

Cartographie par télédétection de la dynamique et de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 (Sud-Bénin) de 2000 à 2025

Ognondoun Azize

Doctorant/Ecole Doctorale Pluridisciplinaire (EDP)

Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement (LA2GE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), République du Bénin

Tchibozo Eric Alain M.

Professeur Titulaire (CAMES), Géomatique, Télédétection, SIG

Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement (LA2GE), Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT/FASHS), Université d'Abomey-Calavi (UAC) République du Bénin

Vissin Expédit Wilfried

Professeur Titulaire (CAMES), Hydroclimatologie

Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Écosystèmes et Développement (LACEEDE), Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT/FASHS), Université d'Abomey-Calavi (UAC) République du Bénin

Djaouga Mama

Maître de Conférences (CAMES), Géomatique, Télédétection, SIG

Laboratoire de la Cartographie de la Télédétection et des SIG (LaCarto) Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT/FASHS) Université d'Abomey-Calavi (UAC), République du Bénin

Approved: 20 September 2026

Posted: 22 September 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Ognondoun, A., Tchibozo, E.A.M., Vissin, E.W., & Djaouga, M. (2026). *Cartographie par télédétection de la dynamique et de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 (Sud-Bénin) de 2000 à 2025*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2026.p748>

Résumé

La dégradation du couvert végétal constitue aujourd'hui une problématique environnementale majeure pour les zones humides en général et celle du site Ramsar 1018 situé au sud du Bénin en particulier. Elle représente une menace majeure pour l'équilibre écologique et socio-économique du paysage (exploitation agricole, urbanisation, prélèvement du

bois-énergie, exploitation forestière). L'objectif de la présente étude est d'évaluer le niveau de dégradation de la végétation de ce site. La méthodologie adoptée est une approche géographique basée sur l'utilisation des données de télédétection (images satellitaires multispectrales), des Systèmes d'Information Géographique (SIG), de l'évaluation multicritère (EMC) et du Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). Les résultats obtenus montrent une dégradation importante et inégalement répartie de la végétation du site Ramsar 1018. Ainsi, les zones à très forte (14,25 %) et forte (48,01 %) dégradation représentent ensemble 62,26 %, soit plus de la moitié du secteur d'étude, où le couvert végétal subit des pressions anthropiques liées surtout à l'urbanisation rapide et aux activités agricoles intensives. Les zones à moyenne (19,50 %) et faible (18,24 %) dégradation correspondent aux surfaces où la végétation humide est encore relativement conservée, malgré les pressions environnementales liées aux changements climatiques. L'analyse PEIR a identifié l'agriculture extensive (40 %), la déforestation (25 %), l'urbanisation (20 %) et les feux de brousse (15 %) comme principaux facteurs de pression. Face à cette situation, des actions prioritaires, en cohérence avec les engagements de la Convention de Ramsar, sont recommandées : la restauration écologique (35 %), la gestion agricole durable (30 %), la conservation et la protection (20 %), et la sensibilisation des décideurs (15 %).

Mots-clés : Télédétection, SIG, Cartographie, dégradation de la végétation, Site Ramsar 1018

Remote Sensing Mapping of the Dynamics and Degradation of Vegetation at Ramsar Site 1018 (Southern Benin) from 2000 to 2025

Ognondoun Azize

PhD student/Multidisciplinary Doctoral School (EDP)
Laboratory of Geomatics Applications and Environmental Management
(LA2GE), University of Abomey-Calavi (UAC), Republic of Benin

Tchibozo Eric Alain M.

Full Professor (CAMES), Geomatics, Remote Sensing, GIS
Laboratory of Geomatics Applications and Environmental Management
(LA2GE), Department of Geography and Spatial Planning (DGAT/FASHS),
University of Abomey-Calavi (UAC), Republic of Benin

Vissin Expédit Wilfried

Full Professor (CAMES), Hydroclimatology
Pierre Pagney Laboratory: Climate, Water, Ecosystems and Development
(LACEEDE), Department of Geography and Spatial Planning
(DGAT/FASHS), University of Abomey-Calavi (UAC), Republic of Benin

Djaouga Mama

Senior Lecturer (CAMES), Geomatics, Remote Sensing, GIS
Laboratory of Cartography, Remote Sensing and GIS (LaCarto)
Department of Geography and Spatial Planning (DGAT/FASHS)
University of Abomey-Calavi (UAC), Republic of Benin

Abstract

Vegetation cover degradation is today a major environmental issue for wetlands in general, and for Ramsar Site 1018 located in southern Benin in particular. It currently represents a significant threat to the ecological and socio-economic balance of the landscape (agricultural exploitation, urbanization, fuelwood harvesting, and logging). The objective of this study is to assess the level of vegetation degradation at this site. The methodology adopted is a geographical approach based on the use of remote sensing data (multispectral satellite imagery), Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Evaluation (MCE), and the Analytical Hierarchy Process (AHP). The results obtained reveal significant and unevenly distributed vegetation degradation within Ramsar Site 1018. Specifically, areas with very high (14.25%) and high (48.01%) degradation together account for 62.26%, representing more than half of the study area, where vegetation cover is subject to anthropogenic pressures mainly linked to rapid urbanization and intensive agricultural activities. Areas with moderate

(19.50%) and low (18.24%) degradation correspond to surfaces where wetland vegetation is still relatively preserved, despite environmental pressures related to climate change. The PSIR analysis identified extensive agriculture (40%), deforestation (25%), urbanization (20%), and bush fires (15%) as the main pressure factors. In response to this situation, priority actions consistent with the commitments of the Ramsar Convention are recommended: ecological restoration (35%), sustainable agricultural management (30%), conservation and protection (20%), and awareness-raising among decision-makers (15%).

Keywords: Remote sensing, GIS, Cartography, Vegetation degradation, Ramsar Site 1018

Introduction

De nos jours, la dégradation environnementale est devenue préoccupante. En effet, face à la pression démographique croissante, à l'expansion des activités agricoles, à l'urbanisation accélérée et aux effets des changements climatiques, les écosystèmes des zones humides sont aujourd'hui soumis à des perturbations profondes et irréversibles. Le Bénin abrite quatre (04) sites désignés comme sites Ramsar d'Importance Internationale, avec une surface totale de 1.179.354 hectares. En effet entre 1970 et 2015, ceux marins, côtiers et intérieurs ont connu une régression de près de 35 %, soit un déclin de plus de trois fois supérieur au taux de disparition des forêts (G. Hounto *et al.*, 2019, p. 13). Dans le cadre de cette recherche, il est question d'évaluer la dégradation de la végétation de Ramsar 1018. Selon Onibon 1999, le rapprochement des variables démographiques et économiques met en évidence un déséquilibre entre les besoins actuels des populations et les ressources disponibles. Le site Ramsar 1018, situé au sud du Bénin, n'échappe pas à cette réalité et ses conditions climatiques, écologiques et environnementales sont impactées. Les formations végétales naturelles du pays, estimées à 44 % du territoire national en 1990 (4 923 000 ha), sont passées à 41 % en 1995 (4 625 000 ha), soit un recul de 70 000 ha/an, l'un des plus forts taux de la région. Dans le domaine protégé de l'État, le ruissellement et l'érosion s'intensifient sous la pression de l'occupation agricole, pastorale et urbaine des terres (FAO, 1997 ; FAO, 2000), alors que la déforestation et la dégradation des forêts tropicales contribuent à 20 % des émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique (IPCC, 2007).

Dans ce contexte, il est important de savoir dans quelle mesure la végétation du site Ramsar 1018 (Sud-Bénin) s'est-elle dégradée sous l'effet conjugué des pressions anthropiques et des changements climatiques entre 2000 et 2025.

De manière spécifique les questions suivantes sont à investiguer :

1. Quelle est la dynamique spatiale et temporelle de l'occupation du sol du site Ramsar 1018 entre 2000 et 2025 ?
2. Quels sont les facteurs anthropiques et climatiques qui expliquent la dégradation observée de la végétation du site Ramsar 1018 ?
3. Quels sont les niveaux et la répartition spatiale de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018, et quelles mesures prioritaires peuvent être préconisées pour sa conservation durable ?

Pour répondre à ces interrogations, ce travail présente d'abord le milieu d'étude et la démarche méthodologique adoptée, avant d'analyser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol du site entre 2000 et 2025. Il examine ensuite les facteurs anthropiques et climatiques de la dégradation observée, puis en dresse les niveaux et la répartition spatiale de la dégradation de la végétation, pour aboutir à des mesures prioritaires de conservation durable.

Milieu d'étude

Le Bénin abrite quatre (04) sites désignés comme sites Ramsar d'Importance Internationale, avec une surface totale de 1.179.354 hectares parmi lesquels se trouve le site Ramsar 1018. Ce dernier encore appelé Complexe Est est situé entre 6°19'44'' et 7°12'48'' de latitude Nord et 1°58'35'' et 2°47'32'' de longitude Est. Il s'étend sur une superficie de 652.760 ha, avec un périmètre de 301 km. Son altitude maximale est de 135m (région de Pobè). La figure 1 présente la situation géographique du Site Ramsar 1018.

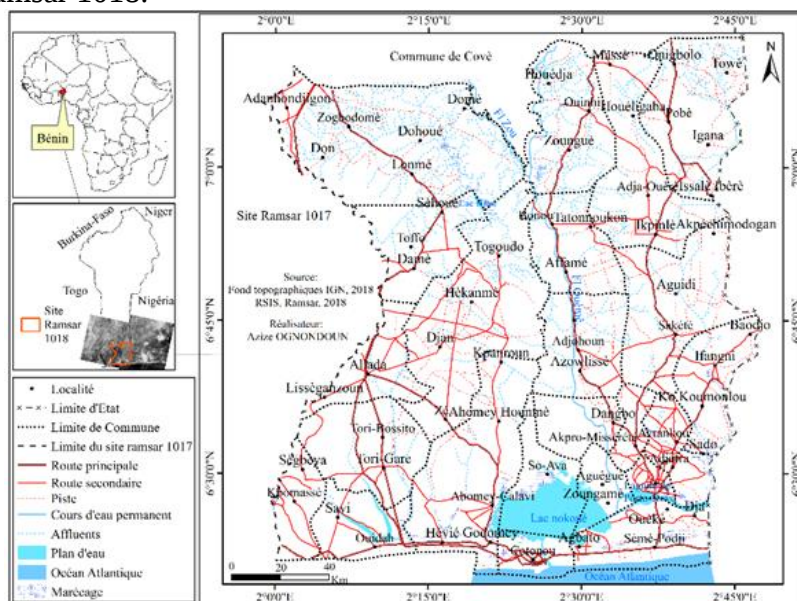


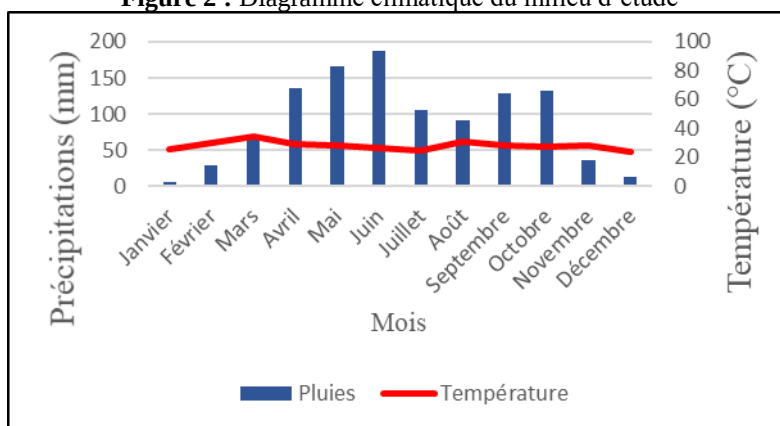
Figure 1 : Situation géographique du site Ramsar 1018

Le site Ramsar 1018 est limité au Nord par les communes de Pobè, Adja-Ouèrè et Zogbodomey (dont elle couvre une partie des territoires), au Sud par l'Océan Atlantique (à l'embouchure du fleuve Ouémé), à l'Est par le Nigéria et à l'Ouest par le site Ramsar 1017. Il regroupe cinq (05) sous-sites à savoir : la mer côtière, la basse vallée de l'Ouémé comprenant le lac Nokoué, le delta inférieur de l'Ouémé et la lagune de Porto-Novo, le complexe des lagunes anciennes (à l'ouest), les marécages d'Adjarra (à l'est), la moyenne vallée de l'Ouémé (Plan de Gestion, Site 1018).

Climat

Le Bénin est situé dans la zone intertropicale chaude et humide et subit de ce fait l'influence de deux masses d'air principales : la mousson ou alizé maritime, humide et pluvieuse, provenant du sud-ouest et l'harmattan ou alizé continental sec, en provenance du Nord-ouest. Les températures varient faiblement au cours de l'année avec des amplitudes plus marquées dans la partie septentrionale du pays. Le complexe Est (1018) qui suscite l'intérêt pour la présente étude est sous l'influence du climat tropical humide appelé climat subéquatorial (caractérisé par un régime pluviométrique bimodal). La figure 2 présente le diagramme climatique du site Ramsar 1018.

Figure 2 : Diagramme climatique du milieu d'étude



Source : Météo-Benin, octobre 2025

L'analyse de la figure 2 montre que le site Ramsar 1018, également appelé complexe Est, est soumis à un climat tropical humide de type subéquatorial caractérisé par un régime pluviométrique bimodal. Quatre saisons se succèdent : une grande saison sèche de mi-novembre à mars, une grande saison pluvieuse d'avril à mi-juillet, une petite saison sèche de mi-juillet à mi-septembre et une petite saison pluvieuse de mi-septembre à mi-novembre. Sur les trente dernières années, la pluviométrie annuelle moyenne est estimée à environ 1200 mm, avec des mois particulièrement pluvieux

entre mai et juillet, notamment juin et octobre (Météo-Bénin, 2024). Les températures oscillent généralement entre 18 °C et 35 °C, avec une humidité élevée. Ce contexte climatique favorise les activités agricoles, mais expose également ce milieu à des inondations récurrentes, à l'érosion et à la dégradation de la végétation.

Matériel et méthodes

Pour réaliser cette étude, plusieurs types de données ont été nécessaires. Leur analyse a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels selon le type de traitement requis.

Matériel

Le matériel utilisé pour cette étude est constitué d'un ordinateur, d'un appareil photo, d'un drone, d'un GPS, de Microsoft Excel, des logiciels SIG (Qgis 3.16 ; ArcGIS 10.5 et Envi 5.3) pour le traitement des images et des données. Les caractéristiques des données collectées pour la présente étude sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des données spatiales utilisées

Types/Format	Échelles /Résolution	Sources
Path/Row	191-192 / 55 191 / 56	USGS/Earth Explorer
Image Landsat 7 ETM+, 2000	1- Bleu (0.45-0.52 µm) 2- Vert (0.52-0.60 µm) 3- Rouge (0.63-0.69 µm) 4- Proche Infrarouge (0.77-0.90 µm) 5- Moyen Infrarouge 1 (1.55-1.75 µm) 6- Moyen thermique (10.4-12.5 µm) 7- Moyen Infrarouge (2.08-2.35 µm) 8- Panchromatique (0.52-0.90 µm)	
Image Landsat 9, 2025	1- Aérosols côtiers (0.43-0.45 µm) 2- Bleu (0.45-0.51 µm) 3- Vert (0.53-0.59 µm) 4- Rouge (0.64-0.67 µm) 5- Proche Infrarouge (0.85-0.88 µm) 6- Moyen Infrarouge 1 (1.57-1.65 µm) 7- Moyen Infrarouge 2 (2.11-2.29 µm) 8- Panchromatique (0.50-0.68 µm) 9- Cirrus (1.36-1.38 µm) 10- Infrarouge Thermique 1 (10.60-11.19 µm) 11- Infrarouge Thermique 2 (11.50-12.51 µm)	
Résolution spatiale	30 m	
(dimension des pixels)	Bande 8 : 15 m ; Bande 10 et 11 : 100 m	
Dimension d'une scène	185 x 185 km	
Fréquence de passage	16 jours	

Source : Travaux de laboratoire LA2GE, décembre 2025

Méthodes

La méthodologie pour la cartographie de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 a suivi plusieurs étapes. La première est l'acquisition des images satellitaires qui font l'objet de prétraitements indispensables pour garantir leur qualité, leur comparabilité pour appréhender la dynamique de l'occupation du sol du site Ramsar 1018. Ces opérations incluent les corrections radiométriques propres aux images Landsat 7 ETM+ et Landsat 9 Oli/Tirs à l'aide du logiciel ENVI 5.3 par le module FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), basé sur le modèle de transfert radiatif MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission). Ce dernier permet de convertir les valeurs numériques en réflectances, ainsi que la correction atmosphérique visant à réduire les effets liés à la diffusion et à l'absorption de l'énergie par l'atmosphère. Les paramètres utilisés incluent un modèle atmosphérique tropical, un modèle d'aérosols de type rural (ENVI → Radiometric Correction → FLAASH Atmospheric Correction). Une correction géométrique est également appliquée afin d'assurer un bon positionnement spatial des images. La deuxième est consacrée à l'évaluation multicritère (couple SIG-EMC) qui a consisté en un choix des critères d'évaluation qui sont : la standardisation et la pondération des critères par la matrice de Saaty (1991, p.15) puis celle de l'agrégation au moyen de l'algorithme Weighted Overlay (superposition pondérée) dans le logiciel SIG. Ce package a permis le traitement, l'analyse spatiale et multithématique de données géoréférencées (El Morjani, 2002). Le choix des indices appropriés pour l'étude de la dégradation de la végétation dépend de plusieurs critères, notamment : le type de phénomène qui doit être étudié, l'échelle d'investigation, la qualité, la résolution, l'échelle, le type d'information requise et la disponibilité des outils d'analyse de l'information (Roose, 2005).

Les indices spectraux font partie des méthodes de traitement d'images satellites appelées transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Ils sont basés sur le caractère multispectral des données satellitaires et permettent de décrire l'état d'un phénomène et reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Il en existe une multitude, mais le présent travail se limite à quelques-uns pour étudier la dégradation de la végétation. Ainsi, les critères jugés pertinents au regard de la synthèse de littérature (Rikimaru *et al.*, 2002) et à l'issue des enquêtes de terrain dans le secteur d'étude sont entre autres : l'indice de végétation (NDVI), l'indice (brûlis) du rapport de combustion normalisé (NBR), l'indice de végétation ajusté au sol (MSAVI2), l'indice de végétation perpendiculaire (PVI),

l'indice de différence de végétation (DVI), l'indice des sols (BSI), l'indice d'humidité par différence normalisée (NDMI), les types de sols et l'occupation du sol de 2025, qui conditionnent la résistance et la vulnérabilité des surfaces aux processus de dégradation. Les indices utilisés sont détaillés ci-dessous :

Indice de végétation (NDVI) : L'indice le plus utilisé est l'Indice de Végétation par Différence Normalisée. Il permet de mesurer la vigueur végétale, d'identifier les zones à forte ou faible densité végétale, d'apprécier la qualité de la végétation, la production de biomasse verte et l'évaluation de la couverture et de la dynamique de la végétation ainsi que pour les études d'incendies forestiers (Diof et Lambin, 2001, Paegelow *et al.*, 2012). Il est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation (A. Spotifarm, 2020, p.30). Son expression est la suivante (Bacour *et al.*, 2006) : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$; Avec PIR = réflectance dans la bande Proche Infra-Rouge et R = réflectance dans la bande rouge. C'est un indice normalisé (Davranche, 2008) et de ce fait ses valeurs s'échelonnent de -1 à 1 où : $[0+1[$ = végétation avec une forte activité chlorophyllienne ; $[-1, 0[$ = espace en eau ou très humide ; 0 = sol nu.

Indice d'humidité par différence normalisé (NDMI) : Il permet d'évaluer l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile). Il utilise les canaux NIR et SWIR pour créer un ratio conçu afin d'atténuer l'éclairage et les effets atmosphériques. Sa formule est : $NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$.

NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge ; SWIR1 = valeurs de pixel du canal d'onde courte infrarouge. Le NDMI est normalisé et varie entre -1 et +1. Si : Valeurs élevées (≈ 0.4 à 1) = Végétation humide (bonne teneur en eau, végétation saine) ; Valeurs moyennes (≈ 0.1 à 0.4) = Humidité modérée (végétation en stress, hydrique léger) ; Valeurs proches de 0 (≈ -0.1 à 0.1) = Faible humidité (sol nu, végétation sèche) ; Valeurs négatives (< 0) = Très faible humidité (zones très sèches, sols nus secs, parfois zones brûlées).

Indice (brûlis) du rapport de combustion normalisé (NBR) : L'indice NBR est essentiel pour analyser la dégradation de la végétation liée aux incendies (brûlis). C'est un indice spectral utilisé en télédétection pour détecter les feux de végétation, les perturbations liées à la combustion et évaluer les zones brûlées ainsi que la sévérité des incendies. Il a été développé par Key C. H. et Benson N. C. (2006) dans le cadre du programme FIREMON. Selon ces auteurs, le NBR permet de cartographier les surfaces brûlées, d'évaluer la sévérité du feu et de suivre la régénération post-incendie. Il permet d'identifier les zones dégradées ou récemment brûlées, ce qui est essentiel pour analyser la couverture végétale. Le NBR repose sur le comportement des surfaces brûlées sur une image :

la végétation saine = forte réflexion en NIR

les zones brûlées = forte réflexion en SWIR

après incendie = chute du NIR et hausse du SWIR

Le contraste NIR / SWIR permet donc d'identifier les brûlis. Sa formule est $NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$

NIR = Proche infrarouge (B5) ; SWIR = Infrarouge à ondes courtes (B7)

Les valeurs du NBR varient selon l'état de la surface observée. Ainsi si : Valeurs élevées (= 0.4 à 1) = Végétation dense, saine, non brûlée (forte réflexion en NIR, faible en SWIR) ; Valeurs moyennes ($\approx$ 0.1 à 0.4) = Végétation modérée ou légèrement dégradée ; Valeurs proches de 0 (= -0.1 à 0.1) = Sol nu, zones urbaines ou surfaces peu végétalisées ; Valeurs négatives (< 0) = Zones brûlées, eau ou surfaces fortement dégradées ; (forte réflexion en SWIR due à la sécheresse ou aux cendres). Dans les zones brûlées après un incendie : le NIR diminue (moins de végétation) et le SWIR augmente (présence de cendres et sécheresse). Ce qui entraîne une baisse importante du NBR, souvent vers des valeurs faibles ou négatives.

Indice MSAVI2 : L'indice MSAVI2 est basé sur la détermination préalable de la droite des sols à partir des bandes spectrales du capteur. Il utilise la pente a et l'ordonnée à l'origine b de la droite, plutôt que les valeurs arbitraires fixées pour l'indice SAVI2.

$$MSAVI2 = \frac{2NIR+1 - \sqrt{(2NIR+1)^2 - 8(NIR-R)}}{2}$$

Comme les autres indices de végétation, le MSAVI2 varie généralement entre -1 et +1.

Il corrige l'effet du sol (très important en zones sèches ou peu couvertes).

Si :

- Valeurs élevées (= 0.5 à 1) = Végétation dense et vigoureuse (forte activité chlorophyllienne) ; Valeurs moyennes (= 0.2 à 0.5) = Végétation modérée ou clairsemée ; Valeurs faibles (= 0 à 0.2) = Sol nu ou végétation très faible et Valeurs négatives (< 0) = Eau, zones très dégradées ou surfaces non végétalisées.

Types de sols : La carte des sols du secteur d'étude est extraite de la carte des sols au 1 : 200.000 de Volkoff (1976). Des informations additionnelles sont collectées à partir des travaux de A. Fritz (1996) et du CENAP (V. Agoussou, 1987, p. 60). Cette approche a permis d'avoir une meilleure appréhension de la perméabilité et de la capacité de rétention en eau des différents types de sols.

Indice BSI : L'indice des sols nus est utilisé pour analyser la dégradation de la végétation et l'exposition des sols. Il est utilisé en télédétection pour identifier et quantifier les surfaces de sols nus ou faiblement végétalisées. Selon les travaux de Rikimaru et al. (2002), le BSI permet de détecter les zones de dégradation végétale, de cartographier les

sols exposés. Le BSI combine certaines bandes pour isoler les sols nus. Sa formule est $BSI = ((SWIR + Red) - (NIR + Blue) / (SWIR + Red) + (NIR + Blue))$, où : SWIR = Infrarouge à ondes courtes (B7) ; Red = Visible rouge (B4) ; NIR = Proche infrarouge (B5) ; Blue = Visible bleu (B2)

Si la valeur obtenue est positive (0 à +1), alors le sol est nu ou sec ; Plus la valeur est élevée = plus le sol est exposé. Si la valeur est proche de 0, alors la zone est mixte ; Si la valeur est négative (-1 à 0) alors c'est de la végétation ou de l'eau.

Indice PVI : L'indice de végétation perpendiculaire est un outil précieux en télédétection qui vise à évaluer la couverture végétale tout en minimisant l'influence des sols sous-jacents. Il est conçu pour réduire l'impact des sols sur le signal mesuré par les capteurs satellitaires, permettant ainsi une meilleure évaluation de la végétation. Il permet également une meilleure discrimination entre sol et végétation. Sa formule est la suivante :

$$PVI = \frac{NIR - aR - b}{\sqrt{1 + a^2}}$$

NIR (ou PIR) : proche infrarouge ; R : bande rouge ; a : pente de la droite des sols et b : ordonnée à l'origine de la droite des sols. Dans le plan spectral (R, NIR), les pixels de sol nu s'alignent approximativement sur une droite. Cette droite s'écrit : $NIR = aR + b$ où (a = pente ; b = ordonnée à l'origine).

Pour calculer a et b, on doit d'abord isoler uniquement les zones sans végétation : seuil NDVI : $NDVI < 0.2$ ou sélection visuelle (zones claires : sols nus)

Ainsi on'a un ensemble de pixels avec valeurs R et NIR. Pour chaque pixel sélectionné : axe X = R ; axe Y = NIR. On obtient un nuage de points (scatter plot) puis on ajuste une droite : $NIR = aR + b$. À partir des données, on calcule : $a = \frac{Cov(R, NIR)}{Var(R)}$ et

$$b = \overline{NIR} - a \cdot \overline{R}$$

Ici, on voit directement : a = 1 et b = 0.05. Donc : $NIR = 1R + 0.05$

Si le PVI est mesuré à une distance de la droite des sols alors : $PVI > 0$: Végétation présente ; Plus la valeur est élevée, plus la végétation est dense ; $PVI = 0$: Sol nu ; Très faible couverture végétale ; $PVI < 0$: Surfaces non végétalisées (eau ; zones brûlées ; surfaces très dégradées).

Indice DVI : L'indice de différence de végétation est un indicateur utilisé en télédétection pour évaluer la présence et l'état de la végétation. Il est basé sur la différence entre le proche infrarouge et le rouge. Il permet une évaluation directe de la biomasse végétale et sert de complément aux indices normalisés. Il est calculé comme la différence entre la réflectance dans le proche infrarouge (NIR) et la réflectance dans le rouge (R). Sa formule est : $DVI = (PIR - R) / PIR$: Réflectance dans le proche infrarouge, une bande où la végétation saine réfléchit fortement et R : Réflectance dans le rouge, une bande où la chlorophylle absorbe une grande partie de la lumière. Plus la

végétation est dense et vigoureuse, plus la valeur du DVI est élevée. Si : $DVI > 0$: présence de végétation (plus la valeur est grande, plus la végétation est dense) ; $DVI = 0$: zones de sol nu, surfaces imperméabilisées, zones à faible végétation et $DVI < 0$: généralement de l'eau, des zones humides ou des surfaces sombres (car la réflectance du RED devient supérieure à celle du NIR).

Standardisation des critères

Pour comparer tous les critères entre eux, il est nécessaire de les standardiser (S. Drobne, A. Lisec, 2009). Par conséquent, il faut avoir la même échelle de comparaison. Ainsi, chaque critère comportant plusieurs classes se voit attribuer des scores différents allant de 0 à 10 en fonction de l'échelle d'évaluation. Ce score est plus ou moins élevé selon l'importance de la classe.

Pondération des critères

Plusieurs méthodes existent pour le choix du poids. On retrouve notamment la comparaison par paire, qui consiste à évaluer tous les critères par paire et les trier par ordre d'importance dans un tableau. La méthode du Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) développée par Saaty (1991) a été utilisée à cet effet. Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 100 % ou 1. Le poids des facteurs indique leur importance relative par rapport à tous les autres. Ils sont déterminés à partir d'une série de comparaison par paire de ces critères en tenant compte de l'importance des différentes classes. Leur importance relative est arrangée dans une matrice de décision ou matrice de comparaison par paire (tableau 2) et déterminée sur une échelle numérique d'importance à 9 niveaux (tableau 3).

Tableau 2 : Matrice de comparaison par paire (Saaty, 1991)

Critères	C1	C2	...	Cn
C1	1	a_{12}		a_{1n}
C2	$a_{21}=1/a_{12}$	1		a_{2n}
...			1	
Cn	$a_{n1}=1/a_{1n}$	$a_{n2}=1/a_{2n}$		1

Source : Saaty, 1991

Dans le processus d'analyse hiérarchique, l'importance relative de la composante ou critère i par rapport à la composante j est déterminée à l'aide de l'échelle de Saaty et est affecté à la (i,j) ème position de la matrice de comparaison par paires. Automatiquement, l'inverse du numéro attribué est associé à la (j,i) ème position selon la règle suivante: $a_{ij} = 0$ alors $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ainsi $a_{ii} = 1$, $i = 1, 2, \dots, n$ (Chang *et al*, 2007). Le tableau 3 présente l'échelle numérique d'importance à neuf niveaux (Saaty, 1991).

Tableau 3 : Échelle numérique d'importance à 9 niveaux

Degrés d'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif.
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelle favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre.
7	Importance très forte ou attestée	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique.
9	Importance absolue	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre sont aussi convaincantes que possible.
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Source : Adapté de Saaty, 1991

Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule le vecteur propre $\{W_i\}_{i=1\dots n}$ de chaque critère et le vecteur propre normalisé $\{T_i\}_{i=1\dots n}$ lui correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. Le vecteur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode. Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé grâce à la formule suivante :

$$W_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}$$

n = nombre de critère et a_{ij} = degré d'importance

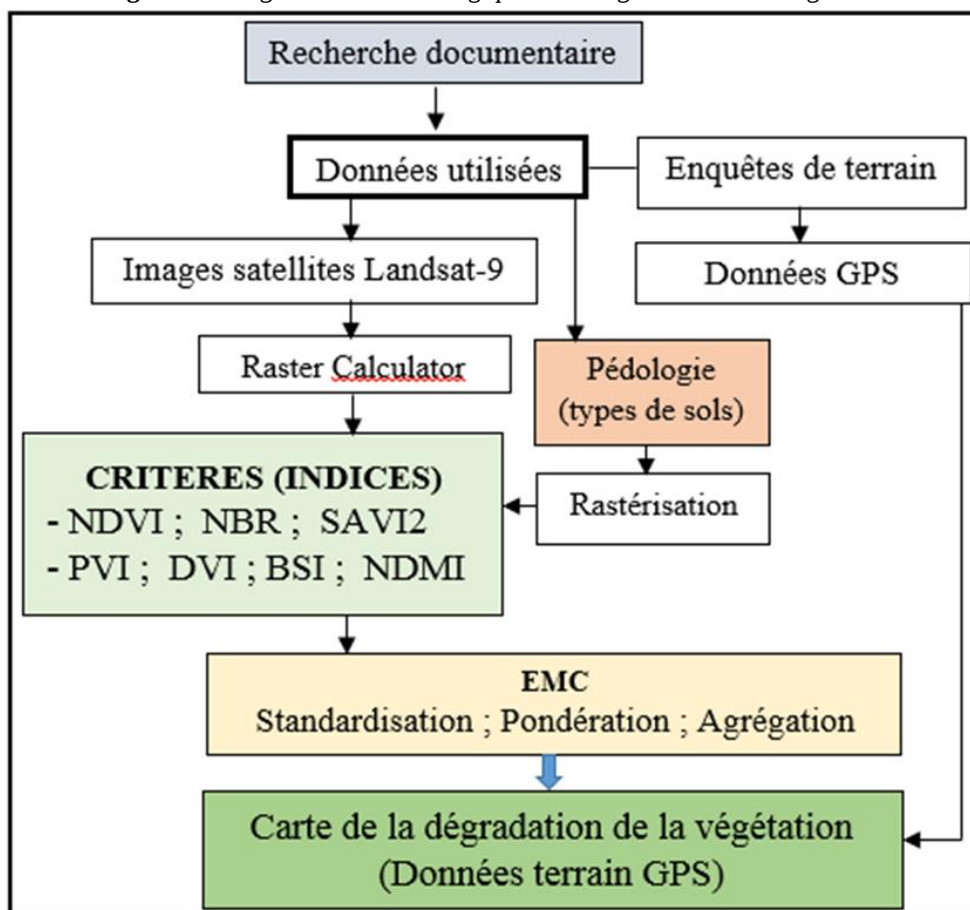
En outre, celui-ci doit être normalisé afin que la somme de ses éléments soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque élément par rapport à l'addition (soit la fréquence).

$$T_i = (W_i / \sum W_i) \times 100 \quad ; \quad T_n = (W_n / \sum W_i) \times 100$$

Avec T_i le vecteur propre normalisé encore appelé coefficient de pondération utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère.

Agrégation des critères

L'agrégation consiste à multiplier chaque couche-facteur par son coefficient de pondération et ensuite à additionner ces résultats pour produire un indice d'aptitude situé sur une échelle prédéterminée. Le logiciel ArcGIS 10.5 propose plusieurs méthodes d'agrégations et présente plusieurs algorithmes dans la fonction overlay (superposition) de l'outil Spatial Analyst. Ainsi celle Weighted Overlay (Superposition pondérée) est choisie. Elle permet de superposer plusieurs rasters en utilisant une échelle de mesure commune et les pondère en fonction de leur importance entrée par l'opérateur au cours de l'ajout. La figure 3 présente le diagramme méthodologique.

Figure 3 : Diagramme méthodologique de la dégradation de la végétation

Source : Travaux de laboratoire LA2GE, janvier 2026

Confirmation et validation de la représentation cartographique

La validation a consisté à confronter les résultats obtenus par la présente étude aux réalités du terrain. Pour ce faire, des zones - tests (transects aléatoires) ont été identifiées sur la carte de dégradation des sols et sont visitées sur le terrain afin de vérifier sa conformité et sa validation.

La validation de la carte d'occupation du sol a été réalisée à l'aide d'un échantillonnage aléatoire probabiliste. La comparaison des données de terrain avec leurs représentations sur les images a permis d'obtenir une précision globale de 84,6 % et un coefficient de Kappa de 0,89 traduisant ainsi une bonne fiabilité de la classification supervisée. Les erreurs spatiales observées concernent principalement les zones de transition entre milieux agricoles, urbains et humides. Malgré ces limites, les résultats obtenus par la présente étude sont jugés satisfaisants pour l'analyse spatiale de l'occupation du sol (Landis & Koch, 1977).

Resultats

Cartographie la dynamique de l'occupation du sol du site Ramsar 1018 de 2000 à 2025

La distribution spatiale et la quantification des catégories d'occupation du sol du site Ramsar 1018 constituent une étape essentielle pour apprécier l'état actuel des différentes unités d'occupation et d'en mesurer les superficies. La figure 4 et 5 montre l'occupation du sol du site Ramsar de 2000 à 2025.

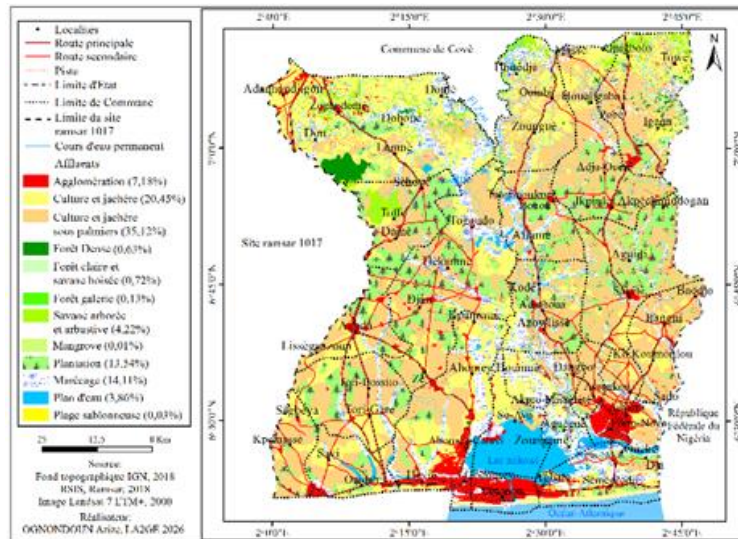


Figure 4 : Occupation du sol de 2000

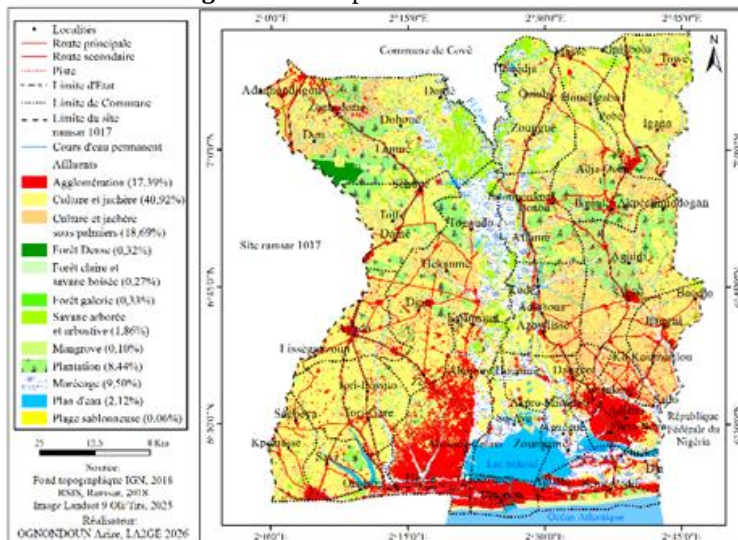


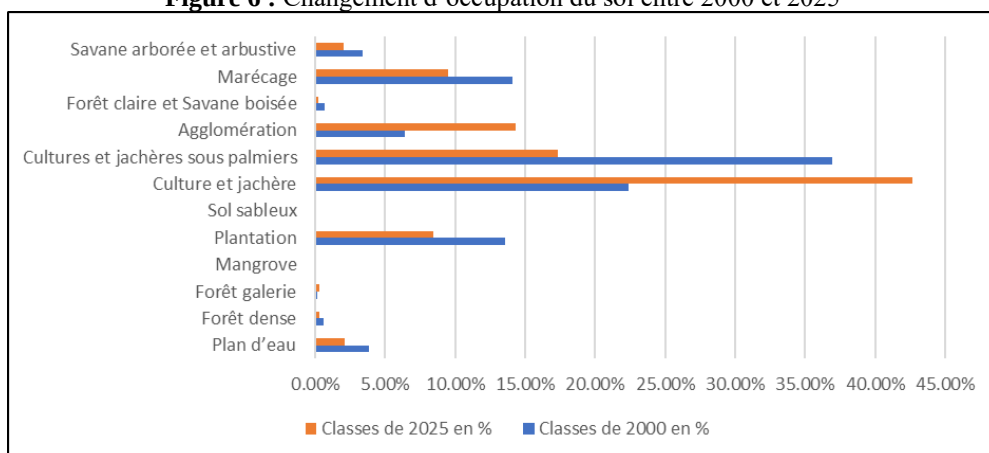
Figure 5 : Occupation du sol de 2025

L'analyse de l'occupation du sol de 2000 et 2025 met en évidence une importante dynamique spatiale au sein du site Ramsar 1018. En 2000,

l'espace d'étude était largement dominé par les cultures et jachères sous palmiers (36,94 %), suivies des cultures et jachères (22,39 %), des marécages (14,11 %) et des plantations (13,54 %). En 2025, on observe une nette progression des cultures et jachères, qui ont atteint actuellement 42,66 %, ainsi que des agglomérations dont la superficie est passée de 6,43 % à 14,32 %. Les cultures et jachères sous palmiers ont connu une importante diminution pour atteindre à 17,30 %, tandis que les plantations et les formations végétales naturelles connaissent la même tendance à la régression.

Cette évolution variée des unités d'occupation du sol explique l'extension des espaces agricoles et urbains au détriment des formations végétales et de certains écosystèmes naturels, révélant ainsi une pression anthropique croissante sur le site Ramsar 1018. La progression des agglomérations est particulièrement marquée au sud (Cotonou, Abomey-Calavi, Sèmè-Podji, Porto-Novo, Ouidah, Adjara) tandis que l'extension des espaces cultivés est plus diffuse. Ces mutations constituent un indicateur important de la dégradation progressive de la couverture végétale, qui sera approfondie à travers le calcul des indices de télédétection au travers de l'analyse de la dégradation environnementale. La figure 6 présente le changement d'occupation du sol entre les périodes d'étude 2000 et 2025.

Figure 6 : Changement d'occupation du sol entre 2000 et 2025



Source : Traitement statistique de la matrice de transition, Ognondoun, 2026

La figure 6 met en évidence les changements intervenus dans les différentes catégories d'occupation du sol du site Ramsar 1018 entre 2000 et 2025. L'analyse comparative des superficies relatives révèle une dynamique paysagère marquée surtout par une intensification des activités anthropiques, qui se traduisant par une expansion des espaces agricoles et urbanisés au détriment des formations naturelles et de certaines zones humides. Le tableau 4 présente la matrice de transition.

Tableau 4 : Matrice de transition de la dynamique de l'occupation du sol

Classes	PE	FD	FG	MAN	SAA	PT	MA	SS	CJ	CJP	AGG	FCSB	Total 2000
PE	2430,74	0,05	6,39	16,06	436,89	45,28	21231,45	73,41	981,77	112,51	344,68	13,95	25693,18
FD	0,29	36,22	1,28	0,00	65,66	40,51	272,30	0,00	1244,43	245,16	76,04	60,48	2042,37
FG	2,55	0,00	158,66	0,00	131,44	13,17	59,95	0,01	265,89	234,68	0,00	8,74	875,09
MAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SAA	32,20	29,26	59,54	0,00	2235,48	1039,44	36,18	8,13	6616,78	1725,75	10209,87	163,85	22156,48
PT	258,60	353,68	99,30	0,00	1268,85	23883,05	5010,21	44,13	35922,89	18027,92	2744,17	807,06	88419,86
MA	11628,02	234,03	646,84	36,70	1264,38	1724,23	32733,85	168,39	26864,11	12432,45	3716,55	678,07	92127,62
SS	148,83	0,00	0,00	0,00	0,00	3,74	0,94	13,19	0,10	0,03	52,78	0,00	219,61
CJ	595,51	294,34	698,74	67,38	1372,06	11895,74	9030,52	49,68	81551,76	23552,21	15714,14	1325,80	146147,88
CJP	772,11	2929,39	509,11	9,83	6748,89	16236,23	13230,99	2,15	123972,77	56488,03	18625,84	1653,36	241178,70
AGG	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,18	0,09	41976,54	0,01	41976,92
FCSB	0,47	206,02	6,39	0,00	25,93	230,31	78,28	0,00	1063,63	116,64	3,59	14,73	1745,99
Total 2025	15869,36	4082,99	2186,25	129,97	13549,58	55111,70	83268,59	359,09	278484,31	112935,47	93464,20	4726,05	652759,88

Source : Interprétation image Landsat ETM+ de 2000 et 9 Oli/Tirs de 2025

Légende : PE : Plan d'eau ; FG : Forêt galerie ; FD : Forêt dense ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SAA : Savanes arborée et arbustive ; MAN : Mangrove ; PT : Plantation ; MA : Marécage ; SS : Sol sableux ; CJ : Culture et jachères ; CJP : Culture et jachères sous palmiers ; AGG : Agglomération

Le tableau 4 montre la matrice de transition. Sa lecture révèle une forte dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2025. Les principales transformations concernent surtout la conversion des cultures et jachères sous palmiers en cultures et jachères, ainsi que la transformation des zones marécageuses en espaces agricoles. L'extension des agglomérations au détriment des terres cultivées traduit également la pression d'une urbanisation croissante. Ces changements témoignent d'une intensification des pressions anthropiques, contribuant ainsi à la dégradation progressive des écosystèmes du site Ramsar 1018.

Cartographie de la dégradation de la végétation

La cartographie de la dégradation de la végétation repose sur une approche intégrée combinant la standardisation des critères, leur pondération selon leur importance relative et leur agrégation, afin de produire une représentation spatiale cohérente et fiable des niveaux de dégradation.

Standardisation des critères

La standardisation des critères consiste à transformer et harmoniser les différentes variables utilisées afin de les rendre comparables sur une même échelle d'analyse, facilitant ainsi leur intégration dans le processus d'évaluation de la dégradation de la végétation. Le tableau 5 montre la standardisation des critères (indices).

Tableau 5: Standardisation des critères (indices)

Indice de végétation (NDVI)	- 1 - 1	2	Types de sols	Hydromorphes	6
	- 0,6 - - 0,9	4		Ferrugineux, Vertisols, sables marins littoraux	7
	- 0,3 - - 0,6	7		Hydromorphes non salés à anmoor acide	8
	- 0,1 - - 0,3	9		Ferralitiques	9
Indice d'humidité (NDMI)	- 0,3	2	Indice de BSI	-0,6	2
	- 0,1 - -0,3	4		-0,3	4
	0	7		-0,3	7
	0,1 - 0,3	9		0,6	9
Indice de NBR	0,6 - 1	2	Indice de PVI	0,5 - 0,6	2
	0,4 - 0,6	4		0,2 - 0,5	4
	-0,2 - -0,4	7		-0,3 - -0,01	7
	-0,01 - -0,2	9		-0,3	9
Indice de MSAVI2	0,5 - 1	2	Indice de DVI	0,4	2
	0,2 - 0,5	4		0,05	4
	0 - -0,2	7		0	7
	-0,02 - - 0,04	9		-0,1	9
Occupation du sol	Forêt dense, Forêt claire savane boisée, Forêt galerie, Savanes arborée et arbustive, Mangrove, Plantation, Marécage, Sol sableux				5
	Culture et jachères, Culture et jachères sous palmiers				7
	Agglomération				9

Source : Ognondoun et al., 2026

La standardisation présentée dans le tableau 5 montre une hiérarchisation cohérente des indices biophysiques en fonction de leur contribution à la dégradation de la végétation, avec des classes de valeurs traduites en scores comparables. Cette approche est en accord avec plusieurs travaux en télédétection, notamment ceux de Rouse *et al.*, (1974) pour le NDVI et Huete (1988) pour le SAVI/MSAVI, qui soulignent l'importance de normaliser les indices pour une meilleure interprétation spatiale. De même, des études comme celles de Zha *et al.*, (2003) sur le BSI confirment la pertinence de ces seuils pour distinguer les zones dégradées. Ainsi, la méthode adoptée garantit une intégration fiable des variables dans l'analyse multicritère de la dégradation végétale. Les différentes figures présentent la standardisation des critères.

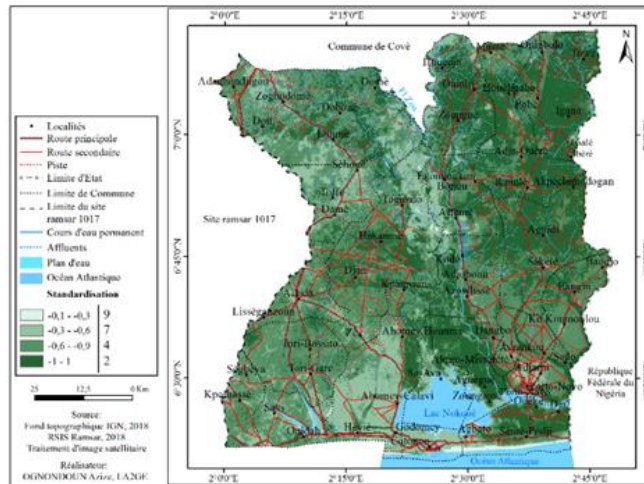


Figure 7: Standardisation du NDVI

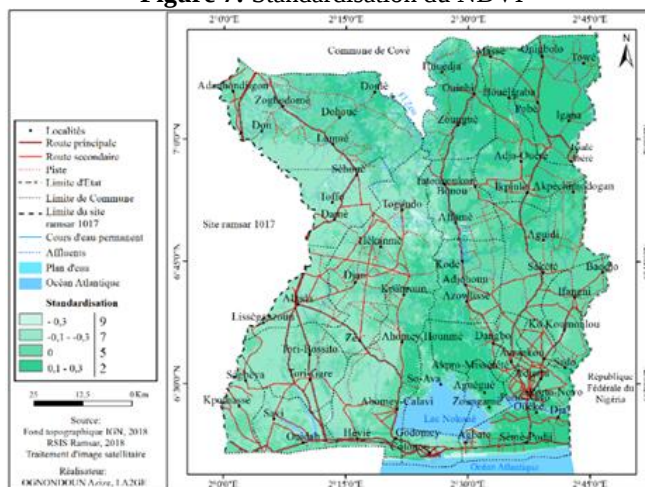


Figure 8: Standardisation du NDMI

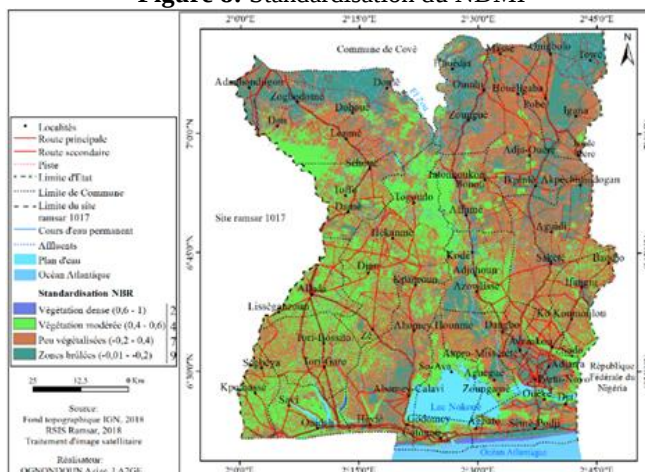


Figure 9: Standardisation du NBR

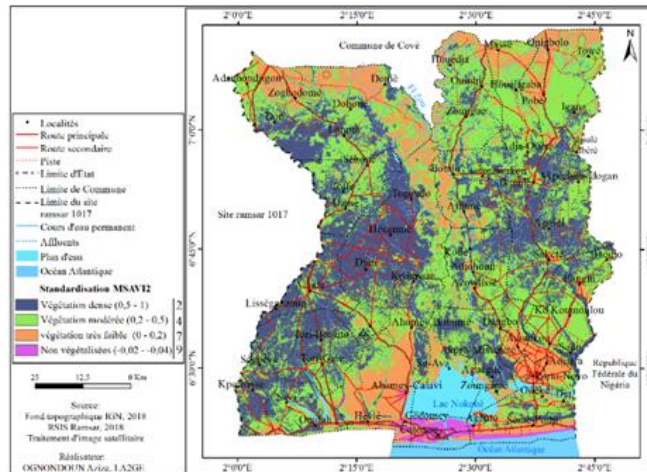


Figure 10: Standardisation du MSAVI2

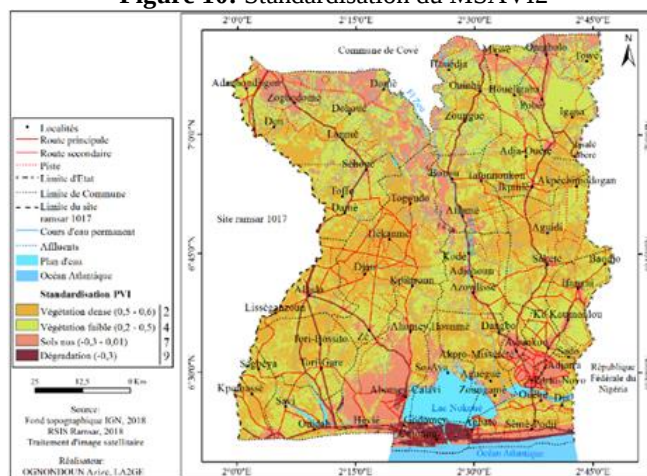


Figure 11: Standardisation du PVI

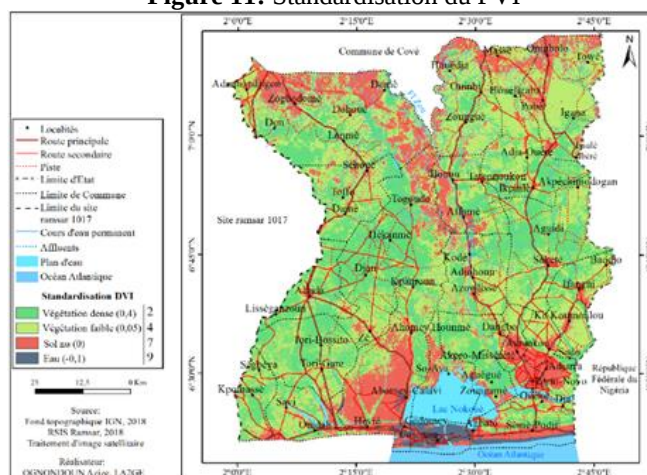


Figure 12: Standardisation du DVI

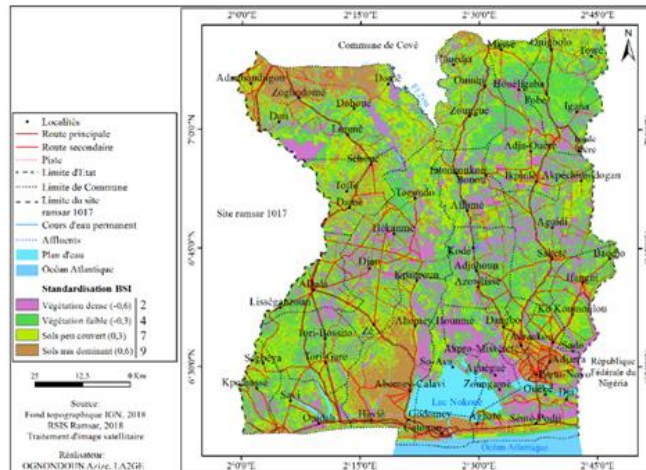


Figure 13: Standardisation du BSI

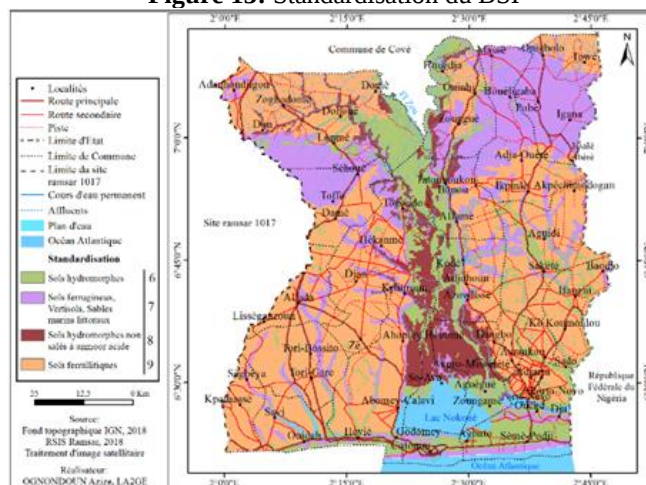


Figure 14: Standardisation des types de sols

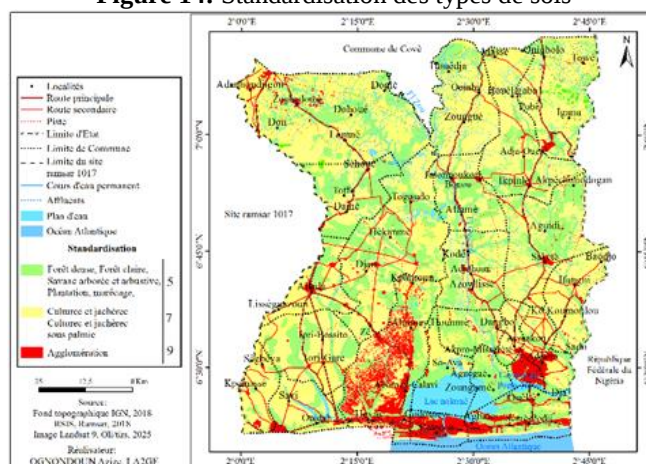


Figure 15 : Standardisation de l'occupation du sol

Pondération des critères

La pondération des critères constitue une étape essentielle visant à attribuer à chaque facteur un poids relatif en fonction de son importance dans l'évaluation globale du phénomène étudié. Le tableau 6 montre la matrice de comparaison par paire des critères

Tableau 6 : Matrice de comparaison par paire des critères

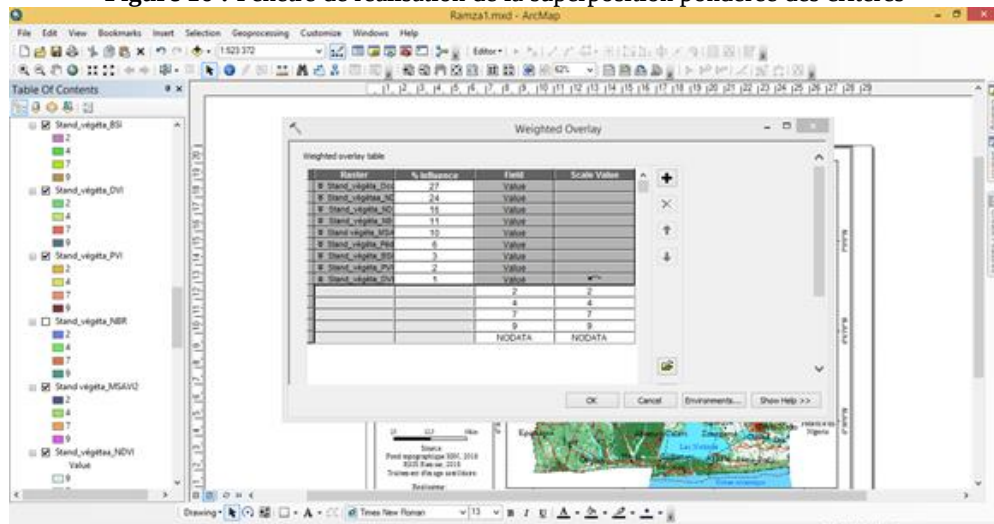
Critères	Occupatio n du sol	NDV I	NDM I	NB R	MSAVI 2	Sols	BSI	PVI	DV I
Occupatio n du sol	1								
NDVI	1/1	1							
NDMI	1/2	1/2	1						
NBR	1/3	1/2	1/2	1					
MSAVI2	1/4	1/3	1/2	1/1	1				
Sols	1/6	1/5	1/3	1/2	1/2	1			
BSI	1/9	1/8	1/5	1/4	1/3	1/2	1		
PVI	1/9	1/9	1/8	1/6	1/4	1/3	1/2	1	
DVI	1/9	1/9	1/9	1/9	1/8	1/5	1/3	1/2	1
Wi	0,27	0,23	0,16	0,11	0,10	0,0 6	0,0 3	0,0 2	0,02
Ti (%)	27	24	16	11	9	6	3	2	2

Source : Ognondoun et al., 2026

La matrice de comparaison par paires met en évidence la prédominance de l'occupation du sol, du NDVI et du NDMI dans l'évaluation de la dégradation de la végétation, avec des poids respectifs de 27 %, 24 % et 16 %. Le NBR et le MSAVI2 présentent également une contribution relativement importante, avec respectivement 11 % et 10 %. À l'inverse, les critères sols, BSI, PVI et DVI présentent des poids plus faibles, respectivement de 6%, 3%, 2% et 1%. Cette hiérarchisation traduit l'importance accordée aux variables directement liées à la couverture et à l'état de la végétation. Le contrôle de cohérence donne un RC de 2,1 %, inférieur au seuil de 10 %, confirmant la cohérence de la matrice de comparaison.

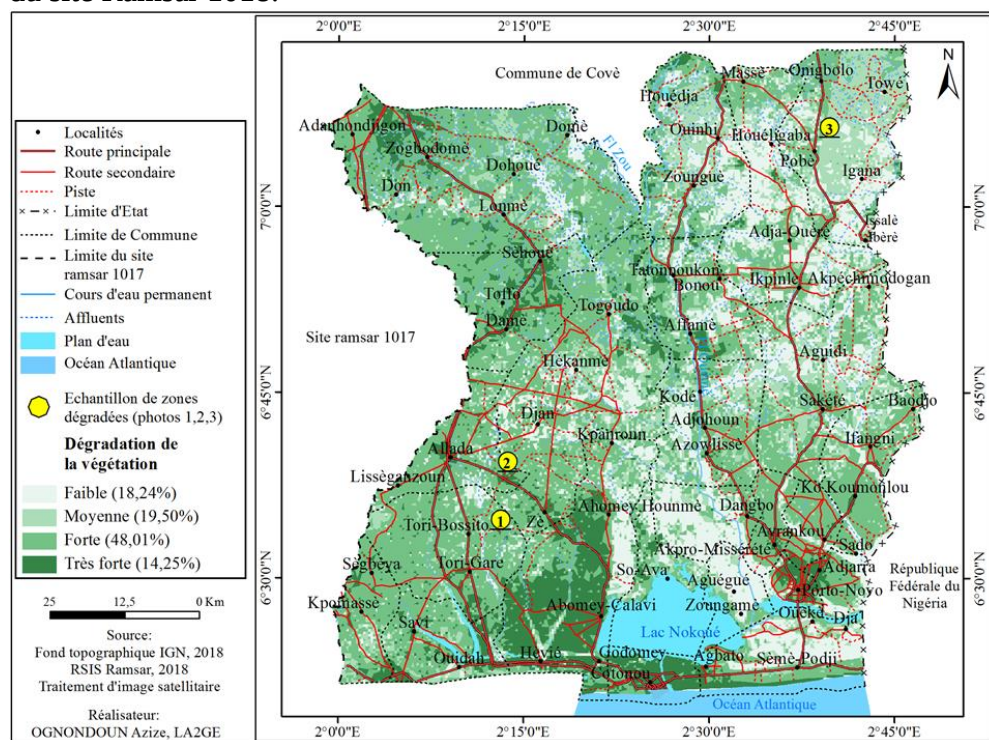
Agrégation des critères

A l'intérieur d'un SIG, la combinaison des critères est réalisée au moyen de l'algorithme Weighted Overlay (superposition pondérée) pour une agrégation. La figure 16 présente la fenêtre de réalisation dans Weighted Overlay (Superposition pondérée).

Figure 16 : Fenêtre de réalisation de la superposition pondérée des critères

Source : LA2GE, Ognondoun, janvier 2026

L'analyse de la figure 16 montre la prédominance de l'occupation du sol du NDVI et NDMI (67% de l'influence totale). Cette superposition a permis d'obtenir la carte synthèse de la dégradation de la végétation. La Figure 17 présente la distribution spatiale de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018.

**Figure 17** : Distribution spatiale de la dégradation de la végétation

La figure 17 montre la répartition spatiale de la dégradation de la végétation. Cette dernière est obtenue par la pondération multicritère des indices biophysiques (NBR, NDVI, MSAVI2, PVI, DVI, BSI, NDMI, types de sols, occupation du sol) et des facteurs environnementaux, met en évidence une structuration spatiale contrastée de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018. L'analyse des classes étudiées révèle une dominance des niveaux de dégradation très forte (14,25 %) et forte (48,01 %), suivie des celles moyenne (19,50 %) et faible (18,24 %). Cette distribution spatiale localisée traduit une pression significative exercée sur le couvert végétal, avec une tendance générale à une dégradation avancée de la zone d'étude.

Sur le plan spatial, les zones de dégradation très forte se concentrent principalement dans la partie méridionale et sud-est, notamment autour des agglomérations d'Abomey-Calavi, de Cotonou, de Sèmè-Podji, de Porto-Novo de Ouidah et dans les zones riveraines du lac Nokoué. Cette configuration s'explique surtout par l'intensité localisée des activités anthropiques, incluant l'urbanisation rapide, l'exploitation des ressources naturelles, les pratiques agricoles extensives et la pression démographique croissante. Ces résultats corroborent les observations de Eric F. Lambin et Helmut J. Geist (2006), qui ont montré que la dynamique de dégradation des écosystèmes en Afrique subsaharienne est fortement liée aux facteurs anthropiques, notamment l'expansion urbaine et agricole.

Les zones de dégradation forte, largement dominantes, couvrent une grande partie du centre (Toffo, Bonou, Adjohoun) et du sud-ouest (Tori-Bossito, Zè, Allada, Kpomassè) du site Ramsar 1018, traduisant ainsi l'expression des milieux soumis à une pression modérée à élevée mais encore susceptibles de régénération. Ces espaces correspondent généralement à des zones agricoles et périurbaines où la végétation est fragmentée. Les zones de dégradation moyenne et faible, quant à elles, se localisent davantage dans les secteurs septentrionaux et certaines zones moins accessibles, où les conditions environnementales et une moindre pression humaine favorisent la conservation relative du couvert végétal.

La cohérence de la figure de synthèse repose sur l'intégration de plusieurs indices de télédétection, chacun apportant une information spécifique sur l'état de la végétation et des sols. À cet égard, les travaux de Abdelaziz Bannari *et al.*, (1995) ont démontré que la combinaison de plusieurs indices spectraux améliore significativement la détection des gradients de dégradation environnementale. De même, Alfredo R. Huete (1988) souligne l'importance des indices corrigés du sol (comme le MSAVI2) pour une meilleure estimation de la végétation dans les milieux à couverture discontinue, tandis que John A. Richardson et Charles L.

Wiegand (1977) mettent en évidence la pertinence du PVI pour discriminer efficacement les sols nus et la végétation.

Par ailleurs, l'utilisation d'indices d'humidité tels que le NDMI et d'indices de dégradation comme le NBR permet de mieux capter les dynamiques liées au stress hydrique et aux perturbations du couvert végétal, rejoignant les conclusions de Christopher D. Elvidge (1998) sur l'importance des approches multispectrales dans l'évaluation des changements environnementaux.

En somme, la figure de synthèse met en évidence une dégradation préoccupante de la végétation du site Ramsar 1018, dominée par des niveaux forts à très forts, traduisant une vulnérabilité accrue des écosystèmes. Elle constitue un outil d'aide à la décision essentiel pour l'aménagement du territoire et la mise en œuvre de stratégies de gestion durable visant à limiter la dégradation et à favoriser la restauration du couvert végétal.

Enfin, la validation par les points d'échantillonnage (Photos 1 à 3) renforce la fiabilité de la classification, en établissant une correspondance entre les observations de terrain et les niveaux de dégradation cartographiés. Cette approche intégrée s'inscrit dans les recommandations méthodologiques en analyse multicritère, où la pondération des critères permet de hiérarchiser leur influence dans le processus décisionnel. La planche 1 montre quelques zones de végétation en dégradation au profit de l'urbanisation et l'agriculture du site Ramsar 1018.

Planche 1 : Quelques zones de végétation en dégradation au profit de l'urbanisation et l'agriculture du site Ramsar 1018



X = 2,2315736 Y = 6,6044169



X = 2,2338674 Y = 6,6472322

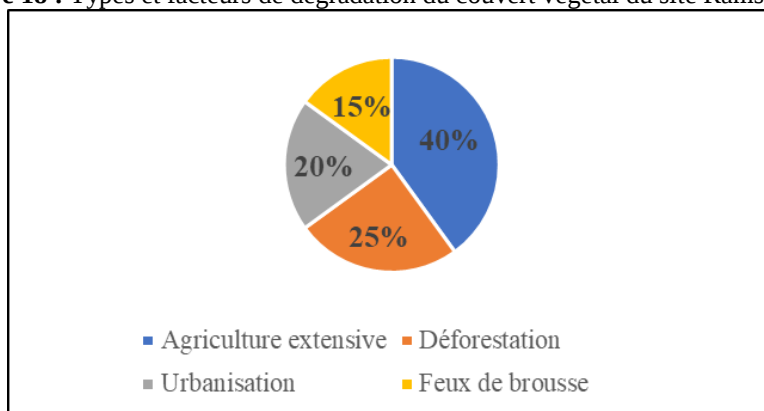


X = 2,6857073 Y = 6,9943084

Source : Prise de vue par drone, Ognondoun, janvier 2026

L'analyse de la planche 1 montre quelques zones de végétation en dégradation au profit de l'urbanisation et l'agriculture du site Ramsar 1018. La photo 1.1 montre une dégradation progressive du couvert végétal caractérisée par une fragmentation de la végétation naturelle au profit des activités agricoles. On observe une juxtaposition de zones cultivées et de reliques de végétation, traduisant une conversion partielle des formations végétales en terres agricoles interprétant ainsi une pression anthropique accentuée. La photo 1.2 montre une dégradation avancée liée à l'urbanisation, caractérisée par des sols nus et une quasi-disparition de la végétation, indiquant une forte artificialisation du milieu. La photo 1.3 met en évidence une dégradation de la végétation liée à l'exploitation et à la commercialisation des ressources ligneuses. La présence de bois coupé et stocké en bordure de voie témoigne d'une activité intense de prélèvement du couvert végétal avec une réduction de la biomasse et une perturbation de la régénération naturelle. La figure 18 illustre les types des causes de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018

Figure 18 : Types et facteurs de dégradation du couvert végétal du site Ramsar 1018

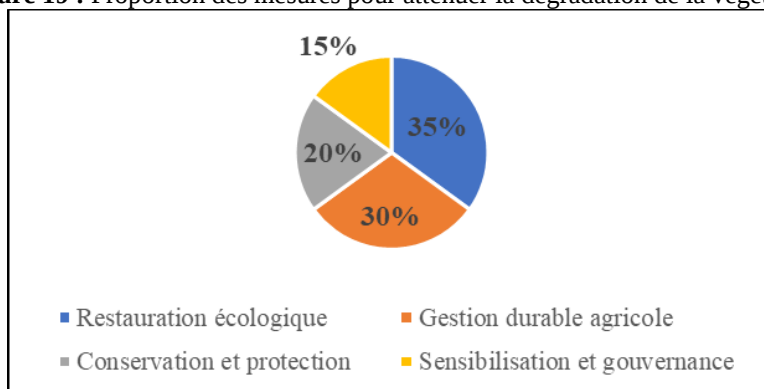


Source : Travaux de terrain, janvier 2026

La figure 18 met en évidence une dominance des causes anthropiques dans la dégradation au site Ramsar 1018. Elles sont marquées par l'agriculture extensive (40 %), suivie de la déforestation (25 %), de l'urbanisation (20 %) et des feux de brousse (15 %). Cette répartition inégale traduit une pression variée et importante liée principalement aux pratiques agricoles non durables et à l'expansion des terres cultivées. Ces résultats concordent avec Lal (2001), qui a identifié l'agriculture comme facteur majeur de dégradation des terres en zone tropicale, ainsi que ceux de Geist et Lambin (2002), qui mettent en évidence le rôle central de la déforestation. L'impact de l'urbanisation rejoint également les analyses de Seto *et al.*, (2012) sur la fragmentation des écosystèmes, tandis que l'effet des feux de brousse est confirmé par Bowman *et al.*, (2009). L'ensemble de ces facteurs de pression mettent en évidence le poids des pressions agricoles et forestières dans la dégradation de la végétation.

Face à l'ampleur de la dégradation de la végétation observée dans la zone d'étude, il apparaît indispensable de mettre en œuvre des mesures prioritaires visant à restaurer le couvert végétal et à limiter les pressions exercées sur les écosystèmes. La figure 19 montre la proportion des mesures prioritaires à mettre en œuvre pour atténuer la dégradation de la végétation.

Figure 19 : Proportion des mesures pour atténuer la dégradation de la végétation



Source : Travaux de terrain, janvier 2026

La figure 19 met en évidence une prédominance des mesures d'atténuation. Elles sont constituées de : la restauration écologique (35 %), suivie de la gestion durable agricole (30 %), de la conservation et protection (20 %) et de la sensibilisation et gouvernance (15 %). Cette répartition inégale de la pondération des actions à mener permettra une réhabilitation structurée des écosystèmes dégradés et la mise en place des approches préventives. Les résultats obtenus par la présente étude concordent avec celui de Lal (2004), qui a souligné l'importance de la restauration des sols, ainsi qu'avec Altieri (1995) qui mis en avant le rôle de l'agroécologie dans la durabilité agricole. Les résultats de la présente étude corroborent également

les recommandations de la FAO en matière de protection des écosystèmes et celui de la Convention de Ramsar, qui insiste sur l'implication des acteurs et de la gouvernance pour une gestion durable.

Discussion

La présente étude porte sur la cartographie de la dégradation de la végétation à l'aide des techniques de télédétection, fondées sur l'analyse des variations de l'état de la surface terrestre à partir d'indices spectraux dérivés d'images satellitaires. L'évaluation multicritère (EMC) repose sur la sélection des critères d'analyse, leur standardisation, leur pondération à l'aide de la matrice de Thomas L. Saaty (1991), puis leur agrégation par superposition pondérée selon le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP). Ces indices, issus de combinaisons de réflectances, permettent de caractériser le comportement spectral des composantes naturelles telles que la végétation, les sols et l'eau. Toutefois, leur interprétation nécessite une rigueur méthodologique, le choix des indices les plus pertinents demeurant complexe et dépendant des objectifs spécifiques de l'étude. La dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2025 permet de mieux expliquer cette dégradation. Les cultures et jachères progressent fortement, passant de 22,39 % à 42,66 %, tandis que les agglomérations passent de 6,43 % à 14,32 %. À l'inverse, les cultures et jachères sous palmiers diminuent de 36,94 % à 17,30 %, les plantations de 13,54 % à 8,44 % et les savanes arborées et arbustives de 3,39 % à 2,08 %. Les marécages et les plans d'eau régressent également, respectivement de 14,11 % à 9,50 % et de 3,86 % à 2,12 %. Ces transformations traduisent une conversion progressive des espaces végétalisés et humides au profit des usages agricoles et urbains. Elles rejoignent les résultats de Anagonou *et al.*, (2023), qui ont montré une transformation importante des espaces naturels et semi-naturels du site Ramsar 1018 sous l'effet des activités anthropiques. La prédominance des niveaux de dégradation élevés apparaît ainsi directement liée à cette recomposition du paysage. La diminution des formations végétales et l'extension des espaces agricoles et bâtis contribuent à la fragmentation des habitats et à la réduction de la couverture végétale. Ces résultats rejoignent également les observations de Brun *et al.*, (2018) et de Tchibozo et Toundoh (2014) sur la pression exercée par les activités humaines sur les zones humides béninoises. La forte prédominance des classes de dégradation forte (48,01 %) et très forte (14,25 %) met en évidence une altération avancée du couvert végétal au sein du site Ramsar 1018, traduisant une pression anthropique soutenue. Cette tendance est cohérente avec les travaux de Eric F. Lambin et Helmut J. Geist (2006), qui montrent que la dégradation des écosystèmes en Afrique subsaharienne résulte principalement de l'expansion agricole, de l'urbanisation et de la pression démographique. La proportion

non négligeable des classes moyenne (19,50 %) et faible (18,24 %) suggère toutefois l'existence de zones encore relativement préservées ou en transition, offrant des potentialités de restauration. L'approche méthodologique basée sur l'évaluation multicritère (EMC) et le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) renforce la robustesse des résultats obtenus. En effet, la pondération des critères selon la matrice de T. B. Saaty (1991) permet de hiérarchiser l'influence des facteurs biophysiques et environnementaux, tandis que la superposition pondérée facilite une représentation intégrée des niveaux de dégradation. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux de Abdelaziz Bannari *et al.*, (1995), qui soulignent l'efficacité de la combinaison d'indices multispectraux (NDVI, NBR, NDMI, etc.) pour améliorer la détection des dynamiques de dégradation. Par ailleurs, l'utilisation d'indices spécifiques tels que le MSAVI2 et le PVI confirme les apports de Alfredo R. Huete (1988) et de John A. Richardson et Charles L. Wiegand (1977), qui démontrent leur pertinence dans la discrimination de la végétation en milieux à couverture discontinue et dans l'identification des sols nus. De même, l'intégration d'indices liés à l'humidité et aux perturbations (NDMI, NBR) rejoint les conclusions de Christopher D. Elvidge (1998) sur l'importance des approches multispectrales pour l'analyse des changements environnementaux. À l'échelle locale, ces résultats corroborent également les analyses de Éric Alain M. Tchibozo (2018), qui met en évidence, dans les zones humides béninoises, une dégradation progressive du couvert végétal sous l'effet combiné des activités agricoles, de l'exploitation des ressources naturelles et de l'urbanisation. La dominance des niveaux de dégradation élevés observée dans cette étude confirme ainsi la vulnérabilité accrue des écosystèmes du sud-Bénin. En somme, la cohérence entre les statistiques obtenues (62,26 % de dégradation forte à très forte) et les travaux antérieurs souligne la pertinence de l'approche EMC-AHP couplée à la télédétection pour l'évaluation de la dégradation de la végétation. Elle met en évidence une dynamique préoccupante, tout en fournissant une base scientifique solide pour orienter les stratégies de gestion durable et de restauration des écosystèmes.

Conclusion

La présente étude de la cartographie de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 par télédétection a permis de mettre en évidence une situation préoccupante dans cet écosystème sensible à partir des indices spectraux déduits des images satellites. Les résultats montrent une forte dominance des niveaux de dégradation élevée. Cette dégradation s'inscrit dans une dynamique de transformation de l'occupation du sol entre 2000 et 2025, caractérisée notamment par une forte progression des cultures

et jachères et des agglomérations, parallèlement à la régression de plusieurs formations végétales, des plantations, des marécages et des plans d'eau. Cette évolution traduit une intensification des pressions agricoles et urbaines sur les écosystèmes du site. Avec une dégradation très forte (14,25 %) et forte dégradation (48,01 %) soit plus de 62 % de la zone étudiée, le couvert végétal apparaît fortement altéré sous l'effet des pressions environnementales et anthropiques autour desquels sont implantées les grandes agglomérations (Porto-Novo, Cotonou, Abomey-Calavi, Sèmè-Podji) et les périurbaines et rurales (Ifangni, Adjara, Akpro-Missérété, Avrankou, Tori-Bossito, Zogbdomey). Cette situation est liée à la pression démographique, l'agriculture intensive et l'urbanisation. Les zones moyenne (19,50 %) et faible (18,24 %) traduisent toutefois l'existence de zones encore relativement conservées et en transition, offrant des perspectives de restauration. Elles sont localisées au centre (Dangbo, So-Ava) et à l'est (Sakété, Adja-Ouère, Pobè) du secteur d'étude où la population est moins importante. L'approche méthodologique basée sur l'évaluation multicritère et l'agrégation par AHP, combinée à l'utilisation d'indices de télédétection, a permis de produire une analyse intégrée, cohérente et spatialement explicite de la dégradation. Elle constitue ainsi un outil pertinent d'aide à la décision. Ainsi, les résultats soulignent l'urgence de mettre en œuvre des stratégies adaptées de gestion durable, visant à limiter l'intensification des processus de dégradation et à favoriser la restauration des écosystèmes, afin de préserver les fonctions écologiques et les services environnementaux du site Ramsar 1018.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Agoussou, V., (1987) : Études pédologiques et cartographie des sols du Bénin. CENAP, p. 60.
2. Anagonou, S. P. G., Ewemoje, T. A., Toyi, S. S. M. & Olubode, O. S. (2023): Landscape ecological risk assessment and transformation processes in the Guinean-Congolese climate zone in Benin Republic. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31, 100985. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100985>

3. Altieri, M. A. (1995): *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. Boulder : Westview Press.
4. Bacour, C., Baret, F., Béal, D., Weiss, M., & Pavageau, K. (2006) : Utilisation des indices de végétation pour le suivi de la dynamique du couvert végétal.. *Remote Sensing of Environment*, 105(4), 313–325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.014>.
5. Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995) : A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*.
6. Brun, L. E., Djego, J. G., Gibigaye, M. & Tente, B. (2018) : Dynamique de l'occupation du sol dans les zones humides de la commune d'Allada au Sud-Bénin (sites Ramsar 1017 et 1018). *European Scientific Journal*, 14(12), 59. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n12p59>
7. Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., Swetnam, T. W., van der Werf, G. R., & Pyne, S. J. (2009): *Fire in the Earth System*. Science.
8. Convention de Ramsar (1971) : Convention relative aux zones humides d'importance internationale. Ramsar, Iran.
9. Davranche, A. (2008) : Télédétection et analyse des milieux naturels.
10. Diof, A., & Lambin, E. F. (2001) : Suivi de la dynamique de la végétation par télédétection.
11. Drobne, S., & Lisec, A. (2009): Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted overlay and standardization approaches.
12. El Morjani, Z. (2002) : Contribution à l'utilisation des SIG et de l'analyse multicritère pour l'aide à la décision.
13. Elvidge, C. D. (1998): Global change and remote sensing of vegetation.
14. FAO (1997) : *Situation des forêts du monde*. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
15. FAO (2000) : *Évaluation des ressources forestières mondiales*. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
16. FAO : (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). *Rapports et recommandations sur la gestion durable des écosystèmes*. Rome.
17. Fritz, A. (1996) : Études complémentaires sur les sols et leur dynamique. 31(B4), 273–282.
18. Hounto, G., Mouzoun, S. & Yabi, I. (2019) : Implications socio-environnementales de la dynamique d'occupation du sol des zones

- humides du site RAMSAR 1017, Sud-Ouest du Bénin. *Afrique SCIENCE*, 15(4), 317–329.
19. Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002): Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*.
 20. Huete, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*.
 21. Environment.
 22. IPCC (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
 23. Key, C. H., & Benson, N. C. (2006): *Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index; and Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio*. FIREMON Program.
 24. Lal, R. (2001): Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*.
 25. Lal, R. (2004): Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*.
 26. Lambin, E. F., & Geist, H. J. (2006): *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin : Springer.
 27. Météo-Bénin (2024) : Rapport de la situation pluviométrique de 2024. Direction de la climatologie et de l'agro météorologie, 13 p.
 28. Onibon, P. (1999) : Pression démographique et gestion des ressources naturelles au Bénin.
 29. Paegelow, M., Monteil, C., & Sèdes, F. (2012) : Modélisation spatiale et télédétection de la végétation.
 30. Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
 31. Rikimaru, A., & Miyatake, S. (2002) : Méthodes de télédétection pour l'évaluation de la dégradation des terres.
 32. Roose, E. (2005) : *Erosion et gestion conservatoire des sols*. Paris : IRD Éditions.
 33. Rouse, J. W., J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA.
 34. Saaty, T. L. (1991): *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
 35. Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyrá, L. R. (2012): Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*.

36. Spotifarm, A. (2020): Guide d'utilisation des indices de végétation en agriculture de précision. *Solution d'agriculture de précision et de suivi des cultures par télédétection*. ISAGRI/Promize, France.
37. Tchibozo, É. A. M. (2018): Dynamique et dégradation des écosystèmes des zones humides au Bénin.
38. Tchibozo, E. A. & Toundoh, O. P. (2014). Détection localisée des zones dégradées de végétation par télédétection : application à la zone de transition entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin (Centre – Bénin). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 11(2), 477–493.
39. Volkoff, B. (1976): Carte des sols du Bénin au 1:200 000. ORSTOM.
40. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003) : Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*.