

Variabilité pluviométrique et son impact sur le couvert végétal dans le secteur Natitingou-Boukombé au nord-ouest du Bénin

Thierry Bidossèssi AGBANOU^{1,2*}, Djafarou ABDOULAYE¹, Guimmongui Abib SABI OROU BOGO², Martin PAEGELOW³ et Brice TENTE¹

¹ *Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale (LABEE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), BP 677 Abomey-Calavi, Bénin*

² *Laboratoire de Cartographie (LaCarto), Université d'Abomey - Calavi (UAC), 10 BP 1082 Cotonou, Bénin*

³ *Géographie de l'Environnement (GEODE), UMR 5602 CNRS, Université de Toulouse Jean Jaurès. Maison de la recherche- 5, Allées A. Machado-31058, Toulouse, Cedex*

* Correspondance, courriel : thierry.agbanou@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité pluviométrique et son impact sur le couvert végétal du nord-ouest Bénin. Les données utilisées dans cette étude sont essentiellement des données pluviométriques (1961 - 2016) de 16 stations ayant une influence sur le secteur d'étude, des images satellitaires Landsat (2000 et 2016) et une série d'images Modis NDVI (2000 à 2016). Le logiciel Khronostat a été utilisé pour le traitement statistique des séries pluviométriques et le logiciel Terset pour les traitements des images satellitaires. Les résultats du calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) et des tests de Pettitt et de Buishand montrent que la période 1961 à 2016 se décompose en trois sous - périodes avec deux ruptures de stationnarité : 1961 - 1969 (moyenne pluviométrique annuelle de $1431,88 \pm 248,58$ mm) ; 1970 - 2011 (moyenne pluviométrique annuelle de $1189,23 \pm 178,15$ mm) ; 2012 - 2016 (moyenne pluviométrique annuelle de $830,40 \pm 79,86$ mm). Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le coefficient d'efficacité pluviométrique (CEP) sur la période 2000 à 2016 évoluent est à la baisse sur toute la période. Ceci pour toutes les catégories d'occupation du sol du milieu. La mauvaise répartition spatio-temporelle des précipitations et surtout la forte pression anthropique qui s'exerce sur le couvert végétal expliquent cette dégradation du couvert végétal du milieu. Il est donc indispensable que des mesures soient prises pour réglementer les activités humaines responsables de la dégradation du couvert végétal de ce milieu.

Mots-clés : *variabilité pluviométrique, rupture de stationnarité, NDVI, Natitingou-Boukombé.*

Abstract

Rainfall variability and impact on vegetation cover in Natitingou-Boukombe sector in north-western Benin

The objective of this study is to characterize rainfall variability and its impact on the vegetation cover of northwest Benin. The data used in this study are mainly rainfall data (1961-2016) from 16 stations having an influence on the study area, Landsat satellite images (2000 and 2016) and a series of Modis NDVI images (2000 to 2016). Khronostat software was used for statistical processing of rainfall series and Terset software

for satellite image processing. The results of the calculation of the Standard Precipitation Index (SPI) and the Pettitt and Buishand tests show that the period 1961 to 2016 is broken down into three sub-periods with two breaks in stationarity : 1961 - 1969 (mean annual rainfall of 1431.88 ± 248.58 mm) 1970 - 2011 (mean annual rainfall of 1189.23 ± 178.15 mm) 2012 - 2016 (mean annual rainfall of 830.40 ± 79.86 mm). The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and the rainfall efficiency coefficient (CEP) over the period 2000 to 2016 are decreasing throughout the period. This applies to all categories of land use in the environment. The poor spatial and temporal distribution of precipitation and especially the strong anthropic pressure exerted on the vegetation cover explain this degradation of the vegetation cover of the environment. It is therefore essential that measures be taken to regulate the human activities responsible for the degradation of the vegetation cover of this environment.

Keywords : *rainfall variability, stationarity breakdown, NDVI, Natitingou-Boukombé.*

1. Introduction

Dans le nord-ouest du Bénin, notamment dans le secteur Natitingou-Boukombé, plusieurs activités anthropiques sont développées. Avec, l'explosion démographique de ces dernières décennies qui a entraîné l'usage des pratiques agricoles non appropriées, une surexploitation des sols et des ressources hydriques ainsi que le surpâturage ont eu d'importants impacts sur l'environnement [1]. Les techniques agricoles et l'exploitation forestière participent à la destruction du couvert végétal avec pour corollaire une baisse de la pluviométrie. La variabilité climatique, notamment pluviométrique, en Afrique subsaharienne en général et au nord-ouest du Bénin en particulier, n'est plus à démontrer. Cette dernière a une influence sur les ressources en eau du sol et la qualité du couvert végétal. Le suivi spatio-temporel de la couverture végétale du sol dans cette région soudanienne du Bénin à l'aide d'images satellitaires est donc d'une importance capitale pour caractériser la dynamique actuelle du paysage de ce milieu. Les conséquences de la régression du couvert végétal de ce milieu peuvent être irréversibles sur l'état de dégradation du sol [2]. La variabilité pluviométrique enregistrée cumulée aux activités humaines à grande échelle dans cette région sont responsables de la dégradation de l'état du couvert végétal et des sols. Le coefficient d'efficacité pluviométrique défini par [3] traduit l'état de la dynamique de la végétation des zones arides et celui de la surface du sol, les deux étant liés et étant fortement influencés par les impacts anthropiques [4]. C'est un indicateur de désertisation utilisé par [5, 6] pour apprécier l'évolution du couvert végétal en zone sahélienne entre 1982 et 1990. Face à la régression du couvert végétal, comment évolue l'indice d'efficacité pluviométrique dans le nord-ouest du Bénin ? L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de la pluviométrie sur l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) observé entre 2000 et 2016. Le NDVI qui traduit l'état du couvert végétal du milieu, permet de suivre la dynamique de ce dernier entre 2000 et 2016 en calculant le coefficient d'efficacité pluviométrique (CEP). Le choix de cette période se justifie d'une part, par l'explosion démographique importante observée à partir des années 2000 dans ce secteur avec ses conséquences d'augmentation des besoins de tout gens et la dégradation du couvert végétal, et d'autre part, par la disponibilité des données images Modis NDVI à partir de cette même année (2000).

2. Données et méthode

2-1. Donnée

2-1-1. Collecte des images satellitaires

Les données utilisées pour apprécier la dynamique de l'occupation du sol, sont essentiellement des images satellitaires Landsat ETM+ du 04 février 2000 et OLI-TIRS du 07 janvier 2016 de 30 m de résolution. Ces images ont été téléchargées gratuitement sur le site *earthexplorer.usgs.gov* au format GEOTIFF (Path 193 et Row 53). Pour mieux apprécier l'évolution du couvert végétal, les NDVI issus de la série d'images (2000-2016) Modis Terra (MOD13Q1.005) de 250 m de résolution ont été exploitées. L'intérêt des images Modis est qu'elles sont des résumés bimensuels (16 jours) des meilleurs pixels en termes de qualité pour la période considérée. Nous avons d'abord téléchargé les images du début de la période sèche (seconde quinzaine du mois de décembre) et celles de la fin de la période sèche (première quinzaine du mois d'avril) où l'impact de sécheresse sur la végétation devrait être maximal.

2-1-2. Collecte des données pluviométriques

Les données brutes sur le climat sont des séries pluviométriques mensuelles (1961 à 2016) des stations de Tanguiéta, Natitingou, Kouandé, Banikoara, Kandi, Djougou, Bembèrèkè, Ina, N'Dali, Bassila du Bénin et Blitta, Sokodé, Alédjo, Niamtougou, Pagouda, Kara-ville du Togo voisin. Au total les données de seize (16) stations du Bénin et du Togo voisin ont été utilisées dans le cadre de cette étude.

2-2. Méthode

2-2-1. Extraction des valeurs des NDVI (Landsat et Modis)

Pour faciliter la comparaison des NDVI issues des deux types d'images (Landsat et Modis), les images Landsat ont été classifiées et les différentes catégories d'occupation et les transitions identifiées entre 2000 et 2016. Aussi, le différentiel en terme de résolution a été intégré dans cette analyse en passant d'un pixel TM de 30 x 30 = 900 m² (pour les images Landsat) à un pixel théoriquement de 250 x 250 = 62 500 m² (pour les images Modis). Mais les résolutions temporelles sont différentes car, nous comparons une série d'images à échantillonnage annuelle à deux images ponctuelles dans le temps. Les images Modis NDVI ont été reprojetées (référentiel WGS84, UTM zone 31 Nord) et leurs valeurs, initialement codées sur 16 bits ont été recodées sur 8 bits (1 - 255) avant de constituer les séries temporelles (TSF) pour l'analyse avec le logiciel TerrSet (ex Idrisi). Ainsi, une étude comparative de l'évolution des NDVI a été faite par catégories d'occupation du sol en calculant le coefficient d'efficacité pluviométrique (CEP) et par type de transition en calculant les anomalies des NDVI sur la période 2000 à 2016. Il est à noter que l'évolution du CEP traduit mieux les changements d'occupation du sol que le NDVI simple. La **Formule** utilisée pour calculer le NDVI avec les images Landsat est :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)} \quad (\text{Huete, 1988}) \quad (1)$$

Pour le calcul du Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP), nous avons utilisé la définition simplifiée de [7], qui consiste à faire un rapport du NDVI par la pluviométrie annuelle.

$$CEP = \frac{\sum_1^m NDVI}{\sum_1^m P} \quad (2)$$

m étant le mois de l'année et *P* les précipitations mensuelles en mm

Plus le CEP est élevé, plus le milieu est dépourvu de végétation (milieu dégradé) et l'infiltration est importante.

2-2-2. Tendances et rupture de stationnarité dans les séries climatiques

Le test de Pettitt, l'autocorrélogramme et la statistique de Buishand ont été utilisés pour identifier la rupture de stationnarité dans la série climatique. Le logiciel Khronostat de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) a été utilisé pour le traitement statistique des données pluviométriques.

➤ Test de Pettitt (1979)

Le test non paramétrique de [8] a permis de déterminer à partir du logiciel Khronostat les ruptures de stationnarité sur la série 1961-2010. C'est un test souvent utilisé par plusieurs chercheurs [9] pour détecter les « ruptures » dans l'étude des variables hydrométéorologiques en Afrique de l'Ouest. L'absence de rupture dans une série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle H_0 . La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques $x_i, i = 1, t$ et $x_j, j = t + 1N$ appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable U_t, N définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (3)$$

avec, $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$

Selon la théorie des rangs, si K désigne la valeur KN prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est exprimée approximativement par :

$$\text{Prob}(KN > K) \approx 2 \exp(-6K^2 / (N^3 + N^2)) \quad (4)$$

H_0 est rejetée pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α . La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé $\max |U_t, N|$ avec $t = 1, N-1$.

➤ Statistique U de Buishand (1982, 1984)

En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture m , la statistique U de Buishand est définie par la **Formule** :

$$U = [N(N+1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} (S_k / D_k)^2 \quad (5)$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \text{ pour } k = 1, \dots, N \text{ avec } S_0 = 0$$

\bar{X} est la moyenne des valeurs X_1, X_2, \dots, X_N

Des valeurs critiques de la statistique (5) sont données par Buishand (1982) à partir d'une méthode de Monte Carlo. La statistique U est un test robuste qui permet de déceler tout changement de moyenne survenant au milieu de la série.

2-2-3. Indice standardisé des précipitations

Pour mieux analyser les périodes ou cycles humides et secs, l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) a été calculé. Selon Diallo *et al.* (2011) cet indice pluviométrique est bien adapté au suivi des variations de la dynamique de la végétation en relation avec l'évolution de la pluviométrie. L'Indice Standardisé des Précipitations, en anglais Standardized Precipitation Index (SPI) créé par McKee *et al.* (1993) répond à la **Formule** suivante :

$$SPI = \frac{(Xi - Xm)}{Si} \quad (6)$$

Xi est le cumul de la pluie pour une année i ; Xm et Si , sont respectivement la moyenne et l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

$$\text{Moyenne arithmétique } X_m = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

L'Indice Standardisé des Précipitations définit la sévérité de la sécheresse [10]. Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide. Cet indice a été utilisé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe [11, 12] et s'est révélé très efficace pour la détection des périodes de sécheresse.

3. Résultats et discussion

3-1. Variabilité interannuelle des pluies

Depuis trois décennies le secteur Nord-ouest du Bénin à l'instar de toute l'Afrique de l'Ouest Occidentale connaît une migration importante de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) vers le nord. Ce phénomène a une influence sur la pluviométrie qui connaît une variabilité importante ces dernières décennies. Les indices pluviométriques calculés illustrent l'instabilité au niveau de l'offre pluviométrique du secteur d'étude (**Figure 1**). Les anomalies positives traduisent des excédents et celles négatives, des déficits pluviométriques.

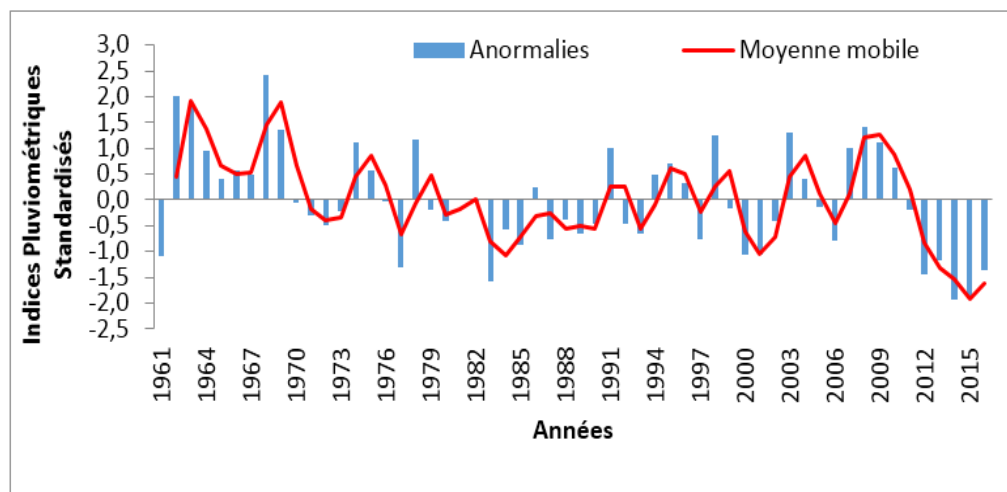


Figure 1 : Indices pluviométriques de la période 1961-2016 sur 16 stations pluviométriques du secteur d'étude

L'examen de la *Figure 1* montre sur la période 1961-2016 une variabilité des indices pluviométriques sur deux grandes périodes. La période allant de 1961 à 1970 est caractérisée globalement par des anomalies positives, ce qui traduit une période globalement humide. Alors que la période de 1970 à 2016 est caractérisée par des anomalies globalement négatives (période globalement sèche). Ce constat permet de dire que ce milieu est marqué par des périodes humides et des périodes sèches. Mais la tendance générale d'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne est à la baisse sur toute la période de 1961 à 2016. Toutefois, il y a quelques nuances avec certaines années d'humidité forte ou modérée. Pour mieux apprécier cette situation, une analyse de la rupture de stationnarité a été faite.

3-2. Tendance et rupture de stationnarité

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des précipitations annuelles. Les **Figures 2A et 2B** présentent respectivement les résultats des tests de Buishand et de Pettitt sur des séries précipitations annuelles.

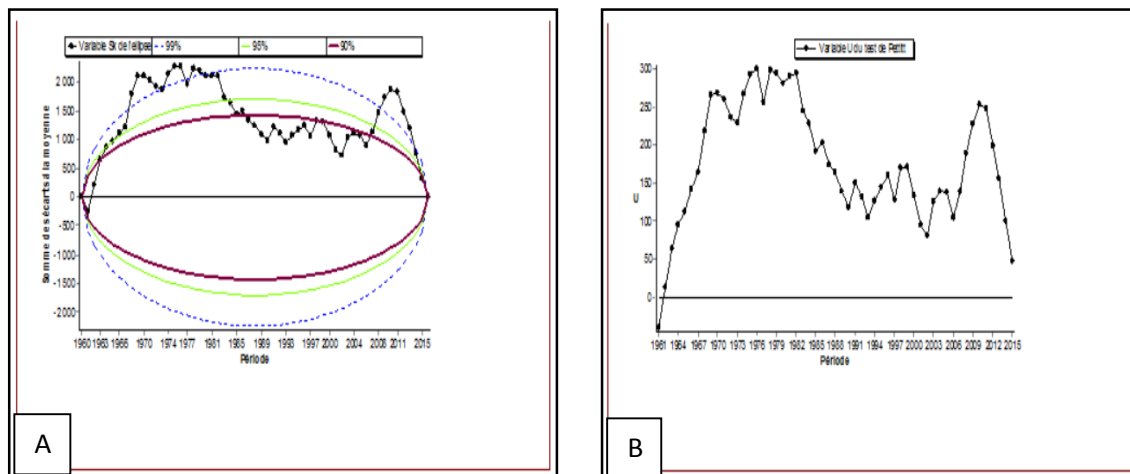


Figure 2 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B)

L'analyse des **Figures 2A et 2B** permet de constater que les tests de Buishand et de Pettitt identifient les années 1969 et 2011 comme années de la rupture de stationnarité. Ces ruptures sont significatives au seuil de 99 %. Il se dégage donc trois sous-séries : la série de 1961 - 1969, celle de 1970 à 2011 et celle de 2012 à 2016 (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Segmentation de Hubert (Niveau de significativité de Scheffé 1 %)

Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1961	1969	1431,88	248,58
1970	2011	1189,23	178,15
2012	2016	830,40	79,86

Au regard de ces deux tests, il est remarqué que les moyennes des sous-séries avant et après la première rupture sont respectivement de $1431,88 \pm 248,58$ mm et de $1189,23 \pm 178,15$ mm, soit un déficit pluviométrique de 16,94 % après la rupture. La sous période 1961 à 1969 est donc plus humide que la sous période 1970 à 2010. La moyenne pluviométrique annuelle de la troisième sous - série est de $830,40 \pm 79,86$ mm avec un déficit pluviométrique de 30,17 % par rapport à la deuxième sous série. La tendance évolutive des hauteurs de pluie est la régression. Cette situation pourrait bien avoir une influence sur l'état du couvert végétal.

3-3. Changement du paysage au niveau spatial entre 2000 et 2016

L'analyse diachronique de l'occupation du sol entre 2000 et 2016 permet de constater que les formations végétales naturelles (forêts denses, forêts claires et savanes boisées) de ce milieu connaissent une grande agressivité parce qu'elles disparaissent au profit des formations anthropiques (mosaïques de cultures et jachères, agglomérations et plantations). Ceci est peut-être dû à l'intensité des activités telles que l'agriculture itinérante sur brûlis et l'exploitation du bois (bois d'œuvre, et bois énergie) destructrices de l'environnement. La synthèse des différentes transitions observées entre 2000 et 2016 est présentée par la **Figure 3** ci-dessous.

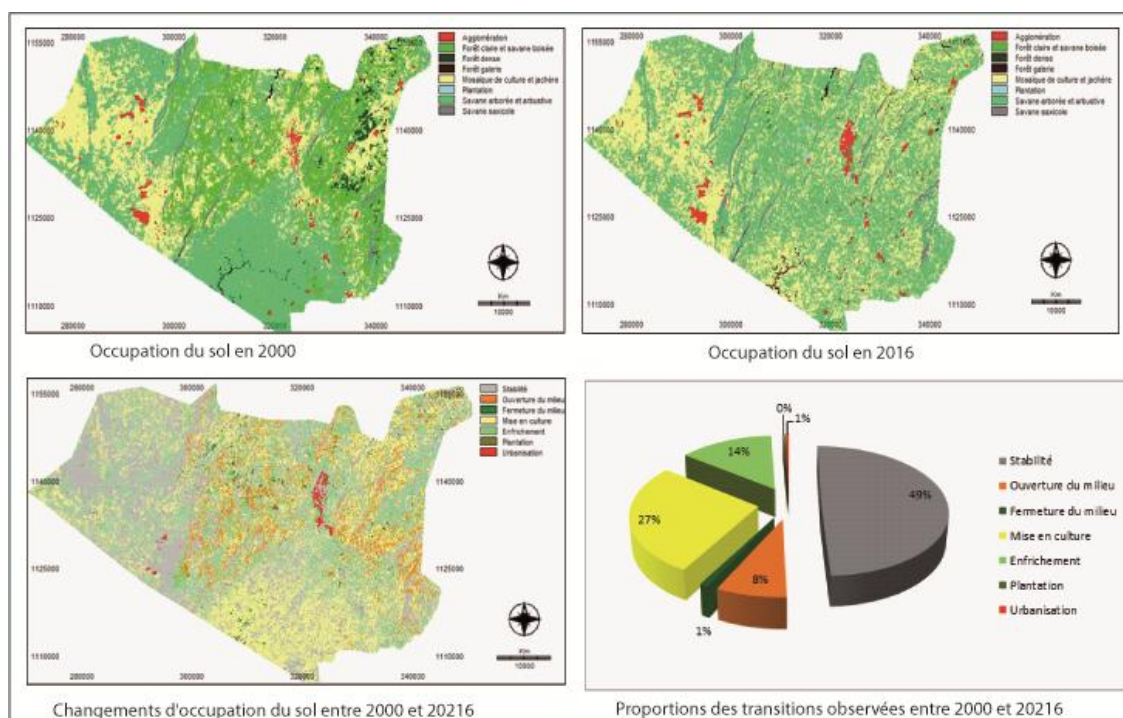


Figure 3 : Cartes d'occupation du sol et des changements observés sur la période 2000-2016

L'examen de la **Figure 3** montre qu'environ 49,42 % (122573,34 ha) de la superficie de ce milieu est restée relativement stable entre 2000 et 2016. Près de 34,97 % (86763,06 ha) dont 7,76 % (19259,82 Ha) de milieu ouvert et 27,21 % (67503,24 Ha) de mise en culture sont des territoires qui ont connu une dégradation du couvert végétal. Par contre 15,16 % (37602,27 Ha) dont 13,83 % (34318,17 Ha) d'enrichissement, 0,96 % (2393,73 Ha) de milieu fermé et 0,35 % (890,37 Ha) de plantation sont des milieux qui ont favorisé la reconstitution du couvert végétal. La zone de changement en milieu urbain fait 0,43 % (1069,65 Ha). Le tableau 2 présentent le LUC budget (Land-Use and Land-Cover Change) calculé sur la période 2000-2016.

Tableau 2 : LUC budget pour la période 2000-2016 (en Ha)

Catégorie	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	123,75	123,75	0	123,75
FD	0	4154,85	4154,85	0	4154,85
FCSB	1646,55	39430,17	41076,72	3293,1	37783,62
SAA	52902	43235,73	96137,73	86471,46	9666,27
SS	140,4	385,38	525,78	280,8	244,98
PT	885,69	04,77	890,46	09,54	880,92
MCJ	67518	36608,22	104126,22	73216,44	30909,78
AGG	1069,56	219,33	1288,89	438,66	850,23

Source : Interprétation images Landsat ETM+ de 2000 et OLI TIRS 2016

Légende : FG : Forêt galerie ; FD : Forêt dense ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SAA : Savanes arborée et arbustive ; SS : Savane saxicole ; PT : Plantation ; MCJ : Mosaïque de Champs et jachères ; AGG : Agglomération

Le **Tableau 2** montre sur la période 2000-2016 que pertes et gains des savanes arborées et arbustives tendent à s'équilibrer pour l'essentiel. Bien qu'elle a gagné 9666,27 Ha, l'essentiel de la dynamique spatio-temporelle consiste en un changement de localisation des savanes arborées et arbustives : ce qu'elles ont perdu à un endroit, elles l'ont gagné ailleurs. Il en va de même pour les mosaïques de cultures et de jachères. Au-delà d'une extension de 30909,78 Ha, on remarque aussi une relocalisation importante de 36608,22 Ha. Au niveau des forêts claires et savanes boisées, elles perdent 39430,17 Ha et gagne en retour 1646,55 Ha, des changements de localisation estimées à 37783,62 Ha pour la période 1987-2000. Cette régression des formations végétales naturelles (forêts denses, forêts claires et savanes boisées) au profit des formations anthropiques (mosaïques de cultures et jachères, agglomérations, plantations) peut s'expliquer par plusieurs raisons dont l'évolution démographique et à une demande de plus en plus croissante des terres agricoles d'autre part [13]. Cette tendance de régression du paysage ligneux au profit de la culture et des espaces urbains observée depuis l'année 1987 à 2016 a été aussi observées par plusieurs Auteurs dont [14 - 16] qui ont réalisé des études sur le Bénin et dans la zone soudanienne.

3-4. Évolution du NDVI et du coefficient d'efficacité pluviométrique entre 2000 et 2016

Le suivi du NDVI sur la période 2000 à 2016 montre que l'activité chlorophyllienne et le Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP) évoluent en fonction de l'état végétatif de la transition considérée (**Figures 4A et 4B**).

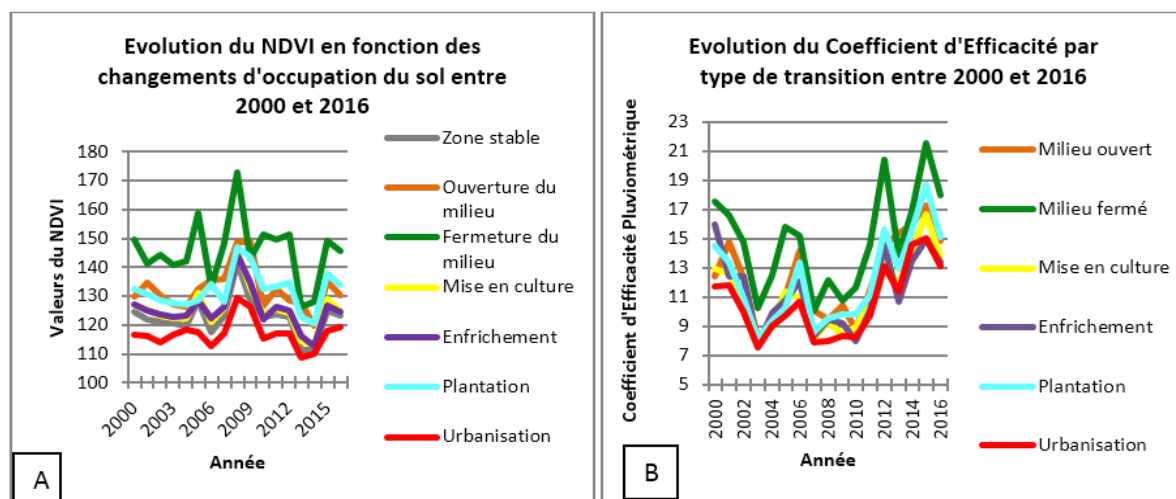


Figure 4 : Évolution du NDVI et du CEP en fonction des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Il ressort de l'examen de la **Figure 4A** que les valeurs de NDVI les plus élevées sont enregistrées au niveau de la transition "fermeture du milieu" et varient entre 127 et 173. Cela signifie que l'activité chlorophyllienne au niveau de cette transition est plus importante qu'au niveau des autres transitions : la végétation est donc plus abondante. On note aussi une activité chlorophyllienne importante au niveau des plantations avec des NDVI variant entre 120 et 147 et au niveau des milieux ouverts avec des NDVI variant entre 120 et 139. L'activité chlorophyllienne la moins importante est observée au niveau de la transition vers l'urbanisation, avec des valeurs de NDVI oscillant entre 107 et 129. Ceci se justifie par la réduction du couvert végétal au profit des habitats dans cette catégorie. Les valeurs les plus élevées de NDVI sont enregistrées au cours des années 2005, 2008 et 2015 pour tous les types de transition. Ces années ont été des années qui ont enregistré une importante pluviométrie selon les données de précipitations collectées. Ceci a favorisé le développement du couvert végétal et donc la montée de l'activité chlorophyllienne de la végétation. La tendance globale du Coefficient de Efficacité Pluviométrique (CEP) pour tous les types de transitions sur la figure 4B est à la hausse

entre 2000 et 2016. Ceci montre que ces milieux s'appauvrissent de plus en plus en couvert végétal du fait de la baisse de la pluviométrie et/ou de l'importance des activités humaines. Malgré que les années 2003, 2007, 2008 et 2009 ont enregistré une pluviométrie élevée, leurs CEP sont faibles. Ceci confirme que la pluviométrie n'est pas le seul facteur qui influence l'état du couvert végétal dans ce milieu. Ces résultats concordent bien avec ceux de [7]. Ces derniers ont montré dans leurs travaux que le Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP) est en augmentation dans les zones de plus de 300 mm de pluie annuelle en milieu soudanien. Ceci s'explique selon ces auteurs par la destruction de la végétation surtout ligneuse (comme une zone forestière remplacée par des cultures) et une augmentation de l'infiltration des eaux de pluie. L'augmentation progressive du Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP) entre 2000 et 2016 ici peut s'expliquer par la baisse de la pluviométrie constatée et évidemment par la régression du couvert végétal observée. Ces résultats sont conformes avec ceux de [04] qui ont montré que le coefficient d'efficacité pluviométrique évolue inversement à la pluviométrie. Plus ce coefficient est augmenté, plus le milieu est aride.

4. Conclusion

La suivie de l'évolution du couvert végétal a permis de constater qu'entre 2000 et 2016, le couvert végétal dans ce milieu a considérablement régressé au profit des zones de cultures et des espaces urbanisés. Les valeurs du NDVI varient en fonction des types d'occupation du sol. Elles sont plus élevées au niveau des milieux fermés et plantations qu'au niveau des milieux ouverts et urbanisés. Le Coefficient d'Efficacité Pluviométrique (CEP) dans ce secteur évolue à la hausse entre 2000 et 2016 pour toutes les catégories d'occupation du sol. Ceci traduit une dégradation du couvert végétal. La variabilité pluviométrique observée a donc une influence sur le développement du couvert végétal. Mais cette baisse de la pluviométrie n'explique pas toute seule la régression du couvert végétal. Cette dernière pourrait être aussi liée à l'importance des activités humaines pratiquées dans ce milieu. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies de conservation des ressources végétales encore disponibles dans ce milieu pour espérer une amélioration des facteurs pluviométriques.

Références

- [1] - Y. C. HOUNTONDI, P. OZER, J. NICOLAS, Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergeog : Revue européenne de géographie*, N° 291, (2004) 18 p.
- [2] - R. S. DEFRIES, M. C. HANSEN and J. R. G. TOWNSHEND, 'Global Continuous Fields of Vegetation Characteristics: A Linear Mixture Model Applied to Multi-Year 8 km AVHRR Data', *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, N° 6-7 (2000) 1389 - 1414 p.
- [3] - H. N. LE HOUÉROU, Rain-Use efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments*, Vol. 7, (1984) 1 - 35 p.
- [4] - B. LACAZE, S. AÏT-BACHIR, S. SOMMER, L'étude diachronique de l'efficacité des pluies pour la production végétale dans le bassin méditerranéen de 1986 à 1996. *Télédétection*, Editions scientifiques GB, 3 (2-3-4) (2003) 165 - 174 p. <halshs-00273844> (2008)
- [5] - S. E. NICHOLSON, C. J. TUCKER and M. B. BA, Desertification, drought, and surface vegetation : an example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, (1998) 815 - 829 p.

- [6] - S. D. PRINCE, E. BROWN DE COLSTOUN and L. L. KRAVITZ, Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, Vol. 4, (1998) 359 - 374 p.
- [7] - S. D. PRINCE, E. BROWN DE COLSTOUN and L. L. KRAVITZ, Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology*, 4 (1998) 359 - 374
- [8] - A. N. PETTITT, A non-parametric approach to the change-point problem, (1979) 122 p.
- [9] - 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. Dijon, France, (2007) 285 p
- [10] - S. ARDOIN-BARDIN, Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Thèse de doctorat*, Université Montpellier II, Montpellier, (2014) 240 p.
- [11] - L. GIDDINGS, M. SOTO, B. M. RUTHERFORD et A. MAAROUF, Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmosfera*, (2005) 33 - 56 p.
- [12] - H. WU, M. J. HAYES, A. WEISS et Q. HU, An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China Z-index and the statistical Z-score. *International Journal of Climatology*, 21 (2001) 745 - 758 p.
- [13] - E. AMOUSSOU, Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest) Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, (2010) 313 p.
- [14] - B. TENTE, Recherche sur les facteurs de la diversité floristique des versants du massif de l'Atacora : Secteur Perma-Toucuontouna (Bénin). Thèse de Doctorat unique. EDP/FLASH/UAC, Abomey-Calavi, (2005) 252 p.
- [15] - L. LEROUX, Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'ouémé (Bénin) à partir l'imagerie Landsat-MODIS- cas d'étude du communal de Djougou. Hydrosciences Montpellier, France, ANR ESCAPE, (2012) 62
- [16] - E. J. BIDOU, M. PALIBRK, J. ANDRIEU, C. MERING, Vulnérabilité, dynamique de population et occupation des sols : Réflexion sur les indicateurs de vulnérabilité au Bénin et au Niger. Livrable N° 6.4, Février (2013) 28 p.