

## Utilisation de séries temporelles d'images satellitaires à basse résolution pour la cartographie des trajectoires de l'activité végétale à l'échelle des unités administratives au Cameroun

Matsaguim N.C.A.<sup>1</sup>, Tiomo Dongfack E.<sup>2</sup> et Ngoufo R.<sup>1</sup>

(1) Département de Géographie, Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines, Université de Yaoundé I, Cameroun / e-mail : tiomoemmanuel2008@yahoo.fr

(2) Département de Géographie - Aménagement - Environnement, Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines, Université de Yaoundé I, Cameroun

DOI : 10.5281/zenodo.4043986

### Résumé

Les images satellites apportent une aide significative à la connaissance de la couverture végétale et le suivi de son état. C'est notamment le cas des images à grande résolution temporelle. Cette étude a pour objectif principal d'établir une typologie des arrondissements du Cameroun selon leur trajectoire phénologique de 1999 à 2013. Ceci afin de distinguer ceux où elle est positive de ceux où elle est négative. A partir des images satellites d'une résolution spatiale de 1 km et composées des produits de synthèse du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) issus du capteur SPOT-VEGETATION (SPOT-VGT), une méthode mixte combinant l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

a été utilisée pour parvenir à une typologie en 4 classes de tendance d'évolution de la vigueur de la végétation mesurée au sein de chacun des 360 arrondissements du Cameroun. Il en ressort que de 1999 à 2013, près de 5% des arrondissements du pays ont connu une très forte diminution de leur activité végétale principalement en raison du développement urbain et de la croissance démographique ; tandis que 46,94% des arrondissements du pays ont connu une stabilité, voire une progression relative de leur activité végétale au cours de cette période. Ces résultats montrent ainsi toute l'utilité de ce type d'images satellites en matière de monitoring de la dynamique spatio-temporelle de l'activité végétale à grande échelle.

**Mots clés :** Télédétection, Cartographie, NDVI, Activité végétale, SPOT-VGT, Cameroun

### Abstract

Satellite images provide a significant aid in understanding the vegetation cover and monitoring its condition. This is particularly the case for those with high temporal resolution in medium to low spatial resolution. The main objective of this study is to establish a classification of the districts of Cameroon according to their phenological trajectory from 1999 to 2013. This is in order to distinguish those where it is positive from those where it is negative. Using satellite images with a spatial resolution of 1 km that represent NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) synthesis products from the SPOT-VEGETATION (SPOT-VGT) sensor, a mixed method combining Principal Component

Analysis (PCA) and Ascendent Hierarchical Classification (AHC) was used to arrive at a classification in 4 classes of vegetation evolution trend measured within each of the 360 districts of Cameroon. The main result of this study shows that from 1999 to 2013, nearly 5% of the districts of Cameroon experienced a very sharp decline in vegetation growing mainly due to urban development and population growth; while 46.94% of the districts of Cameroon experienced some increase in vegetation growing during this period. These results thus show all the usefulness of this type of satellite images in terms of monitoring of spatial and temporal dynamics of vegetation growing on a large scale.

**Keywords :** Remote sensing, Cartography, NDVI, vegetation growing, SPOT-VGT, Cameroon

### 1. Introduction

L'exploitation des images de télédétection à haute répétitivité temporelle présente un grand intérêt pour la caractérisation et le suivi de l'activité végétale sur le long terme et à une large échelle spatiale (Chéret

V. et al, 2011). En effet, malgré leur résolution spatiale généralement moyenne à basse, soit de 250-300 m à plusieurs km, elles couvrent cependant une étendue spatiale assez large pour favoriser des études comparatives à l'échelle régionale. C'est par exemple

le cas des travaux de Mayaux P. et al., (2000), Njomo D. (2008) ou de Verhegghen A. et al., (2012) qui utilisent cette catégorie d'images satellites pour cartographier les types ainsi que les changements de couverts végétaux survenus dans le bassin du Congo. Ainsi, entre 1990 et 2000, les pertes du couvert forestier dans cette région étaient estimées à moins de 1% (Hansen M.C. et al., 2008). Cependant, elles variaient d'intensité d'un pays à l'autre avec une tendance à la hausse au courant de la décennie 2000 – 2010 aussi bien dans les zones accessibles que dans celles qui l'étaient moins (Ernst C. et al., 2010). Une conjonction d'un certain nombre de facteurs directs et sous-jacents explique cette tendance à la hausse. S'agissant des facteurs directs, on peut citer : l'expansion de l'agriculture, l'exploitation forestière et minière et le développement des infrastructures, y compris le transport et l'énergie. Pour ce qui est des facteurs sous-jacents, on relève des facteurs économiques, institutionnels, technologiques, culturels ou sociopolitiques et démographiques (Wilkie D. et al., 2000 ; Ingram V. et al., 2011 ; Megevand C., 2013 ; de Wasseige C. et al., 2015 ; MINEPDED, 2016 ; Gillet P. et al., 2016 ; Kleinschroth F. et al., 2017 ; Tyukavina A. et al., 2018 ; Kleinschroth F. et al., 2019). Néanmoins, tous ces facteurs impactent le couvert végétal à des échelles spatiale et temporelle différentes (Bele M.Y. et al., 2015). C'est notamment le cas de l'agriculture dont la pratique crée selon Nasi R. et al. (2012), des « paysages particuliers » composés d'une mosaïque alternant des champs de culture, des jachères d'âges divers, des forêts secondaires dérivées de jachères et reliques de la végétation originale qui apparaissent comme une mosaïque de forêts et de terres cultivées sur des images satellites à basse résolution.

Dès lors, l'utilisation des images satellites à haute, voire très haute résolution spatiale est inappropriée pour le suivi des modifications de l'activité végétale qui résulteraient de mécanismes continus et progressifs perturbant par exemple la phénologie. Leur répétitivité limitée dans le temps ainsi que des surfaces couvertes restreintes en sont les principales raisons (Chéret V. et al., 2011). Pour des études régionales, voire nationales, les images à moyenne ou basse résolution spatiale sont plus appropriées. Elles permettent de mettre en évidence des dynamiques spatio-temporelles de la végétation liées à des variations des paramètres environnementaux telles

le climat qui a un impact sur le long terme. C'est par exemple ce que montrent Zhou L. et al. (2014) en ce qui concerne les effets du déficit pluviométrique enregistré en Afrique centrale sur la baisse de l'activité végétale observée dans le bassin du Congo. De même, elles permettent également de détecter des perturbations plus brutales de l'activité végétale lorsqu'elles sont d'une ampleur spatiale suffisamment grande.

Ainsi les images satellites à moyenne ou basse résolution spatiale permettent de caractériser (i) l'état et le comportement de la végétation pour repérer des changements plus ou moins importants de son activité et (ii) leurs tendances d'évolution temporelle. Il devient alors possible d'une part, de mesurer des anomalies que l'on peut assimiler aux « effets immédiats » d'une perturbation environnementale et d'autre part, d'approcher les « effets retardés » d'une perturbation du milieu sur un pas de temps pluriannuel : tendance à la dégradation continue de l'activité végétale et à l'amplification des dégâts ou au contraire, à une récupération progressive (Chéret V. et al., 2011). L'objectif principal de cette étude consiste à établir une typologie des unités administratives du Cameroun selon les trajectoires de leur activité végétale qui permette de distinguer celles où elle est positive de celles où elle est négative.

## **2. Matériel et Méthodes**

### **2.1. Matériel**

#### **2.1.1. Zone d'étude**

La zone d'étude choisie est le Cameroun, un des six pays du bassin du Congo. (figure 1). Il est situé entre 02-13°N et 09-16°E. D'une superficie de plus de 475 000 km<sup>2</sup>, sa population était estimée en 2010 à 19 406 100 habitants inégalement réparties au sein de 360 arrondissements (BUCREP, 2010), qui correspondent aux unités administratives de base. Ce pays est recouvert à environ 41% par des forêts denses (Verhegghen A. et al., 2012). La figure 1 montre les différents types de couverts végétaux rencontrés au Cameroun entre 2000 et 2007. Ils proviennent des résultats de la classification des images NDVI issus du capteur SPOT-VEGETATION d'une résolution de 1 000 m réalisée par Verhegghen A. et al. (2012) pour l'ensemble du bassin du Congo. Les résultats du Cameroun sont représentés sur la figure 1 qui montre 17 classes d'occupation du sol.

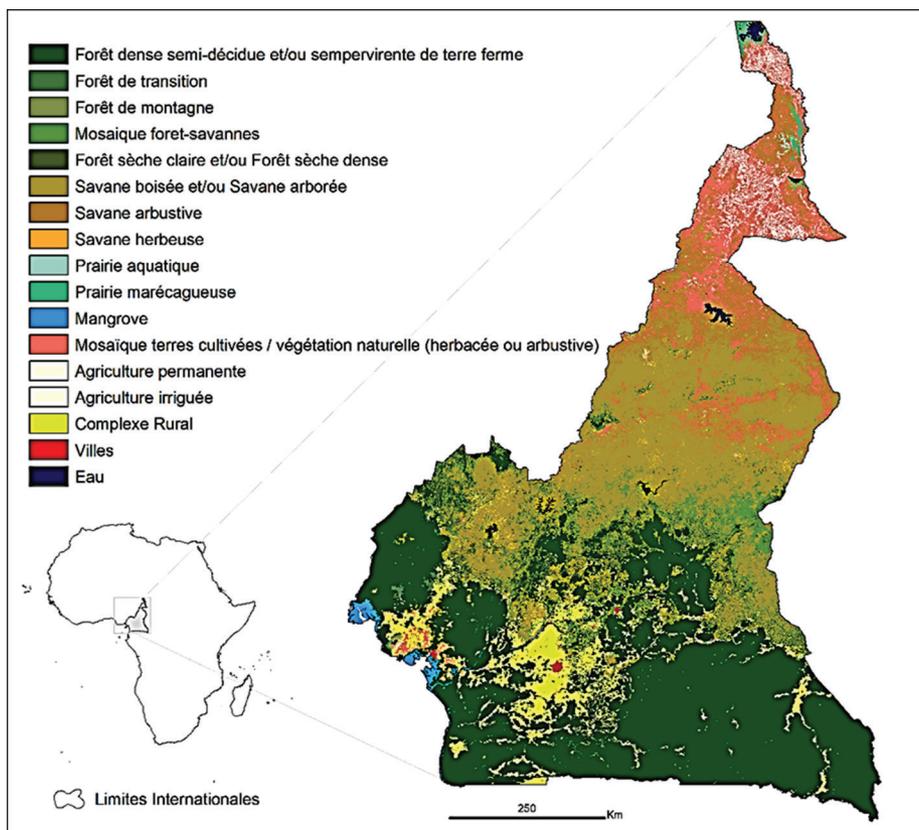


Figure 1 : Zone d'étude et types de couverts végétaux du Cameroun (source : Verhegghen A. et al., 2012)

### 2.1.2. Description des données

En zone tropicale, les conditions atmosphériques et particulièrement la nébulosité constituent une contrainte importante qui affecte les données de télédétection. Afin d'éliminer les perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques différentes lors de l'acquisition des images d'un jour à l'autre, des produits de synthèse ont été utilisés. Ainsi, une base de données d'images satellites composée des produits de synthèse du Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) issus du capteur SPOT-VEGETATION (SPOT-VGT) embarqué sur les satellites SPOT 4 et SPOT 5 dont la résolution du pixel est de 1 km<sup>2</sup> a été confectionnée (disponibles pour la période 01/04/1998 - 31/05/2014). Différents produits de synthèse fournis à l'échelle décadaire et issus du traitement des données radiométriques couvrent l'ensemble du globe et sont accessibles librement auprès du Joint Research Centre, sur le site internet du Flemish Institute for Technological Research (VITO) à l'adresse <http://free.vgt.vito.be>. La fenêtre temporelle couverte par la base de données utilisée

pour cette étude représente 15 années (01/01/1999 - 12/12/2013), soit un total de 540 images à raison de 36 images par année. Les images NDVI sont prétraitées puis mises à la disposition du public sous trois types de produits : VGT-P (Physical), VGT-S (Synthesis) et VGT-D (Directional). La signification de ces différents produits de synthèse, ainsi que leurs procédures de prétraitement et d'acquisition sont décrites par Deronde B. et al. (2014). Pour la présente étude, les produits de synthèse S10-NDVI ont été utilisés. Les produits VGT-S sont obtenus en calculant une synthèse de plusieurs images sur la même zone acquises à des dates différentes. Ladite synthèse utilise la méthode du Maximum Value Composite (MVC), c'est-à-dire que pour chaque pixel de l'image finale, on sélectionne les valeurs radiométriques sur l'image présentant la valeur du NDVI la plus élevée. Cette méthode du MVC est appliquée dans le but de réduire les effets des biais des nuages ; S10 signifie ainsi que les images sont une synthèse de celles collectées sur 10 jours et elles comportent le moins de biais dû aux nuages.

Le NDVI est utilisé ici comme un indicateur de l'activité chlorophyllienne et donc de la vigueur de la végétation. En effet, des variations anormales de NDVI peuvent être liées à une perturbation environnementale ayant entraîné une baisse de l'activité végétale, soit par réduction du couvert végétale suite par exemple à la construction d'une infrastructure, soit par baisse de l'activité chlorophyllienne suite à une situation de stress par exemple (Gedif B. et al., 2014 ; Thao Do P.T., 2014). Cet indice est fortement corrélé à des paramètres biophysiques de la végétation (Huete A. et al., 2002). Sensible aux variations spatiales et temporelles, le NDVI est adapté au suivi de la dynamique de la végétation (Chéret V. et al., 2011).

## 2.2. Méthodes

### 2.2.1. Traitement des données

#### Calcul de la tendance pluriannuelle de l'activité végétale

Les données de NDVI ayant été collectées à l'échelle décadaire, elles ont été sommées à l'échelle annuelle afin d'obtenir une série de 15 images représentant le cumul annuel de NDVI à l'échelle de chaque pixel de l'image pour la période 1999-2013. Par la suite, les valeurs de NDVI de chaque pixel ont été extraites sous la forme de points et elles ont ensuite été agrégées à l'échelle des différents arrondissements du Cameroun. Dès lors, chaque arrondissement possède des valeurs de NDVI (15 années) correspondant chacune à la valeur moyenne observée au sein de chaque unité administrative.

Pour calculer la tendance de l'activité végétale observée au sein de chaque arrondissement, le coefficient de tendance tel que décrit par (Chéret V. et al., 2011) a été calculé. Dans un premier temps, le coefficient de pente ( $a$ ) qui donne le sens (*positif ou négatif*) et l'importance (*valeur*) de l'évolution de l'activité végétale au sein d'un arrondissement a été calculé. Ce coefficient permet de représenter l'intensité du « changement » ou de la perturbation observée sur la période 1999-2013. Dans un second temps, le coefficient de tendance a été calculé à partir de l'équation suivante:

$$t = (a - a_0) / (\sigma / n) \quad \text{Eq. 1}$$

où  $t$  = tendance ;  $a$  = pente de la tendance ;  $a_0$  = pente de référence considérée nulle ;  $\sigma$  = écart-type ;  $n$  = nombre d'années d'observation.

Les valeurs de ( $t$ ) sont soit positives ou négatives. Les valeurs négatives significatives au seuil de

probabilité de 0,01 traduisent une baisse de l'activité végétale. Les valeurs positives significatives ( $p < 0,01$ ) traduisent au contraire le maintien, voire une augmentation, de la vigueur de la végétation (Chéret V. et al., 2011).

### 2.2.2. Classification des arrondissements selon leurs trajectoires biophysiques par rapport à l'année 1999

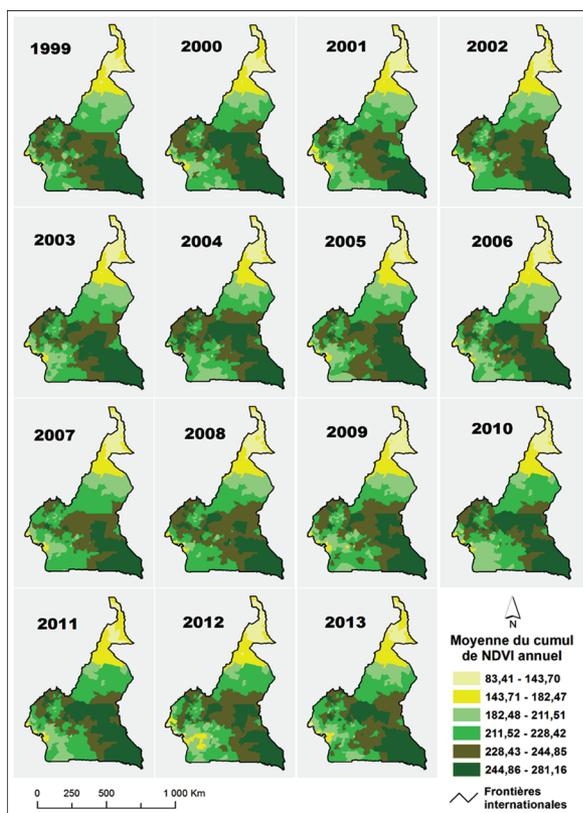
Afin d'élaborer une typologie des arrondissements selon les trajectoires de leur activité végétale par rapport à une situation de référence, nous avons utilisé les méthodes d'analyse multivariée. Il s'agit d'une méthode mixte qui couple l'Analyse en Composante Principale (ACP) à la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Cette approche mixte a pour avantage l'homogénéité et la stabilité des classes (Husson F. et al., 2017). L'ACP permet de regrouper les différents arrondissements selon leurs coordonnées sur les différents axes factoriels, tandis que la CAH crée des classes homogènes du point de vue de leur profil temporel. L'année 1999 a été retenue comme année de référence car, il s'agit de l'année la plus reculée de la base de données. Les trajectoires biophysiques ainsi obtenus grâce à l'ACP et à la CAH correspondent aux évolutions de l'activité végétale de 2000 à 2013 par rapport à la situation observée en 1999.

## 3. Résultats

### 3.1. Variabilité spatiale et interannuelle de l'activité végétale au sein des différents arrondissements entre 1999 et 2013

La comparaison des variations interannuelles de l'activité végétale au sein des différents arrondissements permet d'identifier des années particulières sur le plan de la phénologie et dans une certaine mesure de mettre en évidence une tendance générale à l'affaiblissement ou alors, au renforcement de la vigueur de la végétation. La figure 2 est la représentation cartographique des moyennes du cumul annuel de NDVI pour chacune des années de la période 1999-2013. Elle permet de montrer, par comparaison, les fluctuations interannuelles de l'activité végétale.

D'une manière générale, nous pouvons constater une hétérogénéité spatiale faisant ressortir les zones de plus forte activité végétale à l'échelle nationale. Cette hétérogénéité spatiale s'organise conformément à la distribution spatiale des principaux types de



**Figure 2 : cartographie des variations interannuelles de l'activité végétale mesurée par le NDVI au niveau des arrondissements du Cameroun de 1999 à 2013**

couverts végétaux rencontrés au Cameroun, à savoir le domaine savanicole principalement au nord du pays et celui forestier principalement au sud (figure 1). Cette structuration spatiale de la végétation est étroitement liée à celle de la pluviométrie. Par conséquent, la distribution spatiale de l'activité végétale observée à la figure 2 est principalement marquée par ce gradient nord-sud avec une activité végétale plus importante pour les arrondissements situés au sud du pays.

Toutefois, cette structuration presque zonale de l'activité végétale au niveau national est modifiée par un gradient est-ouest qui oppose principalement les arrondissements situés à proximité de la côte à ceux situés à l'intérieur du territoire. Cette figure 2 permet de constater qu'une grande partie des arrondissements des régions du Sud-Ouest, de l'Ouest, du Littoral, du Centre et du Sud du Cameroun ont une activité végétale nettement plus faible que celle observée dans les arrondissements de la région de l'Est

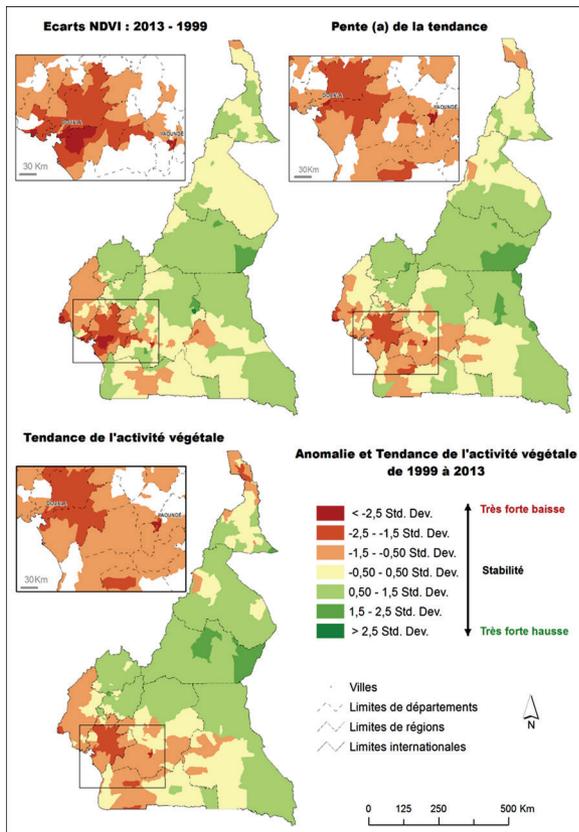
Cameroun bien qu'étant situés à la même latitude. Leur niveau d'activité végétale est similaire à celle enregistrée dans la zone soudanienne (Adamaoua). Une possible explication est à rechercher dans les densités humaines plus fortes dans ces régions que dans celle de l'Est. En effet, la figure 2 permet de faire ressortir la situation particulière observée au niveau des deux principales villes du Cameroun: Yaoundé et Douala. Ces villes enregistrent des niveaux d'activité végétale particulièrement faibles par rapport à la situation régionale. Cela montre que le couvert végétal dans ces villes est particulièrement faible.

Au plan temporel, il ne se dégage pas de manière évidente une hétérogénéité entre une période enregistrant une forte activité végétale sur l'ensemble du territoire et une autre enregistrant une faible activité végétale. Toutefois, il est possible d'identifier des années où l'activité végétale semble avoir été assez importante, notamment dans la partie sud du Cameroun, comme entre 2003 et 2004 par exemple, et des années où elle semble avoir été moins importante, comme en 2001 et 2007 par exemple (figure 2). Cela peut s'expliquer par des conditions climatiques particulières durant ces différentes années dans cette partie du pays.

### 3.2. Caractérisation de l'évolution et de la tendance de l'activité végétale entre 1999 et 2013

Si la figure 2 permet de comparer les années les unes aux autres, elle ne permet pas de dégager de manière évidente une tendance au niveau de chaque arrondissement. Il devient alors nécessaire de déterminer la tendance au sein de chacune des unités administratives afin de rendre compte de la variation de l'activité végétale entre deux situations extrêmes : tendance à la baisse en cas de perturbation physiologique, ou à la hausse si accroissement de la végétation.

La figure 3 présente d'une part l'évolution de l'activité végétale entre 1999 et 2013, et d'autre part les tendances observées au niveau de chaque arrondissement pour l'ensemble de la période. Concernant les indicateurs de tendance générale, la pente ( $a$ ) de la ligne de tendance et le coefficient de tendance ( $t$ ) sont représentés. Les valeurs des différentes cartes sont présentées en termes d'écart par rapport à une situation moyenne (écart-type). Cette situation moyenne est considérée ici comme traduisant une certaine stabilité ou un point de départ.



**Figure 3 : cartographie des tendances d'évolution de l'activité végétale au sein des différents arrondissements du Cameroun entre 1999 et 2013**

Cette représentation permet de mettre clairement en évidence les tendances significativement fortes de l'activité végétale dans les arrondissements concernés. De plus, le caractère synthétique de ces différentes figures facilite les comparaisons.

D'une manière générale, il existe des similitudes entre les différents faciès de la figure 3 dans les arrondissements du Cameroun qui ont connu une baisse progressive et significative de leur activité végétale. Ces arrondissements se concentrent principalement au sein des Régions du Sud-Ouest, du Littoral, du Centre, du Sud et de l'Extrême-Nord du Cameroun. Parallèlement, on observe également un regain plus ou moins significatif de l'activité végétale au sein d'un grand nombre d'arrondissements notamment ceux de la Région de l'Adamaoua (figure 3) essentiellement dominée par une végétation savanicole et de forêt sèche (figure 1). Les arrondissements qui présentent une tendance significative à la baisse de leur activité végétale

correspondent principalement à ceux appartenant aux départements du Mfoundi et du Wouri dans les Régions du Centre et du Littoral respectivement. Il s'agit là des départements dans lesquels se trouvent les deux principales villes du Cameroun : Yaoundé et Douala avec chacune plus de 1 000 000 d'habitants en 2005 (Mbarga B., 2010). Cette tendance à la baisse de l'activité végétale s'explique donc principalement dans ces arrondissements par l'urbanisation associée à l'accroissement de la population qui y est observé.

La Région du Littoral semble se caractériser par une tendance à la baisse de l'activité végétale pour l'ensemble de ses arrondissements. L'importance de la baisse de l'activité au sein de cette Région s'organise de manière concentrique autour des arrondissements du département du Wouri. On semble retrouver ici un gradient centre-périphérie comme le montre la carte illustrant la différence d'activité végétale entre 1999 et 2013 (figure 3). La baisse de l'activité végétale observée au sein de cette région s'intensifie des arrondissements situés à l'intérieur des terres en direction de ceux situés le long de la côte Atlantique où se trouve la ville de Douala. Il semblerait donc que de 1999 à 2013, l'urbanisation s'y est poursuivie progressivement des arrondissements du Wouri en direction des arrondissements voisins suivant un axe SSO - NNE. Cette urbanisation s'effectue au détriment du couvert végétal, d'où la baisse de l'activité végétale observée (figure 3). Au niveau national, les arrondissements qui présentent une tendance plus ou moins significative à la baisse de leur activité végétale semblent être ceux où un processus de conversion de l'utilisation des terres s'est opéré. Celle-ci se caractérisant principalement par une transformation de toute ou partie des terres couvertes par la végétation naturelle en terres cultivées comme le montre la figure 1.

### 3.3. Typologie des arrondissements selon les trajectoires de l'activité végétale entre 1999 et 2013

La figure 3 met en évidence le fait qu'il est possible de distinguer les arrondissements du Cameroun selon leur trajectoire phénologique par rapport à la situation observée en 1999. Cette distinction des arrondissements en classes homogènes du point de vue de leurs similitudes en matière d'évolution de l'activité végétale a été réalisée à partir des méthodes d'analyse multivariée : ACP et CAH. La figure 4 présente les résultats de cette opération de classification. L'ACP permet de mettre en évidence

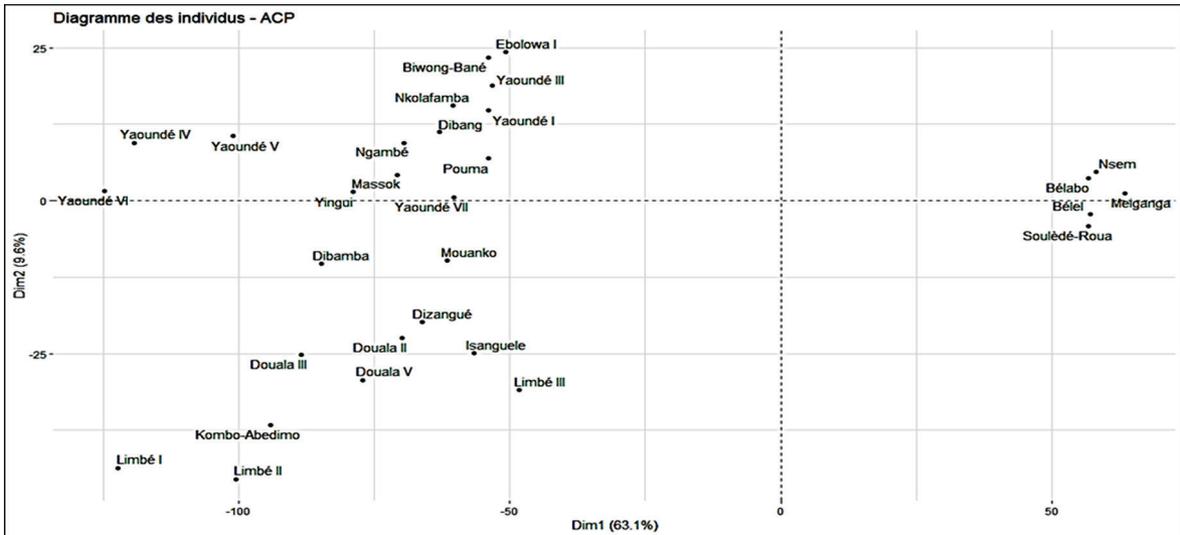


Figure 4a: diagramme des arrondissements en ACP

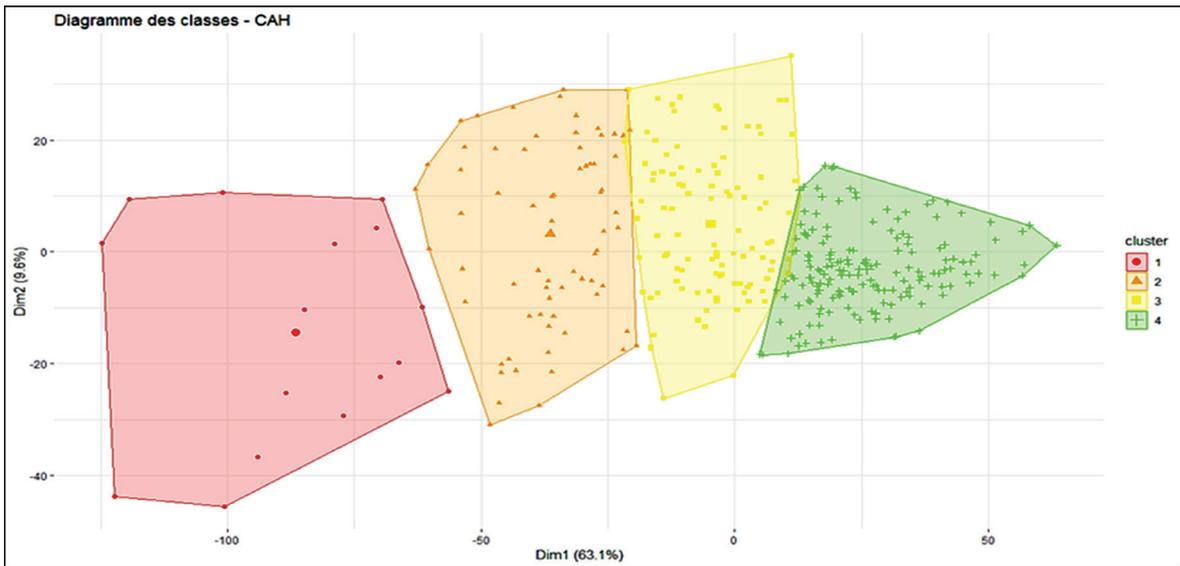


Figure 4b : Résultats de l'opération de la classification des arrondissements selon leur profil phénologique. (CAH).

une forte structuration du territoire national concernant l'évolution de l'activité végétale au sein des différents arrondissements. En effet, le premier plan factoriel résume 72,7% de la variance présente dans les données (figure 4a). Sur cette figure, ne sont représentés que les trente arrondissements qui ont le plus contribué à la construction des différentes dimensions ou axes. La première dimension oppose les arrondissements qui ont connu une forte baisse de leur activité végétale au courant de la période, comme par exemple ceux de Yaoundé 6, 4 ou 5 situés

dans la Région du Centre, à ceux qui au contraire ont connu une certaine progression régulière de leur activité végétale. Ces derniers se retrouvent principalement dans les Régions de l'Adamaoua et de l'Est. La deuxième dimension quant à elle oppose principalement les arrondissements situés le long de la côte atlantique (Limbé 1, 2 et 3 ; Douala 2, 3 et 5; Dizangué ; etc.) qui ont connu une très forte baisse de leur activité végétale, à ceux situés à l'intérieur du territoire ayant connu une baisse relativement faible (figure 4a).

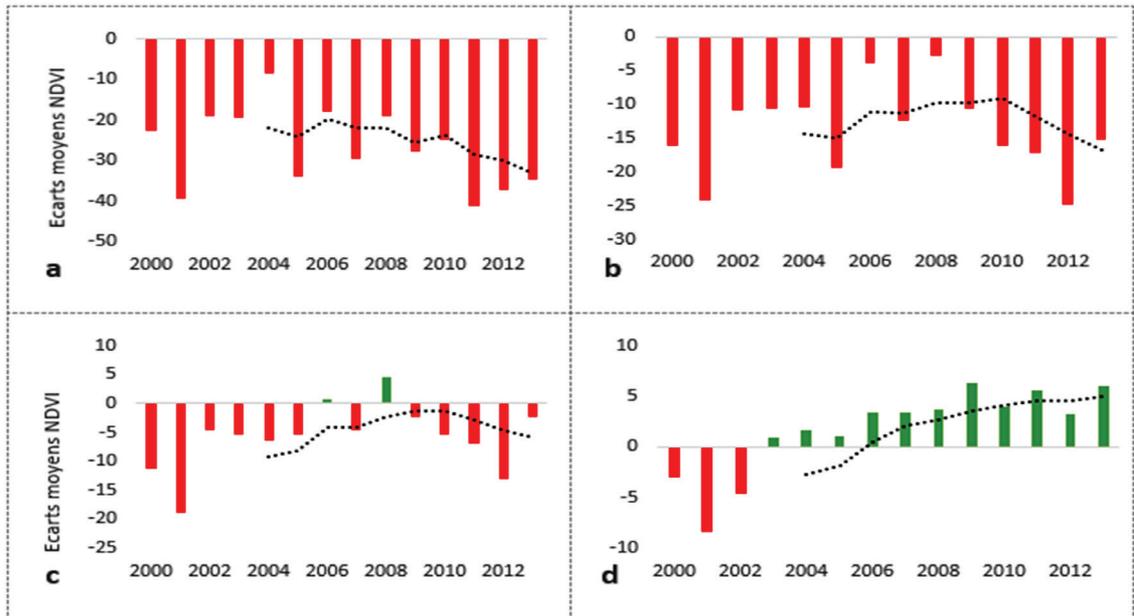


Figure 5 : Caractérisation des profils phénologiques moyen des différentes classes : (a) classe 1 ; (b) classe 2 ; (c) classe 3 ; (d) classe 4. La couleur rouge indique des valeurs négatives du NDVI, tandis que le vert indique des valeurs positives. La courbe en pointillés de couleur noir représente la Moyenne mobile du NDVI sur 5 ans

La CAH réalisée sur les résultats issus de l'ACP permet de distinguer 4 classes d'arrondissements aux trajectoires phénologiques similaires de 2000 à 2013 par rapport à la situation observée en 1999 (figure 4b). La distribution des arrondissements au sein de chaque classe n'est pas homogène. La classe 1 compte 16 arrondissements (figure 4b). Elle regroupe ceux ayant connu une très forte chute de l'activité végétale au courant de la période par rapport à l'année 1999, tout particulièrement à partir de 2004 comme le montre la figure 5. La classe 2 compte 70 arrondissements (figure 4b) et elle regroupe ceux ayant connu une chute de l'activité végétale au courant de cette période. Toutefois, comparé à ceux de la classe 1, cette chute est beaucoup plus faible bien qu'importante et ne semble s'intensifier qu'à partir de 2010 (figure 5b). La classe 3 qui compte 104 arrondissements regroupe ceux qui ont une trajectoire plus ou moins incertaine (figure 5c). Ils ont connu une succession de phases de chute et de regain. Toutefois, ces différentes phases sont assez faibles et ne permettent pas de dégager une tendance évidente. Enfin, la classe 4 regroupe 169 arrondissements qui se caractérisent tous par un certain regain de leur activité végétale (figure 5d). Bien que faible, ce regain est continue dans le temps et montre ainsi une tendance à la hausse.

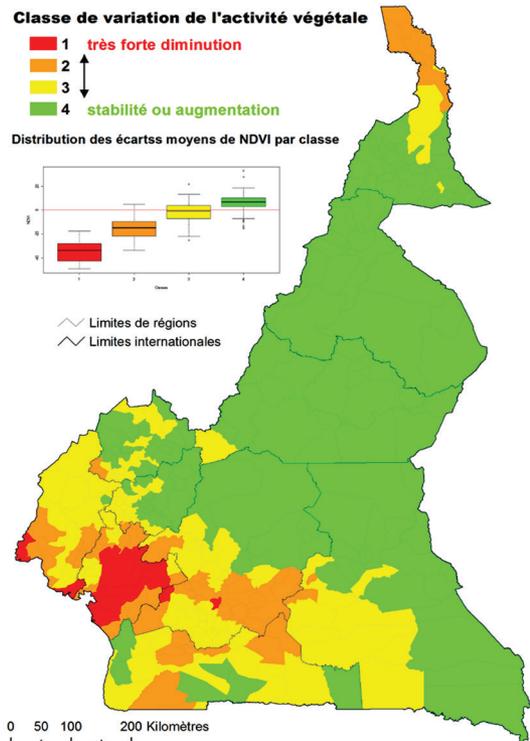


Figure 6 : carte illustrant la baisse de l'activité végétale au sein des différents arrondissements du Cameroun entre 1999 et 2013

Ainsi, les résultats de la classification des arrondissements selon leur trajectoire phénologique montre que 46,94% (169) des arrondissements du Cameroun ont connu une certaine stabilité ou un regain de leur activité végétale de 2000 à 2013 par rapport à leur situation en 1999. Par contre, moins de 5% (16) de ses arrondissements ont enregistré une très forte baisse de leur activité végétale au cours de la même période. Une représentation cartographique des différents arrondissements du Cameroun selon leur appartenance à chacune de ces quatre classes permet de mettre en évidence le fait que (i) les arrondissements appartenant à la classe 1 sont majoritairement situés dans le Littoral, et (ii) ce sont ceux où se situent les principaux centres urbains régionaux ou nationaux à savoir, Douala, Yaoundé, Limbe (figure 6). Par conséquent, il est probable que cette forte baisse de l'activité végétale soit due à une diminution du couvert végétal relativement forte et progressive. On retrouve une certaine similitude entre les figures 3 et 6.

#### 4. Discussion

L'utilisation des données de télédétection à basse résolution spatiale a permis de mettre en évidence et de cartographier une baisse de l'activité végétale au sein d'un certain nombre d'arrondissements du Cameroun entre 1999 et 2013. Ces cartes indiquent d'une part les grandes zones de diminution de l'activité végétale due principalement à un phénomène de conversion plus ou moins importante du couvert végétal et d'autre part, les grandes zones de stabilité voire de regain de l'activité végétale. De plus, elles permettent également de se rendre compte qu'en 2013, 75,83% des arrondissements du Cameroun (classes 3 et 4) n'avaient pas connu de changements significatifs de leur activité végétale par rapport à 1999. Ils ont ainsi enregistré une certaine stabilité en la matière. Toutefois, il convient de préciser que cette stabilité ou ce regain apparent de l'activité végétale ne signifie pas nécessairement un maintien ou alors une redynamisation des superficies des différents couverts végétaux présents au sein de chaque arrondissement. Ceci est principalement dû à l'échelle spatiale à laquelle les données ont été mesurées (Nasi R. et al., 2012) et leur nature.

En effet, le NDVI en tant qu'un indicateur de la vigueur de la végétation ne mesure que l'intensité de l'activité chlorophyllienne des plantes. Il est d'autant plus élevé que les plantes sont saines et en phase de

croissance. Par contre, il s'affaiblit avec la sénescence des plantes ou en cas de situation de stress (Huete A. et al., 2002). Cet indice biophysique est donc sujet aux variations temporelles associées aux différents stades de développement des plantes (Chéret V. et al., 2011). Ainsi, une baisse du NDVI est possible même dans le cas où le couvert végétal serait maintenu. Cependant, l'échelle temporelle et spatiale utilisées dans le cadre de cette étude permet d'éliminer ces variations saisonnières et locales pour ne retenir que celle à plus grande échelle permettant de mettre en évidence des tendances générales; ce que démontrent Jong R. et al. (2011) qui étudient les tendances au renforcement de l'activité végétale à l'échelle globale grâce aux NDVI entre 1981 et 2006. Ces auteurs mettent en évidence un renforcement de l'activité végétale dans la zone d'étude pour cette période bien qu'ils utilisent des données issues d'un capteur et d'une résolution spatiale différent(e)s. Les résultats sont confirmés par ceux de Zhao L. et al. (2018) qui travaillent sur la période 1982-2013 en utilisant le même jeu de données. Toutefois, ces résultats sont en partie dus aux imperfections présentes dans les données utilisées comme l'indiquent les travaux de Zhang Y. et al. (2017). Il convient alors d'utiliser des données différentes afin de mieux comparer les résultats issus de leur analyse.

Le NDVI est lié positivement ou négativement aux paramètres climatiques tels les précipitations, l'évapotranspiration ou les températures (Ji L. et Peters A.J., 2004 ; Li H. et al., 2016). Cependant, la nature et l'intensité de cette relation varient selon le type de couvert végétal, les régions du globe et le principal facteur climatique limitant pour la croissance de la végétation (Kogan F. et al., 2003; Zhao L. et al., 2018). Dans les régions où le bilan hydrique est un facteur limitant important comme dans les zones semi-arides et arides, un renforcement de l'activité végétale observée à travers les valeurs du NDVI peut indiquer une tendance à la hausse des précipitations. C'est par exemple ce que montrent les travaux de Dardel C. et al. (2013) à une échelle locale ou ceux de Liu Y. et al. (2015) qui travaillent à l'échelle globale. Ces différents auteurs mettent en évidence le rôle positif joué par la pluviométrie depuis le début des années 2000 dans le reverdissement observé au niveau du Sahel grâce aux données du NDVI. Il semblerait alors que d'une part, la tendance positive du NDVI observée dans certains arrondissements du Cameroun depuis 2003-2004 (figures 5d et 6)

ait un caractère régional et d'autre part, qu'elle soit en partie due à une augmentation de la pluviométrie particulièrement au niveau des arrondissements situés dans les zones semi-arides et arides (figure 6).

Par contre, la décroissance significative de la valeur du NDVI observée dans les arrondissements de la classe 1 est synonyme d'une réduction du couvert végétal. Leur localisation spatiale au sein du territoire national permet de soupçonner une perte significative du couvert végétal au profit d'autres usages des terres comme cause de la très forte diminution de l'activité végétale qui y est observée. En effet, ces différents arrondissements se localisent principalement au niveau des différents centres urbains régionaux ou nationaux de plus de 100 000 habitants (figure 6). Les fortes densités de la population qui y sont observées occasionnent nécessairement une transformation permanente du couvert végétal, notamment des forêts. A l'échelle du bassin du Congo, Desclée B. et al. (2014) montrent par exemple qu'en ce qui concerne la pratique agricole, elle occasionne une transformation permanente du couvert forestier lorsque la densité de population excède 8 hab/km<sup>2</sup> du fait de la forte pression démographique. Par ailleurs, le développement urbain observé au sein de ces arrondissements se serait donc opérée au détriment du couvert végétal (Voundi E. et al., 2018), d'où la très forte baisse de l'activité végétale enregistrée. Esau I. et al. (2016) font un constat similaire en utilisant les données du NDVI (250 m) pour mettre en évidence l'impact du développement urbain sur la perte du couvert végétal en Sibérie de 2000 à 2015.

## 5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif principal d'établir une typologie des unités administratives du Cameroun selon les trajectoires de leur activité végétale qui permette de distinguer celles où elle est positive de celles où elle est négative. Pour y parvenir, des images satellitales du NDVI à faible résolution spatiale et à grande répétitivité temporelle issues du capteur SPOT-VGT ont été utilisées pour la caractérisation et la cartographie des profils d'évolution de la vigueur de la végétation à grande échelle. Le cas du Cameroun a été pris en exemple. Ainsi, il a été mis en évidence le fait que de 1999 à 2013, près de 5% des arrondissements du pays ont connu une très forte diminution de leur activité végétale principalement en raison du développement urbain. En effet, ces

derniers se situent essentiellement au niveau des principaux centres-urbains du pays. A contrario, il ressort des analyses que 46,94% des arrondissements du pays ont connu soit une stabilité, soit une faible progression de leur activité végétale au courant de cette période. Cette faible progression traduit un renforcement de la vigueur de la végétation au sein de ces arrondissements qui implique une amélioration de l'activité chlorophyllienne des plantes, à défaut d'un accroissement du couvert végétal. En effet, cette progression continue dans le temps laisse supposer que l'activité végétale au sein de ces arrondissements a été peu perturbée durant toute la période d'étude contrairement à ceux qui ont vu leur activité très fortement réduite suite à une dégradation importante du couvert végétal. Ainsi, grâce aux données de télédétection à grande répétitivité temporelle et aux indices de végétation qui en découlent, il est possible de suivre l'évolution de la dynamique spatio-temporelle de l'activité végétale et de faire ressortir les principales tendances sur une large échelle.

## Références

- Bele, M.Y., Sonwa, D.J., Tiani, A-M. (2015).** Adapting the Congo Basin forests management to climate change: Linkages among biodiversity, forest loss, and human well-being, *Forest Policy and Economics*, Vol. 50, pp. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2014.05.010>
- BUCREP. (2010).** La population du Cameroun en 2010, Cameroun, 9 p.
- Chéret, V., Denux, J-P., Gacherieu, C., Ortisset, J-P. (2011).** Utilisation de séries temporelles d'images satellitales pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central, *RenDez – Vous techniques*, n° 31, pp. 55-62.
- Daedel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Tucker, C.J. (2013).** Re-greening Sahel: 30 years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger), *Remote Sensing of Environment*, Vol. 140, pp. 350-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.011>
- De Jong, R., De Bruin, S., De Wit, A., Schaepman, M E., Dent, D L. (2011).** Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No 2, pp. 692- 702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>

- De Wasseige, C., Tadoum, M., Eba'a, A.R., Doumenge, C. (Eds). (2015).** The forests of the Congo Basin-*Forests and climate change*, Weyrich, Belgium, 128 p.
- Deronde, B., Debruyne, W., Gontier, E., Goo, R. E., Jacobs, T., Verbeiren, S., Vereecken, J. (2014).** 15 years of processing and dissemination of SPOT-VEGETATION products, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 7, pp. 2402–2420. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.883102>
- Desclée, B., Mayaux, P., Hansen, M., Lola Amani, P., Sannier, C., Mertens, B., Häusler, T., Ngamabou Siwé, E., Poilvé, H., Gond, V., Rahm, M., Haarpaintner, J., Kibambé Lubamba, J-P. (2014).** Evolution of forest cover at national and regional scale and drivers of change. Dans: The forests of the Congo basin – *State of the forest 2013*, Weyrich, Belgium, pp. 21 - 46.
- Djomo, D. (2008).** Mapping deforestation in the Congo basin forest using multi-temporal SPOT-VGT imagery from 2000 to 2004, *EARSeL eProceedings*, Vol. 7, No 1, 10 p.
- Ernst, C., Verhegghena, A., Bodart, C., Mayaux, P., de Wasseige, C., Bararwandikad, A., Begot, G., Esono Mbaf, F., Ibarag, M., Kondjo Shokoh, A., Koy Kondjoh, H., Makaki, J-S., Menomo Biangj, J-D., Musampah, C., Ncogo Motogok, R., Neba Shul, G., Nkoumakalim, B., Ouissikan, C.B., Defourny, P. (2010).** Congo Basin forest cover change estimate for 1990, 2000 and 2005 by Landsat interpretation using an automated object-based processing chain, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-4/C7, 6 p.
- Esau, I., Miles, V.V., Davy, R., Miles, M.V., Kurchatova, A. (2016).** Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 16, pp: 9563–9577. DOI:10.5194/acp-16-9563-2016
- Gedif, B., Hadish, L., Addisu, S., Suryabagavan, K.V. (2014).** Drought Risk Assessment using Remote Sensing and GIS: The Case of Southern Zone, Tigray Region, Ethiopia, *Journal of Natural Sciences Research*, Vol. 4, No. 23, pp. 87-94.
- Gillet, P., Vermeulen, C., Feintrenie, L., Dessard, H., Garcia, C. (2016).** Quelles sont les causes de la déforestation dans le bassin du Congo ? Synthèse bibliographique et études de cas, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, Vol. 20, No 2, pp. 183-194.
- Hansen, M.C., Roy, D.P., Lindquist, E., Adusei B., Justice, C.O., Altstatt, A. (2008).** A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, pp. 2495–2513. DOI:10.1016/j.rse.2007.11.012
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. (2002).** Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol.83, pp. 195-213.
- Husson, F., Lê, S., Pagès, J. (2017).** Exploratory multivariate analysis by example using R, *CRC press*, USA, 248 p.
- Ingram, V., Tieguhong, J.C., Schure, J., Nkamgnia, E., Tadjuidje, M.H. (2011).** Where artisanal mines and forest meet: socio-economic and environmental impacts in the Congo Basin, *Natural Resources Forum*, Vol. 35, No 4, pp. 304-320. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01408.x>
- Ji, L., Peters, A.J. (2004).** A spatial regression procedure for evaluating the relationship between AVHRR-NDVI and climate in the northern Great Plains, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 2, p. 297–311. DOI: 10.1080/0143116031000102548
- Kleinschroth, F., Healey, J.R., Gourlet-Fleury, S., Mortier, F., Stoica, R.S. (2017).** Effects of logging on roadless space in intact forest landscapes of the Congo Basin, *Conservation Biology*, Vol. 31, No. 2, pp. 469-480. DOI: 10.1111/cobi.12815
- Kleinschroth, F., Laporte, N., Laurance, W.F., Goetz, S.J., Ghazoul, J. (2019).** Road expansion and persistence in forests of the Congo Basin, *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 628–634. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0310-6>
- Kogan, F., Gitelson, A., Zakarin, E., Spivak, L., Lebed, L. (2003).** AVHRR-based spectral vegetation index for quantitative assessment of vegetation state and productivity: calibration and validation, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 69, No. 8, pp. 899–906.

- Li, H., Jiang, J., Chen, B., Li, Y., Xu, Y., Shen, W. (2016).** Pattern of NDVI-based vegetation greening along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and its response to global warming, *Environ Monit Assess.*, Vol. 188, No 186, 10 p. DOI 10.1007/s10661-016-5196-4
- Liu, Y., Li, Y., Li, S., Motesharrei, S. (2015).** Spatial and Temporal Patterns of Global NDVI Trends Correlations with Climate and Human Factors, *Remote Sensing*, Vol. 7, pp. 13233-13250. DOI:10.3390/rs71013233
- Mayaux, P., De Grandi, G., Malingrau, J-P. (2000).** Central African forest cover revisited: a multisatellite analysis, *REMOTE SENS. ENVIRON.*, Vol. 71, pp. 183–196.
- Mbarga, B. (201).** Etat et structures de la population, 3e RGPH, Volume II, Tome 01, BUCREP, 161 p.
- Megevand, C. (2013).** Dynamiques de déforestation dans le bassin du Congo: Réconcilier la croissance économique et la protection de la forêt, Washington, DC: *World Bank*, 179 p. DOI: 10.1596/978-0-8213-9827-2
- MINEPDED. (2016).** Etude des facteurs de la déforestation et de la dégradation des forêts dans le plateau sud camerounais, Cameroun, 73 P.
- Nasi, R., Billand, A., Vanvliet, N. (2012).** Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin, *Forest Ecology and Management*, Vol. 268, pp. 103-111. DOI:10.1016/j.foreco.2011.04.005
- Thao Do, T.P. (2014).** Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiscalaire des interactions climat-surface en Afrique de l'Ouest : Etude du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin), *Thèse, Université de Grenoble, France*, 216 p.
- Tyukavina, A., Hansen, M.C., Potapov, P., Parker, D., Okpa, C., Stehman, S.V., Kommareddy, I., Turubanova, S. (2018).** Congo Basin forest loss dominated by increasing smallholder clearing, *Science Advances*, Vol. 4, eaat2993, 12 p.
- Verhegghen, A., Mayaux, P., de Wasseige, C., Defourny, P. (2012).** Mapping Congo Basin vegetation types from 300 m and 1 km multi-sensor time series for carbon stocks and forest areas estimation, *Biogeosciences*, Vol. 9, pp. 5061–5079. DOI:10.5194/bg-9-5061-2012
- Voundi, E., Tsopbeng, C., Tchindjang, M. (2018).** Restructuration urbaine et recomposition paysagère dans la ville de Yaoundé, *Vertigo*, Vol. 18, No 3, <https://doi.org/10.4000/vertigo.23083>
- Wilkie, D., Shaw, E., Rotberg, F., Morelli, G., Auzel, F. (2000).** Roads, Development, and Conservation in the Congo Basin, *Conservation Biology*, Vol. 14, No 6, pp. 1614 – 1622.
- Zhang, Y., Song, C., Band, L.E., Sun, G., Li, J. (2017).** Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? *Remote Sensing of Environment*, Vol. 191, pp. 145–155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.018>
- Zhao, L., Dai, A., Dong, B. (2018).** Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982-2013, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 249, pp. 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.013>
- Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R.B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y.Y., Piao, S., Chen, H., Vermote, E.F., Song, C., Hwang, T. (2014).** Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade, *Nature*, Vol. 509, pp. 86-90.