



Cartographie et analyse spatiale de la dégradation des terres dans le sud-est du Togo : une approche basée sur la télédétection

Koffi Djagnikpo KPEDENOU¹, Zakariyao KOUMOI²

¹ Université de Lomé (Togo), Laboratoire de Recherches Biogéographiques et d'Etudes Environnementales (LaRBE), Département de Géographie (FSHS) BP : 1515 Lomé Togo

² Université de Kara (Togo), Pôle de Recherche et d'Expertise sur la Dynamique des Espaces et des Sociétés (PREDES), Département de Géographie (FLASH), BP : 404 Kara Togo

Reçu le 15 Mai 2018 - Accepté le 4 Mars 2019

Mapping and spatial analysis of land degradation in south-east Togo: an approach based on remote sensing

Abstract: The present work involves the use of remote sensing techniques to characterize and evaluate land degradation in South-East Togo. The problem of land degradation in this part of Togo is due to human pressures related to the different economic activities. The approach adopted is geomatics based on the calculation of vegetation and soil indices, and spatial analysis. For this purpose, indices such as NDVI, DVI, MSAVI2, TCT-B, NDBI and BSI were calculated and combined. For this purpose, from two mosaic Landsat scenes, indices such as NDVI, DVI, MSAVI2, TCT-B, NDBI and BSI were calculated and then combined. A better combination was chosen and allowed the classification of the images according to the level of land degradation. The validation of the obtained map was made on the basis of the field verification and previous studies on land degradation in the study area. The results showed that the highly degraded lands represent 54.9% of the total land compared to 41% for the moderately degraded lands. The low level of degradation affects only 4.1% of the land in the study area. The breakdown by administrative unit showed that the most degraded lands are mainly located in Vo district. The qualitative evaluation of the results showed the advantage of these spectral indicators to discriminate the different levels of land degradation in the study area.

Keywords: Land degradation, remote sensing, spectral indices, South-East Togo.

Résumé : Le présent travail consiste en l'utilisation des techniques de télédétection afin de caractériser et d'évaluer la dégradation des terres dans le Sud-Est Togo. Le problème de dégradation des terres dans cette partie du Togo est dû à de fortes pressions d'origine humaine relevant des différentes activités économiques. L'approche adoptée relève de la géomatique basée sur le calcul des indices (végétation et sol) et l'analyse spatiale. A cet effet, à partir de deux scènes Landsat mosaïquées, des indices tels que le NDVI, le DVI, le MSAVI2, le TCT-B, le NDBI et le BSI ont été calculés, puis combinés. Une meilleure combinaison fut retenue et a permis la classification des images suivant l'intensité de dégradation des terres. La validation de la carte obtenue a été faite sur la base de la vérification terrain et des études antérieures sur la thématique dans le secteur. Les résultats obtenus ont révélé que les terres fortement dégradées représentent 54,9 % de l'ensemble des terres contre 41 % pour les terres modérément dégradées. La faible dégradation quant à elle, ne concerne que 4,1 % des terres dans le secteur d'étude. La répartition par unité administrative a montré que les terres les plus dégradées sont localisées essentiellement dans la préfecture de Vo. L'évaluation qualitative des résultats a montré l'atout de ces indicateurs spectraux à discriminer les différents niveaux de dégradation des terres dans le secteur d'étude. L'étude permet ainsi d'apprécier l'étendue du phénomène dans le souci de conservation des terres dans un espace fortement anthropisé.

Mots clés: Dégradation des terres, télédétection, indices spectraux, Sud-Est Togo.

1. Introduction

La dégradation des terres constitue un défi environnemental majeur pour l'humanité (Romm, 2011). Défini comme la perte de productivité biologique des terres (Reynolds & Stafford Smith, 2002), ce phénomène constitue l'un des plus graves problèmes environnementaux contemporains (Soulama et al., 2015). Il affecte près de la moitié (41 %) des terres émergées, une centaine de pays sur tous les continents et un tiers de la population mondiale parmi les plus pauvres et les plus vulnérables (MEA, 2005). Cette situation a pris de l'ampleur depuis une soixantaine d'années du fait de la croissance démographique, des pratiques d'exploitation des ressources naturelles inadaptées et des irrégularités climatiques croissantes (MEA, 2005). Cependant, tout semble indiquer qu'en dépit des nombreux engagements pris par les Etats pour endiguer le phénomène, la dégradation des terres, au lieu de reculer, s'aggrave. Elle est à la base de situations critiques relatives à la sécurité alimentaire, à la disponibilité des ressources en eau potable, à la conservation des ressources naturelles, à la perte de la biodiversité et au changement global du climat (Huete et al., 2002).

En Afrique, ce phénomène constitue un facteur majeur de détérioration des économies et des stratégies de subsistance (Eswaran et al., 2001). Ainsi, parmi les objectifs de lutte contre la pauvreté que visent les Objectifs de développement durable (ODD), lutter contre la dégradation des terres contribuerait non seulement à réduire l'extrême pauvreté et la faim, mais également à assurer un environnement durable. La dégradation des terres conduit les populations rurales, notamment les petites agricultures familiales des pays en développement, dans des spirales de pauvreté. Car, plus leurs besoins augmentent, plus ces populations rurales surexploitent les ressources naturelles dont elles dépendent pour leurs revenus et leur alimentation, et plus celles-ci se dégradent, la sécurité alimentaire est alors menacée.

Au Togo, la dégradation des terres n'est pas un fait nouveau. Elle a été identifiée par les chercheurs depuis l'époque coloniale. La principale cause identifiée est une surexploitation des terres marquée par une quasi disparition des jachères, ne laissant aucune chance aux sols de se régénérer naturellement.

Le Sud-Est du Togo en est l'exemple parfait de cette situation. Déjà en 1956, Dabin soulevait le problème au niveau de la terre de barre dans ce secteur du pays, en rapport avec la chute considérable des rendements de

manioc qui sont passés de 40 à 5 tonnes à l'hectare. Plusieurs études ont attribué cet épuisement des terres aux pressions d'une population trop nombreuse qui devrait tirer ses moyens d'existence des ressources en terres limitées (Vieillefon & Millette, 1965 ; Raunet, 1971 ; Djegui, 1982 ; Dome, 1985 ; Marquette, 1985 ; Poss, 1987). L'accroissement démographique entraînant l'augmentation du nombre des exploitants, le temps de jachère diminue et devient trop court pour reconstituer le niveau de fertilité de la terre. Ce qui devient préjudiciable pour le devenir des terres et de surcroît pour la survie des populations à majorité rurale. Au vu de ceci, la gestion rationnelle des terres devient une nécessité et exige de ce fait une meilleure connaissance, et si possible des mesures précises des ressources naturelles utilisées, utilisables, dégradées ou en voie de dégradation. D'après Gao (2008), il est donc important de déterminer la nature, l'ampleur spatiale et la répartition de la dégradation des terres afin d'envisager les mesures de préservation et de restauration.

Nombreuses sont les techniques développées par les scientifiques pour étudier le phénomène. La télédétection, qui en est une, s'avère un excellent outil (Gao & Liu, 2008) qui rend possible la détection et l'évaluation des terres soumises à la dégradation grâce aux différentes méthodes d'analyse statistique et d'interprétation (Benedine et al., 2011). Grace aux images obtenues à l'aide des capteurs, des phénomènes spatialement répartis, tels que la dégradation des terres, peuvent être cartographiés et quantifiés (Prince et al., 2002). La télédétection facilite le suivi de la végétation, des sols et des eaux qui forment les trois principales composantes biophysiques de la terre (Reynolds & Stafford Smith, 2002 ; Lillesand et al., 2004). Plusieurs études sur la dégradation des terres (dégradation des sols et changements du couvert végétal) ont été menées à travers le monde en utilisant la télédétection. Les unes se sont basées sur le calcul des indices de végétation (Wessels et al., 2004) et de sol (Mambo & Archer, 2007 ; Karnieli et al., 2008). Wessels et al. (2004) et Gibson (2007) ont utilisé les tendances résiduelles de la productivité biologique dérivées de l'imagerie satellitaire pour détecter la dégradation des terres. En capitalisant les avantages et les possibilités qu'offre la télédétection dans la détection de la dégradation des terres, le choix est porté, dans cet article, sur des indices spectraux de végétation et de sol déterminés à partir des images satellites pour localiser et cartographier les terres dégradées. L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer la dégradation des terres dans le Sud-Est du Togo. Il s'agit de façon spécifique de procéder à la détection, à la cartographie et à l'analyse spatiale des terres dégradées dans le secteur d'étude.

* Auteur Correspondant : florentk2@hotmail.fr
Copyright © 2019 Université de Parakou, Bénin

2. Matériel et méthodes

2.1. Milieu d'étude

Le Sud-est du Togo est situé géographiquement entre 6°12' et 6°55' de latitude nord, et 1°15' et 1°46' de longitudes est (Figure 1.a).

Le secteur d'étude couvre 2340 km² et est composé de trois préfectures (Bas-Mono : 326,8 km², Vo : 754,3 km² et Yoto : 1258,5 km²). La topographie se caractérise par deux séries de systèmes de bas-plateaux de faibles altitudes (-200 m) juxtaposés, prises en écharpe par la dépression de la Lama qui marque la distinction entre ces dernières (Figure 1.b). Le climat est de type subéquatorial ou guinéen à deux saisons de pluies marquées par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations qui se concentrent sur deux périodes de l'année : la grande saison des pluies couvre les mois de mars à juin avec un maximum en juin tandis que la petite saison de pluies va de septembre à octobre avec le maximum en octobre.

La structure morphologique du secteur apporte une différenciation dans les caractéristiques des sols. Les travaux de Lamouroux (1969) permettent de dénombrer plusieurs types de sols d'après la CPCS (1967). Sur le cordon littoral, les sols sont peu évolués, peu humifères et à texture sableuse, et parfois halomorphes. Les plaines de débordement portent essentiellement des sols hydromorphes à structures massives avec présence de gley, notamment dans les vallées autour du lac Togo et dans la dépression de la Lama. Sur les plateaux, ce sont les sols ferrallitiques et ferrugineux qui prédominent.

La population est estimée à plus de 500 000 habitants. Sa répartition tout comme sa densité varient considérablement d'une préfecture à une autre et les disparités sont fortes d'un point à un autre. Ces irrégularités de répartition spatiale de la population font distinguer des densités de populations très variables par rapport à la densité moyenne qui est de 198,6 hab./km² contre une moyenne nationale qui se situe autour des 100 hab./km² (INSEED, 2010). D'après les résultats du quatrième recensement général de population et de l'habitat de 2010, le Sud-Est du Togo connaît des densités de plus de 250 hab./km² (Bas-Mono : 271,9 hab./km² et Vo : 278,5 hab./km²) sauf la préfecture de Yoto (131,6 hab./km²). Cette population reste fortement rurale et les activités économiques exercées dans le secteur sont en partie liées à l'exploitation du potentiel naturel. Il s'agit de l'agriculture qui reste l'activité dominante, la pêche, l'industrie, l'artisanat et le commerce.

2.2. Données utilisées

Elles sont composées des images satellitaires et des données GPS. Deux scènes d'images Landsat (192-55 et 192-56) de l'année 2018 issues du satellite spatiale Landsat ont été utilisées. Le tableau 1 présente les caractéristiques des images issues du capteur de la série Landsat utilisées.

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des images Landsat utilisées

Table 1: Technical characteristics of the Landsat images

	Landsat
Satellite	LANDSAT 8
Date	05 janvier 2018
Altitude	705 m
Capteurs	Operational Land Imager (OLI)
Path/Row	192 /55 192 /56
Bandes spectrales	1- Aérosols côtiers (0.43-0.45 µm) 2- Bleu (0.45-0.51 µm) 3- Vert (0.53-0.59 µm) 4- Rouge (0.64-0.67 µm) 5- Proche Infrarouge (0.85-0.88 µm) 6- Moyen Infrarouge 1 (1.57-1.65 µm) 7- Moyen Infrarouge 2 (2.11-2.29 µm) 8- Panchromatique (0.50-0.68 µm) 9- Cirrus (1.36-1.38 µm) 10- Infrarouge Thermique 1 (10.60-11.19 µm) 11- Infrarouge Thermique 2 (11.50-12.51 µm)
Résolution spatiale (dimension des pixels)	30 m Bande 8 : 15 m Bande 10 et 11 : 100 m
Dimension d'une scène	185 x 185 km
Fréquence de passage	16 jours

Source : www.landsat.gsfc.nasa.gov

Un jeu de relevés GPS de 225 points fut collecté pour le contrôle terrain et la validation des résultats.

2.3. Méthode de détection et cartographie de la dégradation des terres

La méthode suivie est illustrée par la figure 2. Elle a regroupé plusieurs étapes. La première porte sur les corrections radiométriques propres au capteur et des effets de l'atmosphère, la deuxième sur le choix et le calcul des indices spectraux. Ensuite vient la troisième étape qui consiste en la combinaison de ces indices en vue de détecter et cartographier l'état de dégradation des terres. Pour finir, la dernière étape a servi à la validation des résultats par des vérifications terrains.

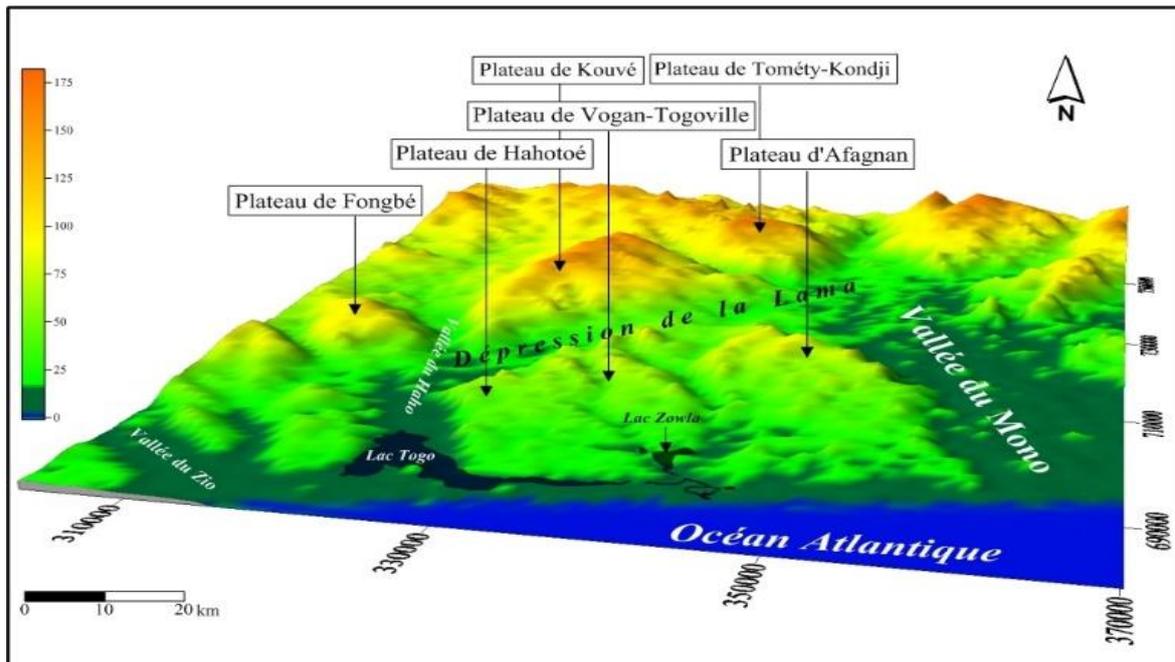
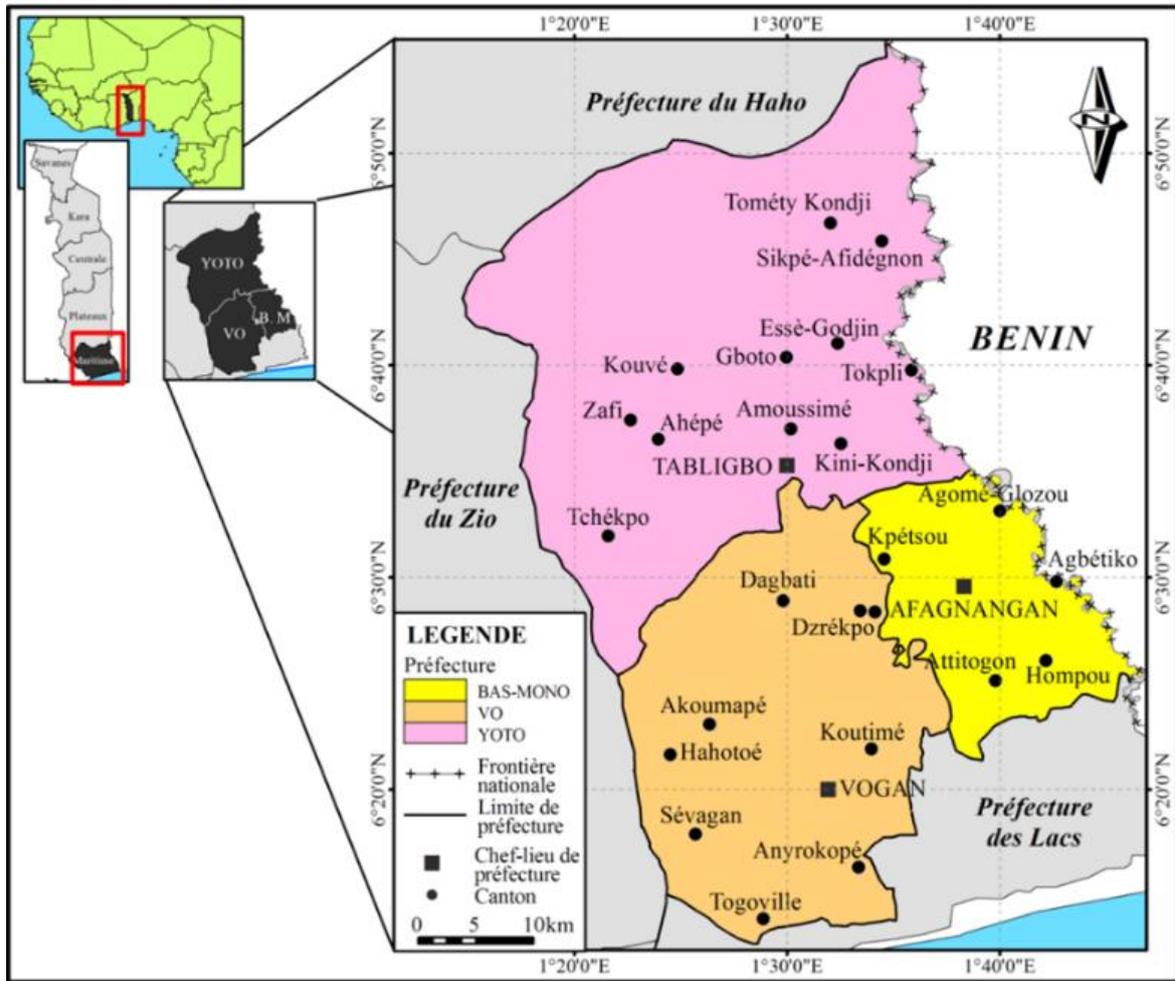


Figure 1 : Caractéristiques du secteur d'étude : a) Carte de localisation ; b) Relief en trois dimensions

Figure 1: Characteristics of the study area: a) Location map; b) Relief in three dimensions

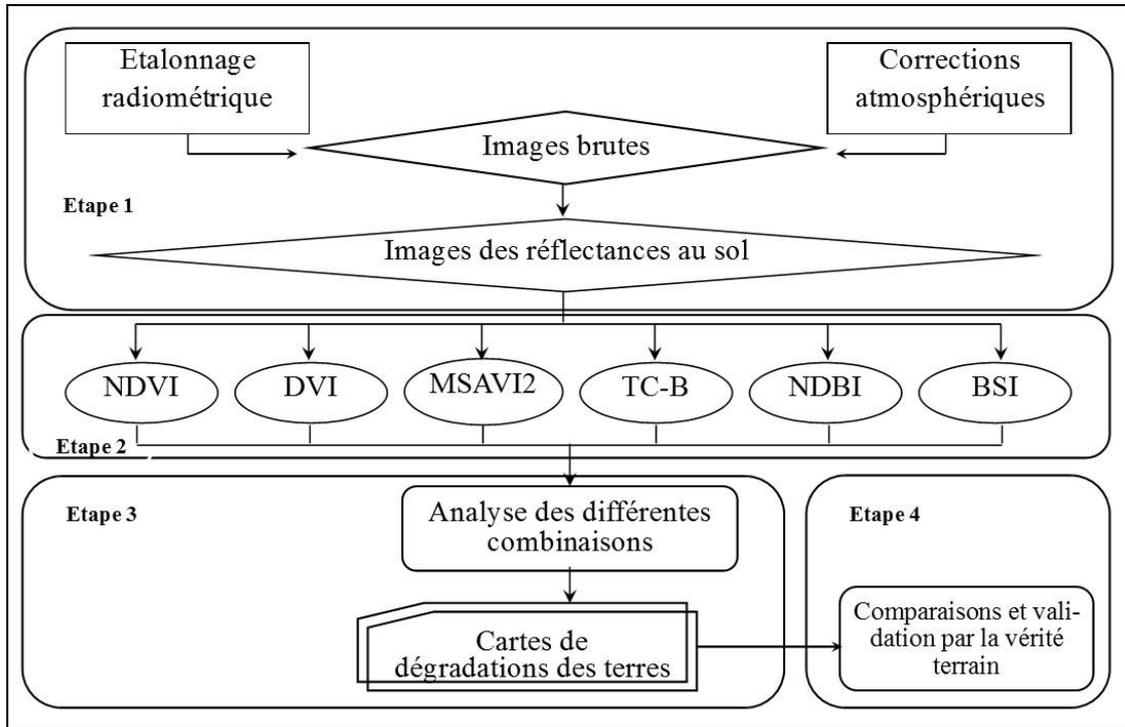


Figure 2 : Organigramme de la méthode de cartographie des terres dégradées

Figure 2: Flow Chart of the Degraded Land Mapping Method

2.3.1. Corrections atmosphériques

Le principe consiste à convertir les comptes numériques des images (valeurs 0 à 255) en luminance ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) au niveau du capteur satellitaire et ensuite d'extraire de cette nouvelle variable les effets perturbateurs atmosphériques afin d'aboutir finalement à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée. Sous le logiciel Envi, deux méthodes de correction atmosphérique existent : les modules QUAC (Quick Atmospheric Correction) et FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) (Mitchell et al., 2012). Ce sont des méthodes de correction basées sur une modélisation atmosphérique et qui visent à corriger les effets atmosphériques en se basant sur des modèles de transfert radiatif (Kruse, 2004) qui permettent de simuler les processus de transfert de rayonnement dans l'atmosphère.

La méthode FLAASH employée dans le cadre de la présente étude s'est faite à l'aide du logiciel Envi 5.1 à travers les étapes telles que :

- l'étalonnage radiométrique consistant à convertir les comptes numériques (Digital Numbers) en fonction de coefficients d'étalonnage (gain et biais) radiométriques en appliquant l'équation suivante (Liu et al., 2014) :

$$L_s = Gain \times Digital\ Numbers + Biais$$

- la configuration FLAASH
- la correction FLAASH et
- la mise à l'échelle

Après les corrections radiométriques, les images satellitaires ont subi un certain nombre de traitements avant la poursuite de la procédure. Il s'agit du mosaïquage des scènes, nécessaire étant donné que le secteur d'étude est couvert par deux scènes (192-55 et 192-56) Landsat, et de l'extraction du secteur d'étude, à partir de l'image mosaïquée, suivant les limites administratives du secteur d'étude.

2.3.2. Choix et calcul des indices spectraux

Les indices spectraux font partie des méthodes de traitement d'images satellites appelées transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Ils sont basés sur le caractère multispectral des données satellitaires et permettent de décrire l'état d'un phénomène et reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Il en existe une multitude, mais le présent travail se limitera à quelques-uns. Le tableau 2 ci-dessous fait le récapitulatif des indices retenus.

Tableau 2 : Formule et description des indices spectraux retenus

Table 2: Formula and description of selected spectral indices

Indices	Formules et atouts	Auteurs
NDVI Indice de végétation de différence normalisée	$(\rho_{PIR} - \rho_R)/(\rho_{PIR} + \rho_R)$ - Sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation - Efficacité à discriminer l'état de santé des végétaux	Rouse et al. (1973)
DVI Indice de différence de végétation	$(\rho_{PIR} - \rho_R)$ - Renseigne sur une couverture suffisante ou non du sol par la végétation.	Richardson & Wiegand (1977)
MSAVI2 Indice de végétation ajusté en fonction du sol	$2 \rho_{PIR} + 1 - ((2 \rho_{PIR} + 1)^2 - 8(\rho_{PIR} - \rho_R))^{0.5} / 2$ - Permet de caractériser la végétation en tenant compte de l'humidité du sol.	Qi et al. (1994a)
TCT-B Indice de brillance de la Transformation Tasseled Cap	$(0.3029 * \rho_B) + (0.2786 * \rho_V) + (0.4733 * \rho_R) + (0.5599 * \rho_{PIR}) + (0.508 * \rho_{MIR1}) + (0.1872 * \rho_{MIR2})$ - Détection des modifications associées à la végétation, au sol et autres fonctions résultant d'une intervention humaine.	Kauth & Thomas (1976)
NDBI Indice d'urbanisation par différence normalisée	$(\rho_{MIR1} - \rho_{PIR})/(\rho_{MIR1} + \rho_{PIR})$ - Conçu pour faire ressortir les terrains bâtis et les sols nus.	Zha et al. (2003)
BSI Indice de sol nu	$\frac{(\rho_R + \rho_{MIR1}) - (\rho_{PIR} + \rho_B)}{(\rho_R + \rho_{MIR1}) + (\rho_{PIR} + \rho_B)}$ - Identifie la différence entre la végétation et sol nu.	

Avec ρ_B la bande spectrale du Bleu, ρ_V la bande spectrale du Vert ; ρ_R la bande spectrale du Rouge

ρ_{PIR} la bande spectrale du Proche Infrarouge ; ρ_{MIR1} et ρ_{MIR2} les bandes spectrales du Moyen Infrarouge

2.3.3. Combinaison des indices spectraux

L'extraction des intensités de dégradation des terres s'est faite par classification des images obtenues par combinaison des indices spectraux. Une analyse faite sur près de 30 combinaisons de composées colorées dans le système Rouge-Vert-Bleu a permis d'en retenir une. Il s'agit de la combinaison NDVI (Rouge), TCT-B (Vert) et BSI (Bleu). L'image ainsi obtenue a permis d'apprécier les différentes intensités de dégradation des terres. Un indice synthétique, calculé sur la base de la moyenne de la somme des trois indices spectraux retenus, a été déterminé. Ses valeurs, réparties en cinq (5) classes suivant l'intensité de dégradation des terres, ont permis la classification de l'image (Tableau 3).

Tableau 3 : Intensité de dégradation et valeurs des indices correspondantes

Table 3: Degradation Intensity and value of corresponding indices

Intensité de dégradation	NDVI	TCT-B	BSI
Très faible	> 0,50	< 0,36	< -0,03
Faible	0,37 à 0,50	0,36 à 0,40	-0,03 à -0,01
Modérée	0,25 à 0,37	0,40 à 0,44	-0,01 à 0,08
Forte	0,13 à 0,25	0,44 à 0,52	0,08 à 0,13
Très forte	< 0,13	> 0,52	> 0,13

2.3.4. Validation et représentation cartographique

La validation des résultats a consisté à confronter les résultats obtenus aux réalités du terrain. Pour ce faire, des zones tests ont été identifiées sur la carte de dégradation obtenue, et visitées à des fins de vérification et de validation. La représentation cartographique a regroupé toutes les opérations effectuées pour l'édition des cartes thématiques finales. Ces opérations sont entre autres l'importation des résultats dans ArcGIS, le choix des couleurs exprimant l'intensité de la dégradation, l'ajout des informations secondaires (limites administratives, hydrographie...).

2.4. Méthode d'analyse du résultat

L'analyse des données issues de la détection et de la cartographie a été spatiale. L'importation des données dans ArcGIS 10.2 a permis le calcul de la superficie de chaque niveau de dégradation des terres. Les analyses ont été conduites à deux niveaux d'échelles : globale (secteur d'étude) et locale (préfecturale).

3. Résultats et discussion

3.1. Cartographie de la dégradation des terres

Le calcul des indices spectraux a permis d'obtenir la carte de dégradation des terres du secteur d'étude en 2018 (figure 3). Laquelle a servi pour l'analyse spatiale du phénomène.

3.2. Analyse spatiale de la dégradation des terres

A l'échelle globale, l'observation de la carte de dégradation des terres (figure 3) révèle des variations au niveau de l'intensité de dégradation. On remarque que la forte dégradation des terres se localise autour des villages de Togoville, Anyrokopé, Sévagan et autre Koutimé dans la préfecture du Vo. Le niveau très fort de dégradation des terres, s'observe également au niveau des localités comme Afagnangan et Attitogon dans la

préfecture du Bas-Mono, de même que les localités de Tabligbo, Amoussimé, et Tométy-Kondji dans le Yoto. Par contre, les terres les moins dégradées se localisent à proximité de l'aire protégée (Parc de Togodo), au nord de Dagbati et également près de Hompou.

L'évaluation statistique déduite de la carte de dégradation des terres a permis de construire le graphique que présente la figure 4. Ce graphique montre en pourcentages, la répartition des terres selon l'intensité de dégradation.

La figure 4 révèle que la dégradation des terres est générale sur l'ensemble du secteur d'étude. Plus de la moitié (54,9 %) des terres sont fortement dégradées (fortement et très fortement) contre seulement 4,1 % de terres faiblement dégradées (faible et très faible). Quant aux terres modérément dégradées, elles représentent 41 % du secteur d'étude.

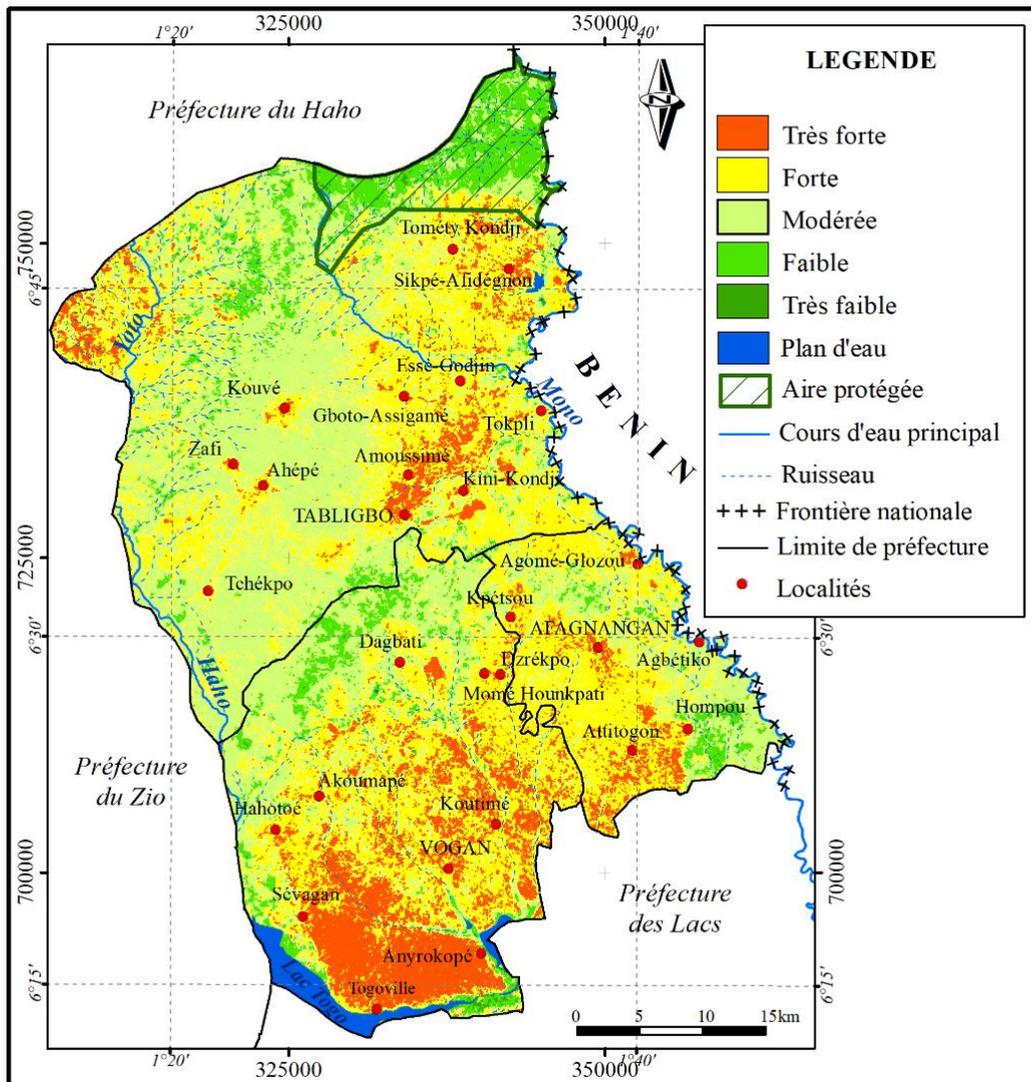


Figure 3 : Carte de dégradation des terres

Figure 3 : Land Degradation Map

A l'échelle préfectorale, les figures 5.a et 5.b présentent les graphiques résumant la répartition par préfecture des terres dégradées. L'analyse des graphiques révèle que la préfecture de Vo est la plus touchée par la dégradation des terres et rassemble à elle seule 65,8 % des terres très fortement dégradées de même que 35 % des terres fortement dégradées. Ce qui équivaut respectivement à 19,9 % et 46 % de sa superficie. Ces deux intensités de dégradation ont également affecté 4,9 % et 42 % des terres dans la préfecture de Yoto, de même que 6,4 % et 51,7 % dans le Bas-Mono (figure 5.b).

Les terres faiblement (faiblement et très faiblement) dégradées se retrouvent plus dans la préfecture de Yoto, qui en rassemble plus de 60 % dans cette catégorie. Il est à noter cependant que les terres modérément dégradées occupent respectivement 38 ; 30,5 et 48,4 %.

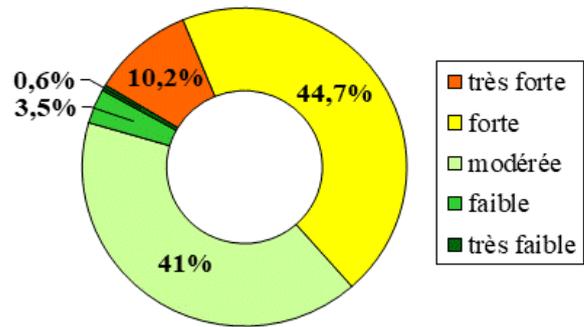
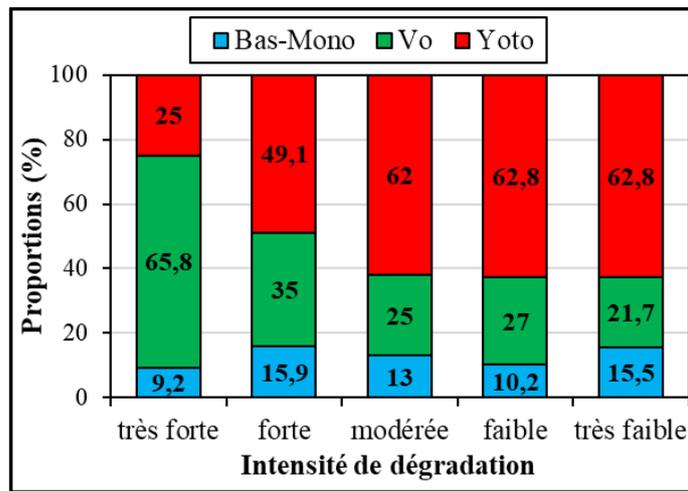
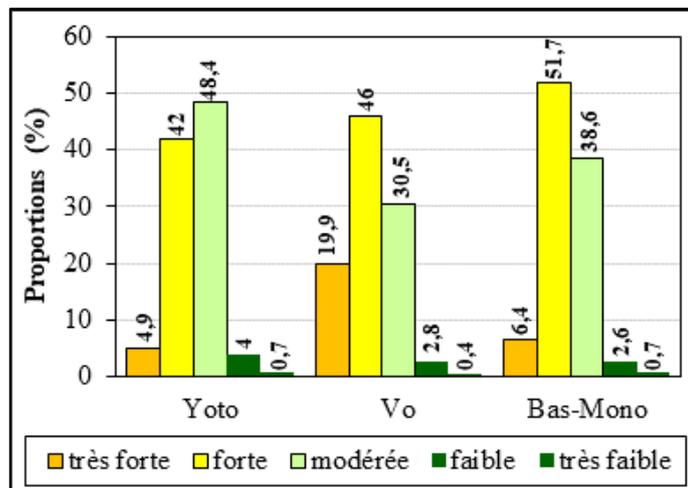


Figure 4 : Intensité de dégradation des terres à l'échelle du secteur d'étude

Figure 4: Land Degradation Intensity at the Study Area Level



a. Répartition en fonction de l'intensité de dégradation



b. Répartition en fonction des superficies préfectorales

Figures 5 : Intensité de dégradation des terres par préfectures

Figures 5: Land Degradation Intensity by Districts

4. Discussion

La présente étude a recouru au calcul des indices spectraux pour cartographier et analyser la répartition spatiale des terres dégradées dans le Sud-Est Togo. Ces indices simples, et souvent utilisés en télédétection, constituent des combinaisons de réflectances et permettent de mettre en évidence les différences de comportement spectral de certaines composantes de la nature comme la végétation, le sol, l'eau, etc. L'usage des indices spectraux pour des estimations quantitatives soulève un certain nombre de questions qui peuvent limiter sérieusement leur utilité réelle. Cependant il faudrait aller dans le sens de la maîtrise de leur correcte interprétation. Malgré les nombreuses études réalisées, il est parfois difficile de choisir avec précision les indices spectraux les plus appropriés (Tchibozo & Toundoh, 2014).

Plusieurs études se sont basées sur les indices spectraux de la végétation, notamment la NDVI pour caractériser la dégradation des terres (Wessels et al., 2004 ; Gibson, 2007). Pour d'autres, ce sont les indices de sol comme l'indice de brillance qui ont servi à mettre en exergue la dégradation des terres suite à l'action humaine (Mambo & Archer, 2007 ; Karnieli et al., 2008). Il faut néanmoins relever que toutes ces études se sont basées sur l'usage unitaire de ces indices, ce qui n'a cessé d'alimenter des critiques. Celles-ci sont essentiellement liées à des raisons techniques. A titre d'exemple, le NDVI reste sensible à la géométrie de vue et d'illumination dans les régions où la densité de végétation est faible et où la présence de sol est importante (Bannari et al., 1995). Cet indice souffre aussi d'une rapide saturation en milieu de végétation dense et la contribution du sol en région de faible densité de végétation peut compliquer son interprétation. Ainsi, d'autres indices sont mis au point pour minimiser l'effet du sol nu sur la réponse spectrale de la végétation.

La détection des terres dégradées dans le secteur d'étude s'est basée sur la combinaison de trois indices spectraux (le NDVI, la TCT-Brightness et l'indice de sol nu). Les valeurs de ces indices, calculées à l'échelle du pixel, ont été mises en relation avec des types d'états de surface et des taux de végétation estimés à partir de la littérature existante et sur le terrain pour identifier les

zones de terres dégradées. L'approche trouve sa pertinence dans le fait qu'elle s'appuie sur plusieurs paramètres spectraux. Elle va également au-delà de simples perceptions ou classifications d'images car la variation de la réponse spectrale mesurée au niveau du capteur satellitaire est un indicateur de changement du milieu. L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Elle donne une représentation synthétique des changements puisqu'elle permet de visualiser directement la nature des changements entre plusieurs dates. Mais cette perception des changements reste grossière : elle donne les grandes tendances du milieu à partir de l'interprétation d'indices radiométriques calculés avec des pixels de 30 mètres de résolution. Or pour de nombreux phénomènes qui marquent aussi bien les sols que la végétation, il faudrait avoir accès à une meilleure résolution spatiale. Même s'il faut reconnaître que les études de cartographie de la dégradation des terres à l'aide des indices spectraux ont pour la plupart du temps été menées dans des régions arides et semi arides du monde, les résultats ont cependant montré la pertinence de ces derniers à discriminer les terres dégradées dans les zones comme le Sud-Est du Togo.

La cartographie de la dégradation des terres a permis d'appréhender son analyse spatiale dans le secteur d'étude. L'examen de la carte montre que la dégradation des terres demeure une réalité incontestable dans le secteur. Sur le plan de la répartition spatiale, même s'il faut admettre que les terres dégradées sont relativement importantes dans les trois préfectures, il faut néanmoins relever que la préfecture de Vo est la plus affectée par le phénomène qui a touché plus de 60 % de ses terres. Ce qui peut s'expliquer par les fortes densités de population qu'elle renferme.

En effet, les facteurs anthropiques de pressions auxquelles sont soumises les terres dans le Sud-Est Togo sont d'ordres démographique et économique. Sur le plan démographique, les chiffres des différents recensements de population (RGPH 1, 2, 3 et 4) montrent une augmentation des populations au cours des 50 dernières années, avec des densités humaines qui figurent parmi les plus élevées du territoire national (400 voire 600 habitants au km² à l'échelle cantonale). Cette croissance démographique sous-tend la surexploitation des terres en réponse aux nombreux besoins. Quant aux facteurs

économiques de pressions sur les terres dans la Sud-Est du Togo, ils relèvent des systèmes d'exploitation des ressources mis en place par les populations. Il s'agit principalement des systèmes de production agricole, de l'exploitation de la flore, des pratiques de feux de végétation et de l'exploitation minière. L'agriculture est de type pluvial et la pratique dominante est l'abattis-brulis, dont le système tend majoritairement vers l'association des cultures. Cette agriculture est marquée par la surexploitation des terres, traduite par le raccourcissement de la durée voire la suppression même des jachères. L'activité minière dans le secteur est représentée par trois unités de production dont deux pour l'exploitation du calcaire (WACEM et SCAN MIN) dans la préfecture de Yoto, et une pour l'exploitation des phosphates dans le Vo (SNPT).

5. Conclusion

La présente étude a permis de cartographier les terres dégradées à partir des indices spectraux déduits des images satellites. Les résultats ont révélé différentes intensités de dégradation inégalement répartis entre la très faible (0,6 %), la faible (3,5 %), la modérée (41 %), la forte (44,7 %) et la très forte (10,2 %). Sur le plan spatial, la préfecture de Vo reste la plus touchée par le phénomène avec 65,8 % des terres très fortement dégradées.

Le présent travail constitue une contribution à la détection et à la localisation des terres dégradées et permettra aux acteurs locaux d'avoir à disposition un outil d'aide à la décision dans le cadre de la lutte contre ce phénomène. Cependant, vu l'importance des pressions humaines dont fait face le Sud-Est du Togo, des analyses diachroniques doivent être faites en vue d'étudier l'ampleur et l'évolution de la dégradation des terres afin de réfléchir sur la mise en place des stratégies de conservation des ressources naturelles.

CONFLIT D'INTERET

Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêt.

REFERENCES

- Bannari A. Morin D. Bonn F. & Huete A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13: 95-120.
- Benedine A. Robert T. A. & Abbas I. I. 2011. The Impact of Spatial distribution of solid waste dumps on infrastructure in Samaru, Zaria, Nigeria using GIS. *Research Journal of Information Technology*, 3 (3): 113-117.
- Chen W. Liu L. Zhang C. Wang J. Wang J. & Pan Y. 2014. Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multitemporal TM images. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'04)*, Anchorage, AK, USA, 20-24 September 2004.
- Dabin B. 1956. Contribution à l'étude de la fertilité des Terres de Barre. *Agron. trop.* XI, 4: 490-506.
- Djegui N. 1982. Essai de caractérisation de l'état de dégradation des terres de barres. Rapport IRAT-CI-RAD.
- Dome D. 1985. Carte pédologique de la région de Tsévié (Togo) au 1/50 000. Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de Barre du Togo. Rapp. ORSTOM, Lomé, Togo.
- Eswaran E., Lal R. & Reich F. 2001. Land degradation: an overview: 1-5. In: Bridges E. M., Hannam I. D., Oldeman L. R., Pening de Vries F. W. T., Scherr S. J. & Sompatpanit S. (eds.), *Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification*, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India.
- Gao J. & Liu Y. 2008. Mapping of land degradation from space: A comparative study of Landsat ETM+ and ASTER data. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (14): 4029-4043.
- Gao J. 2008. Detection of changes in land degradation in northeast China from Landsat TM and Aster data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37: 1533-1538.

- Gibson D. J. D. 2007. Land degradation in the Limpopo province, South Africa. MSc thesis, University of the Witwatersrand, School of Animal, Plant and Environmental Sciences, Johannesburg, South Africa.
- Huete A., Gao X., Kim H. J., Miura T., Borghi C. & Ojeda R. 2002. Characterization of land degradation in central Argentina with hyperspectral AVIRIS and EO-1 data. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand. Symposium 46, Paper n°987.
- Karnieli A. Gilad U. Ponzet M. Svoray T. Mirzadinov R. & Fedorina O. 2008. Assessing land-cover change and degradation in the Central Asian deserts using satellite image processing and geostatistical methods. *Journal of Arid Environments*, 72: 2093-2105.
- Kauth R. J. & Thomas G. S. 1976. The Tasseled Cap-A Graphic Description of the Spectral Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. Paper presented at the LARS Symposia, Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, IN, June 29-July 1, 4B41-4B51.
- Kruse F. A. 2004. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH Atmospheric corrections using lowaltitude AVIRIS data of Boulder, Colorado. Proceedings of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop, Pasadena, CA, USA, 31 March-2 April 2004: 1-10.
- Lamouroux M., (1969) : Carte pédologique du Togo au 1/1.000.000. Notice explicative n°34, ORSTOM. Paris, France.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W. & Chipman J. W. 2004. Remote sensing and image interpretation. 5th Edition, John Wiley & Son, New York, USA.
- Liu Y. Wang T. Ma L. & Wang N. (2014). Spectral calibration of hyperspectral data observed from a hyperspectrometer loaded on an unmanned aerial vehicle platform. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7 (6): 2630-2638.
- Mambo J. & Archer E. 2007. An assessment of land degradation in the Save catchment of Zimbabwe. *Area*, 39 (3): 380-391.
- Marquette C. 1997. Population and environment relationships in developing countries: A select review of approaches and methods. Working Paper Chr. Michelsen Institute Development Studies and Human Rights, Bergen, Norway.
- MEA. 2005. Living beyond our means: Natural assets and human well-being. Statement from the Millennium Ecosystem Assessment Board.
- Mitchell J. J., Glenn N. F., Anderson M. O., Hruska R. C., Halford A., C. Baun & Nydegger N. 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral remote sensing for dryland vegetation monitoring. *Hyperspectral Image and Signal Processing (WHISPERS)*, 4th Workshop. IEEE, Shanghai, China: 1-10.
- Poss R. 1987. La dégradation des terres de Barre du Togo : mythe ou réalité ? Proceedings of the 8th meeting of the West and Central Africa sub-committee on correlation of soils for land development, EA.O., Yaoundé (Cameroon) January 19 -28, 1987: 155-159
- Prince K Guo X & Stiles J. M. 2002. Optimal Landsat TM band combinations and vegetation indices for discrimination of six grassland types in eastern Kansas. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 5031-5042.
- Qi J. Chehbouni A. Huete A. R. & Kerr Y. H. 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sens Environ* 48:119-126.
- Raunet M. 1971. Contribution à l'étude pédo-agronomique des "terres de Barre" du Dahomey et du Togo. *L'Agro. Trop.*: 1049-1069.
- Reynolds J. F. & Stafford Smith D. M. 2002. Global desertification: do humans create deserts? : 1-22 In: Stafford-Smith M. & Reynolds J. F. (eds.), *Do Humans Create Deserts?* Dahlem University Press, Berlin, Germany.

- Richardson A. J. & Wiegand C. L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background in formation. *Photogramm. ENG. Remote sensing* 43: 1541-1552.
- Romm J. 2011. Desertification: the next dust bowl. *Nature*, 478: 450-451.
- Rouse, J. W., Haas R. H., Schell J. A., & Deering D. W. 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In Paper presented at the Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Vol.I, December 10-14, Washington, DC: NASA: 309-317.
- Soulama S. Kadeba A. Nacoulma B. M. I. Traoré S. Bachmann Y. & Thiombiano A. 2015. Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *J. of Appl. Biosci*, 87: 8047-8064.
- Tchiboza E. A. & Toundoh O. P. 2014. Détection localisée des zones dégradées de végétation par télédétection : application à la zone de transition entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin (Centre-Bénin). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 11 (2): 477-493.
- Viellefon J. & Millette G. 1965. Etudes pédo-hydrologiques au Togo. Vol. II : les sols de la région maritime et des savanes. ONU/ FAO, Rome, Italie - ORSTOM, Paris, France.
- Wessels K. J. Prince S. D. Frost P. E. & Van Zyl D. 2004. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing and the Environment*, 91: 47-67.
- Zha Y. Gao J. & Ni S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3): 583-594.