

## Variations saisonnière et interannuelle de NDVI mises en évidence à partir d'images MODIS 250 m dans le bassin versant de l'Ouémé Supérieur

### [ Seasonal and interannual variations of NDVI identified from MODIS 250 m in the catchment of Upper Ouémé ]

*Emile O. EDEA<sup>1</sup>, Ibouaïma YABI<sup>1</sup>, Vincent OREKAN<sup>2</sup>, and Michel BOKO<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire PIERRE PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Département de Géographie, FLASH, Université d'Abomey-Calavi, Benin

<sup>2</sup>Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale (LABEE), Département de Géographie, FLASH, Université d'Abomey-Calavi, Benin

Copyright © 2016 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 research aims to study the variability of the NDVI in the step of annual times in the catchment area of Upper Ouémé between 2000 and 2015. Vegetation Index data is analysed to highlight the spatial variation time of vegetation. The MODIS 250 m resolution are used to analyse the details of the dynamics from 2000 to 2015. Generally, vegetative activity in the Upper Ouémé, declined during the 2000-2015 time series. The spatio-temporal dynamics of vegetation brought together the months of the year, according to homogeneous dynamics. So some months, like those of July-August, are marked by a significant improvement in the vegetation. Others, contrariwise, knows a reverse situation. These are the months from November to February. The Pettit test applied to the series of NDVI MODIS shows that between 2000 and 2015, the data are not homogeneous and that there are dates from which the changes were observed in the data. The year of greater plant production is 2003. As for the year to the smaller plant activity, it corresponds to 2005.

**KEYWORDS:** Upper Ouémé, MODIS, image NDVI, Vegetation dynamics, perspective.

**RESUME:** La présente recherche a pour objectif d'étudier la variabilité des NDVI au pas de temps annuels dans le bassin de versant de l'Ouémé Supérieur entre 2000 et 2015. Des données d'indice de végétation sont essentiellement analysées pour mettre en relief la variation spatio-temporelle du couvert végétal. Les images de moyenne résolution que sont les images MODIS sont utilisées pour analyser le détail de cette dynamique de 2000 à 2015. De façon générale, le bassin versant de l'Ouémé Supérieur connaît une faible activité végétative au cours de la série temporelle 2000-2015. La dynamique spatio-temporelle de la végétation a permis de regrouper les mois de l'année, selon des dynamiques homogènes. Ainsi, certains mois, comme ceux de juillet-Août, sont marqués par un gain important de végétation. D'autres par contre, connaissent une situation inverse. Ce sont les mois de la pleine saison sèche. Il s'agit des mois de Novembre à février. Le test de Pettit appliqué à la série de NDVI de MODIS montre qu'entre 2000 et 2015, les données ne sont pas homogènes et qu'il y a des dates à partir desquelles des changements ont été observés dans les données. L'année de plus grande production végétale est l'année 2003. Quant à l'année de la plus petite activité végétale, elle correspond à 2005.

**MOTS-CLEFS:** Ouémé supérieur, NDVI, Image MODIS, dynamique de la végétation, perspective.

## 1 INTRODUCTION

Dans les milieux soudaniens, qui font partir des milieux semi-arides, l'évolution de la végétation naturelle et les rendements des cultures sont fortement dépendants des facteurs naturels (pluviométrie) et anthropiques [5]. La pluviométrie apparaît, comme le principal facteur limitant de l'écologie de ces milieux. Cette variabilité se manifeste, depuis les années 1970, par une baisse importante des totaux pluviométriques annuels [21], [24], [16], [19], [1]. La baisse annuelle de la pluviométrie et sa mauvaise répartition spatiale et temporelle, ont des répercussions sur l'évolution du couvert végétal. Il s'y ajoute la déforestation, l'élargissement des zones dénudées et des périmètres mise en culture qui font partie des transformations imputables aux activités anthropiques. Le suivi régulier de l'état végétatif devient alors une nécessité. Le recours aux satellites d'observation de la terre permet de suivre et de caractériser cette évolution de la végétation à travers l'indice de végétation (NDVI). Les données d'indice de végétation, en particulier les NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), caractérisent l'activité chlorophyllienne au niveau des plantes et représentent de bons indicateurs pour le suivi de l'état du couvert végétal [23], [17], [27]. Le bassin de l'Ouémé supérieur étant sujet à la dégradation de ses ressources végétales [2] mérite un suivi régulier. En effet, les formations végétales telles que les savanes, demeurent les principales zones de pâturage pour un cheptel de plus en plus important [22]. A cela s'ajoute l'accroissement démographique qui induit une progression des espaces culturels au détriment des unités naturelles d'occupation du sol. Cela constitue de fait un frein à la régénération et au développement du capital forestier. Le présent article qui utilise les NDVI MODIS vise à analyser l'évolution de cette végétation afin de comprendre sa dynamique de 2000 à 2015.

## 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 2.1 SECTEUR D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Ouémé supérieur (Figure 1) encore appelé "Haute Vallée de l'Ouémé (HVO) est situé au centre du Bénin (9° - 10°N et 1°30' - 2°45'E). Sur le plan administratif, ce bassin est partagé entre les départements de la Donga et du Borgou et couvre une superficie d'environ 14 000 km<sup>2</sup> [26], [2]. Il est habité par environ 400 000 personnes et dispose au moins de 35 groupes ethniques. Les principales langues sont le Bariba, le Yom, le Lokpa et le Yorouba. Le bassin supérieur de l'Ouémé est situé dans un contexte climatique soudanien, caractérisé par un climat à deux saisons distinctes et un régime pluviométrique unimodal (Figure 2) dont le maximum des précipitations tombe au cours du mois d'août. La végétation naturelle est une mosaïque de savanes boisées et de petits îlots de forêts : une saison sèche de novembre à mars et une saison des pluies d'avril à octobre [11].

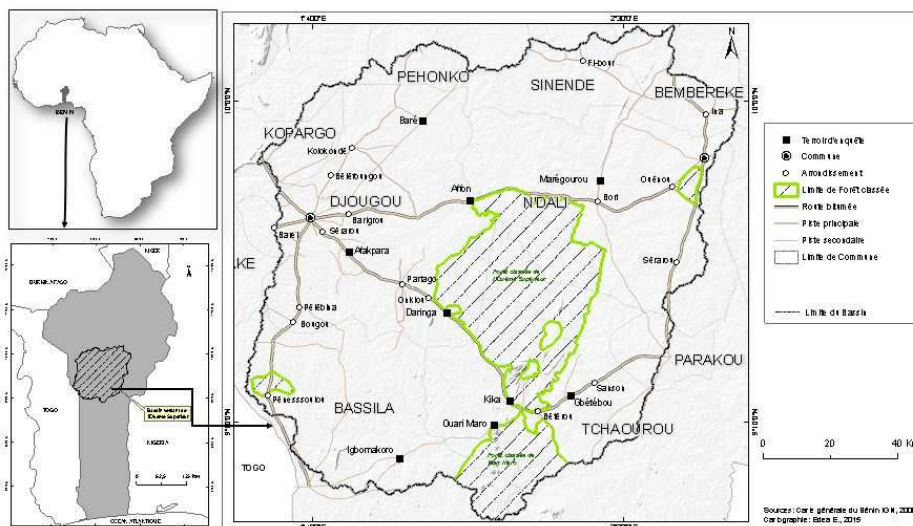


Fig. 1 : Localisation du bassin versant de l'Ouémé supérieur

La géomorphologie correspond à une pénéplaine avec des inselbergs isolés dont le point le plus élevé est l'Inselberg Mont Sobbaro à 658 m d'altitude et le point le plus bas est à 230 m d'altitude. Ce vaste pénéplaine est arrosé par le fleuve Ouémé et ses affluents avec une densité de drainage de 0,78 km / km<sup>2</sup> [18].

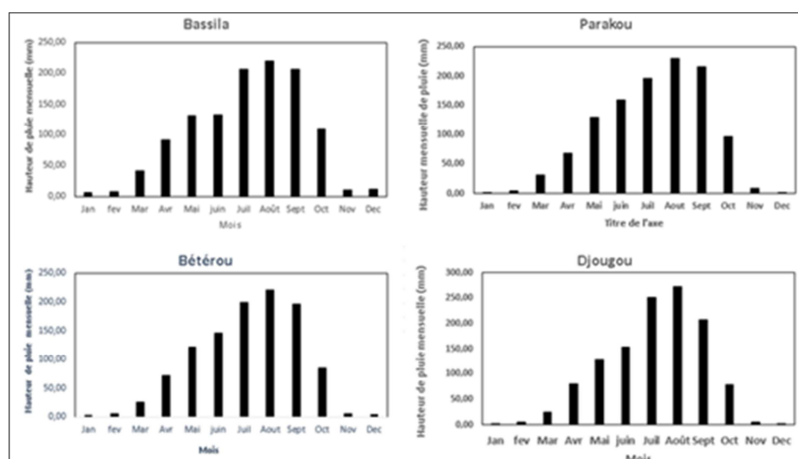


Fig. 2: Régime pluviométrique moyen de quelques stations pluviométriques du bassin de de 1960 à 2010

Source : ASECNA (2000)

L'économie du bassin de l'Ouémé supérieur est principalement basée sur l'agriculture, et le commerce. Il y a aussi l'exploitation forestière comme la fabrication du charbon de bois et la production du bois d'œuvre. A toutes ces formes d'exploitations forestières, il faut également ajouter le bois de chauffe qui assure l'énergie de cuisson. Autant d'activités et de facteurs qui induisent la dégradation du couvert végétal.

## 2.2 DONNÉES

Dans le cadre de cet article, les images d'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de moyenne résolution (250m) fournies par le capteur MODIS ont été utilisées. Ces images présentent l'intérêt de permettre d'analyser, à un rythme temporel fin, la dynamique saisonnière et interannuelle de la couverture végétale ou l'évolution des conditions climatiques ou hydriques de développement de la végétation. Les images MODIS utilisées dans le cadre de cette recherche sont des images de 250 m de résolution spatiale et de 16 jours de résolution temporelle. La série choisie couvre la période allant de 2000 à 2015. Plusieurs raisons expliquent ce choix. D'abord, il y a la disponibilité des données ensuite la qualité de ces données disponibles. En effet, le capteur MODIS a été placé sur la plate-forme Terra en 2000. Donc il n'existe pas de données NDVI MODIS avant cette date. Les données pluviométriques couvrant la période 2000 à 2015 sont sans lacunes. De plus MODIS possède deux bandes spectrales à 250 m de résolution, 5 bandes à 500 m de résolution et 29 bandes à 1 km de résolution. Seules les bandes rouges (R) et proches infrarouge (PIR) possèdent une résolution spatiale de 250 m, permettant ainsi, d'effectuer des suivis de la végétation avec une précision spatiale plus élevée par rapport à la basse résolution. Les données MODIS sont utilisées pour effectuer des cartographies de l'occupation et de l'utilisation du sol aussi bien à l'échelle globale (500 m) [7], [25] qu'à l'échelle régionale (250 m) [28]. Les données MODIS sont également utilisées pour analyser la phénologie des végétaux à l'échelle globale (500 m), régionale (1 km) qu'à l'échelle locale (250 m) [10], [30], [28].

## 2.3 METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES

### 2.3.1 METHODE D'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE LA COUVERTURE VEGETALE

Pour apprécier la dynamique de la végétation, deux échelles d'analyse ont été considérées. Il s'agit de l'analyse globale pour cerner la dynamique d'ensemble de la végétation et l'analyse localisée pour comprendre les dynamiques de l'occupation et de l'utilisation des sols. Ainsi, sont utilisées des images de basses résolutions spatiales MODIS 500 m pour l'analyse globale et des images de résolution moyenne MODIS 250 m pour l'analyse localisée. Cette dernière vise à mieux comprendre les dynamiques exprimées à travers l'analyse des images MODIS. Pour harmoniser les résolutions spatiales des deux types d'images, l'algorithme de Gram-Schmidt Spectral Sharpening a été utilisé. Cet algorithme permet de passer des pixels de 500 m à celui de 250 m. A ces images sont ajoutées des données de climat. Le couplage de ces données climatiques avec les données de télédétection moyenne résolutions (MODIS 250 m) a permis de mettre en évidence les effets des variations climatiques sur les types de milieu. Par ailleurs, d'autres images MODIS ont été compilées sans modification de la

résolution spatiale, en vue de faire des analyses localisées à moyenne résolution (250 m). Avant leur analyse, les données images ont fait l'objet d'une chaîne de prétraitements. La deuxième étape de prétraitement apporté aux images MODIS a consisté à changer la projection initiale des images (projection sinusoïdale) à la projection géographique métrique UTM31N (Datum wgs84). Cette transformation a été effectuée à l'aide de l'outil MODIS Conversion Toolkit du logiciel ENVI 5 qui permet de passer de la projection du géoréférencement d'origine à la projection métrique (UTM31N). La troisième étape consiste à l'harmonisation des facteurs d'échelle et de dimension des images. Les méthodes statistiques ont été utilisées sur les valeurs des pixels (le NDVI) pour l'analyse des images MODIS. L'indice de végétation (NDVI) se fonde sur le principe de la différence de réflectance des plantes vertes entre le proche infrarouge et le rouge. La formule du NDVI est la suivante :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

On utilise l'indice de végétation pour plusieurs objectifs notamment l'estimation de la masse végétale verte couvrant le sol, la description de l'état phénologiques de la couverture végétale, la prévision des récoltes, l'inventaire des cultures par segmentation de l'indice [3], [8]. Dans le présent article, l'analyse de la dynamique de l'indice de végétation NDVI vise à comprendre les variations spatiotemporelles de la végétation dans l'espace du bassin versant de l'Ouémé Supérieur ainsi que ces dynamiques végétales. Cet indice exprime l'évolution des paramètres phénologiques des végétaux et est corrélé aux variations saisonnières et interannuelles du climat, aux changements climatiques à long terme et aux perturbations anthropiques et naturelles [13]. Le NDVI représente deux facteurs environnementaux. Dans un premier temps, le NDVI permet d'expliquer les changements dans la végétation (changements causés par le climat, les sols, le type de végétation, la topographie, etc...). Ensuite, le NDVI permet d'expliquer les variations intra et interannuelle de chaque écosystème en réponse aux fluctuations climatiques.

### 2.3.2 MISE EN EVIDENCE DE TENDANCE, DETECTION DE RUPTURES ET ANALYSES STATISTIQUES

Le traitement statistique de la variabilité temporel des données NDVI de MODIS s'est fait en deux étapes. La première phase a consisté à déterminer s'il y avait une tendance dans chaque série chronologique constitué par chacun des pixels d'une image. Et la deuxième étape vise à savoir s'il existait une rupture dans les séries temporelles. Un seul test de tendance a été utilisé pour ces analyses, celui de Mann-Kendall prenant en compte la saisonnalité d'une chronique temporelle. Ce test a été effectué avec le logiciel XLSTAT. Le choix d'un test de tendance est fonction de plusieurs critères dont la taille de l'échantillon, la distribution de la variable analysée et la nature des tendances espérées [4]. Le test de Mann-Kendall (avec saisonnalité) a été choisi pour sa robustesse prouvée d'une part [12], [29], [4], [14] et d'autre part parce qu'il est non paramétrique (il ne fait aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données). Par ailleurs, ce test tient compte du caractère saisonnier de la série. En d'autres termes, pour des données mensuelles ayant une saisonnalité de 12 mois, il s'agira de rechercher s'il existe une tendance dans la série, en passant d'un mois à l'autre. L'hypothèse nulle  $H_0$  du test, est qu'il n'y a pas de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies. Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du taux de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons. La statistique  $S$  de Kendall et sa variance sont données par :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

Où  $n$  est le nombre de données de la série, et les  $x_i$  ( $i=1\dots n$ ) sont les observations, supposées indépendantes. La détection de rupture dans la série est faite à l'aide du test de Pettitt sur la base du même critère de choix que celui de Kendall [15]. Le test de Pettitt est un test non paramétrique ne nécessitant aucune hypothèse quant à la distribution des données. Le test de Pettitt est une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement. L'hypothèse nulle, dans le cas présent est que les  $T$  variables suivent une même distribution  $F$ , et l'hypothèse alternative est qu'à un temps  $t$  se produit un changement de distribution.

La statistique du test de Pettitt est calculée comme suit :

On pose

$$D_{ij} = -1 \text{ si } (x_i - x_j) > 0, D_{ij} = 0 \text{ si } (x_i - x_j) = 0, D_{ij} = 1 \text{ si } (x_i - x_j) < 0$$

$$U = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij}$$

La statistique de Pettitt correspondant à chacune des hypothèses alternatives est définie par :

$K = \max_{1 \leq t < T} |U_t|$ , pour le test bilatéral ( $H_a$  : il existe un temps  $\tau$  à partir duquel les variables changent de paramètre de position)

$K = \max_{1 \leq t < T} U_t$ , pour le test unilatéral à gauche ( $H_a$  : il existe un temps  $\tau$  à partir duquel le paramètre de position des variables diminue de  $\Delta$ )

$K = -\min_{1 \leq t < T} U_t$ , pour le test unilatéral à droite ( $H_a$  : il existe un temps  $\tau$  à partir duquel le paramètre de position des variables augmente de  $\Delta$ ).

L'interprétation pour la colonne de la position 249 (P249NDVI) est la suivante :

**H0** : Il n'y a pas de tendance dans la série

**Ha** : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification  $\alpha=0,05$ , on doit rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$ , et retenir l'hypothèse alternative  $H_a$ . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,94%.

Les images NDVI MODIS ont été transformées en fichier texte et exporté sous Excel afin de calculer le test de tendance de Mann-Kendall. Voici un extrait de ces tableaux présenté dans le tableau1. Les coordonnées du pixel sont données dans le système de projection UTM31N (première et deuxième ligne du tableau1). La première colonne représente les données de date (ici les années de la période de 1990-2015) et les valeurs de NDVI du pixel PxNDVI correspondant aux données de date sont représentées dans la deuxième colonne (tableau 1).

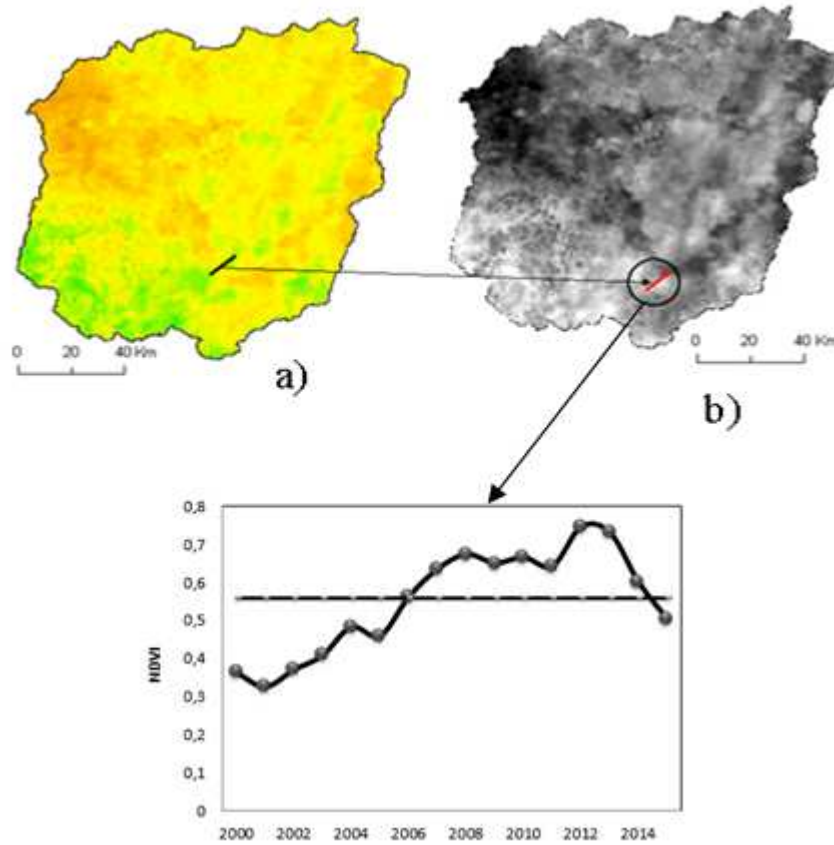
L'analyse spatio-temporelle des images NDVI de MODIS (250 m de résolution spatiale) a été faite en traçant des transects spatiaux dans un certain nombre d'espaces dont la variation porte à intérêt (fig. 3).

**Tableau 1. Echantillon d'une image NDVI de MODIS en format texte exporté sous Excel**

x	399110,39	421882,21	424697,26	415302,60	411628,12	402577,33
y	1041402,39	1019183,20	1022441,23	1025059,64	1025396,09	1031502,66
Année	P30NDVI	P56NDVI	P87NDVI	P245NDVI	P152NDVI	P6NDVI
2000	0,68	0,70	0,75	0,61	0,36	0,31
2001	0,64	0,66	0,75	0,53	0,34	0,35
2002	0,53	0,66	0,70	0,43	0,36	0,42
2003	0,58	0,65	0,58	0,37	0,35	0,43
2004	0,58	0,66	0,46	0,34	0,37	0,41
2005	0,65	0,61	0,40	0,33	0,36	0,48
2006	0,68	0,59	0,36	0,35	0,37	0,56
2007	0,52	0,52	0,30	0,38	0,45	0,60
2008	0,44	0,44	0,31	0,37	0,50	0,68
2009	0,37	0,37	0,32	0,42	0,58	0,69
2010	0,33	0,33	0,33	0,46	0,64	0,73
2011	0,32	0,32	0,41	0,50	0,70	0,66
2012	0,31	0,31	0,42	0,56	0,75	0,66
2013	0,34	0,33	0,50	0,63	0,74	0,74
2014	0,36	0,35	0,55	0,68	0,68	0,75
2015	0,38	0,36	0,60	0,67	0,68	0,73

Source : Traitement des données, 2015

Il a été tenu également compte du fait que ces transects ont un caractère temporel puis qu'ils permettent de relever les valeurs d'un même groupe de pixel de 2000 à 2015 et de les analyser par la suite par les méthodes statistiques. La figure 3c par exemple présente la courbe d'évolution d'un transect.



**Fig. 3 : Etapes d'analyse des images NDVI de MODIS.**

*Source : Traitement des données NDVI MODIS*

L'image (a) représente le coefficient de variation interannuel du NDVI la période de 2000 à 2015 ; l'image (b) indiquant le transect tracé sur une zone d'intérêt repérée sur la figure (a) (zone à forte variation du NDVI) ; la figure (c) exprime en graphique l'évolution interannuelle des valeurs du NDVI pour ce transect

L'analyse de la dynamique spatio-temporelle de la végétation à travers l'étude statistique des images de NDVI de MODIS est faite afin d'extraire les connaissances sur la dynamique générale du couvert, mais également sur la dynamique spécifique selon la nature de la couverture végétale (espace forestier ou espace de culture).



Fig. 4: Extraction de grille à partir d'image MODIS

Source : Traitement des données NDVI MODIS

Pour cela, une connaissance de la nature de l'occupation du sol est nécessaire, d'où l'utilisation des images de haute résolution spatiale (LANDSAT) pour l'établissement de la carte d'utilisation des sols.

L'étude précédente a servi de base pour analyser la dynamique de la végétation à partir de ces images de NDVI.

En effet, tous les pixels de chaque chronique marquée par une tendance significative (à la baisse ou à la hausse) ont été transformés en vecteurs ponctuels. Une grille vectorielle composée d'éléments de 6 km<sup>2</sup> (puisque la résolution spatiale est de 250 m) est construite à partir d'une image MODIS (fig. 4). Pour ce faire, il est simplement extrait, sous forme de vecteur, les contours des pixels d'une image NDVI de MODIS. Ainsi, les vecteurs ponctuels construits sur la base de test de tendance sont superposés à la grille afin d'extraire les valeurs NDVI de chaque chronique nécessaires à la cartographie et à l'analyse de la dynamique de la végétation.

### 3 RÉSULTATS

#### 3.1 TENDANCE DES DONNÉES NDVI MODIS DE QUELQUES PIXELS

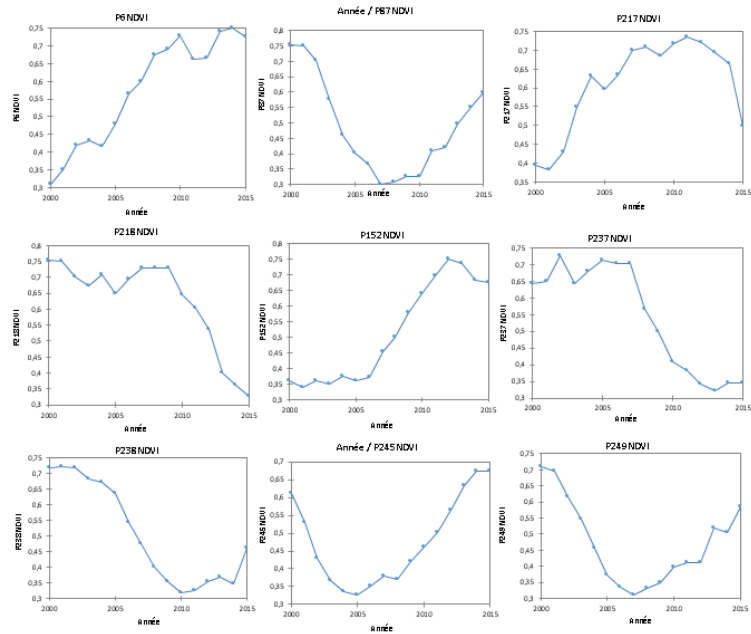
L'application de test d'homogénéité encore appelé test de tendance de Mann-Kendall aux données NDVI MODIS de quelques pixels dans la zone de recherche, a montré des tendances positives durant la période considérée.

Tableau 2 : Test de Mann-Kendall avec saisonnalité appliquée aux pixels échantillonnés

	P249 NDVI	P237 NDVI	P238 NDVI	P218 NDVI	P217 NDVI	P6 NDVI	P245 NDVI	P87 NDVI	P152 NDVI	P30 NDVI	P56 NDVI
<b>Tau of Kendall</b>	-0,25	-1	-1	-1	0,750	1	0,5	-0,25	1,000	-1	-1
<b>S'</b>	-2	-8	-8	-8	6,000	8	4	-2	8	-8	-8
<b>p-value</b>	<b>0,72</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,077</b>	<b>0,01</b>	<b>0,29</b>	<b>0,72</b>	<b>0,01</b>	<b>0,013</b>	<b>0,013</b>
<b>alpha</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Source : Résultats de test de Mann-Kendall avec saisonnalité des données de NDVI MODIS

Pour ce qui concerne la colonne de la position 237 (P237NDVI), la p-value calculée (0,773) est supérieure au niveau de signification  $\alpha=0,05$ . Il n'existe donc une tendance dans la série.



**Fig. 5: Fluctuations interannuelles de NDVI MODIS dans le bassin de l'Ouémé Supérieur**

*Source : Traitement des données NDVI MODIS*

Il existe une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données. L'examen général des courbes de la figure 5, montre qu'au cours de l'année, les fluctuations interannuelles des NDVIs du capteur MODIS sont très variables dans le milieu de recherche. Cette variabilité peut être liée aux facteurs météorologiques et agroécologiques du milieu qui sont déterminants dans le cycle de croissance des plantes et donc de la variation de l'intensité de l'activité chlorophyllienne mesurée par le NDVI. On peut également lier cette fluctuation annuelle au rythme et la distribution des pluies au cours de l'année. En effet, en zone soudanaise, la pluie est le principal facteur limitant pour les plantes. La végétation devient verte systématiquement à chaque période de pluie. Par contre, l'état de la végétation se dégrade rapidement pendant les périodes sans pluies.

### 3.2 MISE EN EVIDENCE DE RUPTURE DANS QUELQUES PIXELS

Les résultats du test de Pettit montrent, les différentes années de rupture (figure 6 et Tableau 3). L'analyse et l'interprétation de détection des ruptures à partir de la figure 4, ont permis de constater, qu'entre 2000 et 2015, il y a eu plusieurs années de ruptures dans la série des données selon les pixels.



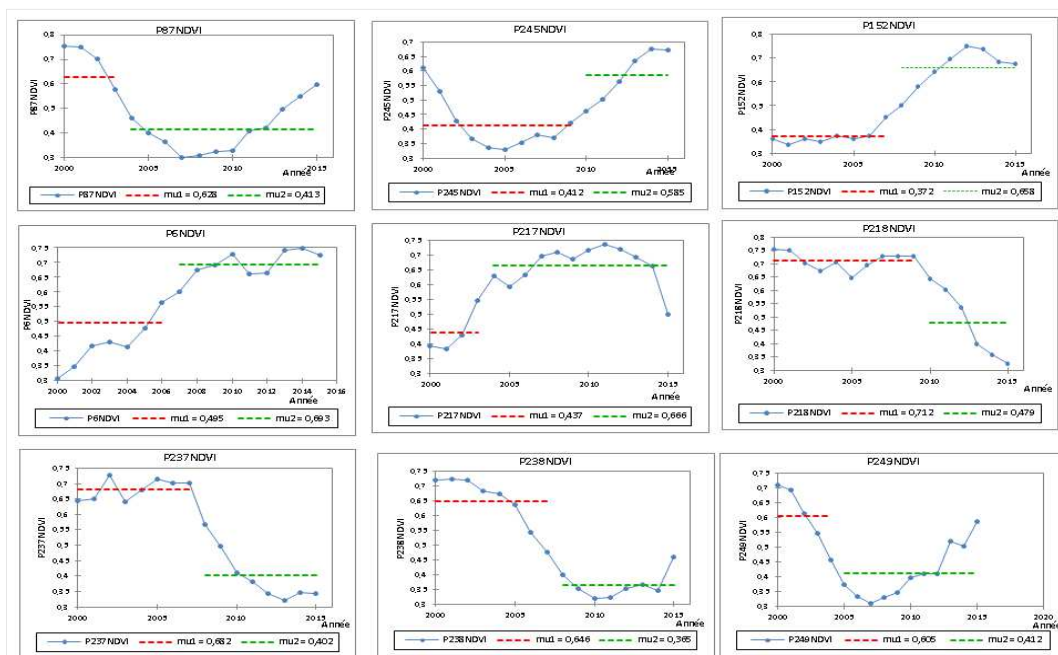


Fig. 6 : Résultats du test d'homogénéité de Pettitt appliqué aux pixels rééchantillonnés.

Source : Traitement des données NDVI MODIS

L'année 2006 est considérée comme la date de rupture dans la série de NDVI pour le pixel de position P6NDVI et P238NDVI. L'analyse du tableau 3 montre que l'année 2007 est celle de rupture du NDVI des pixels P152NDVI P237NDVI et P238NDVI tandis que celle des pixels P218NDVI, P245NDVI est 2009.

Tableau 3 : Détection des ruptures des séries de NDVI (2000,-2015)

Pixel	Année de rupture
P87NDVI	2003
P245NDVI	2009
<b>P152NDVI</b>	<b>2007</b>
P6NDVI	2006
P217NDVI	2003
P218NDVI	2009
<b>P237NDVI</b>	<b>2007</b>
<b>P238NDVI</b>	<b>207</b>
P249NDVI	2004

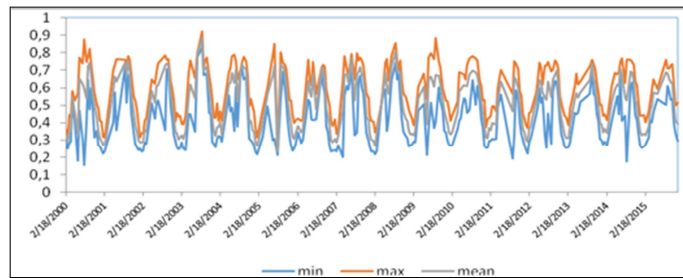
Source : Résultats des tests d'homogénéité de Pettit, de Buishand, de von Neumann de Lee et Heghinian appliquées aux données de NDVI MODIS

### 3.3 DETECTION ET SUIVI DES SAISONS CULTURALES : ANALYSE PAR MAILLE

#### 3.3.1 VARIATION PLURIANNUELLE GLOBALE DE LA PRODUCTIVITE VEGETALE

L'examen général de la courbe de la figure 7 montre qu'au cours de l'année, l'évolution du NDVI suit une courbe en cloche avec une variabilité plus ou moins marquée selon les années. La dynamique de la végétation sur cette période, lorsqu'elle est analysée par intervalle temporelle de 16 jours confirme, à travers le test de Mann-Kendall effectué sur la série de pixels, qu'il n'existe pas de tendance significative dans la série. Pour un niveau de significativité de 0,05 (5%), le test

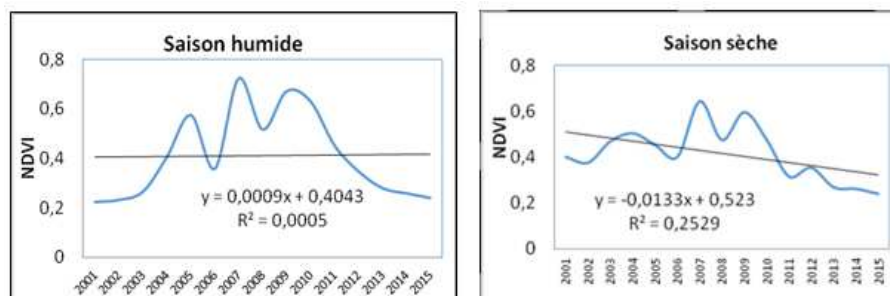
appliqué au pixel P87NDVI indique que le risque de rejeter l'hypothèse nulle  $H_0$  alors qu'elle est vraie est de 84,29%. Le Taux de Kendall de -0,25 confirme un solde général négatif entre année à indice positif et année à indice négatif.



**Fig. 7:** Evolution interannuelle de la végétation du bassin de l'Ouémé Supérieur de 2000 à 2015 (somme de l'ensemble des pixels des images de NDVI par année ou par 16 jours).

Source : Traitement des données NDVI MODIS

Le coefficient de variation interannuelle moyen dans ce cas est de 28,7%. Il n'existe pas également de tendance dans la série temporelle de la somme annuelle des NDVI, ceci avec une certitude de 75,85%. L'analyse de la courbe 7 laisse apparaître une grande variabilité de la production végétale d'une année à l'autre : une année de très faibles productions peut être encadrée par deux années de très bonne production. Cette dynamique interannuelle de la végétation masque une variabilité intra-annuelle différenciée. L'année peut être, en effet, organisée en saison humide (mai à septembre) où l'activité végétative est intense et en saison sèche (octobre à décembre). Ainsi, l'analyse de la dynamique générale de la végétation d'une saison culturale à l'autre fait apparaître une stagnation de l'activité végétale, avec toutefois une pente légèrement positive (figure 8). Le rythme d'évolution est presque semblable à celui de la dynamique interannuelle globale de la végétation. Le test n'indique pas de tendance dans la série chronologique du NDVI.



**Fig. 8:** Evolution interannuelle de la végétation du bassin versant de l'Ouémé Supérieur selon les saisons culturales

Source : Traitement des données NDVI MODIS

Le coefficient de variation moyen de la végétation des saisons agricoles de 2000 à 2010 est d'environ 12,67%. Les variations entre des saisons culturales successives peuvent être importantes. La saison culturale de plus faible activité végétale de la série est l'année 2005-2006. Celle-ci contraste avec l'année 2007-2008 (année de plus forte activité végétale de la série) dans un écart de 60,52%. Les saisons sèches qui sont des périodes de transition entre deux saisons culturales successives présentent une dynamique temporelle très différente de celles des saisons humides de 2000 à 2015 (figure 8). La pente d'évolution temporelle de la végétation sur la période est en effet négative. Cette évolution régressive de la végétation est confirmée par le test de tendance de Mann Kendall : il existe une tendance négative avec une confirmation de 87 %. Le coefficient de variation interannuel moyen de la végétation est de 11,37%. L'année de plus basse activité végétale est, à cet effet, l'année 2005. A l'opposé, l'année 2007 reste l'année de la plus forte activité végétale de cette série.

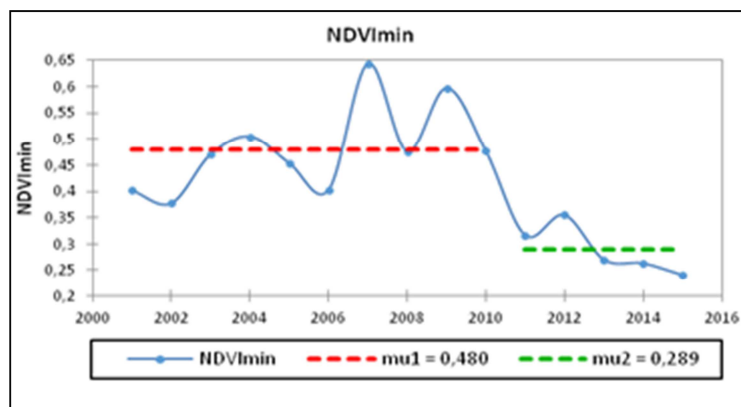


Fig. 9: Graphique du test de rupture de la série chronologique du NDVI des saisons sèches

Source : Traitement des données NDVI MODIS

Ce qui s'exprime par une fluctuation dans le temps de la couverture végétale du bassin de l'Ouémé Supérieur en période sèche. Le test d'homogénéité de Pettitt sur la série chronologique du NDVI des saisons sèches fait ressortir qu'il existe une rupture dans la série en 2010 (figure 9). La dynamique saisonnière de la végétation reflète l'évolution temporelle fine de celle-ci. Aussi, l'analyse de l'évolution du NDVI à une échelle temporelle de 16 jours de 2000 à 2010, révèle une dynamique spatio-temporelle différente à l'intérieur de ce bassin.

### 3.3.2 ACTIVITE VEGETALE DE LA PERIODE VEGETATIVE A LA PERIODE SECHE (AVRIL A FEVRIER)

L'activité végétale pendant la période sèche est presque la même au mois de novembre qu'à février. La moyenne de l'indice de végétation ne varie pas. Il en est de même du minimum de cet indice. Ainsi, cette moyenne indique une faiblesse générale de la couverture végétale (0,31 d'indice de NDVI). Au mois de novembre et de décembre, il est observé une diminution de la moyenne de l'activité végétale. L'indice de végétation est ainsi de 0,22 à la deuxième décennie de novembre contre 0,18 à la deuxième décennie de décembre, traduisant une diminution générale de la couverture végétale du bassin. Les minima de végétation des séries chronologiques de chaque décennie ont été observés. Le constat qui se dégage est que les dates correspondant aux minima d'activité végétale des séries d'indice de végétation varient d'une décennie à l'autre. Elles connaissent cependant, tout comme les moyennes, une augmentation substantielle de la première décennie de juin à la troisième décennie de juillet (0,147 à 0,37 de NDVI). La période d'activité végétative la plus forte où les maxima de végétation ont atteint leur valeur maximale est d'avril à juillet pour la période de 2000 à 2015. La figure 10 montre une variation des valeurs de NDVI au cours de la saison végétative. Les valeurs de NDVI sont plus élevées vers la fin de la saison.

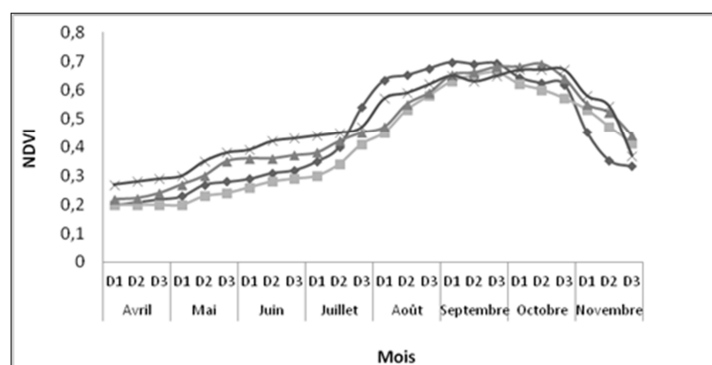


Fig. 10. Evolution saisonnière de la végétation du bassin versant de l'Ouémé Supérieur de 2000 à 2015

Source : Traitement des données NDVI MODIS

Tandis qu'au début de la saison ces valeurs sont plus faibles. En effet, durant les mois d'avril, mai et juin, le NDVI est relativement faible et stable sur l'ensemble du bassin en raison de la faiblesse de l'activité végétative en cette période de démarrage de la saison humide.

Elle augmente progressivement, à partir du mois de juillet et atteint son maximum, entre 3<sup>ème</sup> décennie du mois d'août et la 2<sup>ème</sup> décennie d'octobre. Ces valeurs de NDVI abordent leur diminution à partir de la 3<sup>ème</sup> décennie d'octobre jusqu'à la 3<sup>ème</sup> décennie du mois de décembre.

L'analyse de séries chronologiques à travers le test de Mann Kendall confirme cette observation. L'application du test de Kendall révèle l'inexistence de tendance significative pour un niveau de significativité alpha de 0,05. A titre d'exemple, le test de Mann Kendall indique l'inexistence de tendance dans la série chronologique de la première décennie d'avril avec une certitude de 82%. En outre, les coefficients de variation de la couverture végétale d'une année à l'autre semblent faibles sur l'ensemble des séries. Si ce coefficient reste inférieur à 20% en avril, il est en moyenne de 20% d'octobre à décembre. Ce qui cache en réalité les changements importants de l'activité végétale de deux années successives. L'analyse temporelle de l'activité végétale de 2000 à 2015 indique des pentes positives pour chaque décennie de cette période (figure 10). Cependant, ces pentes restent extrêmement faibles (figure 27) : 0,27% de la première décennie à la deuxième décennie du mois d'avril et moyenne pour de la deuxième décennie de juillet à la troisième décennie du mois d'août. L'analyse détaillée de l'évolution de la végétation au cours de cette période de l'année permet toutefois d'observer différentes séquences à l'intérieur de ces courbes d'évolution. Ainsi, quatre dynamiques peuvent être constatées : celle de la première décennie d'avril; celle de la deuxième décennie de juillet à la troisième décennie du même mois; celle du mois d'août (figure 11). L'analyse de la variation spatio-temporelle de la végétation à partir d'images MODIS indique que le bassin versant de 'Ouémé Supérieur passe d'une situation de forte variation spatio-temporelle positive d'avril à août à une situation contraire d'octobre à décembre. En effet, la variation interannuelle de la végétation passe, dans la majeure partie du bassin, à des coefficients de variation supérieur à 10 %. Au mois d'août, le centre du bassin qui abrite la principale forêt classée de l'Ouémé Supérieur et qui appartient aux espaces à plus forte variation de la végétation commence à être au même niveau de dynamique que les espaces environnants.



Fig. 11: Profil mensuel interannuel du NDVI (moyenne annuelle de l'ensemble des pixels): (a) correspond à la première moitié d'un mois donné et (b) correspond à la deuxième moitié de ce mois. S

Source : Traitement des données NDVI MODIS

De mai à la fin août, cet espace centre va même devenir la zone ayant le plus fort niveau de variation spatio-temporelle de la végétation (inférieur à 35% de coefficient de variation).

#### 4 CONCLUSION ET DISCUSSION

L'analyse de la variation spatiotemporelle de la végétation à partir des images de NDVI de MODIS (période de 2000-2015) permet d'avoir une idée détaillée de la dynamique observée entre 2000 et 2015. Pendant la première décennie du mois d'avril, les variations de la végétation restent faibles sur l'ensemble du bassin. Les activités végétales les plus importantes (coefficient de variation supérieur à 20%) sont observées principalement dans les zones de forêt, les zones agricoles étant pour la plupart encore nues. De façon générale, le bassin versant de l'Ouémé Supérieur connaît une baisse de l'activité végétative au cours de la série temporelle 2000-2015. La dynamique spatio-temporelle de la végétation permet de regrouper les mois de l'année, selon des dynamiques homogènes. Ainsi, certains mois sont marqués par un gain important de végétation. Il s'agit des mois de juillet-Août. Ces mois sont caractérisés par un accroissement de l'activité photosynthétique chez les plantes. Cet accroissement est matérialisé par l'augmentation des valeurs d'indices de végétation dès l'avènement des fortes pluies à forte capacité d'humectation des sols [6], [20]. D'autres par contre connaissent une situation inverse. Ce sont les mois de la période sèche marqué par un ralentissement de l'activité chlorophyllienne. Il s'agit des mois de Novembre à février. Les mois de mars et avril évoluent vers une dynamique positive progressive de la végétation, surtout au centre du bassin. Les mois d'août et septembre sont marqués par un accroissement de la végétation dans certains espaces forestiers et

des gains de végétation dans les espaces agricoles autour des espaces protégés du bassin. L'analyse de l'évolution de la dynamique des minima et des maxima de végétation au cours de la série de 2000 à 2015 permet de conclure que l'année de plus grande production végétale est l'année 2003. Quant à l'année de la plus petite activité végétale, elle correspond à 2005. Cette étude fait apparaître qu'il existe une forte corrélation dans l'évolution saisonnière de la végétation et de la pluie [6]. Ce sont ces variations dans le régime des pluies qui sont reproduites par le NDVI des pixels de MODIS. Ce résultat confirme celui obtenu par [5] dans une étude portant sur la relation indice de Végétation–Pluie au Burkina Faso.

En outre, le calendrier agro-pastoral de ce bassin fait recours aux activités agricoles et pastorales de plus en plus important au cours de la période pluvieuse. Cela expliquerait d'ailleurs les fortes variations de l'activité végétale observées dans les espaces forestiers du bassin. Ces hypothèses n'excluent pas la possibilité d'une évolution à la baisse de l'activité végétale due à la variabilité pluviométrique.

## REFERENCES

- [1] S. Ardoïn, H. Lubes-Niel, E. Servat, A. Dezetter, J.F. Boyer, G. Mahe, et J.E. Paturel, *Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 90*. In: W. C. Servat (Eds.), Najem, S. Leduc and S. Ahmed, *Hydrology in the Mediterranean and Semiarid Regions*, April 2003, Montpellier, France. IAHS Publ. 278, IAHS Press, Wallingford, UK. pp. 223-228, 2003.
- [2] S. Bigot, I. Zin et A. Diedhiou, "Apports de données de HRV de SPOT pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin)." *Revue Télédétection*. Vol. 4, No. 4, pp.339-353, 2005.
- [3] R. Caloz et C. Collet, *Précis de télédétection: traitement numérique d'image de télédétection*. Vol.3 Presse Universitaire du Québec et AUPELF-UREF, 2001.
- [4] K. Chaouche, L.Neppel, C.Dieulin, N. Pujol, B. Ladouche, E. Martin, D. Salas and Y. Caballero, "Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change." *C.R. Geosciences* Vol. 34, No. 2, pp.234 -243, 2010.
- [5] P. Diello, G. Mahe, J-E, Paturel, A. Dezetter, F. Delclaux, E. Servat, et F. Ouattara, "Relations indices de Végétation–Pluie au Burkina Faso: Cas du BassinVersant du Nakambé". *Hydrological Sciences Journal*, vol. 50, no. 2, pp. 207-221, 2005.
- [6] E. O Edea, I. Yabi, V. Orekan et M. Boko, "Estimation de rendement du sorgho avec des données MODIS NDVI dans le bassin versant de l'Ouémé Supérieur." *Revue scientifique MIRD*, Vol. 6, no 10, pp.167-182, 2015.
- [7] M.A. Friedl, D.K. Mc Iver, J.C.F. Hodges, X.Y.D. Zhang, Muchoney, A.H. Strahler, C.E. Woodcock, C.E., S. Gopal, S., A. Schnieder, A. Cooper, A. Baccini, F. Gao, F. and C. Schaaf, 2002. "Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results." *Remote Sensing of Environment*, Vol.83, N°1-2, pp.287-302, 2002.
- [8] M.C. Girard et C.M. Girard, *Traitement des données de télédétection*. DUNOD Eds. Paris, pp.529, 2010.
- [9] M.C. Girard et C.M. Girard, *Traitement des données de télédétection: environnement et ressources naturelles*. 2nd Ed. DUNOD pp.576, 1999.
- [10] M.C. Hansen, R.S.De Fries, .R.G. Townshend, R. JSohlberg, C. Dimiceli, and M. Carroll, "Toward an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data". *Remote Sensing of Environment*, Vol.83, N°1-2, pp.303-319, 2002
- [11] I.C.H. Hountondji, "Dynamiques environnementales en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal." *Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'université de Liège*, Belgique. p153, 2008.
- [12] Z. W. Kundzewicz and A. J. Robson, "Change detection in hydrological records-a review of the methodology." *Hydrol. Sci. J.* Vol.49, N°1, PP7–19, 2004. [http://iahs.info/hsj/491/hysj\\_49\\_01\\_0007.pdf](http://iahs.info/hsj/491/hysj_49_01_0007.pdf) [Accès 10 Janvier 2015].
- [13] E. F. Lambin, "Change detection at multiple temporal scales: seasonal and annual variations in landscape variables". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.62, N°8, pp. 931-938, 1996.
- [14] B. Lopez et A. Leynet, "Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines : revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE." Rapport BRGM/RP-59515-FR, 2011
- [15] H. Lubès-Niel, J. M. Masson, J. E. Paturel et E. Servat, "Variabilité climatique et statistique, Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques." *Rev. des Science de l'eau* Vol. 11, N°3, pp.383 – 408, 1998  
[http://www.rse.inrs.ca/art/volume11/v11n3\\_383.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume11/v11n3_383.pdf) [Acces 10 janvier 2015]
- [16] G. Mahé, Y. L'Hôte, J.C. Olivry and G. Wotling, "Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951-1989." *Hydrol. Sci. J.* Vol.46, N°2, pp. 211-226, 1999
- [17] F. Maselli and F. Rembold, "Integration of LAC and GAC NDVI data to improve vegetation monitoring in semi-arid environments." *Int. J. Remote Sens.* Vol.23, N°12, pp.2475-2488, 2002.

- [18] V. Mulindabigwi, S. Giertz, K. Hadjer, M. Heldmann, et Judex, "Le bassin versant de l'Ouémé Supérieur." IMPETUS Atlas BENIN.p.3-7,2007
- [19] S.E. Nicholson, B.Some, and B. Kone,. "An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years." *J.Climate* , Vol.13, N°14, pp. 2628-2640, 1999.
- [20] G.B. Oyou , "Étude de la relation entre NDVI et pluviométrie dans le bassin versant du Ko,u/ burkina Faso." *Mémoire de fin d'étude d'ingénieur*, 2007.
- [21] J.E. Paturol, E. Servat et M.O. Delattre, "Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique." *Hydrol. Sci. J.*, Vol.43, N°6, pp.937- 946, 1998.
- [22] R. Saliou, R. "Modélisation prédictive et cartographie de la dynamique des parcours de transhumance dans le contexte de variabilités climatiques dans le moyen-Benin." *Thèse de doctorat unique*, Université d'Abomey-Calavi, 2015.
- [23] H. Schmidt, and A. Karnieli, "Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in semi-arid environment." *J. Arid Environ.* Vol. 45, N°1, pp.43-59, 2000.
- [24] J.D.Taupin, A. Amani et T. Lebel, "Variabilité spatiale des pluies au Sahel: Une question d'échelles. 1. Approche expérimentale." In: Servat, E. (Red.), Hughes, D., Fritsch, J. M. et Hulme M, *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* , Novembre 1998 , Abidjan, Côte d'Ivoire. IAHS Publ. 252, IAHS Press, Wallingford, UK. Pp.143-151, 1998.
- [25] J.R.G. Townshend, C.O. Justice, "Toward operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing." *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2), pp.351-359, 2002.
- [26] N. Varado, "Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin." *Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, France. p321, 2004.
- [27] J. L.Weiss, D. S. Gutzler, J. E. A. Coonrod and C. N. Dahm, "Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA." *J. Arid Environ.* Vol.58, N°2, pp.249-272, 2004.
- [28] K.J. Wessels, R.S. De Fries, J. Dempewolf, L.O. Anderson, S.L. Powell, E.F. Mora, "Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: Examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Para State, Brazil." *Remote Sensing of Environment*, Vol.92, N°1-3, pp.217-232, 2004.
- [29] S.Yue, and P. Pilon, *A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection.* *Hydrol. Sci. J.*, Vol.49, N°1, PP21-37, 2004.  
[http://iahs.info/hsj/491/hysj\\_49\\_01\\_0021.pdf](http://iahs.info/hsj/491/hysj_49_01_0021.pdf) [Acces 10 January 2015]
- [30] X. Zhang, M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reed, A. Huete, "Monitoring vegetation phenology using MODIS." *Remote Sensing of Environment*, Vol.84, N°3, pp.417-475, 2003.