comportements hydropluviométriques entre la Kotto orientée Nord-Sud dont le bassin est le domaine de la savane, et le Mbomou orienté NE-SO dont le bassin est couvert à 10% de forêt équatoriale et à 30% de savane boisée: i) sur la Kotto, le déficit hydropluviométrique ne fait que s'accroître depuis 1970 avec un accroissement du déficit hydrologique marqué à partir de 1985 (Tab. 3) et sans marque de reprise des écoulements malgré une reprises des pluies vers 1992 (Fig. 4); et ii) sur le Mbomou, un semblant de reprise des débits au début des années 1990.

Pour préciser ce comportement, nous avons calculé la relation entre la lame d'eau écoulée et la lame d'eau précipitée par décennie, de 1951 à 1995, et pour chacun des 6 bassins étudiés (Fig. 8). Seuls les 2 bassins de la Kotto montrent une corrélation positive entre ces deux variables ; pour les 4 autres bassins la corrélation est négative. Une pente positive est caractéristique d'un fonctionnement hydrologique de type hortonien : les écoulements de surface augmentent avec la pluviométrie. A l'inverse, la pente négative indique des bassins ayant une capacité à retenir l'eau dans leurs sols (à infiltrer), caractéristique souvent liée à la présence de couverts forestiers.

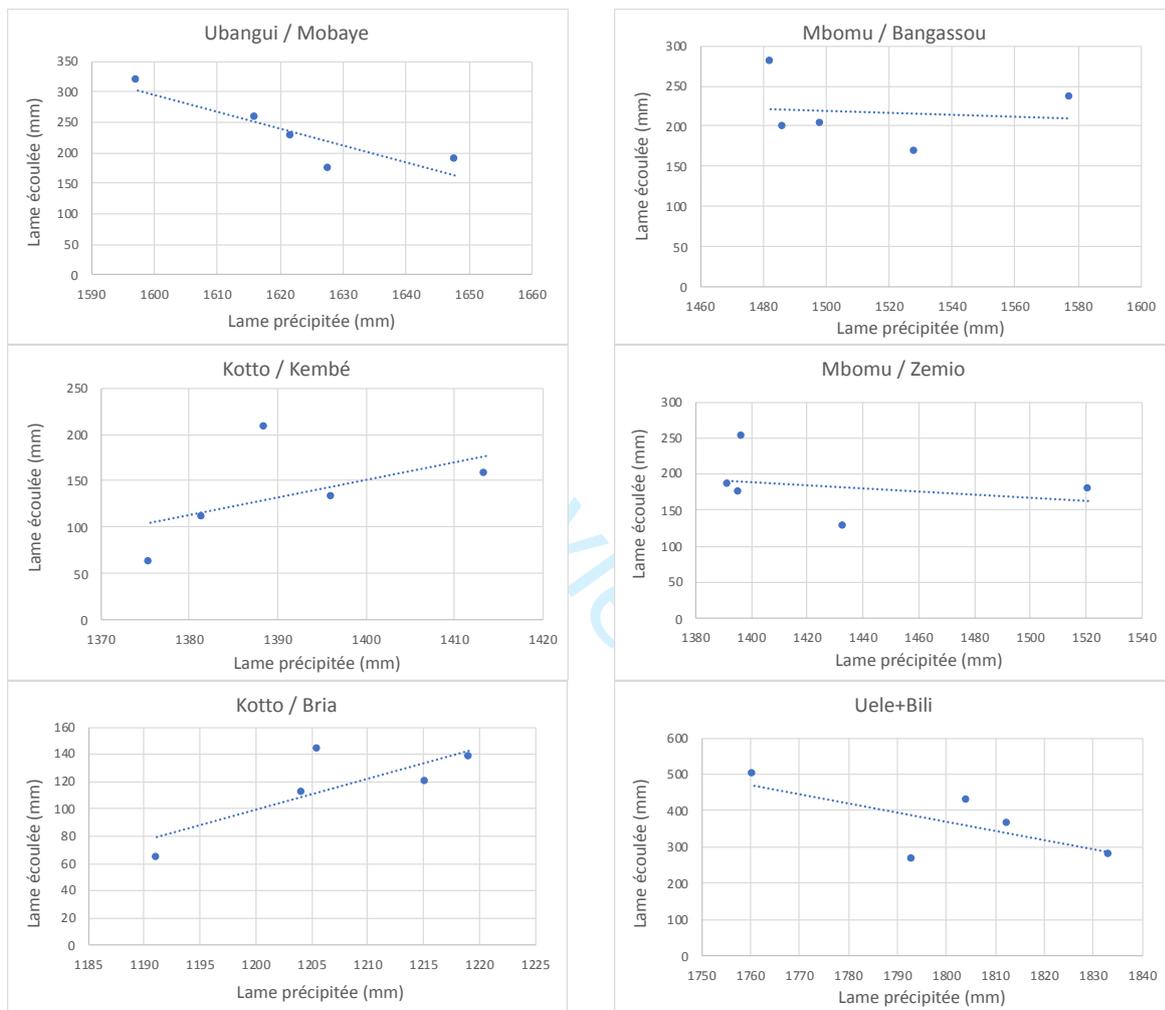


Fig. 8. Relation lame d'eau écoulée en fonction de la lame d'eau précipitée (en mm) sur le bassin l'Oubangui à Mobaye et ses sous-bassins versant (par décennie, de 1951 à 1995).

Le calcul des coefficients d'écoulement par décennie et pour chaque affluent confirme ce comportement. Les coefficients d'écoulement décennaux de la Kotto diminuent sans discontinuer de 1961 à 1995 pour atteindre seulement 5%, alors que sur les autres bassins étudiés le CE augmente au cours de la dernière décennie (Fig. 9). La moyenne sur la période 1951-1995 est de 10% pour la Kotto, à la fois à Kembé et à Bria ; de 14% et 13% sur le Mbomou, respectivement à Bangassou et Zémio ; de 14% sur l'Oubangui à Mobaye et de 20% sur le système hydrologique Uélé+Bili. La valeur du coefficient d'écoulement moyen est très significativement corrélée négativement à la superficie de savane non boisée présente sur le bassin versant (Fig. 10).

L'impact probable du couvert forestier (forêt + savane boisée) peut expliquer l'évolution des CE. Sur la période étudiée 1951-1995, seuls les 2 bassins de la Kotto (à Bria et

Kembé) montrent une tendance continue à la baisse de leurs écoulements sans aucune reprise à la faveur de la reprise des pluies dans le début des années 1990, alors que les 2 bassins du Mbomou ont des débits à la hausse avec une augmentation significative des coefficients d'écoulements, qui passent de moins de 10% à près de 15%. Les coefficients d'écoulement de la Kotto sont seulement à 5% en 1995. Ce constat s'expliquerait par l'impact du couvert forestier sur le régime hydrologique du Mbomou, comparé au couvert de savane non boisée que draine la Kotto.

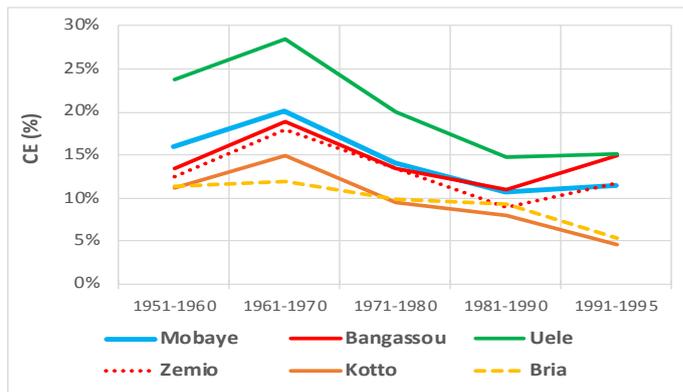


Fig. 9. Evolution décennale des coefficients d'écoulement (CE) de l'Oubangui à Mobaye et de ses affluents.

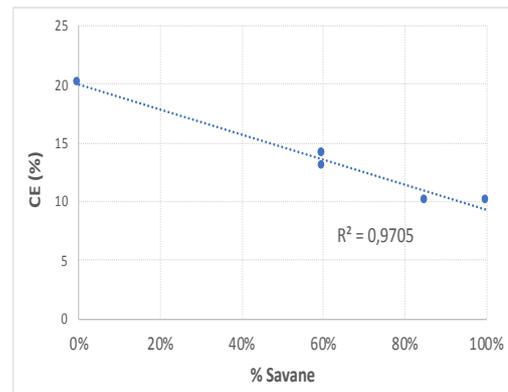


Fig. 10. Relation entre le coefficient d'écoulement (CE) et le pourcentage de superficie en savane non boisée dans les sous-bassins de l'Oubangui à Mobaye.

La série temporelle des débits de l'Oubangui à Mobaye confirme les observations faites sur la station aval de l'Oubangui à Bangui par de nombreux auteurs (Orange et al., 1997 ; Laraque et al., 2001 ; Nguimalet et Orange, 2019) : même si la rupture hydrologique de 1970 reconnue partout en Afrique de l'Ouest et Centrale est observable sur l'Oubangui, la rupture de 1981 impacte plus drastiquement la capacité de ce fleuve à atténuer les déficits pluviométriques annuels. Bien que la grande période de sécheresse en cours ait débuté dans le bassin de l'Oubangui plus d'une décennie avant cette rupture de 1981, le début des années 1980 témoigne en Afrique Centrale d'une accentuation de l'effet de la péjoration pluviométrique dans les bassins forestiers, ce que confirme les travaux sur les bassins forestiers de Côte d'Ivoire (Goula et al., 2006 ; Fadika et al., 2008). Ces auteurs ont révélé un impact tardif vers 1980 de la rupture pluviométrique de 1970 sur les petits rivières ou bassins élémentaires en Afrique de l'Ouest et Centrale, comparé aux grands cours d'eau qui ont enregistré sur leur débit la cassure climatique majeure de 1970 (e.g. Laraque et al., 1998, 2001).

6. Conclusion

La série pluviométrique de l'Oubangui à Mobaye semble confirmer la fin de la longue sécheresse des années 1970 avec une probable seconde rupture en 2006 qui caractérise le retour à une période pluviométrique humide. Les moyennes pluviométriques à retenir sont donc de 1568 mm, 1436 mm et 1583 mm pour respectivement les périodes 1938-1968, 1969-2006 et 2007-2015. La période de déficit pluviométrique 1969-2006 est d'une durée exceptionnellement longue (de 38 ans), elle correspond à une réduction de -8% de la pluviométrie par rapport à la période précédente. Par contre, la période humide actuelle 2007-2015 décrit une hausse pluviométrique de +10% par rapport à la période précédente. La

pluviométrie en Centrafrique est donc revenue à son niveau moyen de 1938-1968, autour de 1570 mm/an. Mais qu'en est-il des écoulements fluviaux ?

Il est remarquable que les deux dates de rupture pluviométrique (1968 et 2006) retrouvées aussi bien sur l'Oubangui à Bangui que sur l'Oubangui à Mobaye, ne se retrouvent pas sur les séries temporelles de débits annuels, où n'apparaît que 1970, marquant le caractère hautement exceptionnel de cette rupture sur le fonctionnement hydrologique dans la région. Par contre, la série temporelle des débits de l'Oubangui à Mobaye atteste de l'importance d'une seconde rupture à la baisse hydrologique en 1981 et d'une troisième rupture cette fois à la hausse en 2013. On distingue donc 3 périodes hydroclimatiques pour l'Oubangui à Mobaye : 1954-1968, 1969-1980, 1981-2013, avec respectivement les débits moyens interannuels de 3919 m³/s, 2986 m³/s (-24%) et 2372 m³/s (-21%).

Nous retiendrons deux choses. (1) D'une part, le semblant de reprise des écoulements, enregistré en 2013, intervient quelques années après la reprise pluviométrique de 2006, comme sur l'Oubangui à Bangui mais avec l'avance d'une année (Nguimalet et Orange, 2019). Ce décalage se retrouve sur les dates de ruptures du début de la longue période de sécheresse, datée à partir de 1981 à Mobaye et de 1983 à Bangui. Ces différences de comportement hydrologique amont-aval de l'Oubangui semblent indiquer que le soutien hydrologique des débits est mieux assuré sur le bassin amont mais que ce soutien s'est dégradé fortement au cours de ces 25 dernières années. (2) D'autre part, une deuxième rupture en 1981 montre un effondrement hydrologique des écoulements fluviaux indiquant le caractère exceptionnel de cette « sécheresse des années 1970 » !

Ce second déficit hydrologique ne correspond pas à un nouveau déficit pluviométrique, aussi il ne peut être expliqué que par des paramètres exogènes à la pluviosité. Le couvert végétal et la pression démographique ayant peu évolués depuis 1970 dans tout le bassin de l'Oubangui à Mobaye, cet effondrement des écoulements fluviaux marque un fonctionnement différent de la contribution des aquifères, comme annoncé par Orange et al. (1997). La longue période de sécheresse a modifié de manière différente les mécanismes d'infiltration entre la zone de savane au Nord et la zone de forêt tropophile au Sud. Sous savane, la part de l'écoulement s'infiltrant pour recharger l'aquifère aurait diminué plus vite que sous forêt, ce qui se traduit par un coefficient d'écoulement très significativement corrélé négativement avec la superficie de savane non boisée présente dans le bassin versant.

Ainsi cette étude a montré le comportement opposé entre bassins sous savane non boisée (la Kotto) et bassins sous forêt et savane boisée (le Mbomou pour partie et surtout l'Uélé). La savane et la forêt jouent un rôle antagoniste sur le comportement hydropluviométrique des bassins hydrologiques constitutifs de l'Oubangui à Mobaye. Ainsi la rupture pluviométrique de 1970 caractéristique du continent ouest-africain et d'Afrique centrale, bien confirmée sur l'Oubangui à Mobaye, n'apparaît explicitement que sur les bassins de savane non boisée drainés par la Kotto. Par contre sur les bassins du Mbomou et de l'Uélé, l'absence de rupture pluviométrique est attribuée à l'impact du couvert forestier.

Remerciements : Les auteurs remercient la Direction de la Météorologie Nationale et l'ASECNA pour l'accès à leurs banques de données, de même que l'IRD et les programmes PEGI/GBF-RCA (Programme d'Etude de l'Environnement de la Géosphère Intertropicale, volet Grands Bassins Fluviaux en Centrafrique ; Bangui, IRD, de 1986 à 1993) et PNUD/OMM CAF/91/021 (Assistance Agrohydro-météorologique et Surveillance de l'Environnement ; Bangui, de 1991 à 1995). Les auteurs remercient les relecteurs.

Bibliographie

- Ardoin S, Lubès-Niel H, Servat E, Dezetter A, Paturol JE, Mahé G, Boyer JF, 2003. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 90. In : Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (colloque IAHS, Montpellier), E. Servat, W. Najem, C. Leduc, S. Ahmed (Ed.Sc.), *PIAHS*, 278: 223-228.
- 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 - Géographie Physique et Environnement*, vol. V : 116-133. DOI : 10.4000/physio-geo.1958
- Callède J, Boulvert Y, Thiébaux J-P, 2009. Le bassin de l'Oubangui. IRD Éditions, Collection : Monographies Hydrologiques, Marseille, France, 657 p.
- Fadika V, Goula Bi Tié A, Kouassi FW, Doumouya I, Koffi K, Kagamate B, Savane I, Srohorou B., 2008. Variabilité interannuelle et saisonnière de l'écoulement de quatre cours d'eau de l'Ouest côtier de la Côte d'Ivoire (Tabo, Dodo, Néro et San Pédro) dans un contexte de baisse de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest. *Eur. J. Sci. Res.*, 21(3): 406-418.
- Global Forest Watch, 2019. Tree cover and loss as well as primary forest cover and loss in Congo Basin countries, 2001-2018.
- Goula BTA, Savané I, Konan B, Fadika V, Kouadio GB, 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 – Rev. Sci. Environnement*, 7(1) : 1-12.
- Haut-Uele, 2020. *La Monographie de la nouvelle Province du Haut-Uele*. <https://www.congo-autrement.com/page/les-26-provincences-de-la-rdc/la-monographie-de-la-province-du-haut-uele.html> consulté le 10 mars 2020
- Hubert P, Carbonnel JP, 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrology*, 95(1) : 165-183. DOI : 10.1016/0022-1694(87)90123-5
- IRD, 1998. KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier. URL : <http://www.hydrosociences.org/spip.php?article239>
- Laraque A, Bellanger M, Adèle G, Guebanda S, Gulemvuga G, Pandi A, Paturol JE, Robert A, Tathy JP, Yambélé A, 2013. Évolutions récentes des débits du Congo, de l'Oubangui et de la Sangha. *Geo-Eco-Trop*, 37(1) : 93-100.
- Laraque A, Mahé G, Orange D, Marieu B, 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology*, 245(1-4) : 104-117.
- Laraque A, Orange D, Maziezoula B, Olivry J-C, 1998. Origine des variations des débits du Congo à Brazzaville durant le XX^e siècle. In Servat E et al. (Ed. Sc): *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, Abidjan, 1998, *PIAHS*, 252: 171-179.
- Nguimalet CR, 2017. Changements enregistrés sur les extrêmes hydrologiques de l'Oubangui à Bangui (République centrafricaine) : analyse des tendances. *Revue des Sciences de l'Eau*, 30(3) : 183-196.
- Nguimalet C., Ndjendolé S, 2008. Les extrêmes hydrologiques: des indicateurs d'hydrodynamisme ou d'hydraulicité du plateau gréseux de Mouka-Ouadda sur la rivière Pipi à Ouadda (République Centrafricaine). *Zf Geomorphologie*, 52(1) : 125-141.
- Nguimalet CR, Orange D, 2013. Dynamique hydrologique récente de l'Oubangui à Bangui (Centrafrique): impacts anthropiques ou climatiques ? *Geo-Eco-Trop*, 37(1) : 101-112.
- Nguimalet CR, Orange D, 2019. Caractérisation de la baisse hydrologique actuelle de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine. *La Houille Blanche*, 1 : 1-7.
- Nguimalet CR, Orange D, 2020. Hydroclimatic variabilities in Tomi at Sibut, Gribingui at Kaga-Bandoro and Fafa at Bouca basins, Central-north and central-south of the Central African Republic. *PIAHS*, Zhongbo Yu et al., Ed Sc : Hydrological Processes and Water Security in a Changing World, 8th Global FRIEND-Water Conference, Beijing, China, Nov. 2018 : in press.
- Olivry J-C, Briquet J-P, Mahé G, 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998, *PIAHS*, 252 : 189-197.
- Orange D, 1995. Review de la Monographie de l'Oubangui : reconstitution des données hydrologiques du bassin de l'Oubangui pour la constitution de la Banque hydrologique du programme PEGI/GBF/RCA (de l'origine des stations à 1994). *Technical report, Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM UR22, Montpellier ; IRD, 2 tomes : 202 p + 222 p*. https://www.researchgate.net/publication/335653636_Review_de_la_Monographie_de_l'Oubangui_RCA
- Orange D, 1996. Transports de matières dans un bassin fluvial tropical humide en zone de forêt : l'Uélé au Zaïre. *Sciences Géologiques, Bull., Strasbourg*, 49(1-4): 71-88.
- Orange D, Ghiloufi M, 1996. Etude de l'impact des feux sur l'érosion des sols à partir des transports solides des cours d'eau en milieu tropical humide (RCA). Collaboration programmes internationaux PEGI (CNRS) et FIRE (EU), Rapport ORSTOM et ENGEES, Montpellier; Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier, 128 p.
- Orange D, Sigha-Nkamdjou L, Mettin J-L, Malibangar D, Debondji D, Feizouré C, 1994. *Evolution mensuelle de la lame d'eau précipitée sur le bassin de l'Oubangui depuis 1972*. Rapport ORSTOM, Bangui ; Géographie, Fac. Lettres et Sci. Hum., Université de Bangui (RCA), 132 p.
- Orange D, Wesselink A, Feizouré C, 1995. Banques de données hydrologiques du bassin de l'Oubangui utilisée pour le programme PEGI/GBF (1986-1993). *Technical report, Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM UR22, Montpellier ; IRD, 53 p*. https://www.researchgate.net/publication/331742846_Banque_Hydrologique_Oubangui_rapport_factuel_1995
- Orange D, Wesselink A, Mahe G, Feizouré C, 1997. The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. *PIAHS*, 240 : 113-123.
- Paturol JE, Barrau C, Mahé G, Dezetter A, Servat E, 2007. Modelling the impact of climatic variability on water resources in West and Central Africa from a non-calibrated hydrological model. *Hydrological Sciences J.*, 52(1) : 38-48.
- Paturol JE, Servat E, Delattre MO, 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. *Hydrological Sciences J.*, 43 (6) : 937-946.

- Savane I, Coulibaly KM, Gioan P, 2003. Etude comparative de trois méthodes de calcul du coefficient de tarissement des cours d'eau. *Sécheresse*, 14(1).
- Servat E, Paturel J-E., Lubès-Niel H, Kouamé B, Masson JM, Travaglio M, Marieu B, 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Rev. Sci. Eau*, 12(2) : 363-387.
- Sighomnou D, Sigha L, Liéno G, Dezetter A, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Olivry JC, Tchoua F, Ekodeck GE, 2007. Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, perspectives pour le XXIème siècle. FRIEND International Seminar, *Technical Document in Hydrology*, 80, UNESCO Paris Ed.:173-182.
- Wesselink A, Orange D, Randriamiarisoa, 1995. Les débits moyens mensuels de 13 stations hydrométriques du bassin de l'Oubangui (1986-1993). Projet PNUD/OMM CAF91 « Assistance Agrohydrométéorologique et Surveillance de l'Environnement », Rapport ORSTOM, Centre ORSTOM de Bangui, modifié à Montpellier, mars 1995, 32 p.
- Wesselink A, Orange D, Randriamiarisoa, Feizuré C, 1996. Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin-versant de type tropical humide : l'Oubangui (République centrafricaine). In Chevallier P, Pouyaud B (Ed. Sc.) : *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, *PIAHS*, 238 : 179-194.

For Review Only