

Contribution de la télédétection et d'un SIG à la cartographie des unités de l'occupation du sol et ses changements face au problème d'inondation sur le plateau d'Allada au Bénin entre 1986-2020

[Contribution of remote sensing and GIS to the mapping of land use units and its changes in the face of the flooding problem on the Plateau of Allada in Benin between 1986 and 2020]

KPOHA Josiane Nadège^{1,3}, AKOKPONHOUE Hounnigbo Bertrand^{2,3}, OREKAN Vincent¹, and N'Guessan Bi Vami Hermann⁴

¹Department, Biodiversity and Environmental Expertise Laboratory, University of Abomey-Calavi, BP: 677 Abomey Calavi, Benin

²Laboratory of Applied Hydrology, National Water Institute (INE), University of Abomey-Calavi, 01BP. 526 Cotonou, Benin

³International Chair in Mathematical Physics and Applications (CIPMA UNESCO Chair), University of Abomey-Calavi, 072 BP. 50 Cotonou, Benin

⁴Centre Universitaire de Recherche Appliquée en Télédétection (CURAT, Université Félix Houphouët-Boigny) Abidjan-Cocody, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The objective of this study is to map the land cover units (LCU) of the Plateau of Allada from the supervised classification by the maximum likelihood method of Landsat multi-spectral images (TM 1986, ETM+ 2000 and OLI 2020) and to highlight their evolutions by analyzing the areas and the rates of change. The approach used combines image pre-processing, identification of land use unit classes, construction and execution of supervised classification by the maximum likelihood method and quantification of change. All of these treatments applied to the images, allowed us to obtain the land use maps in 1986, 2000 and 2020 with five land use classes (forest/gallery/swamp, plantation, mosaic/fallow/crops, dwellings/bare ground, and water yard). Analysis of the dynamics of the land use units from 1986 to 2020 shows a progressive trend in the area of the mosaic/crop/fallow (25.97%) and habitat/bare soil (10.51%) classes and a regressive trend in the forest/gallery/swamp (-5.82%), plantation (-0.13%) and water (-0.25%) classes. Quantification of change from 1986 to 2020 is assessed by an estimated rate of change (Tc) of -5.82% (forest/gallery/swamp); 1.38% (mosaic/fallow/crop); 2.79% (dwellings/bare ground); -0.13% (plantations) and -0.25% (watercourse). This evolution is due to the expansion of the housing/bare soil and the mosaic/fallow/crops areas. This is the result of the strong human pressure on the vegetation formations. These results constitute a decision-making tool for the sustainable management and urbanisation of the Plateau of Allada.

KEYWORDS: Land use dynamics, change detection, supervised classification, maximum likelihood, progressive tendency, regressive tendency.

RESUME: L'objectif de cette étude est de cartographier les unités d'occupation du sol (OCS) du Plateau d'Allada à partir de la classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance des images multi spectrales à multitemps de Landsat (TM 1986, ETM+ 2000 et OLI 2020) et ressortir leurs évolutions en analysant les superficies et les taux de changement.

L'approche utilisée combine le prétraitement des images, l'identification des classes d'unités d'occupation du sol, la construction et l'exécution de la classification supervisée par la méthode maximum de vraisemblance et la quantification du changement. L'ensemble de ses traitements appliqués aux images, ont permis d'obtenir les cartes d'occupation du sol en 1986, 2000 et 2020 avec cinq classes d'occupation du sol (forêts/galeries/marécage, plantation, mosaïque/jachères/cultures, habitations/sols nus, et cour eau). L'analyse de la dynamique des unités d'occupation du sol de 1986 à 2020 présente une tendance progressive des superficies des classes de mosaïques/cultures/jachères de (25.97%) et habitats/sol nu (10.51%) et une tendance régressive des classes de forêt/galerie/marécage (-5.82%), plantations (-0.13%) et eau (-0.25%). La quantification du changement de 1986 à 2020 est évaluée par un taux de changement (Tc) estimé à -5.82% (forêt/galerie/marécage); 1.38% (mosaïque/jachères/cultures); 2.79% (habitations/sols nus); -0,13% (plantations) et -0.25% (cour d'eau). Cette évolution est due à l'expansion des zones habitations/sol nu, et la mosaïque/jachère/cultures. Ceci résulte de la forte pression humaine exercée sur les formations végétales. Ces résultats constituent un outil d'aide à la prise de décision, pour une gestion durable et l'urbanisation du plateau d'Allada.

MOTS-CLÉS: Dynamique occupation du sol, détection du changement, classification supervisée, maximum de vraisemblance, tendance progressive, tendance régressive.

1 INTRODUCTION

La télédétection spatiale offre une opportunité d'observer de façon continue la surface de la Terre et permet de générer de grandes bases de données dont l'exploitation fournit des informations sur l'état des ressources naturelles, des écosystèmes locaux et de leur évolution. Depuis quelques années, la production de données sur l'occupation du sol constitue un intérêt de plus en plus croissant dans les projets environnementaux et la gestion des écosystèmes [1] (Observatoire du Sahara et du Sahel, 2015). Les unités d'occupation du sol évoluent au cours du temps. En télédétection, cette évolution est à la fois un mouvement spectral et/ou spatial d'une entité à travers le temps [2], [3]. Reconnaître un changement consiste en la cartographie de régions changées dans plusieurs images de la même scène prise à différentes dates [4]. Les changements les plus spectaculaires sont d'origine anthropique et sont relatifs aux modes d'occupation du sol [5]. Le Bénin, plus précisément le plateau d'Allada est confrontée à d'énormes difficultés liées à une forte variabilité spatio-temporelle des éléments de son climat. La mauvaise répartition des précipitations et la dégradation des ressources naturelles (eau, végétation, etc.) et de celle humaine (les bâtis) ou le sol constituent de véritables fléaux qui fragilisent le mode de vie des populations. La dynamique des unités d'occupations du sol au cours de ces trente-quatre (34) dernières années est liée à l'action anthropique dans un contexte de la croissance démographique incontrôlé des villes à travers l'urbanisation spontanée. Pour observer et évaluer ces évolutions environnementales dans le temps et dans l'espace, la géomatique et précisément la télédétection sont des outils incontestables de nos jours qui permettent de suivre les éléments caractéristiques qui leur sont propres. Les SIG et la télédétection constituent des approches fiables et pertinentes dans la mise en évidence des unités de l'occupation du sol dans le temps et dans l'espace. Connaître la répartition et l'évolution de l'occupation des sols est essentiel pour évaluer ses conséquences sur l'hydrologie. En effet, ils permettent d'inventorier les différentes unités d'occupation de sol afin d'analyser leur changement dans une période donnée. En appliquant une méthodologie de traitement spécifique et mettre à la disposition des autorités les résultats obtenus pour une prise de décision harmonieuse comme démontré dans les travaux de [6], [7], [8], [9], [10], [5], [11]. Depuis l'avènement des capteurs à haute résolution (HRS) et très haute résolution spatiale (THRS) lancés à partir des années 1990, les méthodes de traitements numériques des images sont de plus en plus développées pour la discrimination des unités d'occupations de sol. La classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance, utilisée pour présenter l'évolution des unités d'occupation du sol, et de montrer l'impact de leur changement sur le secteur d'étude, évaluer la dynamique de l'occupation du sol, répond à un problème de discrimination. Cette méthode consiste à appliquer le même traitement à chaque pixel, indépendamment des pixels voisins. Cette approche génère des règles de classification de façon automatique à partir d'un apprentissage. C'est une technique de classification supervisée qui, comme toute méthode supervisée, requiert des échantillons de référence (parcelles d'apprentissage) pour chaque classe ainsi qu'un espace d'attributs discriminant. L'objectif général de la présente étude est d'analyser la dynamique d'occupation de sol de 1986 à 2020. De façon spécifique, il s'agit de cartographier les unités d'occupation du sol par la méthode de classification supervisée de maximum de vraisemblance en 1986, 2000 et 2020 à partir des images Landsat et ressortir leurs évolutions en analysant les superficies et les taux de changement afin de voir leurs implications dans les problèmes d'inondations sur le plateau d'Allada. Ce qui permettra de comprendre le niveau d'implication de chaque unité d'occupation de sol dans la cause des inondations présent et future sur le Plateau d'Allada. À partir des résultats obtenus, nous analyserons ensuite la dynamique spatiale de l'occupation du sol et identifierons les principaux facteurs responsables des changements dans la zone d'étude ainsi que les risques environnementaux.

2 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'étude est faite dans la zone Guinéenne du Bénin et plus précisément sur le plateau d'Allada. C'est l'une des régions du Bénin où le taux d'accroissement démographique est élevé (5,06%) selon [12]. Cette région du Bénin constitue le grenier de Cotonou, la plus grande ville du pays. Il s'étend des méridiens 1°58'26" à 2°25'55" Est et des parallèles 6°21'38" à 6°57'08" Nord. Le plateau d'Allada (Figure 1) descend vers les vallées de l'Ouémé à l'est, du Couffo à l'ouest et la dépression de la Lama au nord. Il est limité au sud par la plaine côtière (sur laquelle est installée la lagune côtière). Il couvre une superficie d'environ 2140 km²; ce qui représente 66% du département de l'Atlantique et environ 2% du territoire national [12]. Il rassemble Sept (7) communes appartenant toutes au département de l'Atlantique (Figure 1). Le secteur d'étude bénéficie d'un climat subéquatorial. Le régime pluviométrique (240mm/j) qui règne sur le plateau d'Allada fait partie des difficultés des populations du secteur d'étude. Il est à noter que les pluies sont particulièrement fortes dans les mois de mai, juin et septembre occasionnant des inondations sur le plateau d'Allada avec pour corollaire l'état des voies et l'état de santé des habitants. Les localités parcourues au cours des travaux de terrain connaissent des affres de plus en plus régulières des pluies ces dernières années et la fréquence d'inondation évolue à la hausse.

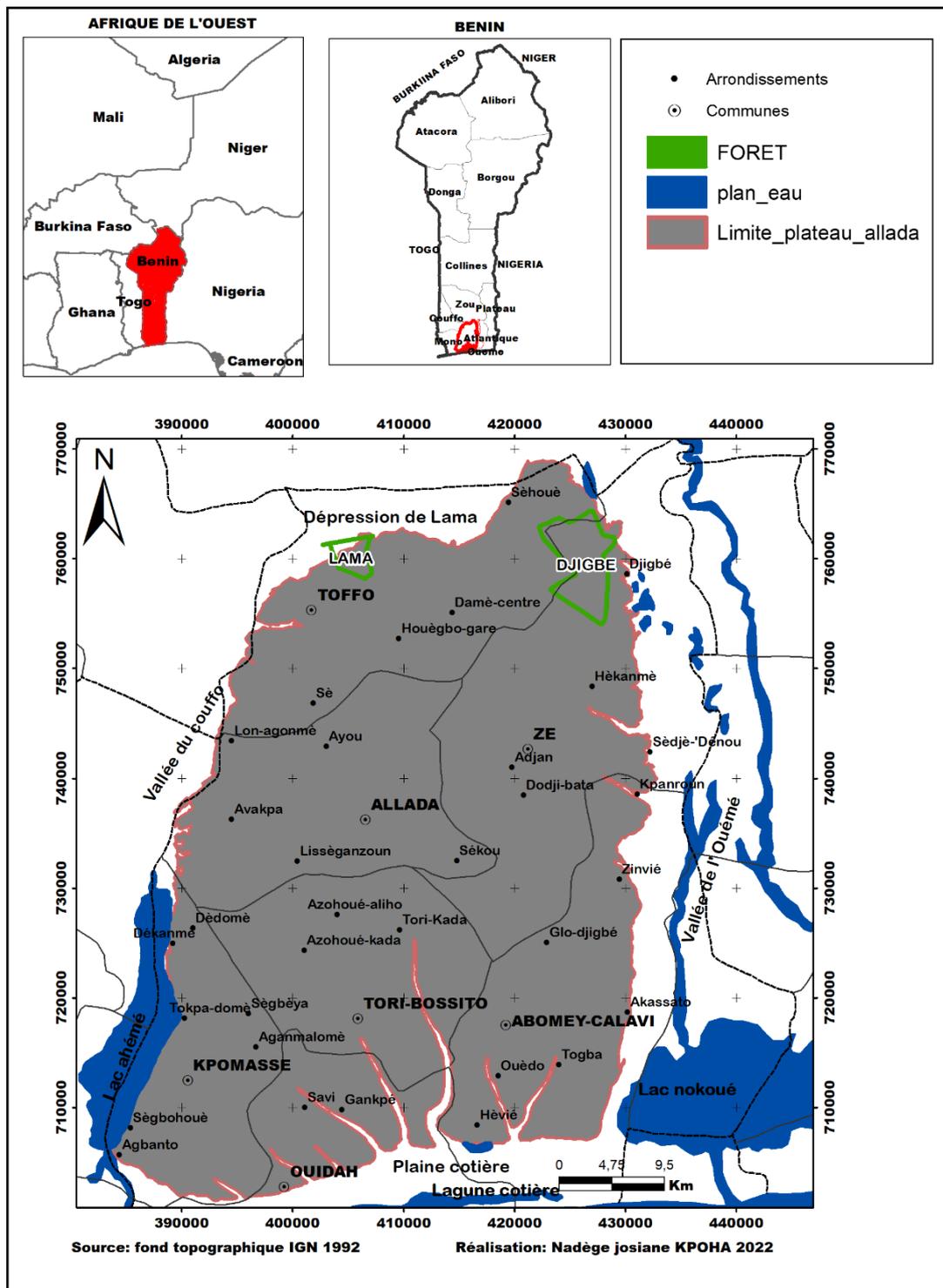


Fig. 1. Situation géographique du plateau d'Allada

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES ET MATÉRIEL

Les données satellitaires utilisées dans la présente étude sont issues de plusieurs capteurs Landsat il s'agit: Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM+) et Operational Land Imager de Landsat 8 (OLI) dont les différentes caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1.

Ces images ont été choisies du fait de leurs caractéristiques spectrales (images prises sur différentes longueurs d'ondes), spatiales (haute résolution) et temporelle (bonne répétitivité) permettant une bonne cartographie de l'occupation du sol à grande échelle. Les bandes du

multispectrale (bleue, verte, rouge, proche infrarouge, infrarouge moyen et lointain), ont servi à la réalisation de ce travail. Ces scènes d'images ont été acquises en janvier pendant la saison sèche. Le Modèle Numérique d'Altitude (MNT), une représentation numérique de la topographie sur une maille de 30 m x 30 m est exploité pour extraire le relief et la pente de la zone d'étude. Trois logiciels ont permis la réalisation de cette étude: Ecognition Developer. 9.01, pour la segmentation et à la classification d'images; ENVI 5.3 pour la classification supervisée; QGIS 2.18 pour l'interprétation des images, l'extraction de la zone d'étude, habiller et éditer les différentes cartes; ArcGis.10.3.1 ont été utilisé pour les traitements dans un SIG et la gestion des bases de données et enfin Microsoft Excel pour l'analyse statistique des résultats obtenus.

Tableau 1. Récapitulatif des différentes caractéristiques des image Landsat utilisées

Capteurs	Scènes	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Date d'acquisition
TM	192-55	Visible (B-V-R)	30 m	Janvier 1986
ETM+		Proche Infrarouge (PIR)		Mars 2000
OLI	192-56	Moyen Infrarouge (MIR)		Février 2020

3.2 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie adopter se résume au prétraitement et traitement numériques des images. Elle consiste donc à comparer les cartes des unités d'occupation du sol de 1986, 2000 et 2020. Le but est de mieux distinguer et extraire les classes des unités d'occupation du sol sur les images Landsat, par la méthode de Classification supervisé. Le processus s'est fait en cinq (05) étapes: i) le prétraitement des images TM (1986), ETM+ (2000) et OLI (2020); ii); l'identification des unités d'occupation du sol, iii) le traitement numérique des images Landsat de 1986, 2000 et 2020; iv) l'exécution et la validation des résultats de la classification supervisée par la méthode maximum de vraisemblance; puis v) la quantification du changement.

3.2.1 PRÉTRAITEMENT DES IMAGES SATELLITAIRES

Après la correction géométrique sur l'image TM de 1986, deux types de pré-traitements ont été appliqués sur les images Landsat. Il s'agit de la correction atmosphérique et radiométrique. La mosaïque des scènes par capteurs grâce à l'outil « Mosaic puis l'extraction de la zone d'étude à partir de l'outil « Image clip » ont été effectuées sur les différentes images. La couverture de la zone d'étude a nécessité deux (02) scènes du découpage Landsat (path/row 192/055 et 192/056). La correction atmosphérique réalisée dans le logiciel ENVI a été exécuté par l'outil « Apply FLAACH Setting » L'option « Radiometric Calibration » dans le même logiciel a permis d'effectuer la correction radiométrique. Ces opérations préalablement réalisées (corrections radiométrique et atmosphérique) ont permis d'avoir des images ayant des informations radiométriques uniforme et sans bruit.

3.2.2 IDENTIFICATION DES CLASSES D'UNITÉ D'OCCUPATION DU SOL

L'unité du paysage ou faciès image est défini comme un ensemble de surfaces ayant des caractéristiques (spectrale, morphologique et textural) communes sur une image. Les rayonnements réfléchis en fonction de la longueur d'onde sont appelés signature spectrale de la surface. L'eau, les sols nus et les habitats, reflètent différemment selon les canaux. Les images satellitaires Landsat TM, ETM et OLI sont caractérisées respectivement 6, 7 et 11 bandes. Chaque bande contient des informations propres qu'elle capte grâce à la différence des longueurs d'onde. La composition colorée vient mettre en évidence ces différentes informations qui sont déduite par une analyse basée sur le mélange de couleurs primaires et les signatures spectrales des différentes entités de la scène. Elle produit une synthèse d'informations en vue de pouvoir discriminer les différents types d'occupation du sol. Après plusieurs compositions colorées, celle des bandes du proche infrarouge (PIR), le rouge et le bleu (4-5-3) des images de 1986, 2000 et 2020 a été choisie parce qu'elle permet de mieux discriminer les entités d'occupation du sol.

La bande du Proche Infrarouge (PIR) réfléchit plus la végétation et distingue les cultures des sols nus; la bande rouge encore appelé Moyen Infrarouge (MIR 1) sépare les forêts des cultures et la bande bleue ou l'Infrarouge Lointain (MIR 2) a une forte réflectance pour les sols nus et les zones d'habitats. Lors des travaux de terrain effectuée dans la zone d'étude, une observation directe et plus rapprochée a été effectuée. À partir de cette observation, cinq (5) classes d'occupations du sol ont été retenues:

- Classe de Forêt/galerie/marécage: constitue les efforts de conservation de la terre et de la biodiversité dans la zone entièrement dégradée. Elle est marquée par des micro-plantations ou quelques pieds d'arbres conservés sur des sites sacrés communément appelés forêts sacrées ou des forêts communautaires;
- Classe de mosaïque/cultures/jachères: constitue la classe majoritaire d'occupation du sol. Il s'agit essentiellement des mosaïques de cultures, ou par endroit des cultures en terrasse;
- Les plantations: Elles sont caractérisées par des palmiers à huile, des champs d'ananas, des savanes arbustives et des savanes herbeuses fragmentées dans les zones d'agriculture quasi traditionnelle;

- Classe habitations/sol nu: Elle est représentée par les localités, des habitats épars dans les zones de cultures et des habitats regroupés formant les zones urbaines. Les sols débroussaillés et les pistes ou routes;
- Classe Eau: représente les cours d'eau et les zones humides

3.2.3 PRÉ-CLASSIFICATION SUPERVISÉE ET CHOIX DES SITES D'ENTRAÎNEMENT

Le choix des sites d'entraînement est une opération qui consiste à délimiter des parcelles ou des portions représentant tous les types d'occupation de sol obtenus après la composition colorée 4-5-3 et 5-7-4 des images de LANDSAT. En effet, selon les travaux [13], [14], [15], [11] la composition colorée des bandes 4-5-3 et 5-7-4 présentent les meilleures discriminations des types d'occupation du sol. Aussi, les sites ont été choisis en fonction de leur accessibilité, nous avons sélectionné des pixels spectralement représentatifs dans chaque site d'entraînement. Sur la base des polygones ainsi définis, l'extraction automatique des valeurs de pixels contenues à l'intérieur des polygones et le calcul de leur moyenne et écart-type produiront la signature spectrale de chaque classe à partir des bandes choisies de l'image Landsat TM, ETM+ et OLI.

3.2.4 MISSION DE TERRAIN

Les images issues de la composition colorée 4-5-3 de TM et ETM+, 5-7-4 et 5-6-7 de l'image OLI, ont été utilisées pour la mission de vérification sur le terrain. Cette mission a été effectuée du 10 Novembre au 10 Décembre 2021. Nous avons défini une placette dans laquelle toutes les classes sont identifiables. Les points de contrôle ont été choisis à cause de leurs accessibilités. Le but de cette mission est de reconnaître et de définir les éléments paysagers de la zone d'étude et d'effectuer des relevés de points GPS représentatifs de chaque classe d'occupation du sol.

3.2.5 CLASSIFICATION SUPERVISÉE PAR LA MÉTHODE DE MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

La bonne connaissance de la zone d'étude nous a permis d'opter pour une classification supervisée. Elle consiste à appliquer le même traitement à chaque pixel, indépendamment des pixels voisins. L'algorithme maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood) a été choisi pour la classification des bandes 4-5-3 TM et de ETM+ des bandes 5-7-4 OLI de la composition colorée. Selon [16], cette technique génère des règles de classification de façon automatique à partir d'un apprentissage. C'est une technique de classification supervisée qui, comme toute méthode supervisée, requiert des échantillons de référence (parcelles d'apprentissage) pour chaque classe ainsi qu'un espace d'attributs discriminant. En effet, cette méthode calcule la probabilité d'appartenance d'un pixel à une classe donnée. Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte. Cependant, si cette probabilité n'atteint pas le seuil escompté, le pixel est classé "inconnu". Ensuite, la qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient Kappa [13]. Appelée aussi tableau de contingence, la matrice de confusion est un tableau affichant les statistiques de la précision de classification d'une image, notamment le degré de classification erronée parmi les diverses classes. Elle est calculée avec les valeurs exprimées en pixels et en pourcentage. De plus, d'autres mesures synthétiques de fiabilité de la classification peuvent être calculées: la précision pour l'utilisateur, la précision pour le réalisateur, les erreurs d'omission et de commission [17].

POST-TRAITEMENT

Après la classification de l'image, la matrice de confusion a été exécutée afin de détecter les erreurs, la séparabilité entre les classes et la précision.

La précision globale de l'image 1986 est 85,99%, avec un coefficient de Kappa égale 0,79. Celle de 2000 a une précision 84,82% et un coefficient de Kappa fixé à 0,78. Enfin l'image 2020 présente une précision de 90,97 avec un coefficient de Kappa de 0,87. Ces résultats montrent qu'il y a une bonne séparabilité entre les classes et que la précision est bonne.

VECTORISATION ET CARTOGRAPHIE

La carte d'occupation de sol en mode raster est convertie en donnée vecteur dans le but de faciliter leur gestion dans le logiciel d'analyse SIG. La figure 2 présente la synthèse méthodologique adoptée dans le plateau d'Alada pour cartographier les unités d'occupations du sol à partir des données de télédétection générées dans un SIG.

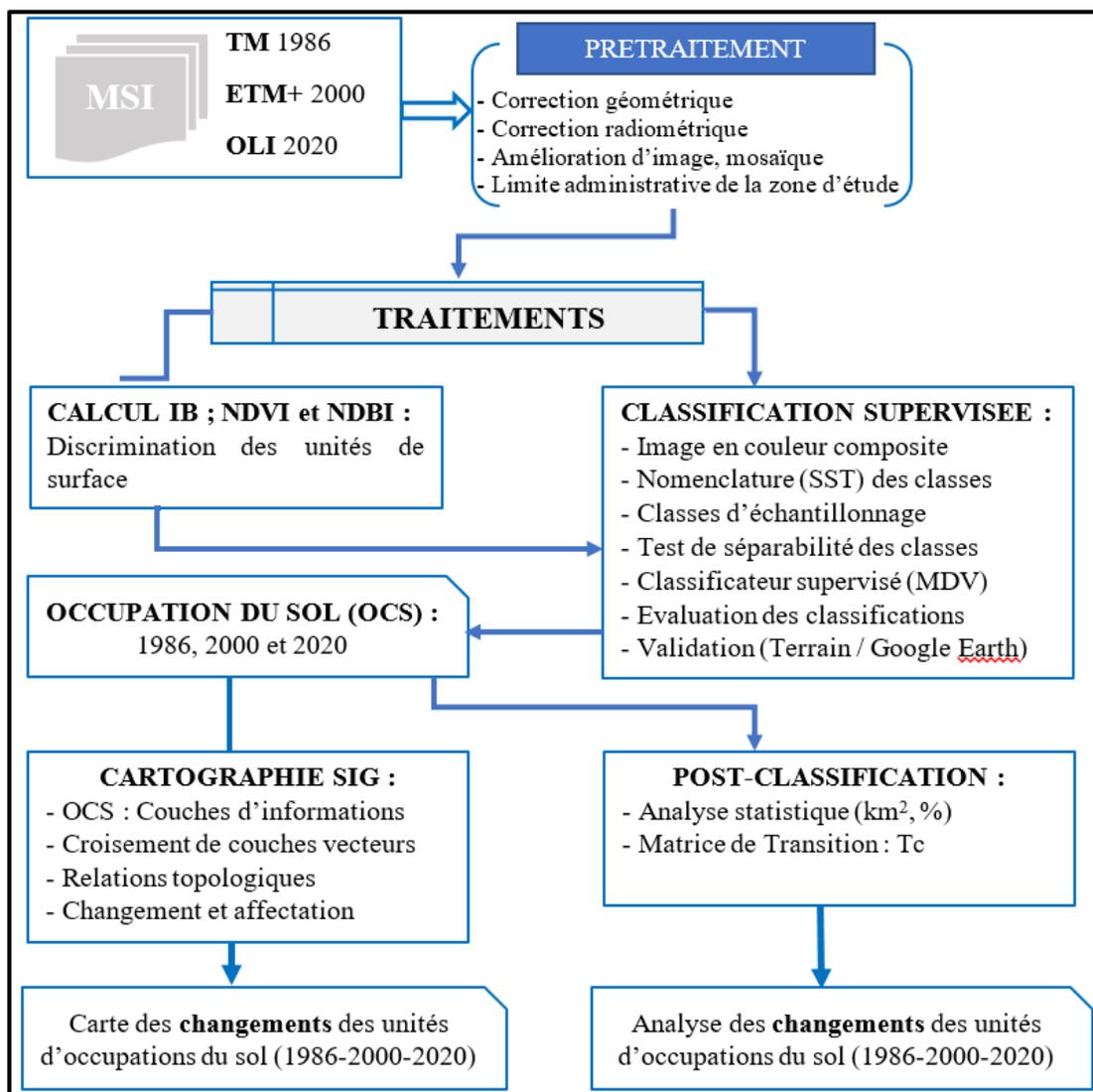


Fig. 2. Méthodologie de cartographie des changements des unités d'occupations du sol à partir des données de télédétection générée dans un SIG

MATRICE DE CONFUSION

Elle permet de mettre en évidence les différentes formes de conversion subies par les unités d'occupation du sol entre deux dates t1 et t2, et décrire les changements intervenus. Elle décrit de manière condensée, les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée [18], dont les cellules contiennent la valeur d'une variable ayant passé d'une classe initiale x à une classe finale y pendant la période allant de t1 à t2. Dans le cadre des présents travaux, cette matrice est obtenue à partir des valeurs issues de la superposition des cartes d'occupation du sol, dans le logiciel de SIG ArcGIS (grâce à l'algorithme "Intersect polygons" de l'extension Geoprocessing), et traitées dans Excel.

3.2.6 CLASSIFICATION SUPERVISEE PAR LA METHODE DU « PLUS PROCHE VOISIN »

L'algorithme de classification choisi pour l'image Landsat du plateau d'Allada est le « plus proche voisin ». Selon [16], cette technique génère des règles de classification de façon automatique à partir d'un apprentissage. C'est une technique de classification supervisée qui, comme toute méthode supervisée, requiert des échantillons de référence (parcelles d'apprentissage) pour chaque classe ainsi qu'un espace d'attributs discriminant.

Cette classification s'est déroulée ici en trois (3) étapes:

- La “classification 1” a permis d’assigner les objets images à des classes thématiques selon leurs valeurs de NDVI et d’obtenir une première séparabilité des classes (classe forêt/galerie/marécages);
- La “classification 2” s’est faite à partir du NDBI en vue d’obtenir une deuxième séparabilité des classes. L’objet de cette deuxième classification est d’identifier le bâti à l’intérieur des objets-images hétérogènes que la première classification n’a pas permis d’isoler. Cette classification a consisté à assigner les objets-images hétérogènes issus de la « classification 1 » à des classes thématiques à l’aide de leur valeur de NDBI. Ainsi le NDBI s’est comporté comme un filtre qui a permis d’isoler le bâti (Tableau 2).
- La “classification 3” est la classification définitive qui a permis d’exporter les données dans ArcGIS en vue de la restitution cartographique. Elle fait suite à l’intégration des données dans Ecognition après la classification 2. Finalement, le couplage NDVI/NDBI qui a permis de classer l’image a suivi la logique booléenne résumée dans le tableau 2, ci-dessous:

Tableau 2. Classe thématique selon les valeurs du NDVI et du NDBI

Classes thématiques	Classes spectrales du NDVI	Classes spectrales du NDBI
	CONDITIONS	
Eau	≤ 0	≤ 0,0099
Bâti	001 à 0,099	≥ 0,01
Sol nu	0,1 à 0,199	≤ 0,0099
Brousse basse	0,2 à 0,299	≤ 0,0099
Forêt dégradée/jachère	0,3 à 0,399	≤ 0,0099
Forêt dense	≥ 0,4	

Le tableau 2, s’interprète comme suit:

- Si le NDBI ≥ 0,01, alors la classe thématique correspond au “Bâti”;
- Si NDBI ≤ 0,0099, et si les valeurs du NDVI < 0, alors, la classe thématique correspondante est “l’Eau”;
- Si le NDBI ≤ 0,0099, et si les valeurs du NDVI sont comprises entre 0,1 et 0,199, alors, la classe thématique correspondante est le “Sol nu”;
- Si NDBI ≤ 0,0099, et si les valeurs du NDVI sont comprises entre 0,2 et 0,299, alors, la classe thématique correspondante est une “Brousse basse”;
- Si NDBI ≤ 0,0099, et si les valeurs du NDVI sont comprises entre 0,3 et 0,399, alors, la classe thématique correspondante est une “Forêt dégradée” ou une “Jachère”;
- Si NDBI ≤ 0,0099, et si les valeurs du NDVI ≥ 0,4, alors, la classe thématique correspondante est une “Forêt dense”.

La “classification 3” est l’étape de la classification définitive. Elle a consisté à ajouter les informations issues de la vérité terrain aux résultats de la “classification 2”.

3.2.7 VALIDATION DE LA CLASSIFICATION

La validation des résultats de cette étude a été effectuée à l’aide des données issues de campagne de terrain. Une première visite de terrain en juin 2020 a permis d’identifier, dans un premier temps, six (6) grands ensembles de classes thématiques: eau, bâti, sol nu, forêt dense, forêt dégradée/jachère et brousse basse. Une autre campagne de terrain (de janvier 2021 à juin 2021), a permis de prendre en compte d’autres éléments du sol, et de valider définitivement les résultats de la classification issue du couplage NDVI/NDBI.

Cette étape a consisté à quantifier les objets correctement classés en comparant les résultats des classifications à ceux de la vérité terrain. Au total, plus de 360 points repartis dans plusieurs régions de l’image ont été relevés aléatoirement afin de les confronter aux réalités du terrain. Pour l’évaluation de la classification, le paramètre de précision Kappa a été calculé aussi manuellement à partir de l’équation (1) [19]:

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \tag{1}$$

Avec, P₀ la précision globale et le facteur de correction (précision aléatoire)

$$P_e = \frac{\sum X_i * Y_j}{N^2} \tag{2}$$

où X_i..., Y_i... et N... (Eléments à définir)

Deux autres coefficients, notamment, le KIA (Kappa Index of Agreement) total et le KIA par classe, s'ajoutent au Kappa pour parfaire cette évaluation.

3.3 ANALYSE STATISTIQUE DES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL: QUANTIFICATION DU CHANGEMENT

L'analyse spatio-temporelle des unités d'occupation du sol du plateau d'Allada, vise à quantifier, sur la base des données disponibles et les connaissances plus ou moins approfondies sur la cartographie de l'occupation du sol, les caractéristiques spatiales et la dynamique spatio-temporelle des unités d'occupation du sol du dit secteur. Pour mieux cerner l'évolution sur les périodes d'études (1986; 2000 et 2020), deux paramètres sont déterminés: l'analyse des superficies, et le taux de changement des unités d'occupation du sol.

3.3.1 ANALYSE DE SUPERFICIES

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol, passe par la comparaison des superficies des unités d'occupation du sol de 1986; 2000 et 2020. Cette analyse a été effectuée en calculant les superficies des classes d'occupation du sol à partir des tables attributaires des images classifiées, grâce à l'outil « calculate geometry » du logiciel ArcGis 10.5.

3.3.2 TAUX DE CHANGEMENT (Tc) EN %

Les changements à l'échelle globale ont été déterminés en ressortant les superficies des différentes unités d'occupation du sol pour chaque période dans un SIG. Les changements ont été déterminés sur les trois (3) périodes que sont: la période 1986-2000, la période 2000-2020 et la période 1986-2020. Une analyse approfondie basée sur l'évaluation des changements intervenus au sein de chaque unité d'occupation prise isolément fut faite à travers le calcul du taux de changement annuel d'expansion spatiale, couramment utilisé dans les études sur le changement d'occupation du sol [20], [21]. Ce taux de changement s'évalue à partir de la formule de [22] généralement employée pour mesurer la croissance des agrégats macroéconomiques entre deux périodes données. Cette formule se présente comme suit:

$$Tc = \frac{\ln S2 - \ln S1}{(t2-t1) \times \ln e} \times 100 \quad (3)$$

Avec S1 la surface d'une classe d'unité de surface à la date t1; S2 la superficie de la même classe d'unité de surface à la date t2; ln le logarithme népérien; e la base des logarithmes népériens (e = 2,71828).

Ce taux de changement, permet d'estimer la proportion de gain (valeur positive) ou de perte (valeur négative) des superficies d'occupation du sol. TC est positif pour les classes d'occupation en progression et négatif pour celles en régression.

4 RESULTAT ET INTERPRETARION

4.1 CLASSIFICATION SUPERVISÉE PAR LA MÉTHODE DE MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

La classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance des images, a permis de cartographier l'occupation du sol de la zone d'étude en 1986, 2000 et 2020. Les différentes classifications ont été évaluées par les matrices de confusion à travers la précision globale de la classification et du coefficient Kappa. La valeur du kappa obtenu après chaque classification est supérieure à 0.76, les classifications sont donc jugées excellentes.

4.2 CARTOGRAPHIES DE L'OCCUPATION DU SOL (1986, 2000 ET 2020)

La classification des images TM 1986, ETM+ 2000 et OLI 2020 a été réalisée avec une précision globale et une valeur de kappa. Les changements d'utilisation et d'occupation des sols résultent d'une multitude de facteurs affectant la population du plateau d'Allada. Ces facteurs peuvent être anthropiques ou naturelle. Le résultat de la matrice est présenté dans le Tableau 3.

Tableau 3. Classe thématique selon les valeurs du NDVI et du NDBI

Matrice de confusion		
Année d'image	Coefficient de Kappa	Précision Globale
1986	0.7961	85.99%
2000	0.7852	84.82%
2020	0.8772	90.97%

4.3 CARTES D'OCCUPATIONS DU SOL

Les cartes ci-après (Figure 2), présentent les résultats issus de la Classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance, des images, des capteurs de la génération Landsat, TM de 1986, ETM+ de 2000 et OLI de 2020. L'analyse de la figure 3 montre qu'en 1986, les rations de la forêt/galerie/marécage ont connu une disparition presque totale en 2020 au profit des mosaïques/jachères/cultures et habitation/sol nu. Par conséquent, les végétales naturelles telle que la plantation est en régression considérable au profit des formations anthropiques. Ce qui en général explique par les diverses pressions que ces formations ne cessent de subir.

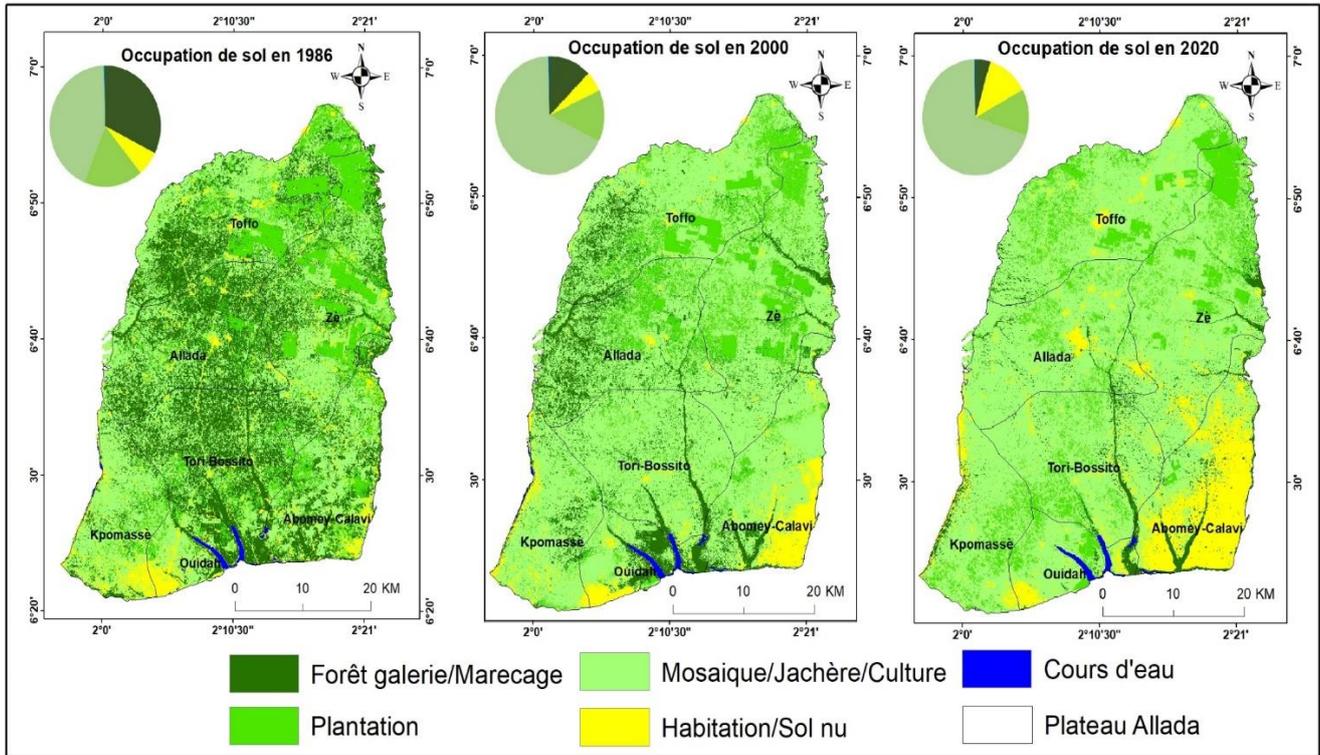


Fig. 3. Cartes d'occupation du sol de 1986 (a), 2000 (b) et 2020 (c) du plateau d'Allada

4.4 ANALYSE STATISTIQUE DES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DU SOL: QUANTIFICATION DU CHANGEMENT

4.4.1 ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DES UNITÉS D'OCCUPATIONS DE SOL

La Figure 4 illustre l'évolution des unités d'occupation du sol de 1986, 2000 et 2020. On observe plusieurs tendances d'évolution de l'occupation du sol du plateau d'Allada suivant les périodes d'étude. Nous notons:

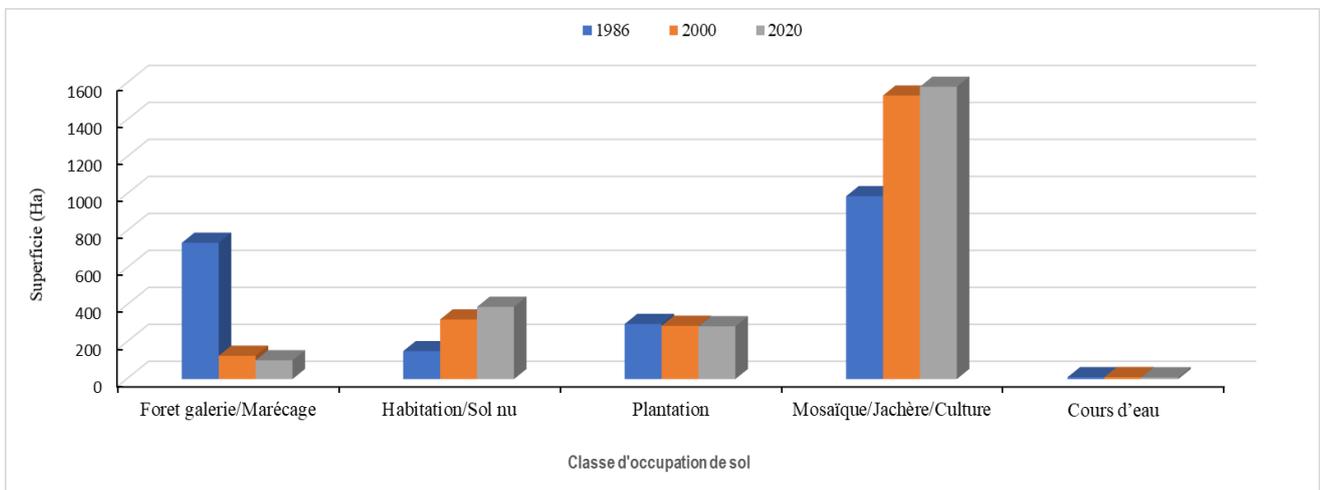


Fig. 4. Evolution des classes d'occupation du sol de 1986 à 2020

DYNAMIQUE ENTRE 1986 ET 2000:

- Une diminution de la superficie des forêts/galerie/marécage de 26.83% et des plantations de 1,54 %;
- Une augmentation des superficies occupées par la classe eau de 0.02%; des mosaïques/cultures/Jachères de 23.89% et des superficies des habitations/sols nus de 7.51%

DYNAMIQUE ENTRE 2000 ET 2020:

- Une diminution des superficies occupées par les plantations, les cours d'eau et des forêts/galerie/marécage respectivement de -0,58 %, 0.05% et 1,06 %;
- Une augmentation des superficies occupées par mosaïques/cultures/Jachères de 2.08% et de la classe habitats/sol nu de 3%

DYNAMIQUE ENTRE 1986 ET 2020:

- Sur toute la période de l'étude, on observe
- Une diminution de la superficie des forêts/galerie/marécage, plantation et de la classe eau respectivement de 27.89%, 2.12% et 0.03%
- Et Une augmentation des superficies des classes mosaïques/cultures/Jachères de 25.97% et habitats/sol nu de 10.51%

L'augmentation ou la diminution correspondent à des changements d'état des classes, ou la conversion d'une classe à une autre.

Tableau 4. Tendence d'évolution des unités d'occupation du sol sur le plateau d'Allada de 1986 à 2020

Classes	Cours d'eau	Habitations/Sol nu	Plantation	Mosaïque/jachère/culture	Foret/galerie/marécage
Cours d'eau	99.92	0.00	0.00	0.00	0.20
Habitations/Sol nu	0.03	99.79	0.04	0.79	0.24
Plantation	0.00	0.00	94.09	16.98	2.52
Mosaïque/Jachère	0.00	0.21	5.05	81.19	3.29
Foret/galerie/marécage	0.05	0.00	0.82	1.04	93.74
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

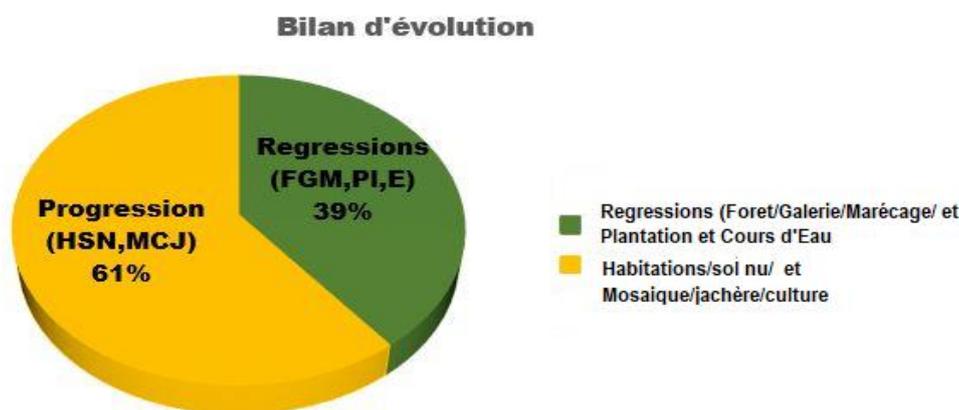


Fig. 5. Bilan de l'évolution des unités d'occupation du sol (1986 - 2020)

L'analyse de la figure 5 révèle que les ordres de progression et de régression sont très prononcés du fait les communes urbaines comme Allada, Abomey- Calavi, Ouidah, Tori et kpomassè, sont de plus en plus peuplé. Le couvert végétal qui protège l'environnement contre les inondations, a connu une régression d'ordre de 39% sur sa superficie au profit de la progression croissante des bâtiments et autres 61 %. Ce qui met à nu la topographie de la zone d'étude. De façon générale, la superficie des bâti et cultivée sont près de 2/3. Cette situation est due non seulement à la croissance rapide de la population mais aussi du fait que le Bénin reste un pays à vocation agricole.

4.4.2 TAUX DE CHANGEMENT (TC)

Pour mieux appréhender les changements survenus durant la période 1986 à 2020, les taux de variation des différentes unités d'occupation du sol calculés sont résumés dans le tableau 5.

- **De 1986 à 2000:** Une progression s'observe dans les classes, Mosaïque/Jachère/culture, habitation/sol nus et cour d'eau respectivement dans l'ordre de **3.13%**, **5.41%**, et **0.23%** et une régression des classes Plantation, et Forêt/galerie/marécage respectivement dans l'ordre de **-0.25%**, et **-12.61%**.
- **De 2000 à 2020:** Une progression s'observe dans les classes Mosaïque/Jachère/culture et habitation/sol nus respectivement dans l'ordre de **0.15%**, et **1%**, et une régression des classes Forêt/galerie/marécage, Plantation et cour eau respectivement de l'ordre de **-1.08%**, **-0.13%** et **-0.58%**
- **De 1986 à 2020:** Une régression s'observe dans les classes Forêt/galerie/marécage, plantation et Cour d'eau respectivement de l'ordre de **-5.82%**, **-0.13%** et **-0.25%** et une progression dans les classes Mosaïque/Jachère/culture et habitation/sols nus respectivement de l'ordre de **1.38%**, et **2.79%**.

Tableau 5. Taux de variation des classes d'occupation du sol de 1986 à 2020

Unités d'occupation	Superficies en Ha			Taux de changement annuel Tc (%)		
	1986	2000	2020	1986-2000	2000 à 2020	1986 à 2020
Forêt/galerie/Marécage	737.19	126.15	101.69	-12,61	-1,08	-5,82
Habitation/Sol nu	151.33	322.85	390.9	5,41	1	2,79
Plantation	298.43	288.29	285.69	-0,25	-0,04	-0,13
Mosaïque/Jachère/Culture	989.13	1533.59	1581.03	3,13	0,15	1.38
Cours d'eau	10.58	10.92	9.72	0,23	-0,58	-0.25

5 DISCUSSION

Le traitement et l'analyse des images multispectrales, associées aux données d'observations de terrain in situ, ont montré que le recul du couvert forestier sur le plateau d'Allada entre 1986 et 2020 est essentiellement lié aux pressions anthropiques, suite aux demandes de plus en plus pressantes de terres pour la construction des bâtiments et les cultures. La présente étude dénombre deux grands groupes de facteurs qui peuvent être considérés comme les causes de la dégradation des forêts et des inondations: facteurs démographiques et l'urbanisation anarchique (multiplication des infrastructures), l'extension de l'agriculture paysanne et enfin d'autres facteurs (prédispositions environnementales, facteurs biophysiques).

La précision globale obtenue dans la classification supervisée de la présente étude est de 85,99% pour la classification des images TM 1986, 84,82% pour ETM+ 2000 et 90,97% pour OLI 2020. Le coefficient de Kappa obtenu pour les images TM de l'année 1986 est de 0,79; 0,78 pour les images ETM+ de 2000 et enfin 0,87 pour les images de l'année 2020. Par ailleurs, [2], [23], confirme que les résultats d'une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50 sont bons et exploitables. [24], [11] dans leurs travaux ont obtenu respectivement comme précisions globales 84,63 % en 1986; 87% en 2000 et 98 % en 2015 et 84,6% pour TM 1990, 89,4% pour ETM+ 2005 et 91,2% pour OLI 2020 ses résultats sont analogue à ceux obtenus sur le plateau d'Allada. L'indice de Kappa de la matrice de confusion sont respectivement de 0,78 pour l'année 1986; 0,75 pour 2000 et 0,96 pour 2015 et 0,76 pour 1990; 0,80 pour 2005 et 0,82 pour 2020. De ce fait, la présente classification qui compte cinq (5) classes est acceptable et permet d'évaluer la tendance de changements de l'occupation du sol sur une période de 34 ans.

S'agissant de la méthodologique, la classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance peut présenter certaines erreurs liées, notamment, à l'intégration de fichiers provenant d'une autre classification. Dans cette méthode de classification, la détermination des unités d'occupation du sol pendant la discrimination nécessite une très bonne enquête de terrain, ce qui a permis de faire l'inventaire de toutes les unités d'occupation du sol, de faire un bon choix des sites d'entraînement et de prendre plusieurs coordonnées. Nous assistons à une légère confusion entre les classes habitations/sol nu et végétation lorsque sont utilisées les images multispectrales à haute résolution spatiale comme Landsat [25]. [26] a rencontré dans ses travaux une difficulté à séparer la végétation (y compris les cultures) des sols nus, surtout lorsqu'on évolue vers des espaces de plus en plus steppiques, en utilisant la classification supervisée.

En ce qui concerne les résultats de la dynamique de l'occupation du sol de 1986 à 2020, l'évolution progressive des classes habitations/sol nu et mosaïques/cultures/Jachères respectivement de l'ordre de 2.79% et de 1.38% de la superficie de la zone étudiée et l'évolution régressive des superficies des forêts/galerie/marécage, plantation et de la classe eau respectivement de -5.82%, -0.13% et -0.25% est un caractère de la dynamique actuelle du paysage du sud Bénin précisément dans le département d'Atlantique. En effet, la croissance démographique, l'expansion des zones habitées, et l'utilisation incontrôlées des réserves telle que la zone économique, l'aéroport de Glodjigbé, la zone industrielle de Glogjigbé sont autant de facteurs qui expliquent ce phénomène. De plus l'expansion des cultures (palmiers et ananas) en sont d'autre facteur [24], [27], [28]. Les diversifications et les reconversions vers de nouvelles spéculations tels que les palmiers et les vivriers marchands, résultent des initiatives paysannes spécifiques. Il est constaté, au niveau de l'occupation du sol à ces trois dates, que l'année 1986 présente des terres plus couvertes par la végétation. La disparition de ces terres végétales s'explique par les pressions anthropiques sur l'espace et des demandes croissance des infrastructures routières.

Le facteur de conversion élevé de la forêts/galerie/marécage (93.74%), ainsi que le taux de changement négatif (-5.82%), mettent en exergue une régression significative des superficies forestières entre 1986 et 2020. L'analyse de la matrice de transition montre que ces régressions se sont

faites au profit des zones cultivées ("plantations" et "mosaïque/culture/jachère") et des habitations/sol nu. En effet, ces habitations ont été construites de façon anarchique en corrélation avec la poussée démographique que subit cette zone. Ainsi, les bâtiments ont été construits dans les zones d'accumulation d'eau ce qui entraîne pendant la saison pluvieuse des inondations.

6 CONCLUSION

La présente étude portant sur la dynamique de l'occupation du sol du plateau d'Allada par la classification supervisée par la méthode de maximum de vraisemblance a montré l'évolution des différentes unités d'occupation de la zone étudiée de 1986 à 2020. L'utilisation des images Landsat TM, ETM+ et OLI et des SIG a permis d'élaborer les cartes d'occupation du sol, d'analyser l'évolution des unités d'occupation du sol et de quantifier le changement entre 1986-2000, 2000-2020 et 1986-2020. L'utilisation de la méthode de classification supervisée a permis d'extraire les différentes unités d'occupation du sol avec un accord excellent soit une précision globale égale à 85.99%, 84.82% et 90.97% respectivement en 1986, 2000 et 2020, et un coefficient Kappa égale à 0.79; 0.78 et 0.87 respectivement en 1986, 2000 et 2020. L'analyse statistique des cartes d'occupation du sol obtenues de 1986 à 2020 montre une augmentation des superficies des classes habitats/sols nus et, mosaïque/jachère/culture respectivement de 2.79%, et 1.38% et une régression des superficies des classes Forêt/galerie/marécage, plantations et cour d'eau respectivement de -5.82%, -0.13% et -0.25%. Le résultat obtenu montre clairement la disparition progressive de l'espace vert au profit des classes de mosaïques/jachères/cultures, des habitations et des plantations. Il y a donc eu un recul généralisé des forêts galerie marécage et des cours d'eau sur l'ensemble du plateau avec une progression des surfaces mosaïque/jachère/culture et habitation/sol nu. L'augmentation de la surface de mosaïque et de jachère témoigne de l'ampleur de la dégradation des écosystèmes. L'appauvrissement de terres lié aux pratiques culturelles contraint les populations à les laisser en jachère. La mise en valeur de nouvelles surfaces cultivables appelle à la destruction des formations végétales. Le recul de la superficie des formations végétales augmente l'exposition de la zone d'étude à l'inondation, car le couvert végétal (forêt, bois) favorise le ralentissement du mouvement des eaux. En effet, la végétation permet de lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau. Les sols, plus poreux, sont alors à même de stocker de plus grandes quantités d'eau, jouant un rôle d'éponge, plus ou moins important selon l'état de saturation des sols. Elle permet de diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement de l'eau et enfin, la végétation maintient les sols grâce aux systèmes racinaires, améliorant ainsi la cohésion des sols et donc renforçant leurs propriétés mécaniques. La destruction des formations végétales met à nu les sols agricoles. Le ruissellement lié à de fortes précipitations entraîne le départ de terre par érosion de façon spectaculaire en creusant de profondes ravines ou plus discrètement.

Compte tenu du changement climatique lié à la croissance de forte intensité pluviométrique sur le plateau d'Allada et ceci au fur et à mesure que les années passent, il urge de développer des politiques allant dans le sens de la construction des infrastructures de drainage, l'urbanisation, l'installation des bâtiments selon leur niveau et orienté l'installation anarchique des populations compte tenue de la croissance démographique.

REMERCIEMENTS

Le traitement des données de cette thèse a été rendu possible grâce au soutien de l'Agence universitaire de la Francophonie (AUF) qui a financé nos séjours de recherche. Nos remerciements s'adressent également au Professeur N'guessan Bi Vami Hermann enseignant/chercheur au CURAT-Université de Cocody-Côte d'Ivoire) pour ces conseils, assistances et orientations lors du traitement des données du présent article.

REFERENCES

- [1] Observatoire du Sahara et du Sahel, Cartographie de l'occupation du sol – Spécifications techniques, Projet amélioration de la résilience des populations sahéliennes aux mutations environnementales – REPSAHEL, p. 36, 2015.
- [2] H. G. Lund, «Change: Now you see it, now you don't», In Proceedings of the International Conference on Renewable Resource Inventories for Monitoring Changes and Trends, pp. 211-213, 1983.
- [3] A. K. Milne, «Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology», In Proceedings of the IGARSS'88 Symposium, pp. 541-544, 1988.
- [4] R. J. Radke, S. Andra, O. Al-kofahi, B. Roysam, «Image change detection algorithms: a systematic survey», IEEE Trans. On Image Processing, pp. 294-307, 2005.
- [5] K. A. Stéphane, A. Roland and E. M. Jalal, «Utilisation d'une image satellite LANDSAT 8 pour la cartographie de l'occupation des sols dans la ville de Bondoukou et ses environs en Côte d'Ivoire», vol. 30, no. 1, pp. 10, 2020.
- [6] J. Oszwald, «Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000): suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique», Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, Lille, France, 304 p, 2005.
- [7] E. N'guessan, H.D. N'da, M. F. Bellan, F. Blasco, «Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire: apport de la télédétection», Revue télédétection vol. 5, no. 5, pp.307-323, 2006.
- [8] C. Hauhouot, P. Pottier, Y. Bamba, «Recul des formations forestières dans la zone humide du littoral de Grand-Bassam, Côte d'Ivoire», Revue internationale de Géomatique, vol. 21, no. 3, pp.327-339, 2011.

- [9] V.H. Bi. N'guessan, «Modélisation markovienne du champ de précipitation et du mode d'occupation du sol pour une prévision du risque d'inondation à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique: cas du département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)», Thèse de doctorat de l'université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 229 p, 2014.
- [10] S.V.C. Jofack, F. K. Kouamé, H. N. Dibi, B. Tankoano, Y.L. Akpa, N.B. Ngounou, «Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI», International Journal of Innovation and Scientific Research, vol. 23, no.2, pp. 443-454, 2016.
- [11] A. C. Njeugeut Mbiafeu, M. Youan Ta, V. M. Sorokoby, T. V. Assoma, M. G. Adja & J-P. Jourda, «Dynamique d'occupation du sol du bassin versant de la Volta, par la méthode de l'arbre de décision, à partir des images multispectrales de la génération Landsat de 1990 à 2020» International Journal of Engineering Science Invention, Vol. 10, no. 4, pp. 34-45, 2021.
- [12] Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique, Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (RGPH-4, 2013). 83 p, 2016.
- [13] Girard, M.C., & Girard, C.M., Traitement des données de Télédétection, DUNOD Ed., Paris, pp. 192-205, 1999.
- [14] P. Hiernaux, & L. Diarra, Pour une technique de télédétection appliquée suivi de l'évolution de la végétation sahélienne, Bilan des activités CIPEA dans le Gourma en 1985. Document de programme AZ 169, CIPEA, Bamako, 32 p, 1986.
- [15] K. J. L. Kouassi «Suivi de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide de l'imagerie satellitaire et des systèmes d'informations géographiques: cas de la Direction régionale des eaux et forêt de Yamoussokro (Côte d'Ivoire)», mémoire de master, 73p, 2013.
- [16] T. Tormos, «Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau», Thèse de Doctorat de Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), Français, 508 p, 2010.
- [17] R. G. Congalton, «A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data», Remote sensing of environment, vol. 37, no.1, pp. 37- 46, 1991.
- [18] R. Schlaepfer, «Analyse de la dynamique du paysage. Fiche d'enseignement 4.2, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes», Ecole Polytechnique de Lausanne, Suisse, 10 p, 2002.
- [19] C. Alexander, «Analyse de l'usage du sol de la région de Bokito (Mbam et Inonbou, Cameroun), à partir de données de la télédétection et implication sur les systèmes de culture agroforestiers. Master en géomatique, université Montpellier III, Paul Valéry UFR III: Sciences Humaines et Sciences de l'Environnement, CIRAD, 40 p, 2013.
- [20] V. J. Mama, & J. Oloukoj, «Évaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol», Télédétection, vol.3, no. 5, pp. 429-441, 2003.
- [21] J. Oloukoj, & I. Ali, «Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin». Télédétection, vol. 6, no. 4, pp. 305-323, 2006.
- [22] B. Bernier, Introduction à la macroéconomie. Dunod, Paris, 1992.
- [23] JR. R. G. Pontius, «Quantification error versus location error in comparison of categorical maps», Photogrammetric Engineering and remote Sensing, vol. 66, no.8, pp. 1011-1016, 2000.
- [24] K. F Kouame, «Estimation des précipitations par la méthode Tamsat dans le nord de la Côte d'Ivoire et analyse de la variabilité pluviométrique et de ses impacts environnementaux et sociodémographiques: cas de Korhogo», Mémoire de master, l'Université Félix Houphouët Boigny, 78 p, 2015.
- [25] H. E. H. Hassan, F. Ardillier-Carra & L. Charbel, «Les changements d'occupation des sols dans la Béqaa Ouest (Liban) : le rôle des actions anthropiques» EDP Sciences Cahiers Agricultures, vol. 28, no.1 pp. 10, 2019.
- [26] A. Z. Tra Bi, A. Emran, Y. T. Brou, G. Mahe, «Cartographie par arbre de décision de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg: en région semi-aride au centre Nord-Ouest du Maroc», Revue Scientifique Internationale de Géomatique, vol.1, no.01, pp.43-52, 2014.
- [27] A. N. N. Boko, «Variabilité climatique, changements dans l'environnement et conscience écologique à Korhogo», Thèse de doctorat de troisième cycle, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 355 p, 2015.
- [28] I. A. K. Bindaoudou, «Analyse par télédétection des vecteurs de changement des types d'occupation et d'utilisation du sol de 1987 à 2013 dans la préfecture d'Amou au sud-ouest du Togo», Mémoire de Master, Université Felix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 2014, 69 p, 2014.