

Variabilité hydropluviométrique et dynamique de l'occupation des terres dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri au Bénin (Afrique de l'Ouest)

[Hydropluviometric variability and dynamic of land cover in the catchment of Sota at the outlet of Coubéri in Benin (West Africa)]

Soufouyane ZAKARI¹⁻³, Brice Agossou Hugues TENTE², Ismaïla TOKO IMOROU¹, Ibouraïma YABI³, Fulgence AFOUDA³, and Benoît N'BESSA⁴

¹Laboratoire de Cartographie, (LaCarto),
Université d'Abomey-Calavi,
10 BP 1082, Cotonou, Bénin

²Laboratoire de Biogéographie et d'Expertise Environnementale (LABEE),
Université d'Abomey-Calavi,
BP : 677 Abomey-Calavi, Bénin

³Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE),
Université d'Abomey-Calavi,
BP 922, Abomey-calavi, Bénin

⁴Laboratoire d'Etude des Dynamiques Urbaines et Régionales (LEDUR),
Université d'Abomey-Calavi,
01 BP : 526 Cotonou, Cotonou, Bénin

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The present study aims to analyze the hydropluviometric variability and the dynamic of land cover in the catchment of the Sota located at the North-east of Benin. It is based on the exploitation, on one hand, of rainfall and runoff data over the period 1965-2010 and, on the other hand, of satellite images Landsat TM of 1995 and Landsat 8 OLI/TIRS of 2013. The calculation of rainfall and hydrometric index and the application of statistical tests were used to analyze the hydropluviometric variability in the catchment of Sota. This variability is marked by similar fluctuations of rainfall and runoff. The break identified on rainfall and hydrometric series in 1970 is followed by a rainfall deficit of 6,76 % and a flow deficit of 33,75 %. The analysis of land cover maps produced from satellite images made it possible to release the land cover dynamic. This dynamic is characterized by the regression of natural vegetation formations to the profit of anthropic formations. The crops areas and fallows knew the greatest expansion with an annual growth rate of 6, 16 %. The degradation of the vegetation cover is undoubtedly one of the factors of the persistence of the relatively high level of the hydrometric deficit in the watershed of Sota.

KEYWORDS: Sota, North-Benin, hydropluviometric variability, vegetation cover, statistical tests.

RÉSUMÉ: La présente étude vise à analyser la variabilité hydropluviométrique et la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota situé au Nord-est du Bénin. Elle se base sur l'exploitation, d'une part des chroniques de hauteurs de précipitations annuelles et de débits annuels de la Sota à Coubéri sur la période 1965-2010 et d'autre part des images satellitaires Landsat TM de 1995 et Landsat 8 OLI/TIRS de 2013. Le calcul des indices pluviométrique et

hydrométrique ainsi que l'application des tests statistiques ont permis d'analyser la variabilité hydropluviométrique dans le bassin versant de la Sota. Cette variabilité est marquée par des fluctuations comparables des précipitations et des écoulements. La rupture identifiée sur les séries pluviométrique et hydrométrique en 1970 se traduit par un déficit pluviométrique de 6,76 % et un déficit d'écoulement de 33,75 %. L'analyse des cartes d'occupation des terres réalisées à partir des images satellitaires a permis de dégager la dynamique de l'occupation des terres. Cette dynamique est caractérisée par la régression des formations végétales naturelles au profit des formations anthropiques. Les champs et jachères ont connu la plus grande expansion avec un taux annuel de 6,16 %. La dégradation de la couverture végétale est sans doute un des facteurs de la persistance du niveau relativement élevé du déficit hydrométrique dans le bassin de la Sota.

MOTS-CLEFS: Sota, Nord-Bénin, variabilité hydropluviométrique, couverture végétale, tests statistiques.

1 INTRODUCTION

Les déficits pluviométriques observés en Afrique de l'Ouest au cours des décennies 1970 et 1980, et leurs effets cumulés ont largement affecté les régimes des cours d'eau de la région. Les écoulements des grands cours d'eau ont en général baissé de plus de 30 % et parfois même dépassé de 50 % ([1], [2], [3]). L'hydraulicité des cours d'eau a également été affectée avec une diminution marquée de la puissance des crues. Le bassin de la Sota, sous-bassin du fleuve Niger au Bénin, n'a pas été épargné par cette situation. En effet, selon les résultats des travaux de [4], on retient les faits suivants sur ce bassin versant :

- une rupture de stationnarité a été enregistrée en 1972 dans la série des précipitations annuelles du bassin. La sous-période après la rupture (1973-1992) a connu un déficit pluviométrique de 12 % par rapport à la sous-période avant la rupture (1960-1972) ;
- le déficit d'écoulement a été de 40 % entre les sous-périodes avant et après rupture. Le déficit pluviométrique observé sur le bassin s'est accentué de plus de trois fois sur les écoulements ;
- le début des années 1990 a été marqué par un retour à de meilleures conditions pluviométriques. Ce dernier constat a été confirmé par d'autres travaux : sur le même bassin par [5], de façon générale pour la plupart des stations météorologiques du Nord-est du Bénin par [6] et ailleurs en Afrique ([7], [8]). Globalement donc la dernière plus longue période de sécheresse pluviométrique sur le bassin de la Sota a duré une vingtaine d'années (1970-1990).

L'amplification des déficits pluviométriques sur les écoulements a été observée sur d'autres bassins versants ailleurs en Afrique ([1], [9], [10], [11]). Elle serait liée à l'effet conjugué de la variabilité climatique et des activités humaines sur les états de surface ([12], [13], [14]). Concernant le bassin de la Sota, la question qu'on peut se poser est celle de savoir quel est l'état actuel de l'écoulement de surface deux décennies après le retour à de conditions de précipitations plus abondantes. Par ailleurs, l'étude de [5] sur le bassin de la Sota a montré que cet espace subit la dégradation de sa couverture végétale. Les causes principales de cette dégradation sont d'ordre anthropique (pratiques agricoles, élevage transhumant, feux de végétation, exploitation frauduleuse abusive du bois). C'est pourquoi l'hypothèse de la présente recherche est que malgré le retour à une bonne pluviométrie, les déficits d'écoulement persistent dans le bassin de la Sota du fait surtout de la dégradation continue de la couverture végétale du bassin. Le présent travail vise donc à analyser la variabilité hydropluviométrique et la dynamique de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota.

2 MILIEU D'ÉTUDE

Le secteur d'étude est le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri (figure 1). Il est compris entre les latitudes 9°54' et 11°55' Nord et les longitudes 3°33' et 3°46' Est. Il couvre une superficie de 13410 Km², soit 11 % de la superficie du Bénin (Koumassi, 2014). La Sota prend sa source à plus de 400 mètres d'altitude sur les flancs du plateau gréseux de Kalalé qu'elle va contourner par le nord avant d'emprunter la direction SSW-NNE sur les formations du socle.

Le bassin versant de la Sota bénéficie d'un climat tropical de type soudanien caractérisé par une saison sèche allant d'octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à septembre. La moyenne interannuelle des précipitations dans le bassin à l'exutoire de Coubéri est 1028 mm sur la période 1965-2010. Pendant la saison sèche, le bassin est aussi influencé par l'harmattan qui est un vent sec de direction nord-est ([15], [14]). La Sota a un régime hydrologique unimodal avec un débit maximal en saison des pluies. La température moyenne annuelle est de 27° C à Kandi. Quant à la moyenne mensuelle, elle passe de 25° à 32° C entre décembre et avril.

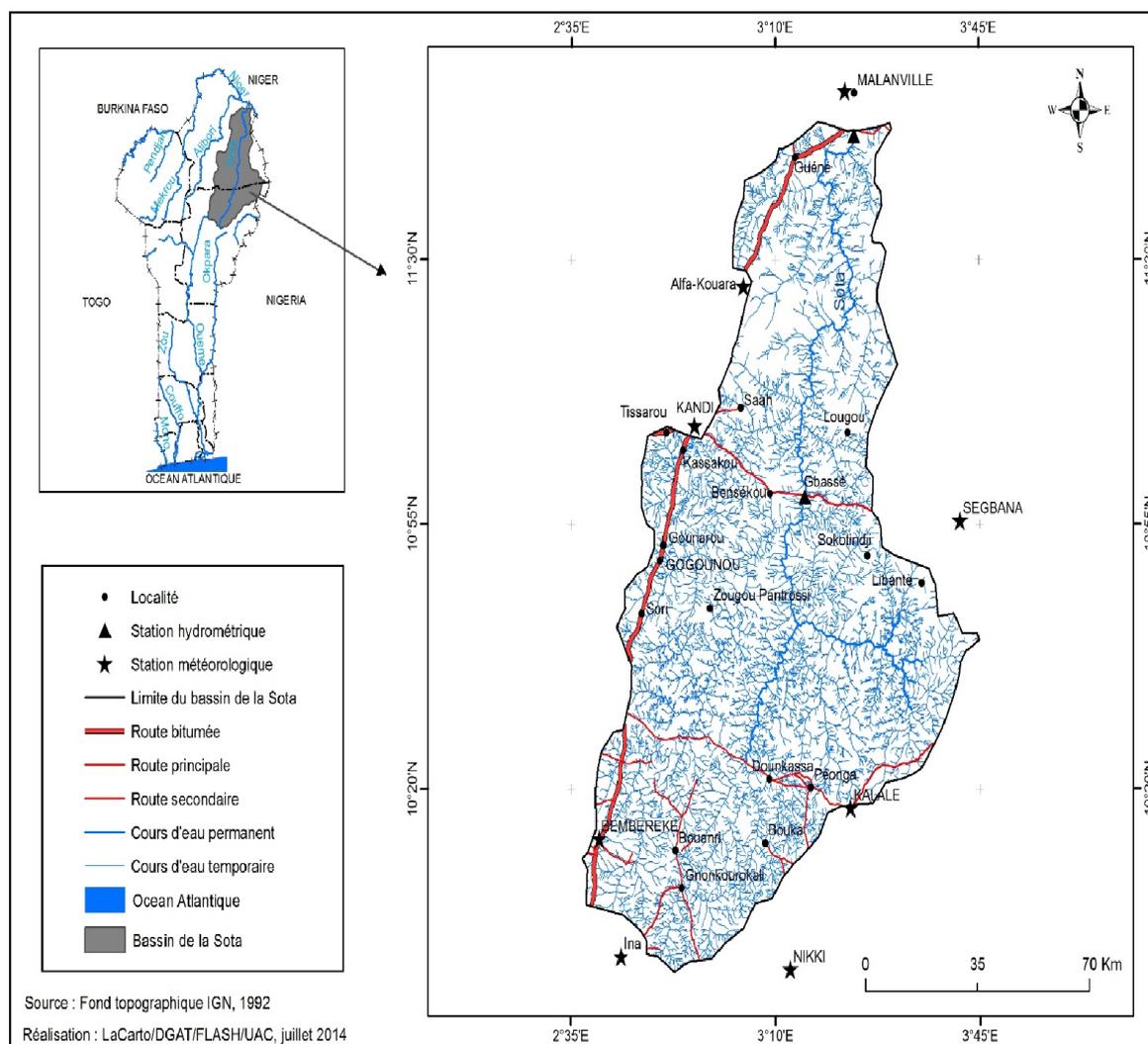


Fig. 1. Localisation du bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri

3 DONNÉES ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES

Les données utilisées dans la présente étude sont constituées des :

- **données pluviométriques** : ce sont des chroniques de hauteurs pluviométriques annuelles de huit (8) stations météorologiques localisées dans le bassin versant ou dans son voisinage au Bénin (tableau 1). Ces chroniques couvrent la période de 1965 à 2010 et sont obtenues à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) et au Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement" (LACEEDE) de l'Université d'Abomey-Calavi.

Tableau 1. Caractéristiques des stations météorologiques utilisées

Stations	Latitude Nord	Longitude Est	Année d'ouverture	Nature de la station
Alfakoara	11°27'	3°04'	1969	Pluviométrique
Bembèrèkè	10°12'	2°40'	1921	Pluviométrique
Ina	9° 58'	2°44'	1944	Climatique
Kalalé	10°18'	3°23'	1944	Pluviométrique
Kandi	11°08'	2°56'	1921	Synoptique
Malanville	11°52'	1°39'	1942	Pluviométrique
Nikki	9°56'	3°12'	1921	Pluviométrique
Ségbana	10°56'	3°42'	1954	Climatique

- **données hydrométriques** : ce sont des chroniques de débits annuels de la station de Coubéri (tableau 2) localisée à l'exutoire du bassin. Les données débitométriques couvrent la période de 1965 à 2010 et sont collectées à la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau).

Tableau 2. Caractéristiques de la station de Coubéri

Station hydrométrique	Coordonnées		Superficie (Km ²)
	Latitude (N)	Longitude (E)	
Sota à Coubéri	11° 45'	3° 20'	13 410

- **images satellitaires** : Pour l'analyse et la cartographie de la dynamique de l'occupation des terres, les images mosaïquées Landsat TM du 26 octobre 1995 et les images mosaïquées Landsat 8 OLI/TIRS du 07 novembre 2013 ont été exploitées. Les scènes mosaïquées sont : P192 et R052, P191 et R052, P192 et R053, P191 et R053. Ces différentes images ont été téléchargées sur le site earthexplorer.usgs.gov au format GEOTIFF.

3.2 MÉTHODES DE TRAITEMENTS DES DONNÉES

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour traiter et analyser les données et les résultats.

3.2.1 RÉGIONALISATION DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

C'est la méthode des polygones de Thiessen qui a été utilisée pour la régionalisation des données pluviométriques. Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique. Elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en pourcentage (%), représente le facteur de pondération de la valeur locale. La précipitation moyenne sur le bassin s'obtient par la formule :

$$P_{moy} = \sum A_i \cdot P_i / A \quad (1)$$

Avec, P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin, A : aire totale du bassin, P_i : précipitation enregistrée à la station i , A_i : superficie du polygone associée à la station i .

3.2.2 CALCUL DES INDICES PLUVIOMETRIQUE ET HYDROMETRIQUE

Le calcul des indices pluviométriques et hydrométriques permet de dégager les grandes tendances dans les séries chronologiques. A l'échelle interannuelle, ils permettent de mettre en évidence les phases déficitaires et les phases excédentaires. Ils sont calculés à partir de la formule suivante :

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)} \quad (2)$$

x'_i = variable centrée réduite pour l'année i (indice pluviométrique ou hydrométrique selon la variable étudiée) ;

\bar{x} = moyenne de la série chronologique sur la période 1965-2010

$\sigma(x)$ = écart-type de la série chronologique sur la période 1965-2010.

L'indice pluviométrique est bien adapté au suivi des variations de la dynamique de la végétation en relation avec l'évolution de la pluviométrie [16].

3.2.3 FILTRE PASSE BAS DE HANNING D'ORDRE 2

Le Filtre Passe Bas de Hanning d'ordre 2 a également été utilisée pour avoir une meilleure visualisation des tendances. Cette méthode permet d'éliminer les variations saisonnières des données. Ce filtre est effectué au moyen des équations recommandées par [17]. Selon cette méthode, chaque terme de la série est calculé de la manière suivante :

$$X_{(t)} = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad (3)$$

Pour $3 \leq t \leq (n - 2)$

$$X_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (4)$$

$$X_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (5)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (6)$$

$$X_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (7)$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique et d'écoulement, ces moyennes mobiles pondérées sont ensuite centrées et réduites en utilisant la formule (2).

3.2.4 RECHERCHE DE TENDANCE ET DE RUPTURE DE STATIONNARITE DANS LES SERIES CHRONOLOGIQUES

Pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques pluviométrique et hydrométrique, il a été utilisé des tests statistiques portant sur l'analyse de tendance et de rupture en moyenne.

Le terme de tendance fait référence au changement dans les propriétés d'un processus aléatoire qui survient graduellement à l'échelle de la période d'échantillonnage alors qu'une rupture correspond à une modification qui survient subitement, étant entendu que les propriétés demeurent stables de part et d'autre de l'année de rupture [18].

Le test de corrélation sur le rang de Kendall [19] a été utilisé pour analyser les tendances dans les séries chronologiques. Ce test vérifie le caractère aléatoire des séries chronologiques. L'hypothèse alternative du test est celle d'une tendance. Toutefois, en présence d'une rupture en moyenne dans la série, le test rejette l'hypothèse nulle sans que l'hypothèse de tendance soit valide.

La recherche de ruptures dans les séries chronologiques a été faite au moyen de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian, du test de Pettitt, du test de Buishand et l'Ellipse de Bois et de la segmentation de Hubert. Les tests de Lee et Heghinian, et de Pettitt détectent une rupture au maximum tandis que le test de Buishand et l'Ellipse de Bois et la segmentation d'Hubert permettent d'en détecter plusieurs si elles existent dans une série chronologique de données. Leur application est effectuée à l'aide du logiciel KhronoStat 1.01 développé par l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD).

3.2.5 CALCUL DES VARIATIONS MOYENNES AUTOUR DES RUPTURES

Pour les variables hydropluviométriques dont la série chronologique présente une rupture, il est intéressant de calculer les variations moyennes de part et d'autre de la rupture en appliquant la formule suivante [20] :

$$D = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_i}{\bar{x}_i} * 100 \quad (8)$$

D = déficit/excédent de part et d'autre de la rupture ; \bar{x}_i = moyenne avant la rupture et \bar{x}_j = moyenne après la rupture.

3.2.6 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES

▪ Cartographie de l'occupation des terres

Elle s'est faite selon une suite d'opérations. La composition colorée a permis de distinguer les différents objets sur les images. Elle est suivie du choix des aires d'entraînement (sites représentatifs des caractéristiques numériques des classes) qui permettent de définir les signatures spectrales de chaque unité paysagère. Ces aires d'entraînement servent d'éléments de base d'une classification supervisée. Ensuite l'algorithme de classification « maximum de vraisemblance a été choisi pour effectuer la classification. Enfin des relevés sur le terrain ont permis de valider la classification. En somme, la classification supervisée par maximum de vraisemblance consiste, à classer les pixels en fonction de leur ressemblance avec des comptes numériques d'objets géographiques de référence préalablement déterminées sur l'image et validées par des relevés de terrain [21]. A partir des classifications thématiques obtenues, les cartes d'occupation du sol ont été réalisées. Le logiciel Idrisi Selva 17.0 a été utilisé pour le traitement numérique des images satellitaires et le logiciel ArcGIS 10.1 pour les travaux de cartographie.

▪ Appréciation des mutations des unités d'occupation des terres

Elle s'est faite en utilisant la matrice de transition et en calculant le taux moyen annuel d'expansion spatiale.

✓ **La Matrice de transition.** C'est un tableau synthétique qui récapitule en termes de superficies, les différentes transformations subies par les unités d'occupation des terres entre deux dates. Elle est constituée de X lignes et de Y colonnes. Le nombre de lignes de la matrice indique le nombre d'unités d'occupations des terres au temps t_0 ; le nombre Y de colonnes de la matrice est le nombre d'unités d'occupation des terres converties au temps t_1 et la diagonale contient les superficies des unités d'occupation des terres restées inchangées. Les transformations se font donc des lignes vers les colonnes. Les superficies de ces différentes unités d'occupation des terres ont été calculées à partir du croisement des cartes de d'occupation des terres de deux dates à l'aide de la fonction Intersect de la boîte à outils Arctoolbox du logiciel ArcGIS 10.1.

✓ **Le taux moyen annuel d'expansion spatiale.** Il exprime la proportion de chaque unité d'occupation des terres qui change annuellement. A partir de la superficie de ces unités, ce taux a été calculé grâce à la formule [22]:

$$T = [(\ln S_2 - \ln S_1) / ((t_2 - t_1) \times \ln e)] \times 10 \quad (9)$$

Avec S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ; $t_2 - t_1$: nombre d'année d'évolution ; \ln : Logarithme népérien ; e : Base des logarithmes népériens ($e = 2,71828$).

4 RÉSULTATS

4.1 VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE

Sur la période 1965-2010, la pluviométrie dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri est marquée par des fluctuations interannuelles très remarquables. La moyenne de la série est de 1028,20 mm. Son écart-type (93, 44 mm) et son coefficient de variation (9,08 %) traduisent cette grande variabilité. On note une succession de phases excédentaires et de phases déficitaires (figure 2).

- La phase 1965-1971 a été excédentaire. La moyenne pluviométrique pour cette phase est 1082,53 mm. Au cours de cette phase, les années 1968 et 1969 ont été très pluvieuses avec respectivement 1115,22 et 1169,86 mm de pluie.
- La phase 1972-1996 a été très déficitaire avec une moyenne pluviométrique de 995,17 mm. Les années 1983, 1986 et 1987 ont été particulièrement sèches avec respectivement 853,06 ; 893,96 et 829,58 mm de précipitation.
- La phase 1997-2010 a été excédentaire avec une moyenne pluviométrique de 1060,01 mm. Les années 1998 et 1999 qui ont été particulièrement pluvieuses avec respectivement 1115,22 et 1169, 86 mm de pluie enregistrée.

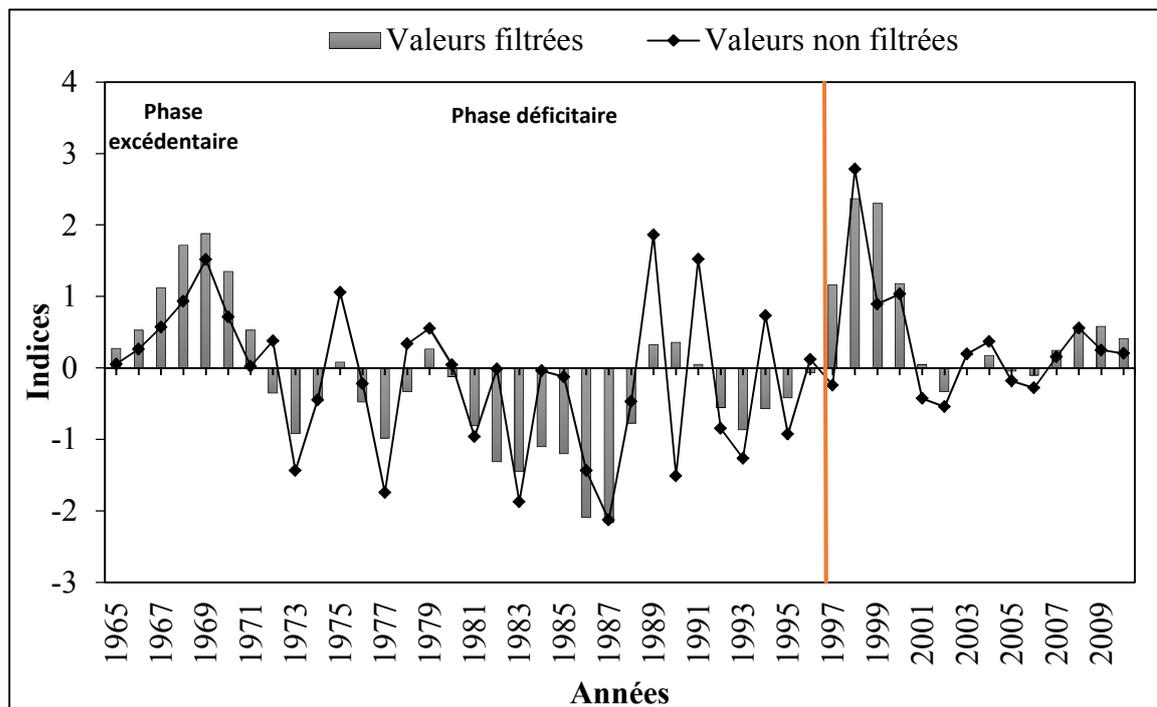


Fig. 2. Variabilité interannuelle des précipitations annuelles (1965-2010)

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des précipitations annuelles.

La figure 3 présente les résultats de l'application des tests de Buishand et de Pettitt sur la série précipitations annuelles.

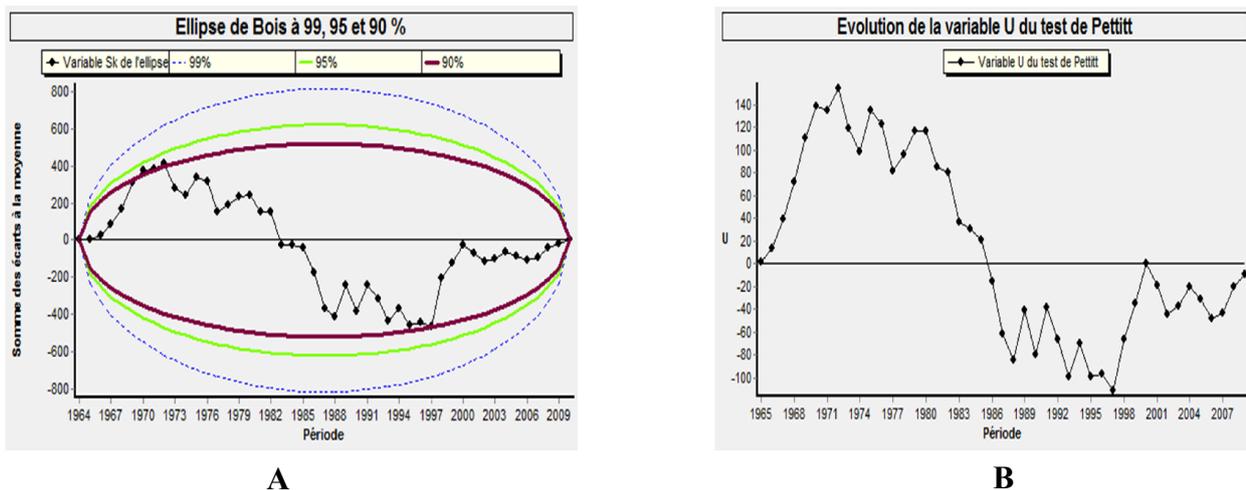


Fig. 3. Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des précipitations annuelles

Le test de Buishand (figure 3 A), le test de Pettitt (figure 3 B), la procédure de segmentation de Hubert ne mettent en évidence aucune rupture dans la chronique des précipitations annuelles. Seul le test de Lee et Heghinian met en évidence une rupture située en 1970 dans la chronique des précipitations annuelles. Les moyennes des sous-séries avant et après la rupture sont respectivement de 1009, 45 mm et 1018, 75 mm soit un déficit pluviométrique de 6,76 % après la rupture.

4.2 VARIABILITÉ HYDROMÉTRIQUE

Sur la période 1965-2010, les variations interannuelles des débits sont assez importantes dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri. La moyenne de la série est de $308,20 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un écart-type de $152,28 \text{ m}^3/\text{s}$ et un coefficient de variation 49,40 %. On distingue globalement deux phases à débits élevés intercalées par une longue phase à faibles débits (figure 4).

- La phase 1965-1971 est caractérisée par des écoulements abondants. La moyenne des débits est de $432,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Les années 1967 et 1970 ont enregistré des modules très élevés ($606,7$ et $514,79 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement).
- La phase 1972-1997 est marquée par une baisse des écoulements. La moyenne des débits pour cette phase est de $244,55 \text{ m}^3/\text{s}$. Les années 1976, 1983 et 1987 ont été caractérisées par des écoulements particulièrement indigents (avec des débits respectivement de 83 , 58 ; $66,72$ et $91,53 \text{ m}^3/\text{s}$). Notons toutefois qu'au cours de cette longue phase de sécheresse, les quatre années 1988, 1989, 1991 et 1994 ont enregistré des débits supérieurs à la moyenne.
- La phase de 1998 à 2010 est caractérisée par des écoulements excédentaires. La moyenne des débits est de $368,69 \text{ m}^3/\text{s}$.

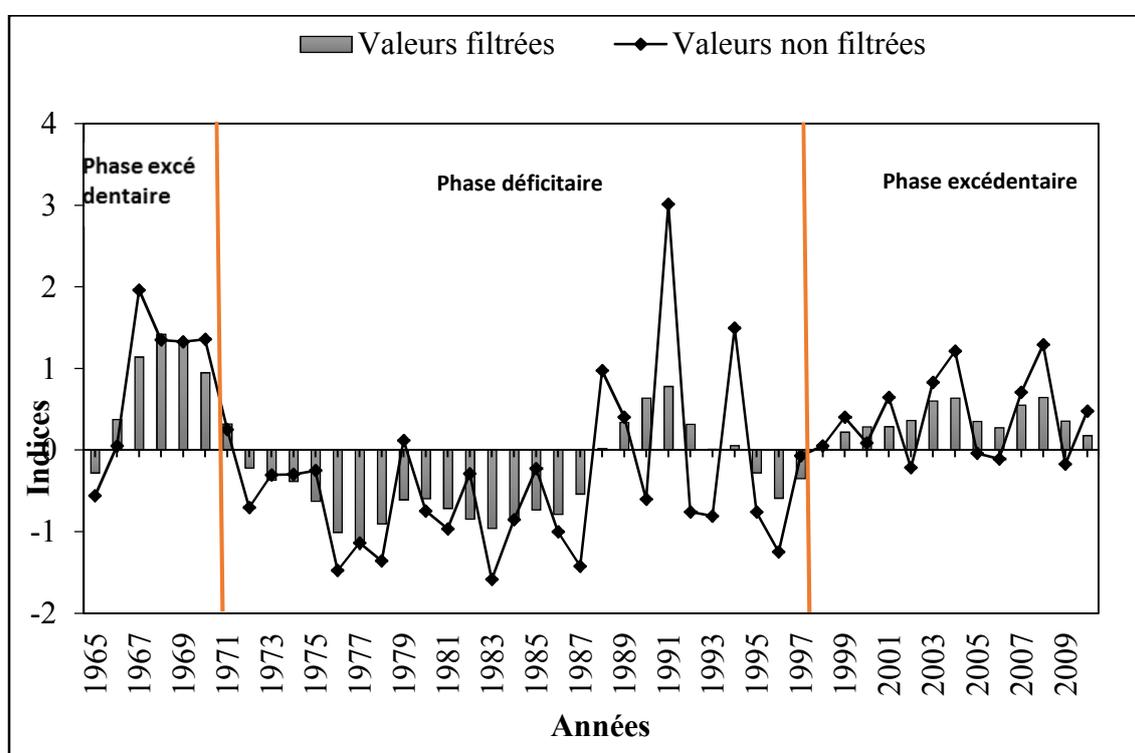


Fig. 4. Variabilité interannuelle des débits de la Sota à l'exutoire de Coubéri (1965-2010)

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des débits annuels.

Le test de Buishand (figure 5 A), le test de Pettitt (figure 5 B), la procédure de segmentation de Hubert ne mettent en évidence aucune rupture dans la chronique des débits annuels.

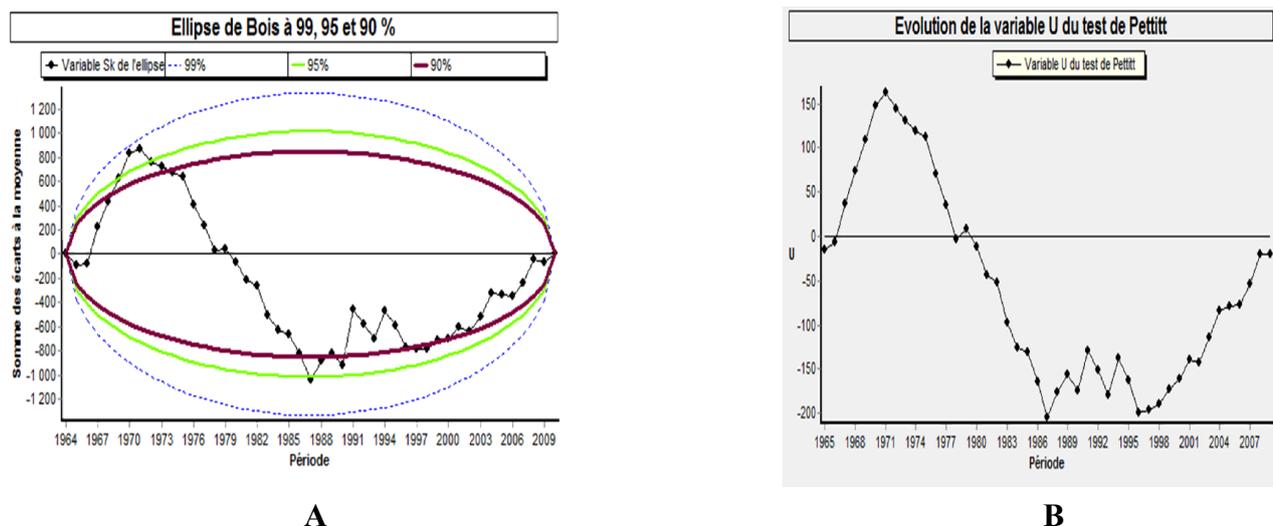


Fig. 5. Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B) appliqués à la série des débits annuels

Seul le test de Lee et Heghinian met en évidence une rupture située en 1970 dans la chronique des débits annuels. Les moyennes des sous-séries avant et après la rupture sont respectivement de 433, 85 m³/s et 287, 45 m³/s soit un déficit hydrométrique de 33,75 % après la rupture.

4.3 DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES TERRES

4.3.1 ETATS DE L'OCCUPATION DES TERRES

- En 1995

L'observation de la carte d'occupation des terres en 1995 (figure 6) montre que, les formations végétales naturelles les plus dominantes sont les forêts claires et les savanes boisées qui s'observent principalement à l'intérieur des aires protégées dans les parties Nord, Centre et Centre-Sud du bassin. Ces formations végétales sont suivies des savanes arborées et arbustives qu'on retrouve un peu partout dans le bassin. Les minces forêts galeries du bassin sont situées le long des différents cours d'eau dont le plus important est la Sota. On observe quelques fragments de forêts denses sèches à l'intérieur des aires protégées et près des forêts galeries. Les mosaïques de champs et jachères s'observent un peu partout mais essentiellement autour des agglomérations. Les agglomérations et les affleurements rocheux sont très dispersés et faiblement représentés. Les sols dénudés et les plantations sont très peu observés.

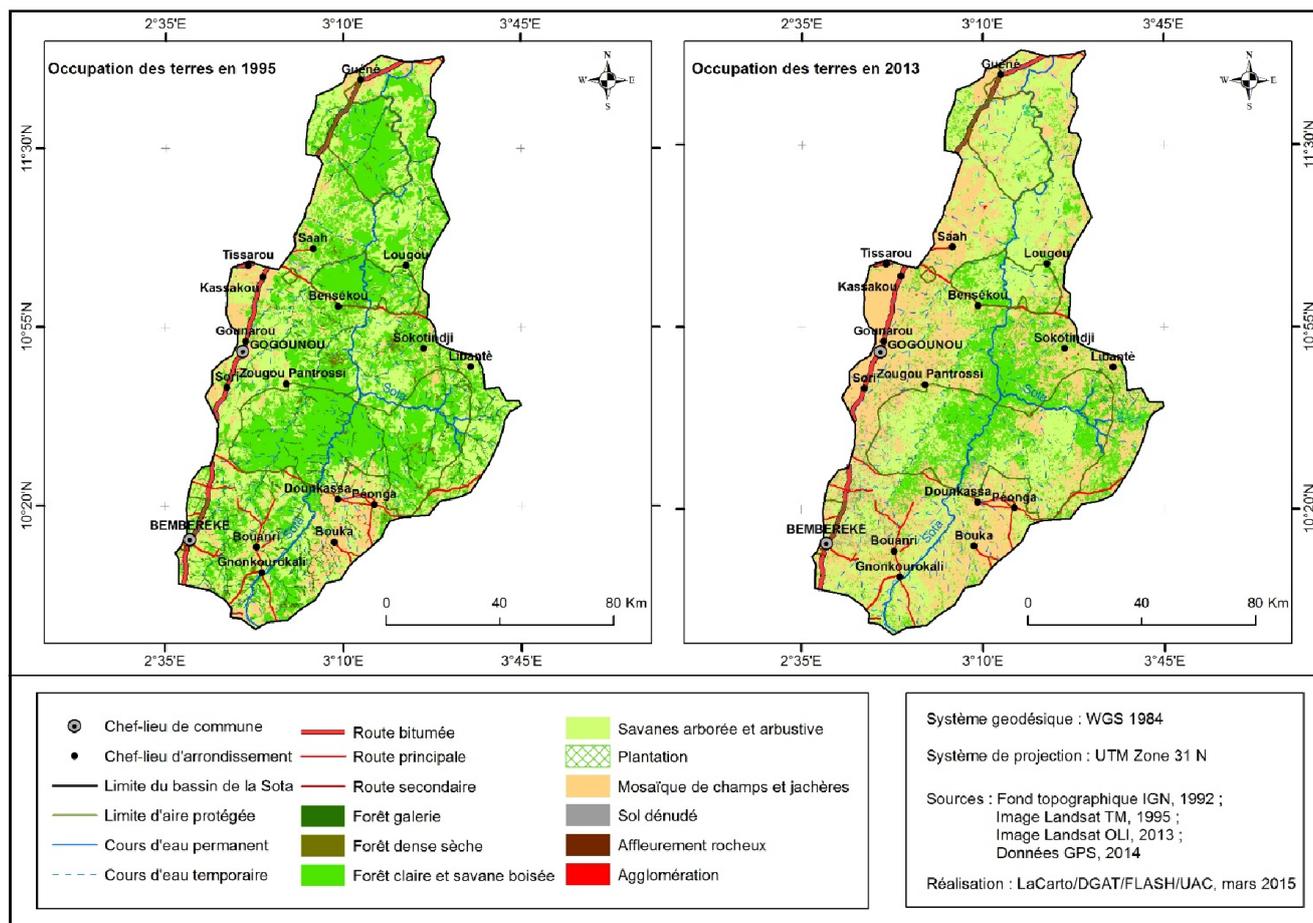


Fig. 6. Occupation des terres du bassin versant de la Sota en 1995 et 2013

• En 2013

L'examen de la carte d'occupation des terres de 2013 (figure 6), indique que les forêts claires et savanes boisées sont réduites en de petits fragments concentrées dans les aires protégées et leurs périphéries. On remarque aussi une quasi absence des îlots de forêts denses sèches et une diminution drastique des galeries forestières le long de la rivière Sota. Les savanes arborées et arbustives sont devenues les formations naturelles les plus répandues dans le bassin. Par contre, les mosaïques de champs et jachères ont connu une forte extension, elles se rencontrent un peu partout jusqu'à l'intérieur des aires protégées. Les sols dénudés et les plantations se sont sensiblement étendus, à l'opposé des affleurements rocheux qui sont demeurés inchangés.

4.3.2 MUTATIONS DANS L'OCCUPATION DES TERRES

La dynamique des formations végétales et des autres unités d'occupation des terres de 1995 à 2013 est résumée par la matrice de transition (tableau 3). Dans les cellules des lignes et des colonnes se trouvent respectivement les formations végétales et les autres unités d'occupation des terres de 1995 et de 2013. Les cellules de la diagonale correspondent aux superficies des unités qui sont demeurées stables de 1995 à 2013. Les unités qui sont en dehors de la diagonale représentent les changements d'état de la végétation et des autres unités d'occupation des terres.

Tableau 3. Matrice de transition de l'occupation des terres entre 1995 et 2013

Unités d'occupation										
Unités de 1995	FG	FDS	FCSB	SASA	PL	MCJ	AR	SD	AG	Sup. Total 1995 (Km ²)
FG	190,96	0	0	0	0	516,93	0	0	0	707,89
FDS	0	23,04	10,80	52,81	0	61,04	0	0	0	147,68
FCSB	0	2,1	2492,58	1553,111	0	1667,14	0	0	0	5714,93
SASA	0	0,343	56,63	3151,80	25,01	1712,11	0	0	2,79	4948,68
PL	0	0	0	0	8,30	0,033	0	0	0,19	8,53
MCJ	0	0	34,51	182,72	25,18	1566,70	0	6,84	6,86	1823
AR	0	0	0	0	0	0	9,847	0	0	9,85
SD	0	0	0	0	0	0,19	0	9,43	0	9,62
AG	0	0	0	0	0	0	0	0	29,80	29,80
Sup. Totale 2013 (Km ²)	190,96	25,48	2594,515	4940,447	58,49	5524,1	9,85	16,26	39,75	13400

Légende : FG : Forêt galerie ; FDS : Forêt dense sèche ; FCSB : Forêt claire et savane boisée; SASA : Savanes arborée et arbustive ; AR : Affleurement Rocheux ; MCJ : Mosaïque de champs et jachères ; SD : Sol Dénudée AG : Agglomération ; PL : Plantation.

Sup.totale_1995 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation du sol en 1995.

Sup.totale_2013 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation du sol en 2013.

190,96 : Superficie restée stable entre 1995 et 2013.

L'examen du tableau 3 permet de retenir que 9 classes d'occupation des terres ont été observées en 1995 et en 2013. Cependant, il faut noter que toutes les classes ne sont pas demeurées identiques entre ces deux années.

➤ Analyse statistique de l'évolution des formations végétales naturelles entre 1995 et 2013

L'analyse de la dynamique des formations végétales naturelles de 1995 à 2013 dans le bassin versant de la Sota indique qu'elles ont connu toutes une évolution régressive.

• Forêts galeries

Les forêts galeries ont connu une régression drastique. De 707,89 km² en 1995, elles sont passées à 190,96 km² en 2013, soit une diminution proportionnelle de 73,02 %. Une partie de ces formations a été convertie en mosaïque de champs et jachères (516,93 km²). Par contre, l'autre partie (190,96 km²) est restée inchangée.

• Forêts denses sèches

Les forêts denses sèches ont connu une conversion significative de leur superficie, avec un taux global d'évolution de -479,6 %. Ces formations sont converties en forêts claires et savanes boisées (10,80 km²), en savanes arborées et arbustives (52,81 km²) et en mosaïque de champs et jachères (61,04 km²). Cependant, 23,04 km² sont demeurés stables entre 1995 et 2013.

• Forêts claires et savanes boisées

En 18 ans, les forêts claires et savanes boisées ont connu une réduction proportionnelle de 120,26 % en passant d'une superficie de 5 714,93 km² en 1995, à 2 594,52 km² en 2013. Une partie est restée inchangée (2 492,58 km²) et 1553,111 km² sont converties en savanes arborées et arbustives, puis 1667,14 km² en champs et jachères.

• Savanes arborées et arbustives

Les savanes arborées et arbustives ont connu une faible diminution, avec un taux global d'évolution de -0,1666 %. Elles sont passées de 4948,68 km² en 1995 à 4940,45 km² en 2013. Environ 3151,80 km² de ces formations sont demeurées stables, 0,343 km² se sont transformées en forêt denses sèches, 56,63 km² en forêts claires et savanes boisées, 25,01 km² sont converties en plantations, 1712,11 km² en champs et jachères et 2,79 km² en agglomérations.

➤ **Analyse statistique de l'évolution des autres unités d'occupation des terres entre 1995 et 2013**

Les unités analysées ici sont les affleurements rocheux, les sols dénudés et les unités anthropiques (plantations, mosaïques de champs et jachères et agglomérations).

• **Affleurements rocheux**

Les affleurements rocheux n'ont pas connu de mutation entre ces deux dates.

• **Sols dénudés**

Cette unité a connu une expansion moyenne annuelle de 2,92 % soit une augmentation de 40,87 % entre 1995 et 2013. Dans le bassin versant de la Sota, les sols dénudés qui occupaient 9,62 km² en 1995 sont passés à 16,26 km². Seulement 0,19 km² ont été convertis en mosaïques de champs et jachères et 9,43 sont restés stables.

• **Plantations**

Les plantations en 1995 qui occupaient une superficie de 8,53 km², sont passées à 58,49 km² en 2013 soit une augmentation proportionnelle de 85,41 % avec un taux d'expansion moyen annuel de 10,70 %. Elles ont gagné une partie des champs et jachères (0,033 km²) et une partie des agglomérations (0,19 km²). 8,30 km² sont restées inchangées.

• **Mosaïques de champs et jachères**

Les mosaïques de champs et jachères ont connu une grande expansion en passant d'une superficie de 1 823 km² en 1995 à 5524,1 km² en 2013 soit un taux d'expansion annuel de 6,16 % et un taux global d'évolution de 67 % entre 1995 et 2013. Ces unités ont vu 34,51 km² de leur superficie convertie en forêts claires et savanes boisées, 182,72 km² en savanes arborées et arbustives, 25,18 km² en plantation, 6,84 km² en sol dénudé, et 6,86 km² en agglomération. Cependant, 1566,70 km² de ces unités sont restées inchangées.

• **Agglomérations**

Les agglomérations ont aussi connu une extension de 1,60 %. De 29,80 km² en 1995, elles sont passées à 39,75 km² en 2013. Une partie de cette unité est restée stable.

La figure 7 synthétise la dynamique des différentes unités d'occupation des terres entre 1995 et 2013.

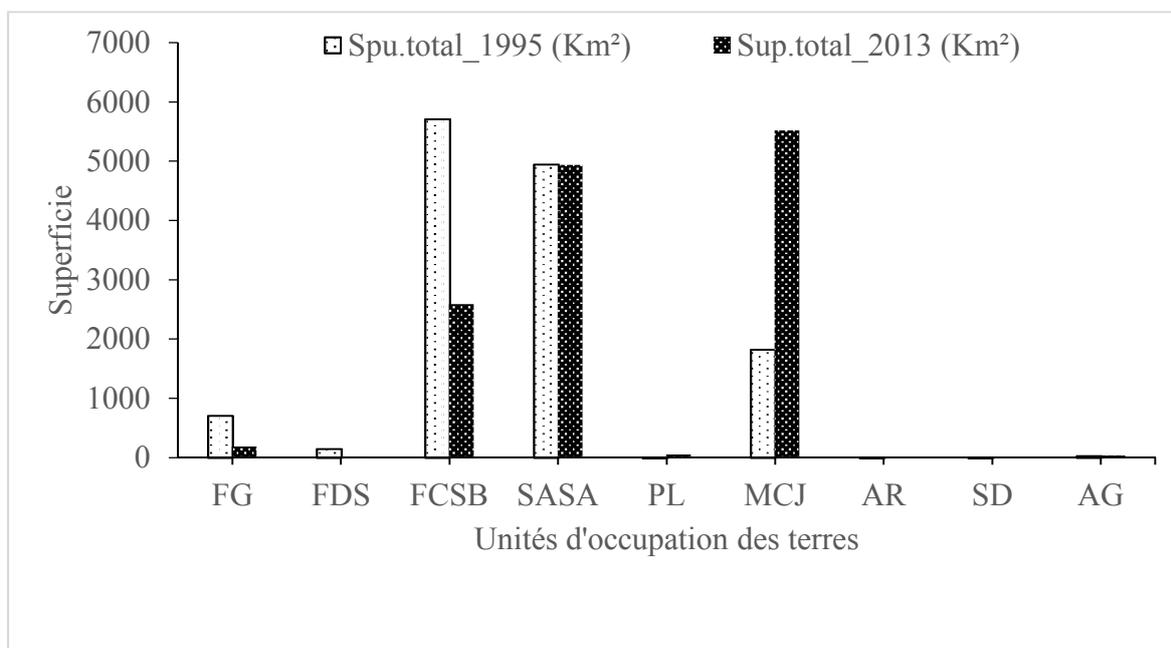


Fig. 7. Synthèse de la dynamique d'occupation des terres entre 1995 et 2013

Légende : FG : Forêt Galerie ; FDS : Forêt Dense Sèche ; FCSB : Forêt Claire et Savane Boisée; SASA : Savanes Arborée et Arbustive ; AR : Affleurement Rocheux ; MCJ : Mosaïque de Champs et Jachères ; SD : Sol Dénudé AG : Agglomération ; PL : Plantation.

Sup.totale_1995 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation du sol en 1995.

Sup.totale_2013 : Superficie des formations végétales et des autres unités d'occupation du sol en 2013.

Globalement on retient de l'examen de la figure 7 que la dynamique de l'occupation des terres entre 1995 et 2013 est marquée par la régression de toutes les formations végétales naturelles au profit des unités d'occupation anthropiques. Entre ces deux dates, les champs et jachères ont connu la plus grande expansion.

5 DISCUSSION

5.1 VARIABILITÉ HYDROPLUVIOMÉTRIQUE

Les résultats montrent l'occurrence de fortes fluctuations interannuelles des précipitations dans le bassin versant de la Sota à Coubéri. Ce bassin versant a connu entre les années 1972 et 1996 une phase de sécheresse qui peut être interprétée comme une manifestation de la grande sécheresse qui a frappé l'Afrique de l'Ouest à partir de la fin des années 1960 ([7], [23]). Ce déficit pluviométrique a été également mis en évidence, au Nord-Togo [8] et en Côte d'Ivoire [24].

Des quatre tests statistiques, seul le test de Lee et Heghinian met en évidence dans la série des précipitations annuelles une rupture de stationnarité située en 1970. Cette différence des résultats des tests statistiques est conforme au constat de [18] qui ont montré à partir de l'étude de séries simulées que ces tests peuvent identifier une rupture en moyenne avec quelques années de différence ou parfois aboutir à des conclusions contradictoires sur une même série de données.

L'année de rupture (1970) notée dans la série des précipitations annuelles appartient à la période (1968-1970) identifiée par [25] comme celle des ruptures pluviométriques au Bénin.

En comparant les résultats de la présente étude à ceux de [4] qui ont aussi pris en compte le même bassin versant, on note quelques différences :

- le test de Pettitt n'a pas identifié, contrairement à l'étude de [4], de rupture de moyenne dans la série des précipitations annuelles ;
- en ne tenant pas compte du test statistique, la date de la rupture sur la série des précipitations annuelles est de 1972 dans l'étude de [4] et de 1970 dans la présente étude ;
- le déficit pluviométrique enregistré après la rupture est respectivement de l'ordre de 12 % dans l'étude de [4] et de 6,76 % dans la présente étude.

Ces différences pourraient s'expliquer dans les résultats des deux études d'une part par l'inégalité de la longueur des séries étudiées et d'autre part par les stations choisies pour interpoler la pluviométrie du bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri.

Les tendances mises en évidence par l'application du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 et les tests statistiques dans les séries hydrométrique et pluviométrique sont très comparables. Ainsi par exemple, dans la série hydrométrique la rupture identifiée est aussi intervenue en 1970. Le déficit d'écoulement qui en a résulté est de 33,75 %. Ce déficit d'écoulement est inférieur à celui obtenu par [4] qui ont noté pour le même bassin un déficit d'écoulement de 40 %. Cette baisse relative du déficit d'écoulement pourrait être liée à l'amélioration de la pluviométrie dans le bassin ces dernières années dans la région ([5], [6]). Le déficit d'écoulement de 33,75 % enregistré fait environ cinq fois celui des précipitations (6,76 %). Ce résultat est similaire à ceux obtenus par d'autres auteurs. Ainsi par exemple, [26] note que les débits du fleuve Niger à Koulikoro (Mali), à sa sortie de la zone soudanienne, diminuent de 60 % après 1970 du fait d'une diminution de 30 % de la pluviométrie. De même, [27] et [28] soulignent une baisse de plus de 80 % des débits du Bani à Douna au Mali depuis les années 1950, conséquences de la diminution persistante des pluies depuis 1970.

5.2 EVOLUTION DE L'OCCUPATION DES TERRES

Les cartes d'occupation des terres réalisées ont permis de mettre en évidence la tendance générale de la dynamique de l'occupation des terres. Cette tendance générale révèle une augmentation de la superficie des formations anthropiques (champs et jachères, agglomérations, plantations) au détriment des formations végétales naturelles (forêts, savanes). [5] était déjà parvenue à la même conclusion concernant le bassin versant de la Sota. Plus inquiétant, cette tendance de

dégradation de la couverture végétale n'épargne même pas les aires protégées du bassin versant comme [29] a pu le montrer en étudiant les impacts des changements climatiques et des activités anthropiques sur la forêt classée de la Sota et sa zone riveraine. Les résultats des travaux de nombreux auteurs ont montré que la situation de dégradation des formations végétales naturelles du bassin versant de la Sota n'est pas une particularité au Bénin. Ainsi par exemple, les bassins versants de la Mékrou, de l'Alibori et de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou étudiés respectivement par [30], [31] et [32] connaissent aussi le recul continu de leurs formations végétales naturelles au profit des formations anthropisées. De même, en Côte d'Ivoire, [33] ont montré que bassin versant de N'zi se caractérise par une forte diminution des surfaces boisées et une importante augmentation des terres destinées aux cultures et pâturages.

5.3 IMPACT DE L'ÉVOLUTION DE L'OCCUPATION DES TERRES SUR LA RELATION PLUIE-DEBIT

Dans le bassin de la Sota, les principaux facteurs de la réduction de la couverture végétale sont le fort accroissement des surfaces cultivées, les pratiques agricoles, l'élevage transhumant, les feux de végétation, l'exploitation abusive de bois [5]. A côté de ces facteurs essentiellement anthropiques, il faut ajouter ceux climatiques. En effet, les fluctuations climatiques influencent aussi les changements d'occupation des terres ([16], [31], [11]). Les modifications de la couverture végétale peuvent avoir des impacts sur les écoulements. En effet, comme le souligne [14], les modifications affectant la couverture végétale d'un milieu donné, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre les précipitations et les écoulements de surface.

Les valeurs des déficits pluviométrique et hydrométrique dans la présente étude sont respectivement de 6,76 % et de 33,75 %. Ces valeurs étaient respectivement de 12 % et 40 % dans le l'étude de [4]. On peut donc noter une baisse de ces déficits. Cette baisse pourrait être liée au retour depuis les années 1990, à de meilleures conditions pluviométriques. Toutefois quand on fait un rapport entre ces déficits, on constate que dans le premier cas, le déficit hydrométrique fait environ cinq fois le déficit pluviométrique. Dans le second cas, le déficit hydrométrique fait un peu plus de trois fois le déficit pluviométrique. De ce constat, il ressort que la relation pluie-débit n'est pas restée constante dans le temps. L'importance relative actuelle du déficit hydrométrique pourrait être liée, en partie, à la dégradation continue de la couverture végétale dans le bassin versant. Ailleurs au Bénin, les travaux de [30] ont abouti à une conclusion similaire dans une étude sur le bassin de la Mékrou à l'exutoire de Kompongou. Dans le même ordre d'idées en Côte d'Ivoire, [33] ont interprété l'évolution de la relation pluie-débit dans le bassin versant de N'zi comme un facteur de la modification de l'occupation du sol.

6 CONCLUSION

Les résultats de la présente étude ont permis de caractériser la variabilité hydropluviométrique et l'évolution de l'occupation des terres dans le bassin versant de la Sota. Sur le plan pluviométrique, à partir de la chronique des précipitations annuelles (1965-2010), on note que le bassin versant est caractérisé par une succession de phases humides et sèches. Le test statistique de Lee et Heghinian indique une rupture de moyenne en 1970. Le déficit pluviométrique qui en a résulté est de 6,76 %. Les fluctuations enregistrées sur la série hydrométrique sont très comparables à celles qu'a connues la série pluviométrique. Ainsi la rupture de stationnarité identifiée sur la série hydrométrique se situe aussi en 1970 avec un déficit d'écoulement de 33,75 % soit environ cinq fois le déficit pluviométrique.

L'analyse de la dynamique de l'occupation des terres entre 1995 et 2013 à partir des cartes d'occupation des terres a montré que cette dynamique est marquée par la régression de toutes les formations végétales naturelles (forêt galerie, forêt dense sèche, forêt claire et savane boisée, savane arborée et arbustive) au profit des unités d'occupation anthropiques (mosaïque de champs et jachères, sol dénudé, plantation, agglomération). Entre ces deux dates, les champs et jachères ont connu la plus grande expansion avec un taux d'expansion annuel de 6, 16 %. La dégradation de la couverture végétale est sans doute un des facteurs de la persistance du niveau relativement élevé du déficit hydrométrique dans le bassin de la Sota.

REFERENCES

- [1] G. Mahé et J. C. Olivry, Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, Vol. 6, n° 1, pp. 109-117, 1995.
- [2] E. Servat, J. E. Paturel, H. Lubes-Niel, B. Kouame et M. Travaglio, De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale. *Sciences de la terre et des planètes*, Vol. 325, pp. 679-682, 1997.
- [3] G. Mahé, Y. L'hôte, J. C. Olivry et G. Wotling, Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa - 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46, n° 2, pp. 211-226, 1999.

- [4] E. W. Vissin, M. Boko, J. Perard et C. Houndénou, Recherche de ruptures dans les séries pluviométriques et hydrologiques du bassin béninois du fleuve Niger (Bénin, Afrique de l'ouest), *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 1, pp. 368-376, 2003.
- [5] A. J. Vodounon, Impacts des systèmes culturels sur la biodiversité, les états de surface et les écoulements dans le bassin-versant de la Sota. Mémoire de DESS, CIFRED/UAC, 91 p, 2010.
- [6] Zakari S. Analyse de quelques descripteurs de la saison des pluies dans le Nord-Est du Bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire de DEA, EDP/FLASH/UAC, 70 p, 2012.
- [7] J. P. Bricquet, F. Bamba, G. Mahe, M. Toure et J. C. Olivry, Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau*, 3, pp. 321-337, 1997.
- [8] H. M. Badjana, K. Hounkpè, K. Wala, K. Batawila, K. Akpagana et K. S. Edjamé, Analyse de la variabilité temporelle et spatiale des séries climatiques du Nord du Togo entre 1960 et 2010. *European Scientific Journal*, vol.10, 11, pp. 257-275, 2014.
- [9] B. T. A. Goula, I. Savané, B. Konan, V. Fadika, B. G. Kouadio, 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*, Vol. 7, n°1, pp. 1-12, 2006 (14 Décembre 2014)
- [10] I. Doumouya, B. Kamagaté, A. Bamba, M. Ouedraogo, I. Ouattara, I. Savané, A. Goula Bi Tié et J. Biémi, Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau et végétation du bassin versant du Bandama en milieu intertropical (Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 203-215, 2009.
- [11] T. D. Soro, B. D. Kouakou, E. A. Kouassi, G. Soro, A. M. Kouassi, K. E. Kouadio, M. S. O. Yéi et N. Soro, 2013. Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire), *Vertigo*, Vol. 13, n°3, <http://vertigo.revues.org/14347>, (15 Mars 2015)
- [12] G. Mahe, A. Dray, J. E. Paturel, A. Cres, F. Kone, M. Manga, F. N. Cres, J. Djoukam, A. H. Maïga, M. Ouedraogo, D. Conway et E. Servat, Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambé river in Burkina in FRIEND (2002) Regional Hydrology : Bridging the gap between research and practice. Van L. et Demuth S. (éds). *IAHS Publ.* n° 274. Cape Town-South Africa, pp. 69-76, 2002.
- [13] P. Diello, Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 368 p, 2007.
- [14] E. W. Vissin, Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 267 p, 2007.
- [15] V. Codjia, Contribution à l'analyse coût /bénéfice des scénarios de lutte contre les mouches tse-tse et les trypanosomoses en Afrique de l'ouest (données sur la zone d'étude au Bénin). Rapport de consultation, Vienne, Autriche, 52 p, 2001.
- [16] H. Diallo, I. Bamba, Y. S. S. Barima, M. Visser, A. Ballo, A. Mama, I. Vranken, M. Maïga et J. Bogaert, Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sécheresse*, Vol. 22, pp. 97-107, 2011.
- [17] A. A. Assani, Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (el niño/ la niña). *Bulletin sécheresse*, Vol. 10, n° 4, pp. 245-252, 1999.
- [18] L. Perreault. Analyse bayésienne retrospective d'une rupture dans les séquences de variables aléatoires hydrologiques. Thèse en cotutelle ENGREF/GRESE et Univ. Quebec/INRS-Eau, 200 p, 2000.
- [19] H. Lubès-Niel, J. M. Masson, J. E. Paturel & E. Servat, Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, (1998), pp. 383-408, 1998.
- [20] S. Ardoïn-Bardin, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II, 437 p, 2004.
- [21] A. M. Kouassi, K. F. Kouamé, K. E. Ahoussi, S. Oularé et J. Biémi, Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N'zi-bandama (Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 124-146, 2012.
- [22] B. Bernier, *Introduction à la macroéconomie*. Dunod, Paris, 1992.

- [23] E. Servat, J. E. Paturel, H. Lubès-Niel, B. Kouamé, J. M. Masson, M. Travaglio et B. Marieu « De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 12, n° 2, pp. 363-387, 1999.
- [24] A. M. Kouassi, K. F. Kouamé, K. B. Yao, K. B. Djé, J. E. Paturel et S. Oularé, 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Européenne de Géographie (Cybergéo)*, <http://cybergeog.revues.org/index23388.html> (15 Mars 2010)
- [25] E. Servat, J. E. Paturel, B. Kouamé, M. Travaglio, M. Ouédraogo, J. M. Boyer, H. Lubès-Niel, J. M. Fritsch, J. M. Masson et B. Marieu, Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan' 98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998)*. *IAHS Publ .no .252*, pp. 323-337, 1998.
- [26] J. C. Olivry, Synthèse des connaissances hydrologiques et potentielles en ressources en eau du fleuve Niger. *International report World Bank-Niger Basin Authority*, 156 p. 2002.
- [27] G. Mahé, J. C. Olivry, R. Dessouassi, D. Orange, F. Bamba, E. Servat, Relations eaux de surface-eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 330, pp. 689-692, 2000.
- [28] G. Mahé Surface/groundwater interactions in the Bani and Nakambe rivers, tributaries of the Niger and Volta basins, West Africa. *Hydrol. Sci. J.*, 54, pp. 704-712, 2009.
- [29] A. K. Gounou N'gobi, Impacts du changement climatique et des activités anthropiques sur la forêt classée de la Sota et sa zone riveraine. *Mémoire de Master, CIFRED/UAC*, p. 149, 2012.
- [30] D. M. M. Ahouansou, Influence de la dynamique du couvert végétal et du changement climatique sur les ressources en eau dans le bassin de la Mékrou à l'exutoire de Kompongou à l'horizon 2025. *Mémoire de Master. UAC/CIFRED*, 115 p, 2010.
- [31] G J. Boko, Trajectoires des changements dans l'occupation du sol: déterminants et simulation. Cas du bassin versant de l'Alibori (Benin, Afrique de l'Ouest). *Thèse de doctorat unique, EDP/FLASH/UAC*, 291 p, 2012.
- [32] A. Akognongbé, D. Abdoulaye, E. W. Vissin et M. Boko, Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Bénin). *Afrique Science*, Vol. 10, n° 2, pp. 228-242, 2014.
- [33] A. M. Kouassi, K. F. Kouamé, B. T. A. Goula, T. Lasm, J. E. Paturel et J. Biemi, Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. des Sci. et Technol.*, Vol. 11, pp. 207-229, 2008.