

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)

[Localize detection of degraded vegetation zone by remote sensing: application to the transition zone between the sedimentary basin and the crystalline basement (Centre – Benin)]

E.A. Tchiboza¹ and O.P. Toundoh²

¹Maître assistant (CAMES), Département de géographie et aménagement du territoire, FLASH, Université d'Abomey Calavi, Benin

²Etudiant de Master, Cartographie et sciences de la géoinformation, RECTAS, Université Obafemi Owolowo Ilé Ifè, Nigeria

Copyright © 2014 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: This paper aims to assess the degradation of vegetation in the transition zone between the sedimentary and crystalline in central Benin. The method used is the geomatics and includes the photo - interpretation assisted image classification, the calculation of vegetation indices and spatial analysis. The results show that despite its high coverage (75.21%), unevenly distributed among the dense forest (40, 50%), open forest (15.03%), woodland (16.47%) and tree and shrub savannah (28.00%), large bare surfaces indicate a risk of desertification and loss of vegetation. Image processing from vegetation indices showed that the degraded vegetation is characterized by low coverage containing low biomass and having a healthy and low density. The highest rate of degradation of vegetation varies. The sharp deterioration represents 8.89% of the dense forest, 76.83% of the woodland, 72.89% of woodland and 100% of the tree and shrub savannah. Degradation of vegetation is related to the importance of human pressure in the south and center of the study area, the sedimentary basin, and insufficient water in the North, on the crystalline basement.

KEYWORDS: degradation, Centre-Benin, vegetation indices, image processing, coverage, desertification.

RESUME: La présente contribution vise à évaluer la dégradation de la végétation dans la zone de transition entre le sédimentaire et le cristallin au centre Bénin. La méthode utilisée relève de la géomatique et regroupe la photo – interprétation par classification assistée d'image, le calcul des indices de végétation et l'analyse spatiale. Les résultats obtenus montrent que malgré son taux de couverture élevé (75,21%), inégalement réparti entre la forêt dense (40, 50%), la forêt claire (15,03%), la savane boisée (16,47%) et la savane arborée et arbustive (28,00%), de vastes surfaces dénudées indiquent un risque de désertification et la perte de végétation. Le traitement d'image à partir des indices de végétation a montré que la végétation dégradée est caractérisée par une faible couverture contenant une faible biomasse et présentant une santé et une densité faibles. Le taux le plus élevé de la dégradation des formations végétales est variable. La forte dégradation représente 8,89% de la forêt dense, 76,83% de la forêt claire, 72,89% de la savane boisée et 100% de la savane arborée et arbustive. La dégradation de la végétation est liée à l'importance de la pression anthropique au sud et au centre de la zone d'étude, sur le bassin sédimentaire, et l'insuffisance d'eau au Nord, sur le socle cristallin.

MOTS-CLEFS: dégradation, Centre –Bénin, indices de végétation, traitement d'image, taux de couverture, désertification

1 INTRODUCTION

Selon [1], la dégradation des forêts se réfère à la réduction de la capacité d'une forêt de produire des biens et services liés au maintien de la structure et des fonctions d'écosystèmes. Actuellement, ce phénomène est devenu un problème grave, en particulier dans les pays en développement. Parmi ses impacts négatifs, le gaz à effet de serre constitue une part significative avec 12% à 15% des émissions mondiales de CO₂ [2].

La déforestation s'accompagne généralement d'une réduction du couvert végétal, et en particulier arboré [3]. Au Bénin, le couvert végétal se dégrade progressivement et l'on estime qu'environ 70.000 ha de forêt sont défrichés chaque année entre 1990 et 2000 du fait des agressions de l'agriculture, de l'élevage, de l'exploitation forestière incontrôlée et des feux de brousse. Avec un taux d'accroissement de la population de l'ordre de 3,2 % et ses corollaires d'augmentation en besoins de tous genres à satisfaire, les formations forestières sont sous la pression de plus en plus forte de l'agriculture, de l'élevage, de l'exploitation forestière et de l'urbanisation [4]. Cette tendance à la dégradation des ressources forestières est confirmée par plusieurs travaux [5], [6],...

Le centre – Bénin est particulièrement concerné. Il accueille de nombreux colons agricoles dont les pratiques culturales et les formes d'utilisation des ressources naturelles sont peu respectueuses de l'environnement. Les terres fertiles se font ainsi rares et se limitent actuellement aux zones hydromorphes, notamment les bas-fonds. Ces changements paysagers deviennent une préoccupation majeure tant pour les institutions scientifiques que pour les gestionnaires des ressources naturelles au Bénin. Le présent travail s'inscrit dans ce cadre où les besoins en informations spatiales sont de plus en plus insatisfaits dans un contexte de dynamique de l'environnement. Pour régler ce problème, il faut un outil adapté pour l'observation répétitive (saisons et climats) de grandes surfaces parfois inaccessibles par les travaux de terrain : la télédétection

L'une des principales applications de la télédétection dans la gestion des ressources de l'environnement et la prise de décision est la détection et l'évaluation quantitative de la végétation verte. Plusieurs auteurs ont utilisé les indices de végétation pour analyser le changement de l'environnement global, en particulier dans le contexte de la sécheresse et de l'évaluation des risques de dégradation des terres [7]. Au cours des 30 dernières années les indices de végétation (VI) ont été largement utilisés pour le traçage et la surveillance des conditions de végétation, telles que la santé, le taux de croissance et de production, de l'eau et des nutriments stress, etc. Dans cet article, les indices de végétation calculés à partir des images satellites seront utilisés pour localiser et cartographier les zones de végétation dégradée.

L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer la dégradation de la végétation dans la zone de transition entre le sédimentaire et le cristallin au centre Bénin. De manière spécifique, il s'agira de cartographier et d'analyser l'occupation du sol, de cartographier les indices de végétation et détecter des zones dégradées de végétation, d'évaluer la dégradation et l'identification de ses facteurs.

Pour atteindre ces objectifs, les hypothèses suivantes sont retenues: la végétation est inégalement répartie dans la zone de transition entre le bassin sédimentaire côtier et le socle cristallin; la dégradation de cette végétation est perçue à partir des indices de végétation ; la dégradation de la végétation est localisée et inégalement répartie ; la pression anthropique et le contenu en eau de la végétation participent à sa dégradation.

La zone d'étude est située au Centre – Bénin entre 6°43'55,3" et 7°41'04,3" de latitude nord, 1°59'17,2" et 2°47'51" de longitude est. D'une superficie de 869799,92 ha, elle constitue une zone de transition soudano - guinéenne, traversée par le « Dahomey gap », c'est-à-dire la zone d'interruption de la ceinture forestière équato-guinéenne devant relier les blocs forestiers d'Afrique centrale et occidentale. Sur le plan géomorphologique, elle chevauche la ligne de contact entre le bassin sédimentaire côtier et le socle cristallin. On y rencontre des mosaïques de forêts claires (*isoberlinia spp.*, *pterocarpus erinaceus*, *combretums*), éventuellement de forêts denses sèches (*isoberlinia doka*, *monotes kerstingii*, *daniellia oliveri*, *khaya senegalensis*), parsemées de savanes arborées et arbustives et traversées par des galeries forestières dont les grandes superficies sont localisées au - delà de 7°N (figure 1a, 1b, 1c et tableau 1). Les types de sol qui couvrent la zone d'étude sont les sols hydromorphes, ferralitiques, ferrugineux et les vertisols.

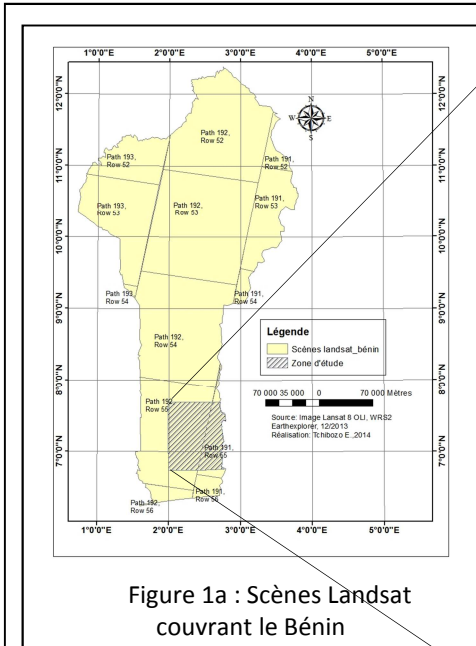


Figure 1a : Scènes Landsat couvrant le Bénin

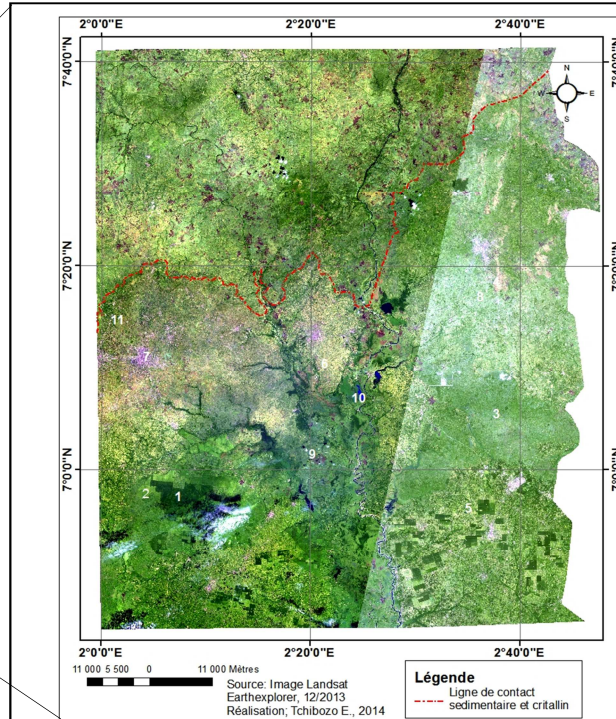


Figure 1b: Image de la zone d'étude

Source : Extrait de mosaïque d'image Landsat WRS2, Earthexplorer, 12/2013

Tableau1 : clé d'interprétation des images

N°	Unités d'occupation du sol
1	Forêt dense
2	Forêt claire
3	Savane arborée et arbustive
4	Savane boisée
5	Plantations
6	Mosaïque de cultures et jachères
7	Agglomérations
8	Sols dénudés
9	Zone inondable
10	Eau de surface

Source : Images traitées, Tchibozo, 2014

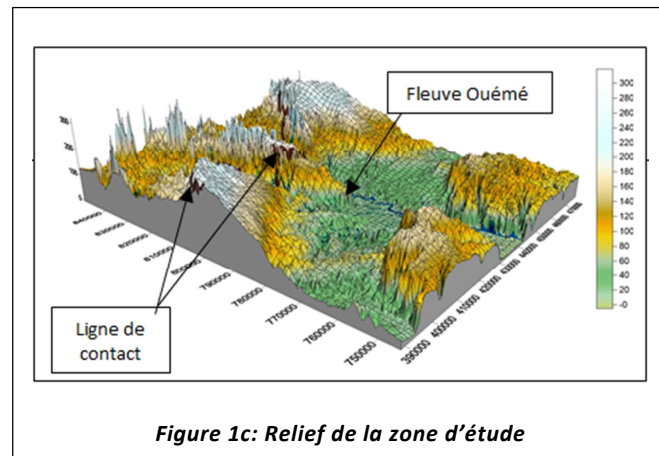


Figure 1c: Relief de la zone d'étude

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MATÉRIEL

Dans ce travail, le matériel est composé d'un GPS, un ordinateur, des logiciels de télédétection et SIG (Envi 4.8, Envi- Ex 4.8, Erdas 9.2, ILWIS 3.7, Excel 2013, SPSS 21,0 et Surfer11), un scanner, une imprimante, des clés USB et une calculatrice. Les données utilisées proviennent de la télédétection, de la cartographie et des travaux publiés antérieurement sur la zone d'étude. Les caractéristiques de ces données sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : principales caractéristiques des données collectées

N°	Données	Principales caractéristiques	Échelle/ Résolution	Source et année
1	Image Landsat 8, Radiomètre LDCM/ OLI	0,43-0,45 µm ; 0,45-0,51 µm 0,52-0,60 µm ; 0,63-0,68 µm 0,85-0,89 µm ; 1,56-1,66 µm 1,36-1,39 µm ; 2,1-2,3 µm 0,52-0,9 µm (panchromatique)	30 mètres 15 mètres	USGS, Earthexplorer09/2013
2	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM3)	Digital Elevation Model	90 meters	2000
3	Carte hydrogéologique du Bénin	scannée raster avec 200 dpi	1/500 000	
4	Carte topographique du Bénin	scannée raster avec 200 dpi	Echelle:1/600000,	IGN - Bénin, 1982, 2ème édition

Source: CENATEL, Bénin 2013, adapté

2.2 MÉTHODES

La méthodologie utilisée dans la présente étude constitue une approche géomatique de l'extraction de l'information géographique utile. Elle est basée sur la photo – interprétation numérique par classification supervisée d'image, le calcul des indices de végétation et l'analyse spatiale [8].

La photo – interprétation par classification supervisée d'image est appliquée pour obtenir une carte de l'occupation du sol. Cette dernière, plus récente, est indispensable pour la mise à jour les données existantes, la reconnaissance des zones de végétation sur le terrain et la superposition des unités d'occupation du sol avec les cartes des indices de végétation. La classification supervisée est réalisée par le critère de maximum de vraisemblance. Les résultats obtenus sont évalués avec la matrice de confusion et l'indice Kappa [9].

Les indices de végétation fournissent des informations sur le taux de couverture de la végétation, différencient les zones couvertes de végétation de celles des sols nus, mesurent le contenu en eau des feuilles, réduisent les effets atmosphériques et topographiques sur les images [10]. Dans la présente étude, ils sont utilisés pour détecter la dégradation localisée de la végétation. En général, les bandes spectrales utilisées pour calculer les indices de végétation dépendent des propriétés spectrales des plantes et des phénomènes contribuant à leur dégradation. Malgré les nombreuses études réalisées, il est parfois difficile de choisir avec précision l'indice de végétation approprié. La réflectance dans la bande R et celle dans le PIR, et en conséquence dans le spectre visible, varient suivant plusieurs facteurs [11]. 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 dégradées de végétation. Ceux utilisés dans la présente étude sont décrits ci-dessous et présentés dans le diagramme méthodologique (figure 2).

- **Difference Vegetation Index (DVI) = PIR-R,**

Où, PIR est la bande proche infrarouge du spectre et R, la bande rouge du spectre [12].

Cet indice est sensible à la présence de la végétation et n'est pas influencé par l'atmosphère et l'ombre des unités d'occupation du sol. Les valeurs égales à 0 indiquent les sols nus, celles inférieures à 0 l'eau et les supérieures à 0, la végétation ;

- **Normalize Vegetation Index (NDVI) = (PIR-R) / (PIR+R),**

Où PIR est la bande proche infrarouge et R, la bande rouge du spectre [13].

Cet indice permet d'éliminer les effets de la topographie et la variation de l'angle d'éclairage solaire sur l'image, ainsi que d'autres éléments atmosphériques tels que la brume... Il se prête au traitement statistique à cause de la distribution normale de ses valeurs comprises entre -1 et +1. Mais, le NDVI est souvent affecté par la rétrodiffusion du sol nu à travers la couverture végétale. En effet, lorsque la végétation ne couvre que partiellement le sol, le signal du sol se mélange avec celui du couvert [14].

Pour suppléer à cette insuffisance du NDVI, d'autres indices permettant de minimiser l'influence du sol comme le MSAVI et le PVI ont été calculés. Toutefois, notons que pour une région de forte densité, le MSAVI peut souffrir de saturation.

- **Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI₂)** = $2 \text{PIR} + 1 - [(2 \text{PIR} + 1)^2 - 8(\text{PIR} - R)]^{0.5} / 2$, [15]

Où, PIR est la bande proche infrarouge et R, la bande rouge du spectre.

- **Perpendicular Vegetation Index (PVI₂)** = $(\text{PIR} - a * R - b) / (1 + a^2)^{0.5}$,

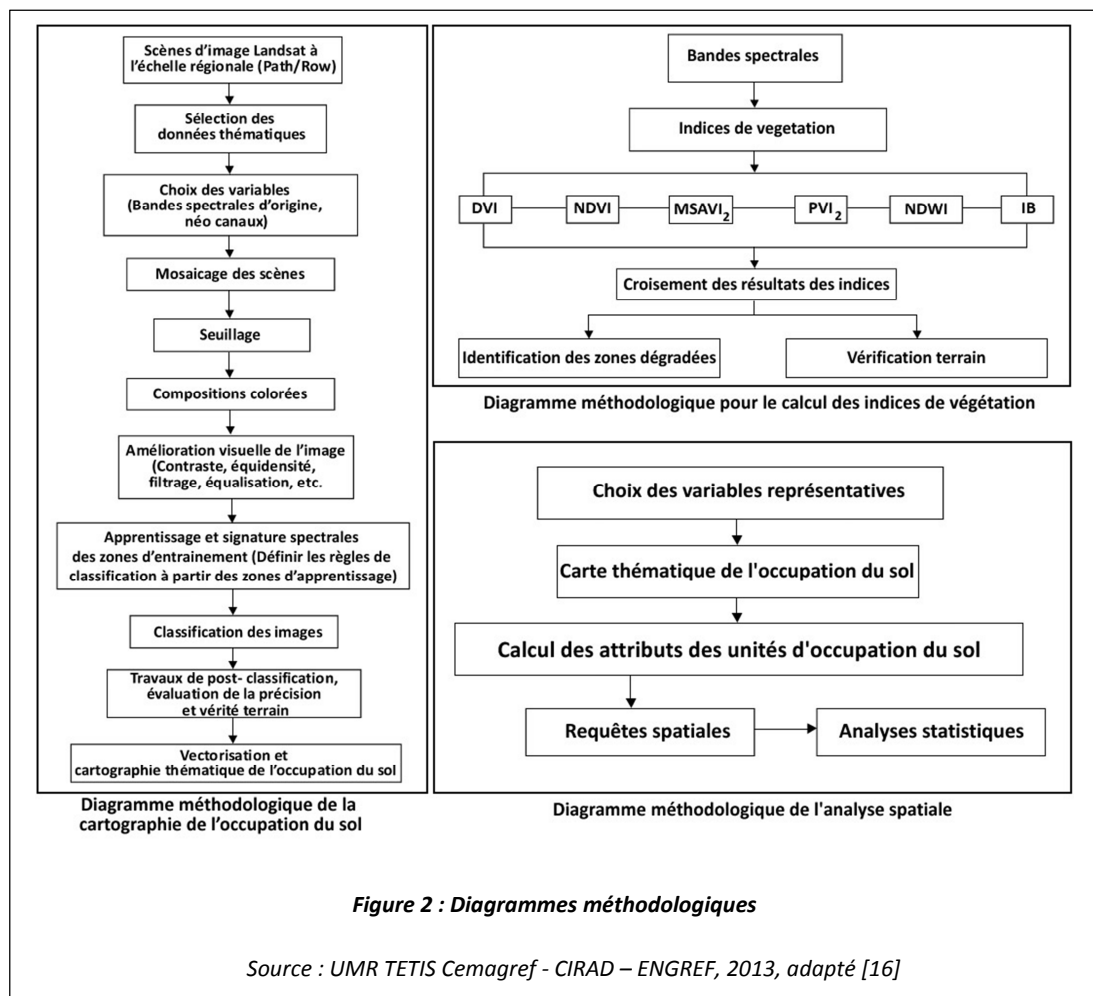
Où PIR est la bande proche infrarouge ; R, la bande rouge ; a, la pente de la droite du sol, b, l'ordonnée à l'origine de la droite du sol [16];

Le PVI₂ est un indice prend en considération, les effets du sol nu et est défini comme la distance orthogonale entre un point qui représente le couvert végétal dans la bande rouge et proche infrarouge et la droite au sol.

Pour identifier les causes probables de la dégradation de la végétation, d'autres indices spécifiques à la pression anthropique et au contenu en eau de la végétation sont calculés : l'indice de brillance (IB) et l'indice du stress hydrique (NDWI). Ils sont identifiés à cause de la pression anthropique liée à l'évolution démographique du sud et les difficultés d'accès à l'eau sur le socle cristallin (granito gneissique).

- **Indice de brillance (IB)** = $(\text{PIR}^2 + R^2)^{0.5}$ où PIR est la bande proche infrarouge ; R, la bande rouge ;
- **L'indice normalisé de différence en eau (NDWI)** = $(\text{PIR} - \text{MIR}) / (\text{PIR} + \text{MIR})$, où, PIR est la bande proche infrarouge ; MIR, la bande moyen rouge.

L'analyse spatiale est réalisée par superposition de la carte de l'occupation du sol avec les cartes d'indices de végétation et des requêtes spatiales. La ligne de contact a été dessinée à partir de la carte hydrogéologique.



3 RÉSULTATS

3.1 ÉVALUATION DE LA CLASSIFICATION ASSISTÉE D'IMAGE

La cartographie de l'occupation du sol est réalisée par classification assistée d'image. Son évaluation montre que sur un total de 2237 pixels que contiennent les zones d'entraînement de l'image, renseignées par la signature spectrale, 2123 pixels ont été bien classifiés, soit une précision globale de 94,90% avec un indice Kappa de 0,94 (tableau 3). Selon [9], cet indice est excellent quand sa valeur $\geq 0,81$; bon lorsqu'il est compris entre $0,80 \leq \text{Kappa} \leq 0,61$; cet indice est modéré quand son chiffre se situe entre 0,60 et 0,21; il est mauvais avec une valeur comprise entre 0,20 et 0,0 et très mauvais avec un chiffre inférieur à 0,0. De ce qui précède, on peut dire que la classification réalisée sur l'image de la zone d'étude est valide. Les unités présentant les plus grandes précisions de classification sont la savane arborée et arbustive (100%) et la mosaïque de cultures et jachères (99,58%). Celles les moins précises dans la classification sont la forêt claire (70,37%) et la savane boisée (87,69%), tableau 4. Les plus importantes erreurs de commission (28,97%) et d'omission (29,63%) sont remarquées sur la forêt claire alors que les plus faibles se retrouvent sur l'eau et la savane arborée et arbustive.

Tableau 3 : Matrice de confusion

N°	Classes d'occupation du sol	Eau de Surface	Agglomérations	Forêt dense	Forêt claire	Savane boisée	Savane arborée et arbustive	Mosaïque de cultures et jachères	Sols dénudés	Zone Inondable	Total
0	Unités non classées	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Eau de surface	712	0	0	0	0	0	0	0	713	713
2	Agglomérations	4	335	0	0	0	0	1	4	344	344
3	Forêt dense	0	0	267	29	0	0	0	0	296	296
4	Forêt claire	0	1	28	76	2	0	0	0	107	107
5	Savane boisée	0	0	2	3	57	0	0	0	62	62
6	Savane arborée et arbustive	0	2	2	0	4	61	0	0	69	69
7	Mosaïque de cultures et jachères	0	0	0	0	2	0	238	3	243	243
8	Sols dénudés	0	21	0	0	0	0	0	276	297	297
9	Zone inondable	4	0	1	0	0	0	0	0	106	106
10	Total	720	359	300	108	65	61	239	283	2237	2237

Source : Photo- interprétation par classification assistée d'image

Tableau 4 : Pourcentage des précisions obtenues sur chaque unité d'occupation du sol

N°	Classes d'occupation du sol	Eau de Surface	Agglomérations	Forêt dense	Forêt claire	Savane boisée	Savane arborée et arbustive	Mosaïque de cultures et jachères	Sols dénudés	Zone Inondable	Total
0	Unités non classées	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	Eau de surface	98,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	31,87
2	Agglomérations	0,56	93,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	1,41	0,00	15,38
3	Forêt dense	0,00	0,00	89,00	26,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,23
4	Forêt claire	0,00	0,28	9,33	70,37	3,08	0,00	0,00	0,00	0,00	4,78
5	Savane boisée	0,00	0,00	0,67	2,78	87,69	0,00	0,00	0,00	0,00	2,77
6	Savane arborée et arbustive	0,00	0,56	0,67	0,00	6,15	100,00	0,00	0,00	0,00	3,08
7	Mosaïque de cultures et jachères	0,00	0,00	0,00	0,00	3,08	0,00	99,58	1,06	0,00	10,86
8	Sols dénudés	0,00	5,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	97,53	0,00	13,28
9	Zone inondable	0,56	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	99,02	4,74
10	Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100

Source : Photo- interprétation par classification assistée d'image

3.2 CARTOGRAPHIE ET ANALYSE DE L'OCCUPATION DU SOL

La classification réalisée a été vectorisée, soumise à la vérité terrain et éditée pour obtenir une carte (figure 3). L'analyse de la carte permet de retenir ce qui suit :

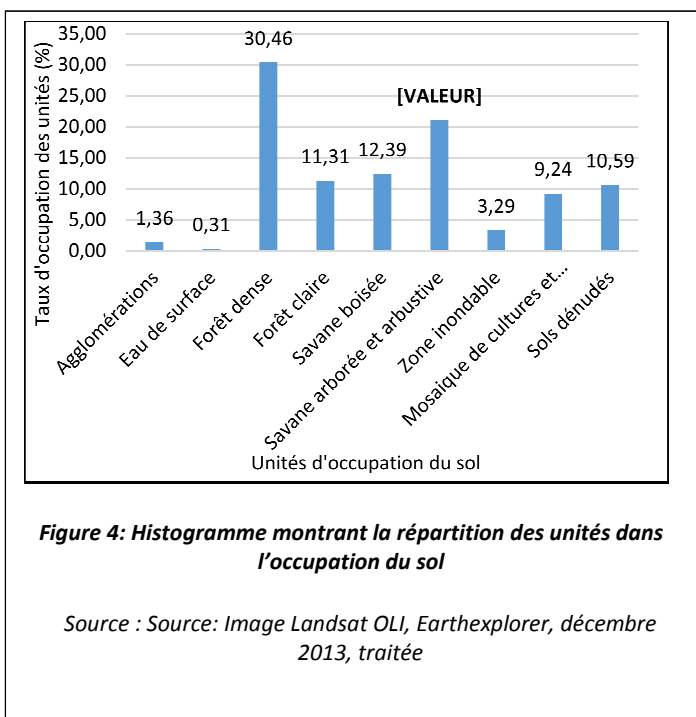
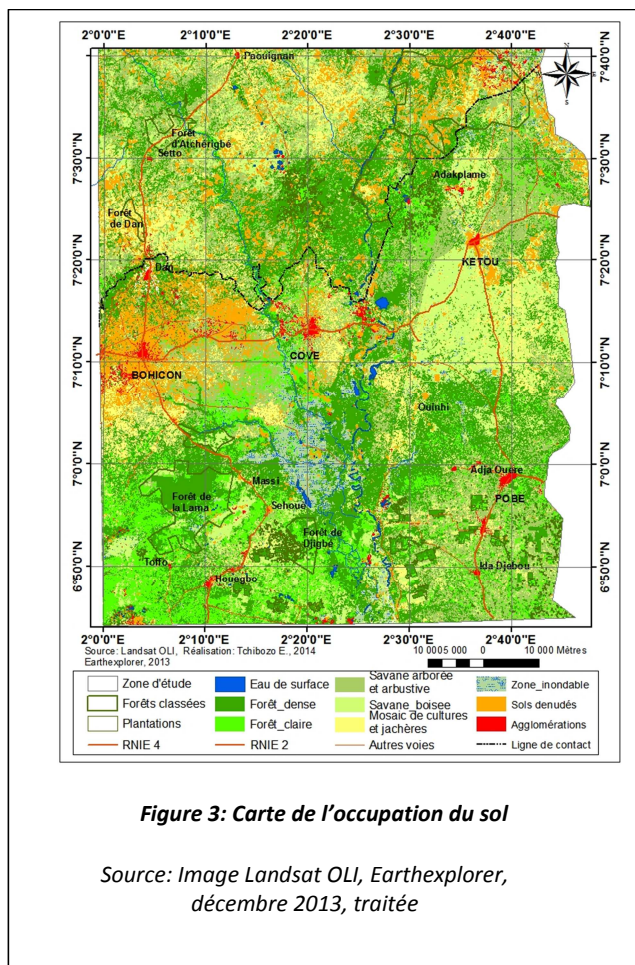
Dans la zone d'étude, l'occupation du sol est composée de forêt dense (30,46%), de forêt claire (11,31%), de savane boisée (12,39%), de savane arborée et arbustive (21,06%), d'eau (0,31%), d'agglomérations (1,36%), de mosaïque de cultures et jachères (9,24%), de sols dénudés (10,59%) et de zone inondable (3,29%). Le taux global de couverture de la végétation est évalué à 75, 21%. Il est inégalement réparti entre la forêt dense qui représente 40, 50% de cette valeur, la forêt claire 15,03%, savane arborée et arbustive 28,00% et la savane boisée 16,47%.

Au Sud, la continuité de la végétation est interrompue par des poches de sols dénudés, de mosaïque de cultures et jachères, d'agglomérations et de plantations. Cette dernière formation présente des formes régulières visibles au sud – est et au sud-ouest sur les berges de la vallée de l'Ouémé. Au centre, un polygone de zone inondable se distingue aisément dans le paysage plus humide de la vallée de l'Ouémé. Les sols dénudés et les champs de cultures et jachères occupent une partie des forêts classées et de la forêt-galerie, particulièrement au sud-ouest entre les villages de Massi et Houegbo et dans la forêt classée de la Lama. Une zone de plantations riveraine de la forêt de Djigbé a déjà franchi les limites établies par son classement.

Au Centre, de vastes espaces dénudés structurent le paysage. Certains sont occupés par une mosaïque de cultures et jachères qui se développent autour des agglomérations de Bohicon, de Cove et de Kétou. Au Centre – ouest, à proximité du village de Dan et au centre, au-dessus de Cove, une ceinture de végétation qui chevauche la ligne de contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin contraste avec les sols dénudés. Cette situation laisse place à une végétation clairsemée sous une faible pression des plantations, mais importante des cultures et jachères au Nord – est de la ligne de contact. Dans cette région, les forêts classées sont menacées par des campements de colons agricoles et de Peuls.

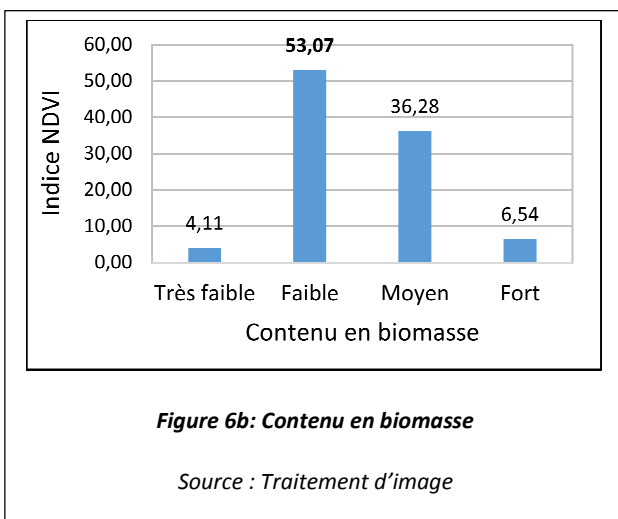
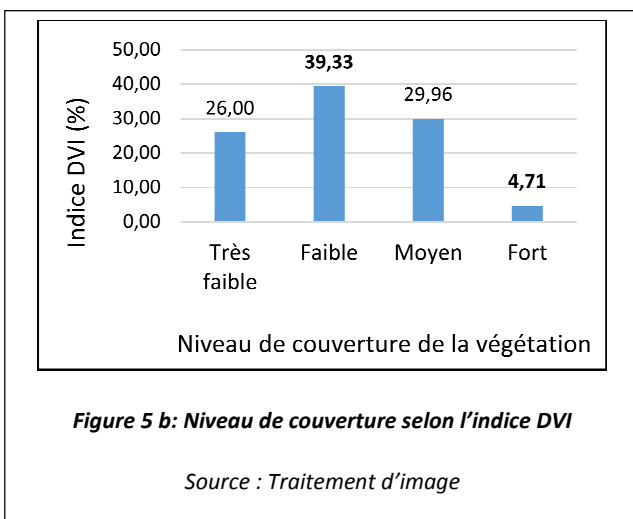
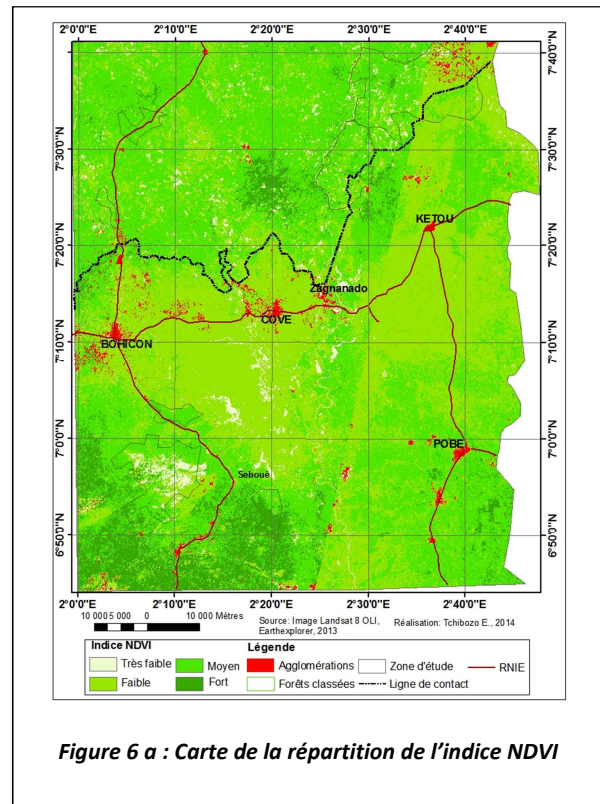
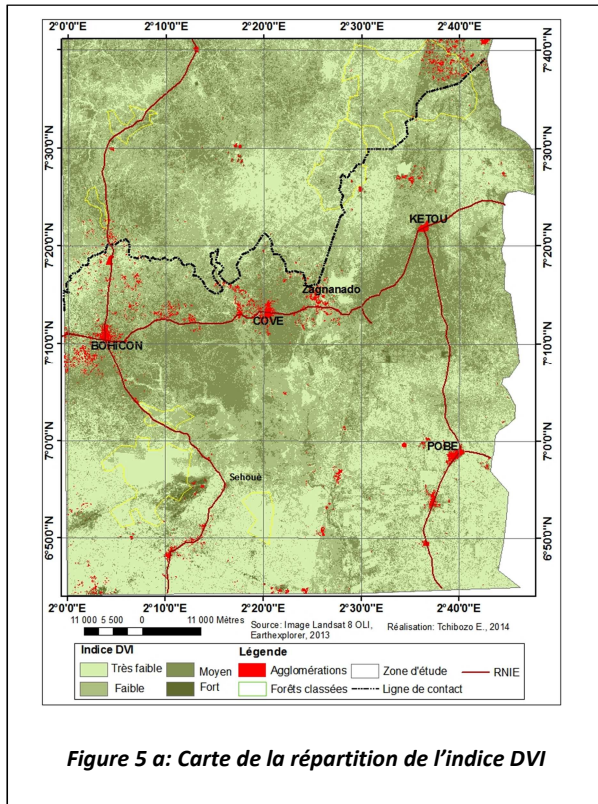
Au nord – ouest, autour du village de Paouignan, la végétation ne présente que des reliques de forêt dense et de forêt claire. Les forêts classées de Dan et d'Atchéribé, riveraines de la Route Nationale Inter – État N°2 (RNIE2) sont presque des sols nus.

Ainsi, de l'analyse de l'occupation du sol, il ressort qu'au centre de la zone d'étude, sur le bassin sédimentaire à proximité de la ligne de contact avec le socle, et au Nord - ouest sur le socle cristallin à proximité des forêts classées d'Atchéribé et de Dan, les surfaces dénudées sont relativement importantes. Le risque de désertification et la perte de végétation sont plus visibles. Cette situation inquiétante doit être étudiée pour évaluer l'état de la végétation afin de caractériser les zones dégradées.



3.3 CARTOGRAPHIE DES INDICES DE VEGETATION ET DETECTION DES ZONES DEGRADEES DE VEGETATION

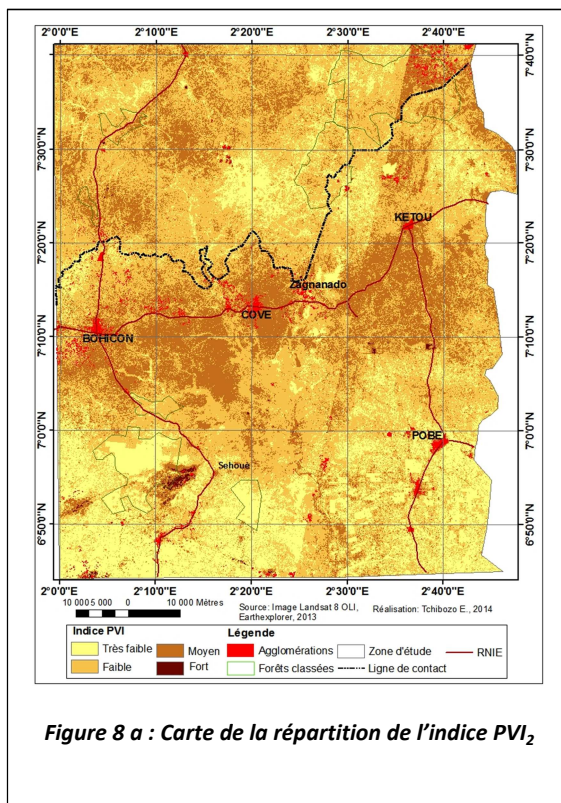
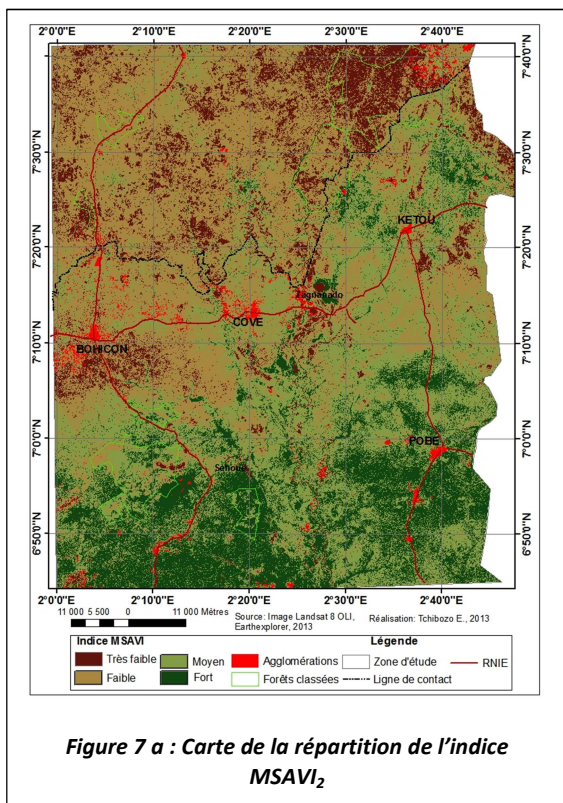
Les indices de végétation mesurent essentiellement la différence de réponse spectrale de la végétation et des sols dans la bande rouge (R) qui est liée à l'absorption de la lumière par la chlorophylle et la bande proche infrarouge (PIR) qui représente la densité de la végétation verte. Dans le présent travail, plusieurs indices sont calculés pour identifier les zones dégradées de végétation. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures ci-dessous.

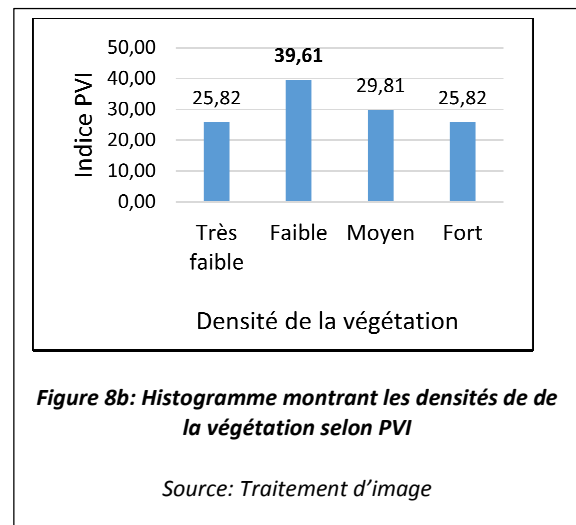
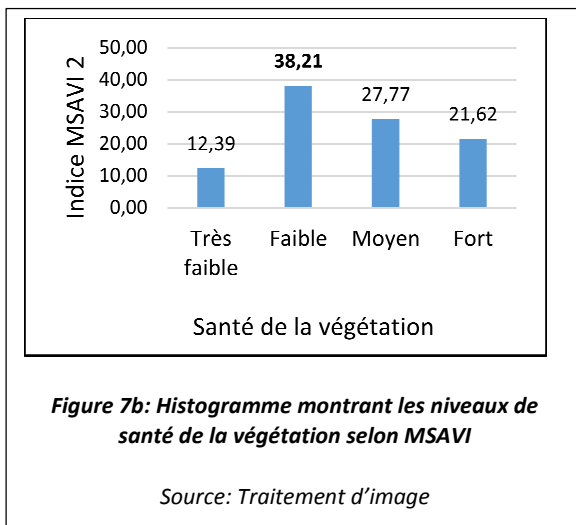


La figure 5a présente la carte de l'indice DVI. Il montre les différents niveaux de couverture de la végétation. L'analyse de sa répartition spatiale indique que les couvertures très faibles occupent 26,00% de la zone d'étude. Sur la carte de l'occupation du sol et sur le terrain, elles correspondent aux cultures et jachères, aux plantations des berges de la vallée de l'Ouémé et celles à proximité de la forêt classée de la Lama, au sud-ouest de la zone d'étude. Au centre, ce sont les savanes autour de la ligne de contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin, et plus particulièrement la savane arborée et arbustive et la savane boisée au Nord – ouest, au-dessus de la forêt classée d'Atchéribé qui sont concernées. Les faibles couvertures de végétation dominent la zone d'étude avec 39,33% d'occupation (figure 5b). Elles représentent la forêt dense et la forêt claire dégradées autour et à l'intérieur de la forêt classée de la Lama et à Houegbo, de même que la forêt-galerie au sud des vallées zou et de l'Ouémé. Cette faible couverture est également présente au centre de la zone d'étude, avec une ceinture de la forêt dense, la forêt claire et la savane arborée et arbustive autour de la ligne de contact entre le sédimentaire et le cristallin. On la remarque également au Nord-ouest, autour de la forêt classée d'Atchéribé et au Nord – est autour du village d'Atakplamè et à l'intérieur des forêts classées de Dogo et Kétou. Les couvertures moyennes représentent 29,96%

l'occupation. Elles correspondent à la forêt claire et aux savanes autour de Bohicon, Cove et Kétou. Ce niveau de couverture chevauche également la ligne de contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin, et est inégalement réparti autour des forêts classées de Dan et d'Atchéribé au Nord –ouest et dans les forêts classées de Dogo et Kétou au Nord – est. Les fortes couvertures de végétation ne représentent seulement que 4,71% dans l'occupation. Sur le terrain, elles caractérisent la forêt dense à l'intérieur de la forêt classée de la Lama au Sud –est, celle de Bohicon, Cove et Kétou au centre et dans la vallée du zou au Nord – ouest. Les forêts galerie du Sud-ouest et du Sud – est de la zone d'étude sont également couvertes par cette forêt dense.

Sur la figure 6a, l'indice normalisé de végétation (NDVI) confirme l'importance relative du faible taux de couverture de la zone d'étude et apporte une précision par rapport à la végétation verte c'est-à-dire, le contenu en biomasse. La biomasse très faible qui indique une mauvaise santé de la végétation représente 4,11% de l'occupation. Sur le terrain, elle correspond à la forêt dense, la forêt claire et les savanes très dégradées à l'intérieur de la forêt classée de la Lama au Sud-ouest et dans les vallées du zou et de l'Ouémé ainsi qu'à Zagnanado au Centre. La faible biomasse suit la même tendance que la faible couverture (figure 5b) et représente le plus important taux de l'occupation (53,07%), graphique 6b. Sur la carte de l'occupation du sol, elle représente la forêt dense dégradée, identifiée sur les limites de la forêt classée de la Lama au Sud – ouest, et la forêt claire au Sud-est sur la berge de la vallée de l'Ouémé. Ce faible niveau de biomasse est également remarqué au centre de la zone d'étude, sur le bassin sédimentaire en dessous de la ligne de contact entre le sédimentaire et le cristallin, et au Nord –est autour des forêts classées de Dan et d'Atchéribé. La biomasse moyenne représente 36,28% dans l'occupation, caractérise une végétation moyennement dégradée. Elle est localisée au Sud, autour des forêts classées de la Lama et de Djigbé, au sud –est autour de Pobè et d'Adja - Ouerè, à l'est de Bohicon au Centre et sur le socle au-dessus de la ligne de contact entre le sédimentaire et le cristallin au nord de la zone d'étude. La biomasse la plus élevée qui indique une végétation verte en bonne santé, n'occupe seulement que (6,54%). On la trouve plus au Sud –ouest de la zone d'étude dans les agglomérations de Toffo et Houegbo, au Centre-ouest sur et au-dessus de la ligne de contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin et à l'ouest du village d'Atakplamè. Ce niveau de couverture est moins visible au Nord-ouest, au-dessus de la forêt classée d'Atchéribé et au Nord – est à l'intérieur des forêts classées du Dogo et de Kétou.





La figure 7a présente la carte de du MSAVI. Cet indice permet d'apprécier la santé de la végétation. La santé très faible de la végétation représente 12,39% de l'occupation et indique une végétation très dégradée empreinte d'importantes surfaces de sols dénudés (figure 7b). Sur la carte d'occupation du sol, elle correspond à la savane arborée et arbustive, les cultures et plantations et la forêt claire à l'intérieur de la forêt classée de la Lama au Sud – ouest de la zone d'étude, au centre à Bohicon, Zagnanado et Kétou. On la retrouve également sur le socle cristallin, au centre autour et au-dessus de la ligne de contact entre le sédimentaire et le cristallin et au Nord – est, autour des forêts classées de Dogo et Kétou. La santé faible caractérise une végétation dégradée qui occupe 38,21% de la zone d'étude. Elle est relativement moins localisée et domine le paysage. Sur le terrain, elle correspond à la forêt claire, la savane arborée et arbustive, les cultures et plantations sur le bassin sédimentaire au Sud, et aux savanes, au Nord sur le socle cristallin. La santé moyenne de la végétation représente 27,77% et indique une végétation clairsemée et moyennement dégradée. Au centre de la zone d'étude, sur le bassin sédimentaire, autour de Bohicon, Zagnanado et Kétou, elle est constituée de la forêt dense et de la forêt claire. Les plus fortes valeurs du MVAVI occupent 21,62% de de la zone d'étude et caractérisent, une végétation dense verdoyante et en bonne santé. Elle est composée de la forêt dense, la forêt claire au sud – ouest, et celles autour des forêts classées de la Lama et de Djigbé, au sud-est à Pobè. On la trouve également au Centre de la zone d'étude, autour de Kétou sur le bassin sédimentaire et dans les zones humides au sud des vallées du zou et de l'Ouémé.

La figure 8a expose la carte du PVI. L'analyse de la répartition spatiale de cet indice montre que la très faible densité de la végétation représente 25,82% dans l'occupation (figure 8b). Sur la carte d'occupation du sol et le terrain, elle correspond aux cultures et jachères, à la forêt claire dégradées et aux savanes qui sont à l'intérieur des forêts classées de la Lama et celle de Djigbé, autour des villages de Toffo, Houegbo et Sehouè, au sud-ouest. Cette très faible densité est également visible autour des plantations de Pobè et Ouinhi et sur les savanes au centre – ouest, réparties de part et d'autre de la ligne de contact, au nord – est de Kétou et dans la vallée de l'Ouémé. La végétation de faible densité occupe 39,61% de l'occupation. Elle domine la zone d'étude et correspond surtout à la savane arborée et arbustive, au sud de la vallée de l'Ouémé, autour de la forêt classée de la Lama et au Sud - est autour du village de Ouinhi. Sur le socle, particulièrement au centre – ouest de la zone d'étude, au-dessus de Bohicon et au Nord – est autour des forêts classées de Dan et d'Atchéribé, la faible densité est également remarquée. La densité moyenne de la végétation représente 29,81% de l'occupation et correspond à la savane boisée au centre de la zone d'étude. Ces formations sont plus visibles autour de Bohicon, Cove, Zagnanado et Kétou et au Nord – ouest, autour des forêts classées de Dan et d'Atchéribé. Au nord – est, la densité moyenne est visible autour du village d'Atakplamè et à l'intérieur de la forêt classée de Dogo. La forte densité quant à elle, représente 25,82% dans l'occupation et correspond à la forêt dense et la claire, concentrée au Sud à l'est de la forêt classée de la Lama et à Adja – Querè, dans les zones inondables de la vallée de l'Ouémé, la foresterie urbaine de Bohicon, Cove, Kétou et les formations saxicoles du Nord – ouest autour de la forêt classée de Dan et de la forêt classée d'Atchéribé, dans les villages de Paouignan et aussi au Nord-est dans la forêt classée du Dogo et à d'Atakplamè.

Ainsi, la zone de transition entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin est caractérisée par une faible couverture de la végétation contenant une biomasse, une santé et une densité faibles. Cette végétation inégalement répartie montre une

faible couverture des cultures et jachères, des plantations et de la savane boisée et une très faible couverture de, la forêt claire et de la savane arborée et arbustive. Ces formations sont caractérisées par une biomasse et une densité très faible remarquées à l'intérieur de la forêt classée de la Lama et dans les vallées du zou et de l'Ouémé au Sud, à Zagnanado au Centre et sur le socle autour des forêts classées de Dan et d'Atchérigbé, au Nord – est de la de la zone d'étude. Cette situation demande une appréciation des niveaux de dégradation de la végétation.

3.4 ÉVALUATION DE LA DEGRADATION LOCALISEE DE LA VEGETATION ET IDENTIFICATION DE SES FACTEURS

La dégradation de la végétation est localisée. Plusieurs facteurs sont à la base de cette situation.

3.4.1 ÉVALUATION DE LA DEGRADATION LOCALISEE DE LA VEGETATION

La figure 9a et 10 a montrent respectivement les niveaux de dégradation dans la zone d'étude et la végétation très dégradée. La lecture de ces cartes permet de retenir les informations suivantes :

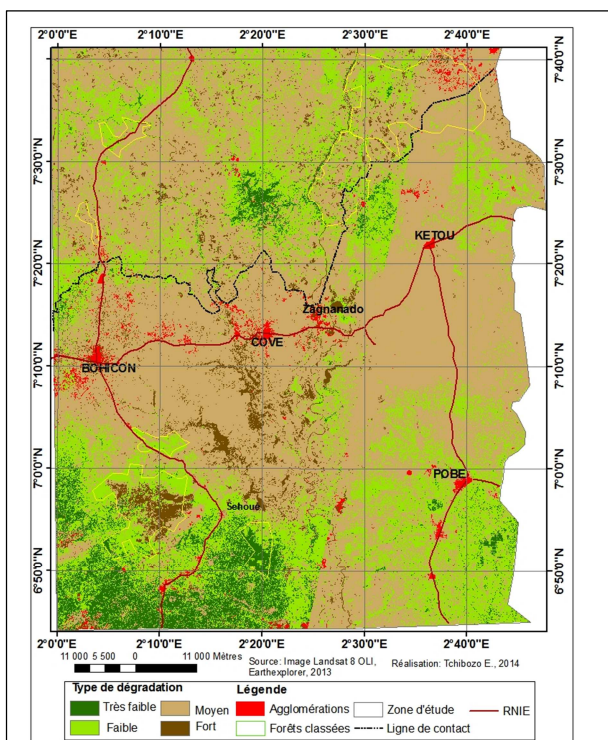


Figure 9a : Carte des niveaux de dégradations

Source : Traitement d'image

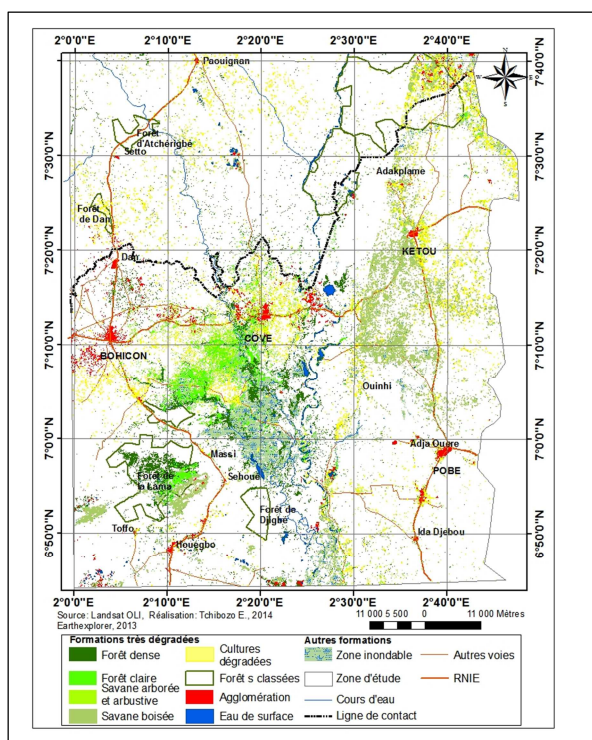
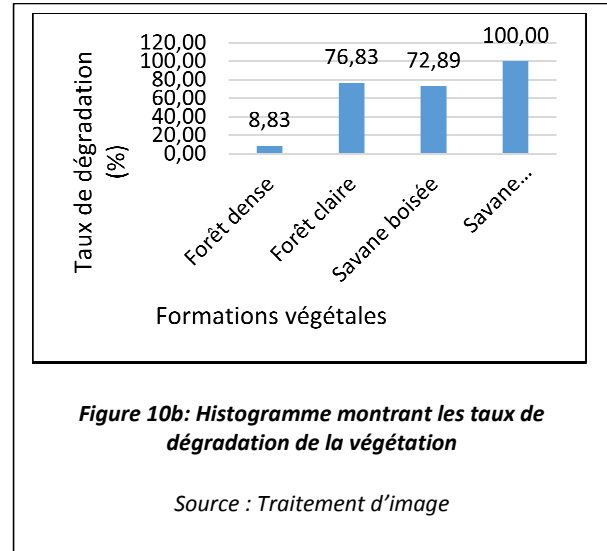
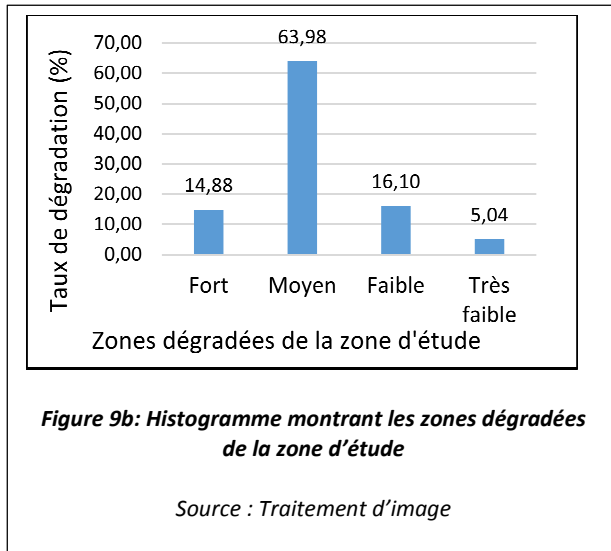


Figure 10 a: Carte de la végétation dégradée

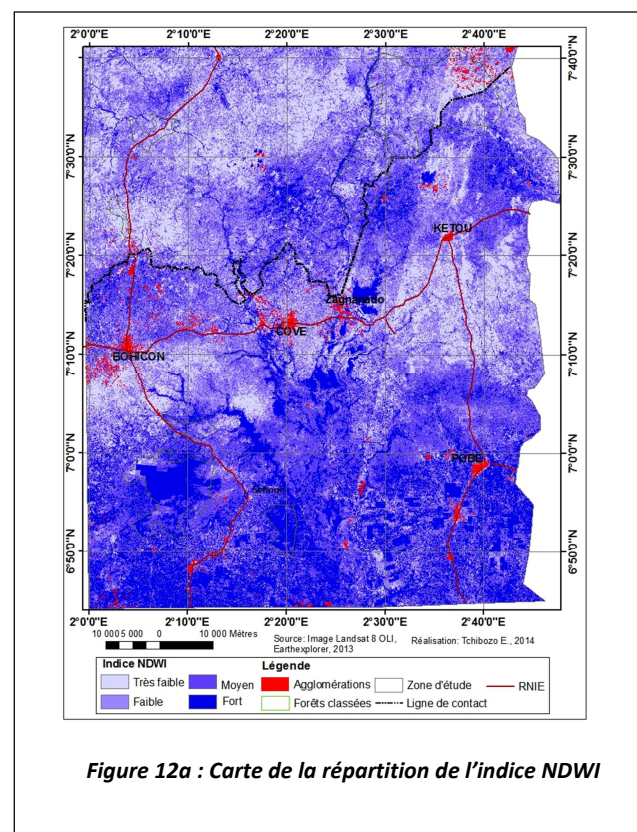
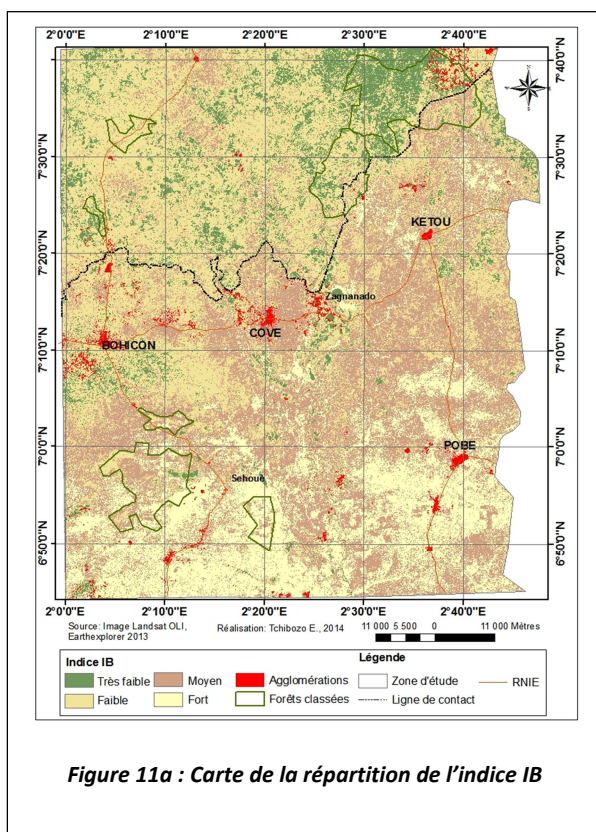
Source : Traitement d'image

La dégradation occupe la zone d'étude à des niveaux variés. On distingue les zones de dégradation forte, moyenne, faible et très faible. La zone de dégradation moyenne est la plus importante de l'occupation (63,98%), figure 9b. Le taux le plus élevé de la dégradation des formations végétales est variable (figure 10a). La forte dégradation représente 8,89% de la forêt dense, 76,83% de la forêt claire, 72,89% de la savane boisée et 100% de la savane arborée et arbustive (figure 10b).



3.4.2 IDENTIFICATION DES FACTEURS DE DÉGRADATION

Dans le présent travail, la pression anthropique et le contenu en eau de la végétation seront étudiés à travers des indices spécifiques. Les résultats obtenus sur l'indice de brillance et l'eau sont présentés ci-dessous.



La figure 11a représente la carte de l'indice de brillance. Elle montre les niveaux de pression anthropique sur le paysage. L'analyse de sa répartition spatiale indique que la forte pression n'occupe que 11,89% de la zone d'étude (figure 10b). Elle correspond aux zones de forte pression anthropique, identifiées au Sud-ouest de la zone d'étude, autour des forêts classées de la Lama et celle de Djigbé, au Sud-est, autour de Pobè et au centre autour de Zagnanado. La forte pression pourrait

s'expliquer par les multiples villages et agglomérations autour des forêts classées. La pression moyenne occupe 35,56% de la zone d'étude. Elle est perçue au Sud – est, au-dessus de la forêt classée de la Lama et celle d'Agrimè, et au centre de la zone d'étude, autour de Cove et Kétou, ainsi qu'au Nord à Paouignan. La pression faible constitue 10,39% et est remarquée au Centre de la zone d'étude sur le bassin sédimentaire à Bohicon et au Nord, sur le socle cristallin au-dessus de la ligne de contact. La très faible pression est identifiée au centre de la zone d'étude, sur le bassin sédimentaire à Bohicon et Zagnanado, et au Nord, sur le socle à l'est des forêts classées de Dogo et Kétou.

La figure 12a représente le NDWI. Cet indice mesure le contenu en eau de la végétation et donc le stress hydrique. La végétation qui contient une forte quantité d'eau occupe 23,78% de la zone d'étude (figure 11 b). Elle est localisée dans les forêts classées et forêt-galerie et les plantations du sud. Au Sud –ouest, elle est répartie autour et à l'intérieur des forêts classées de la Lama et de Djigbé, dans les vallées du zou et de l'Ouémé sur les plantations et au Sud – est, à Zagnanado. Sur le socle, cette végétation humide est remarquée au-dessus de la ligne de contact et plus particulièrement, au Nord – est à l'intérieur des forêts classées de Dogo et Kétou. La végétation qui contient une quantité moyenne d'eau domine le paysage avec 32,79% d'occupation. On la trouve au Sud –est autour des plantations, autour des agglomérations de Bohicon, Cove et Kétou au Centre et au Nord –ouest, autour de la Route Nationale Inter États (RNIE). La végétation contenant une faible quantité d'eau représente 27,84% de l'occupation. Elle est relativement distribuée au centre sur le bassin sédimentaire à Bohicon, Cove et Kétou et au nord de la zone d'étude sur le socle cristallin. La très faible quantité d'eau constitue 15,58% de la zone d'étude. On la trouve au Centre sur le bassin sédimentaire et au Nord-est sur le socle.

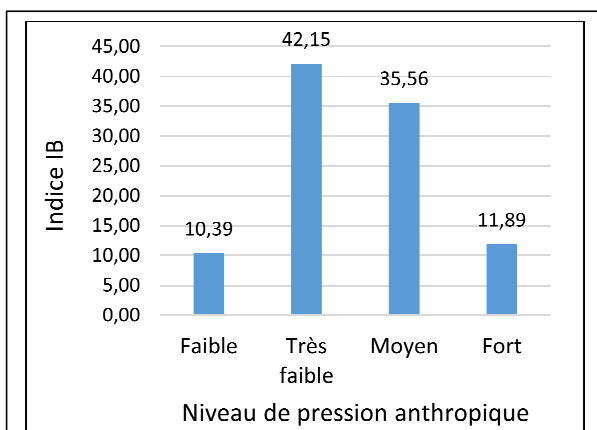


Figure 11b: Histogramme montrant les niveaux de pression anthropique

Source : Traitement d'image

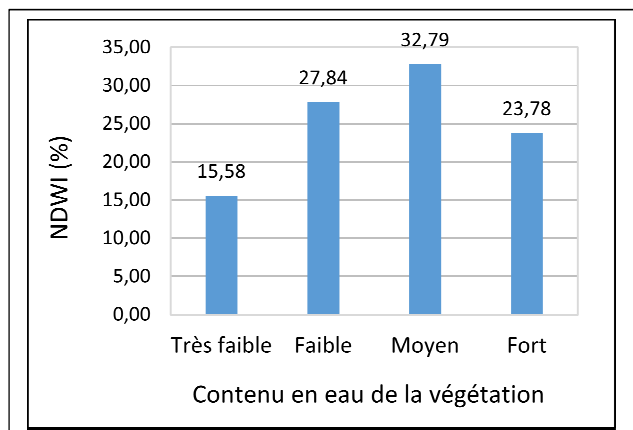


Figure 12b: Histogramme montrant le contenu en eau de la végétation

Source : Traitement d'image

4 DISCUSSIONS

Le présent travail vise comme objectif, d'évaluer la dégradation de la végétation dans la zone de transition entre le sédimentaire et le cristallin, au centre Bénin. Les résultats obtenus montrent que la zone d'étude est caractérisée par un taux global de couverture de la végétation relativement élevé (75, 21%), inégalement réparti entre la forêt dense (40, 50%), la forêt claire (15,03%), savane arborée et arbustive (28,00%) et la savane boisée (16,47%). Malgré cela, de vastes surfaces dénudées (10,59%) sont remarquées au centre, sur le bassin sédimentaire à proximité de la ligne de contact avec le socle cristallin, au Nord – ouest, sur le socle autour des forêts classées d'Atchérigbé et de Dan. Le risque de désertification et la perte de végétation sont plus visibles. De ce qui précède, on peut affirmer que la végétation est inégalement répartie dans la zone d'étude et que la première hypothèse de travail est vérifiée.

La végétation est dégradée à des niveaux variés. Le traitement d'image à partir des indices de végétation a montré qu'elle est caractérisée par une faible couverture contenant une faible biomasse et présentant une santé et une densité faibles. Cette situation est particulièrement constatée sur les cultures et jachères, les plantations, la savane boisée, la forêt dense dégradée, la forêt claire, la savane arborée et arbustive et la savane boisée. Ce résultat permet d'affirmer que la dégradation de végétation est perçue à partir des indices de végétation et que la deuxième hypothèse est aussi vérifiée.

La forte dégradation de la végétation est identifiée au sud de la zone d'étude dans la forêt classée de la Lama, dans la forêt-galerie du zou, de l'Ouémé et à Zagnanado. Au Nord, sur le socle cristallin, au-dessus de la ligne de contact, elle est plus localisée sur les formations saxicoles et constitue un nuage de point qui est relativement concentré au Nord – est à proximité des forêts classées de Dogo et Kétou. Il correspond aux sols dénudés, aux reliques de forêt dense et forêt claire dégradées et à la savane boisée. La forte pression sur la végétation est non seulement au Sud, mais aussi au centre de la zone d'étude. À partir de ce qui précède, on peut confirmer la troisième hypothèse selon laquelle, la dégradation localisée de la végétation est inégalement répartie.

Les facteurs de la dégradation de la végétation sont variés. La pression anthropique et le contenu en eau de la végétation occupent une place importante. La forte pression anthropique est identifiée au sud-ouest de la zone d'étude, alors que la très faible pression est au centre, sur le bassin sédimentaire et au Nord, sur le socle. La végétation contenant une forte quantité d'eau se trouve dans les forêts classées, la forêt-galerie et les plantations du sud. La très faible quantité d'eau est au centre sur le bassin sédimentaire et au Nord-est, sur le socle. De ce qui précède, on peut dire que la quatrième hypothèse du travail est aussi vérifiée.

Les résultats ci-dessus présentés corroborent les travaux de plusieurs auteurs. En effet, selon Oloukoi, 2012, L'exploitation abusive des habitats et de la diversité biologique..., constituent les principales causes de la structure actuelle des paysages en zone soudano-guinéenne de l'Afrique de l'Ouest. En 2010, le rapport du Programme de Gestion des Forêts et Terroirs Riverains (PGFTR) avait montré que la forêt classée d'Abomey (au centre du Bénin) est marquée par une forte emprise humaine et présente des signes de dégradation du couvert forestier. En 2012, une analyse prospective sur la dynamique de l'occupation du sol à l'échéance 2050, réalisée par l'analyse spatiale et le SIG, a montré une régression effrénée des formations naturelles forestières du Bénin au profit des unités anthropisées. En 2013, dans sa thèse sur l'Anthropisation des paysages au Bénin: dynamique, fragmentation et développement agricole, [6] affirmé que dans la zone soudano - guinéenne du Bénin, les mosaïques de forêts sont soumises à de multiples formes de dégradation.

Il est important de noter que malgré son efficacité pour identifier les zones dégradées de végétation, même normalisé, l'indice NDVI reste sensible à la géométrie de vue et d'illumination, plus spécialement dans les régions où la densité de végétation est faible et où la présence de sol est importante [17]. Le NDVI 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. C'est pourquoi, en plus du NDVI, il faut rechercher d'autres indices permettant de minimiser l'effet du sol nu sur la réponse spectrale de la végétation. Dans le présent travail, ce sont les indices MSAVI et PVI qui sont utilisés.

Le SAVI modifié (MSAVI - Modified SAVI) permet de minimiser l'effet des sols nus. Il est plus sensible à la présence de végétation verte que le SAVI et autres indices de végétation [15]. Mais son résultat ne permet pas de supprimer complètement la saturation en région de végétation dense. C'est pourquoi l'indice PVI a été aussi calculé. Plusieurs études sur l'indice PVI ont montré que les isolignes de recouvrement générées par cet indice se «ramassent» sur elles-mêmes pour les plus hauts taux de recouvrement, au point de définir un «point de convergence» des trajectoires radiométriques dans les canaux rouge et proche infrarouge [18]. Ces trajectoires radiométriques décrivent l'accroissement de pourcentage de recouvrement du couvert végétal pour un type donné de sol en arrière-plan. C'est pourquoi dans la présente étude, la moyenne $(MSAVI + PVI)/2$ est utilisée dans pour évaluer la dégradation localisée de la végétation.

5 CONCLUSION

Le présent travail a permis d'identifier les zones dégradées de végétation à partir des indices de végétation. Les résultats obtenus montrent une forte couverture de la végétation (75, 21%), inégalement réparti entre la forêt dense (40, 50%), la forêt claire (15,03%), savane arborée et arbustive (28,00%) et la savane boisée (16,47%).

La très faible couverture de végétation occupe 26,00% de la zone d'étude et la forte, 4,71%. Sur le terrain, la très faible couverture est remarquée au sud-ouest de la zone d'étude, sur les cultures et jachères, les plantations des berges de la vallée de l'Ouémé et celles à proximité de la forêt classée de la Lama. Au centre et au nord – ouest, ce sont les savanes autour de la ligne de contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin, et plus particulièrement la savane arborée et arbustive et la savane boisée au-dessus de la forêt classée d'Atchérigbé, qui sont concernées. La forte couverture caractérise la forêt dense à l'intérieur de la forêt classée de la Lama au Sud –est, celle de Bohicon, Cove et Kétou au centre et dans la vallée du zou au Nord – ouest. Les forêts galerie du Sud-ouest et du Sud – est de la zone d'étude sont également couvertes par cette forêt dense.

L'occupation du sol est composée de plusieurs unités à des taux variés : la forêt dense (30,46%), la forêt claire (11,31%), la savane boisée (12,39%), la savane arborée et arbustive (21,06%), l'eau (0,31%), les agglomérations (1,36%), la mosaïque de cultures et jachères (9,24%), les sols dénudés (10,59%) et la zone inondable (3,29%). Au centre de la zone d'étude, sur le

bassin sédimentaire à proximité de la ligne de contact avec le socle, et au Nord - ouest sur le socle cristallin à autour des forêts classées d'Atchérigbé et de Dan, les surfaces dénudées sont relativement importantes. Le risque de désertification et la perte de végétation sont plus visibles. La forte dégradation occupe 14,88% de la zone d'étude. Elle est identifiée au Sud dans la forêt classée de la Lama, dans la forêt- galerie du zou, de l'Ouémé et à Zagnanado. Au Nord, sur le socle cristallin, au-dessus de la ligne de contact la forte dégradation plus localisée sur les formations saxicoles, constitue un nuage de point qui est relativement concentré au Nord –est à proximité des forêts classées de Dogo et Kétou. Il correspond aux sols dénudés, aux reliques de forêt dense et forêts claires dégradées et à la savane boisée. La très faible dégradation représente seulement 5,04% de l'occupation. On la trouve au Sud-ouest, sur la forêt dense autour de la forêt classée de Djigbé, à Houegbo et à Toffo et au Nord-est sur les formations saxicoles de la vallée de l'Ouémé et d'Atakplamè. Les facteurs de la dégradation de la végétation sont variés. La pression anthropique est plus forte au sud-ouest de la zone d'étude, alors qu'elle est relativement très faible au centre, sur le bassin sédimentaire et au Nord, sur le socle. Le contenu en eau de la végétation est relativement important dans les forêts classées, la forêt-galerie et les plantations du sud, et très faible dans les formations du centre sur le bassin sédimentaire et au Nord-est sur le socle cristallin.

Les résultats obtenus par ce travail constituent une contribution à la localisation des zones dégradées de végétation. Ils permettront de donner une alerte précoce à la désertification afin d'améliorer la gestion des écosystèmes forestiers. Compte tenu de la surface considérée, des études de terrain plus localisées doivent être entreprises pour mieux maîtriser la dégradation localisée de la végétation.

REFERENCES

- [1] OIBT, Critères et indicateurs révisés de l'OIBT pour l'aménagement durable des forêts tropicales, Modèle de rapport sur les C&I inclus, Série OIBT: Politique forestière n° 15. Yokohama, 2005.
- [2] G. P. ASNER, D.E KNAPP, E.P. Broadbent, P. Oliviera, M. Keller, and J. Silva, "Selective logging in the Brazilian Amazon". *Science* 310: 480-482, 2005.
- [3] LUND, H.G., What Is a Degraded Forest, Forest Information Services. Gainesville, VA, USA, 2009. <http://home.comcast.net/~gyde/2009forestdegrade.doc>.
- [4] FAO, Actes de la Troisième réunion d'experts sur l'harmonisation des définitions forestières à l'usage des différentes parties prenantes, 17-19 janvier 2005. OMM//GIEC/CIFOR/FAO/IUFRO /PNUE. Rome, 2005. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/j4959e/j4959e.pdf>
- [5] PGFTR, Etude de la diversité biologique dans les périmètres de reboisement de Kilir et d'Abomey, appartenant à l'aire d'intervention du PGFTR au Bénin, Rapport final, Laboratoire d'écologie appliquée, Bénin, 2010,110p.
- [6] MAMA A., Anthropisation des paysages au Bénin: dynamique, fragmentation et développement agricole, Thèse de l'Université Libre de Bruxelles, Université d'Europe, Bruxelles, 2013,198p.
- [7] W.T. LIU, and F.N. KOGAN, "Monitoring Regional Drought Using the Vegetation Condition Index", *International Journal of Remote Sensing*, vol.17(14): 2761-2782pp, 1996.
- [8] P. VINÉ, "Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems", *Proceedings of Rabat Symposium S3, IAHS Publ. no. 242, April 1997*, pp.
- [9] J.R. LANDIS, G.G. KOCH, "The Measurement of Observer Agreement for Categorical DATA", *Biometrics*, n°33, 159-174pp, 1974.
- [10] D. J RAY and A.R. HUETE, "Interpreting vegetation indices, Preventive veterinary medicine", n°11, 185-200 pp, Elsevier Sciences Publishers, B.V, Amsterdam, 1991.
- [11] J.E. COLWELL, "Grass canopy bidirectional spectral reflectance", *Proceedings of the 9th Int. Symposium on remote sensing of environment*, 1974, 1061-1085pp. 1974
- [12] A.J. RICHARDSON and WIEGAND C.L., "Distinguishing vegetation from soil background in formation", *Photogramm. ENG. Remote sensing*, vol. 43: 1541-1552pp, 1977.
- [13] ROUSE, J.W. Jr., HAAS, R.H., DEERING, D.W., SCHELL, J.A. and HARLAN J.C., *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD., 1974, 371p.*
- [14] F. BARET, G. GUYOT and D. MAJOR, "TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation", 12 th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, pp.4, Vancouver, Canada, 10- 14 July 1989. Cited in BARET and GUYOT, 1991.
- [15] J. Qi, A. CHEHBOUNI, A. R.HUETE and Y. H. KERR, "A Modified Soil Adjusted Vegetation Index", *Journal Remote Sensing of Environment*, vol.48: 119-126pp, 1994.
- [16] CEMAGREF, Aide méthodologique à la caractérisation et la cartographie des interfaces habitat –forêt, 15p, 2012.
- [17] A. BANNARI, A.R. HUETE, D. MORIN and F. ZAGOLSKI, "Effets de la Couleur et de la Brilliance du sol sur les Indices de végétation", *International Journal of Remote Sensing*, n°17(10): 1885 -1906 pp, 1996.
- [18] A.R. HUETE, "A soil adjusted vegetation index (SAVI)". *Remote Sensing of Environment*, n°25: 121–136pp, 1988.