ESJ Humanities Peer-reviewed

# 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***
Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement (LA2GE), Université d'Abomey-Calavi (UAC), République du Bénin
***Tchibozo Eric Alain M.***
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***
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***
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

Doi:10.19044/esj.2026.v22n29p160

Submitted: 10 September 2026
Accepted: 26 October 2026
Published: 31 October 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*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (29), 160. https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n29p160

**Résumé**

La dégradation du couvert végétal constitue une préoccupation environnementale majeure pour les zones humides, notamment le site Ramsar 1018 situé au sud du Bénin. L'objectif de la présente étude est d'évaluer le niveau de dégradation de la végétation de ce site. La méthodologie repose sur l'exploitation d'images satellitaires multispectrales, les Systèmes d'Information Géographique (SIG), l'Évaluation multicritère (EMC), le Processus d'analyse hiérarchique (AHP) et le modèle Pression-État-Impact-Réponse (PEIR). Les résultats révèlent une dégradation spatialement

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

différenciée du couvert végétal. Les zones de très forte dégradation représentent 14,25 % du site, tandis que celles de forte dégradation couvrent 48,01 %, soit une superficie cumulée de 62,26 %. Les zones de dégradation moyenne et faible représentent respectivement 19,50 % et 18,24 % du site. L'analyse PEIR met en évidence plusieurs facteurs de pression, notamment l'agriculture extensive (40 %), la déforestation (25 %), l'urbanisation (20 %) et les feux de brousse (15 %). Ces résultats soulignent l'importance de renforcer le suivi de la végétation et de prioriser les interventions de conservation et de restauration écologique afin de préserver les fonctions écologiques du site Ramsar 1018.

**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***
Laboratory of Geomatics Applications and Environmental Management (LA2GE), University of Abomey-Calavi (UAC), Republic of Benin
***Tchibozo Eric Alain M.***
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***
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***
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**

The degradation of vegetation cover is a major environmental concern for wetlands, particularly for Ramsar site 1018, located in southern Benin. The objective of this study is to assess the level of vegetation degradation at this site. The methodology relies on the use of multispectral satellite imagery, Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Evaluation (MCE), the

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Analytic Hierarchy Process (AHP), and the Pressure-State-Impact-Response (PSIR) model. The results reveal that vegetation degradation varies across the site. Areas of very high degradation account for 14.25% of the site, while areas of high degradation cover 48.01%, representing a combined total of 62.26%. Areas with moderate and low degradation account for 19.50% and 18.24% of the site, respectively. The PSIR analysis highlights several pressure factors, notably extensive agriculture (40%), deforestation (25%), urbanization (20%), and bushfires (15%). These findings underscore the importance of strengthening vegetation monitoring and prioritizing conservation and ecological restoration interventions to preserve the ecological functions of Ramsar site 1018.

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

## Introduction

La dégradation de l'environnement constitue aujourd'hui une préoccupation majeure à l'échelle mondiale. Les zones humides sont particulièrement exposées aux pressions liées à la croissance démographique, à l'expansion des activités agricoles, à l'urbanisation et aux changements climatiques. Ces facteurs contribuent à la transformation des habitats naturels, à la perte de biodiversité et à l'altération des fonctions écologiques de ces milieux (Convention sur les zones humides, 2022). Le Bénin abrite quatre (04) sites inscrit sur la liste des sites Ramsar d'Importance Internationale, avec une superficie 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). Dans le cadre de cette recherche, il est question d'évaluer la dégradation de la végétation du site 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 (FAO, 1997 ; FAO, 2000). 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, tandis 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).

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Dans ce contexte, il est important d'analyser la dynamique spatio-temporelle de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018, dans le Sud-Bénin, sous l'effet des pressions anthropiques et des changements climatiques entre 2000 et 2025, afin de proposer des mesures adaptées à sa conservation durable.

De manière spécifique il s'agit de:

1. Analyser la dynamique spatiale et temporelle de l'occupation du sol du site Ramsar 1018 entre 2000 et 2025;
2. Identifier et analyser les facteurs anthropiques et climatiques susceptibles d'expliquer la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 au cours de la période étudiée;
3. Évaluer les niveaux et la répartition spatiale de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018, afin de proposer des mesures prioritaires pour sa conservation durable.

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.

## 1. Milieu d'étude

Le Bénin abrite quatre (04) sites inscrit sur la liste des sites Ramsar d'Importance Internationale, avec une superficie 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. Le site Ramsar 1018 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.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

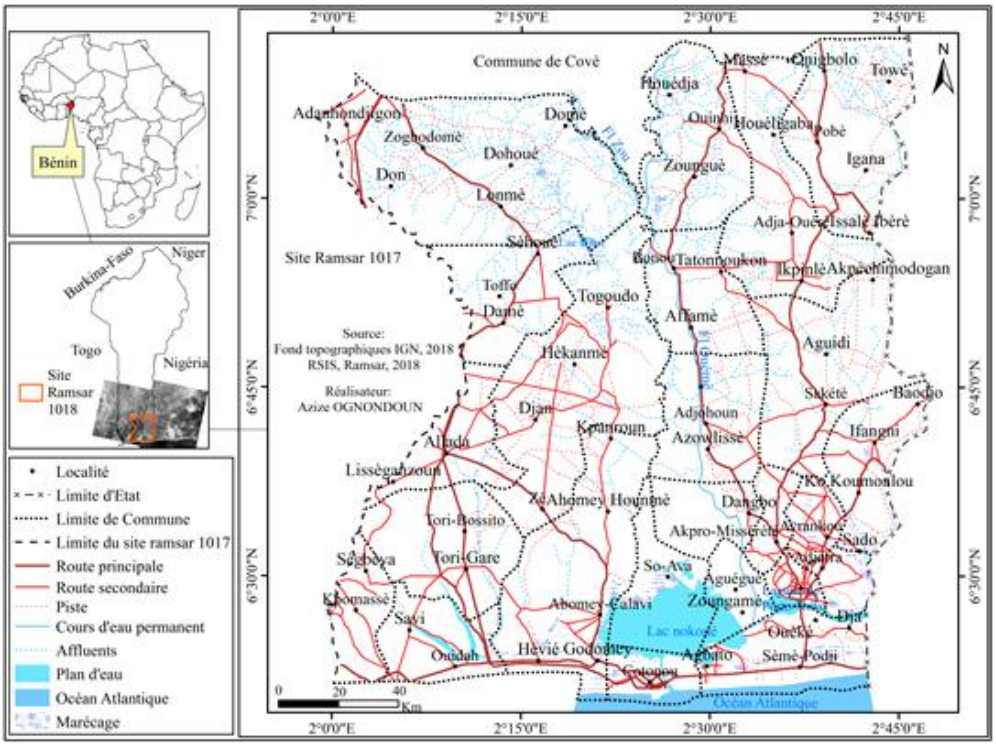



**Figure 1 :** Situation géographique du site Ramsar 1018

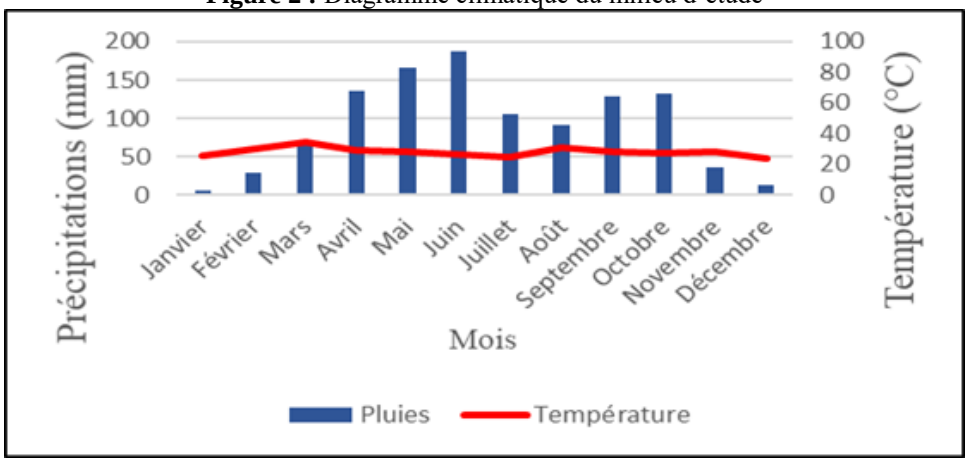
Le site Ramsar 1018 est limité au Nord par les communes de Pobè, Adja-Ouèrè et Zogbodomey (dont elle couvre une partie des territoires), au Sud par l'Océan Atlantique (à l'embouchure du fleuve Ouémé), à l'Est par le Nigéria et à l'Ouest par le site Ramsar 1017. Il regroupe cinq (05) sous-sites à savoir : 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).

## 1.1 Climat

Le Bénin, situé dans la zone intertropicale chaude et humide, subit l'influence de deux masses d'air : la mousson, humide et pluvieuse, venant du sud-ouest, et l'harmattan, sec, provenant du nord-ouest. Les températures varient peu annuellement, avec des amplitudes plus marquées au nord (Météo-Bénin, 2024). Le complexe Est (1018) présente un climat subéquatorial humide, caractérisé par une pluviométrie bimodale, illustrée par le diagramme climatique du site Ramsar 1018 (figure 2).

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

**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, ou complexe Est, est soumis à un climat tropical humide de type subéquatorial, caractérisé par un régime pluviométrique bimodal et quatre saisons : une grande saison sèche (mi-novembre à mars), une grande saison pluvieuse (avril à mi-juillet), une petite saison sèche (mi-juillet à mi-août) et une petite saison pluvieuse (mi-septembre à mi-novembre). Sur les trente dernières années, la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 1 200 mm, avec des pics en juin et en octobre (Météo-Bénin, 2024). Les températures varient entre 18 °C et 35 °C, avec une humidité élevée. Ces conditions favorisent l'agriculture, mais accentuent les risques d'inondation, d'érosion et de dégradation de la végétation.

## 2. 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.

### 2.1 Matériel

Le matériel utilisé pour cette étude est constitué d'un drone, d'un GPS, des logiciels SIG (ArcGIS 10.5 pour le traitements des données et la production des cartes et Envi 5.3 pour le traitement des images. Les caractéristiques des données collectées pour la présente étude sont présentées dans le tableau 1.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

**Tableau 1 :** Caractéristiques des données spatiales utilisées

| Types/Format | Échelles /Résolution | Sources |
|---|---|---|
| Path/Row (Scènes) | 191-192 / 55 191 / 56 | USGS/Earth Explorer |
| Image Landsat 7 ETM+, 2000 | 1- Bleu (0.45-0.52 µm)<br>2- Vert (0.52-0.60 µm)<br>3- Rouge (0.63-0.69 µm)<br>4- Proche Infrarouge (0.77-0.90 µm)<br>5- Moyen Infrarouge 1 (1.55-1.75 µm)<br>6- Moyen thermique (10.4-12.5 µm)<br>7- Moyen Infrarouge (2.08-2.35 µm)<br>8- Panchromatique (0.52-0.90 µm) | |
| Image Landsat 9, 2025 | 1- Aérosols côtiers (0.43-0.45 µm)<br>2- Bleu (0.45-0.51 µm)<br>3- Vert (0.53-0.59 µm)<br>4- Rouge (0.64-0.67 µm)<br>5- Proche Infrarouge (0.85-0.88 µm)<br>6- Moyen Infrarouge 1 (1.57-1.65 µm)<br>7- Moyen Infrarouge 2 (2.11-2.29 µm)<br>8- Panchromatique (0.50-0.68 µm)<br>9- Cirrus (1.36-1.38 µm)<br>10- Infrarouge Thermique 1 (10.60-11.19 µm)<br>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

## 2.2 Méthodes

La méthodologie de cartographie de la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018 entre 2000 et 2025 repose sur une approche intégrée combinant l'analyse diachronique de l'occupation du sol, les données climatiques, les analyses statistiques et les investigations de terrain. Elle a suivi plusieurs étapes. La première est l'identification des facteurs anthropiques qui concernent principalement l'expansion agricole, l'urbanisation, l'exploitation forestière, le prélèvement du bois-énergie et les feux de végétation. Leur identification s'appuie sur la comparaison des cartes d'occupation du sol, l'analyse des superficies des formations végétales et l'exploitation des données démographiques et socio-économiques disponibles. Des observations de terrain et des entretiens semi-directifs auprès des populations riveraines, des agriculteurs, des exploitants forestiers et des responsables locaux permettent de compléter ces informations. L'analyse des facteurs climatiques repose sur les séries chronologiques de précipitations et de températures couvrant la période 2000-2025, obtenues auprès de Météo-Bénin.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

La deuxième étape consiste à acquérir et à prétraiter les images satellitaires nécessaires à l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol du site Ramsar 1018. Les données utilisées proviennent des capteurs Landsat 7 ETM+ et Landsat 9 OLI/TIRS. Les scènes ont été sélectionnées à partir des couples Path/Row 191/55, 192/55 et 191/56. Les images ont été acquises sur la plateforme USGS EarthExplorer. Les traitements ont été réalisés à l'aide du logiciel ENVI 5.3 et d'un système d'information géographique (SIG). Ils comprennent le contrôle de la qualité des images, le masquage des nuages et de leurs ombres, les corrections radiométriques et atmosphériques, du module FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), fondé 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. Après le prétraitement, les images satellitaires sont classées afin de produire les cartes d'occupation du sol pour les différentes dates étudiées. La classification supervisée classification comprend deux phases principales. La première consiste à constituer les échantillons d'apprentissage à partir de l'interprétation des images satellitaires, des observations de terrain, des relevés GPS. Ces échantillons permettent de caractériser la réponse spectrale des différentes classes et de paramétrer l'algorithme de classification. La deuxième phase consiste à appliquer l'algorithme à l'ensemble des pixels valides de l'image afin d'attribuer à chacun d'eux une classe d'occupation du sol. L'algorithme utilize est le maximum de vraisemblance. La qualité de la classification est évaluée à partir d'échantillons de contrôle indépendants des échantillons d'apprentissage. Ces données de référence sont sélectionnées de manière à représenter les différentes classes d'occupation du sol et à limiter les biais liés à leur répartition spatiale. Le nombre total d'échantillons de contrôle est de douze classes. Leur répartition par classe et leur méthode de sélection sont consignés séparément pour chaque année étudiée, notamment 2000 et 2025. Cette séparation permet d'évaluer la capacité de la classification à reproduire les classes de référence sans utiliser les mêmes données pour l'apprentissage et la validation. La qualité des classifications est évaluée au moyen d'une matrice de transition, du coefficient de précision globale et du coefficient Kappa. Cette matrice permet de déterminer la précision globale, qui correspond à la proportion des échantillons correctement classés, ainsi que les précisions du producteur et de l'utilisateur pour chaque classe. Cette démarche permet d'apprécier la fiabilité des cartes d'occupation du sol et de

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

renforcer la validité des analyses diachroniques de la dynamique de la végétation du site Ramsar 1018.

La troisième 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) 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. Les bandes spectrales utilisées sont sélectionnées selon les objectifs de l'étude. Pour Landsat 7 ETM+, les bandes rouge (B3), proche infrarouge (B4) et infrarouge à ondes courtes (B5 et B7) sont notamment mobilisées. Pour Landsat 9 OLI/TIRS, les bandes correspondantes sont respectivement B4, B5, B6 et B7. Ces bandes permettent de calculer les indices spectraux et de distinguer les formations végétales, les sols nus, les surfaces bâties et les zones humides. 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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) : (1) 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 : (2) 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

(3) 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 (≈ 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

(< 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.

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

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 (5) $BSI = ((SWIR + Red) - (NIR + Blue) / (SWIR + Red) + (NIR + Blue)($, 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

meilleure évaluation de la végétation. Il permet également une meilleure discrimination entre sol et végétation. Sa formule est la suivante :

$$(6)\ PVI = NIR\text{-}aR\text{-}b / \sqrt{1+a^2}$$

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 = *fracCov(R, NIR)Var(R)* et

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

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 : (7) 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).

### 2.2.1 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.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Les valeurs extrêmes, les valeurs manquantes et les critères dont le sens de variation est ambigu font l'objet d'un traitement spécifique avant l'agrégation multicritère.

### 2.2.2 Pondération des critères

La pondération des critères est réalisée à l'aide du processus d'analyse hiérarchique (*Analytic Hierarchy Process*, AHP), développé par Saaty. Cette méthode permet de déterminer le poids relatif des critères à partir de comparaisons par paires. Chaque critère est comparé à tous les autres selon son importance relative dans l'explication de la dégradation des sols. Les jugements sont exprimés sur l'échelle fondamentale de Saaty (1991), allant de 1 à 9, où 1 indique une importance égale entre deux critères et 9 une importance extrême d'un critère par rapport à l'autre. Les valeurs intermédiaires permettent de représenter les niveaux d'importance intermédiaires. 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 $a_{ij} = 1/a_{ij}$ ainsi $a_{ii} = 1$, $i = 1, 2, \ldots, n$ (Chang *et al*, 2007). Le tableau 3 présente l'échelle numérique d'importance à neuf niveaux (Saaty, 1991).

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

**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 $\{W_i\}_{i=}1….n$ de chaque critère et le vecteur propre normalisé $\{T_i\}_{i=}1….n$ 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 :

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

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).

$$T_i = (W1/\sum Wi) \times 100 \quad ; \quad Tn= (Wn/\sum Wi) \times 100$$

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

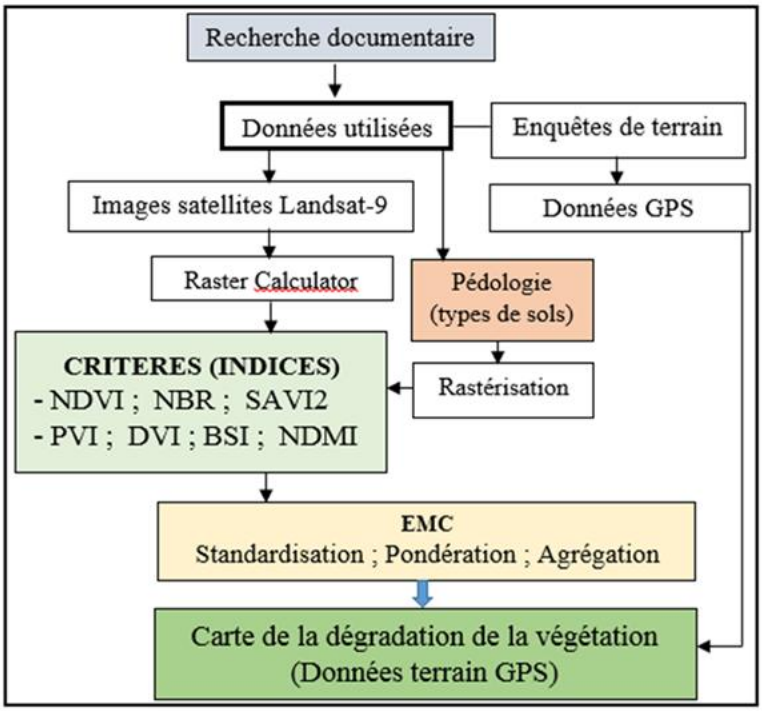
### 2.2.3 Agrégation des critères

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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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 choisi. 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

## 2.3 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).

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

## 3. Resultats

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

La quantification des classes d'occupation du sol du site Ramsar 1018 a été vérifiée pour 2000 et 2025 afin d'assurer la cohérence de l'analyse diachronique. Les superficies et les pourcentages ont été contrôlés par rapport à la superficie totale valide du site, puis comparés aux cartes, aux graphiques et à la matrice de transition. Les totaux marginaux de cette matrice ont également été vérifiés afin de distinguer les classes stables des changements d'occupation du sol et d'identifier les éventuelles erreurs. La validation des classifications repose sur des données de référence indépendantes des échantillons d'apprentissage. La matrice de confusion permet de calculer la précision globale, la précision du producteur, la précision de l'utilisateur et le coefficient Kappa, lorsque celui-ci est retenu. La matrice de transition est ensuite établie afin d'analyser les changements de superficie entre les différentes classes d'occupation du sol. La figure 4 et 5 montre l'occupation du sol du site Ramsar de 2000 à 2025.

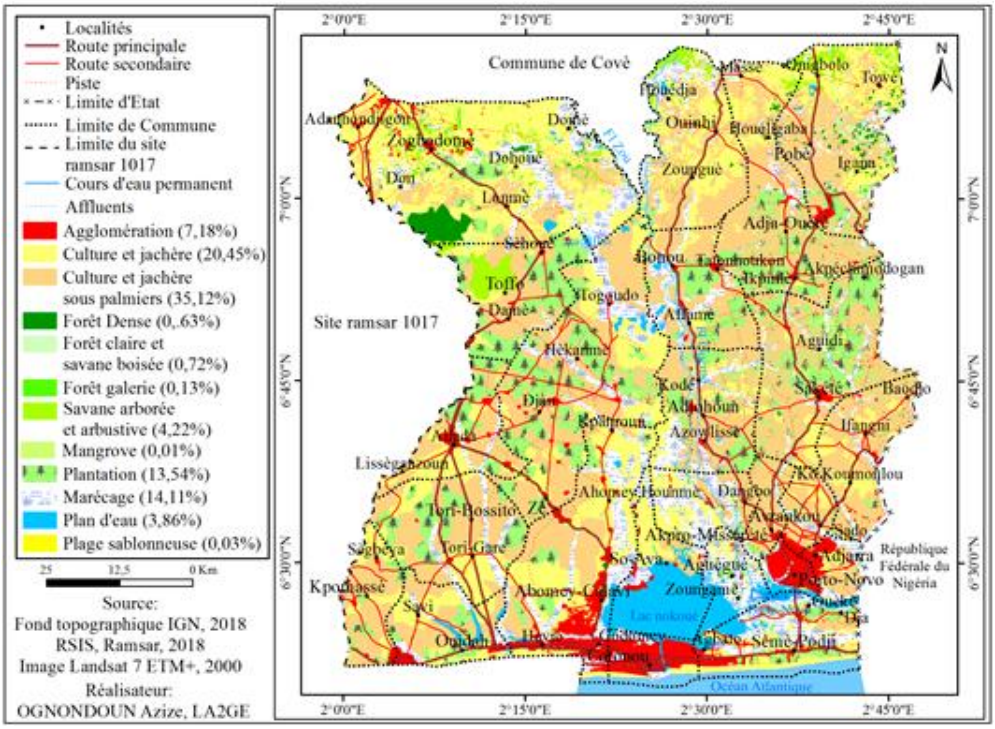



**Figure 4 :** Occupation du sol de 2000

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

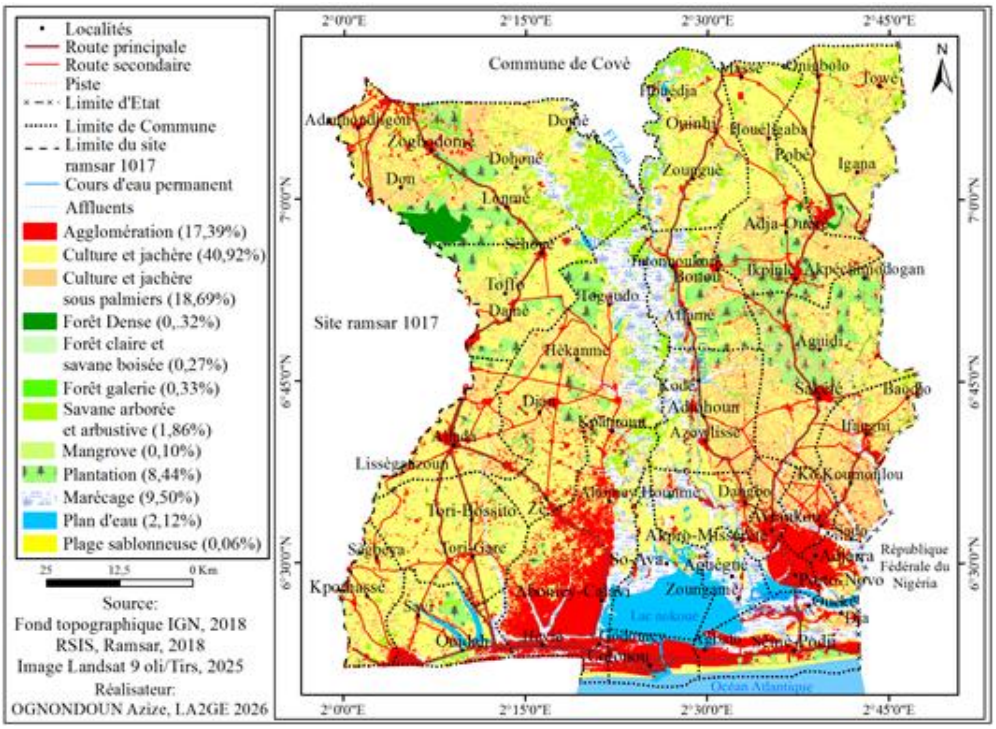



**Figure 5 :** Occupation du sol de 2025

L'analyse de l'occupation du sol de 2000 et 2025 met en évidence une importante dynamique spatiale 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 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 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 des terres 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, Adjarra) 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

l'analyse de la dégradation environnementale. La figure 6 présente les changements d'occupation des terres entre 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Le tableau 4 montre la matrice de transition. Sa lecture révèle une forte dynamique de l'occupation des terres 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.

## 3.2 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.

### 3.2.1 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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.

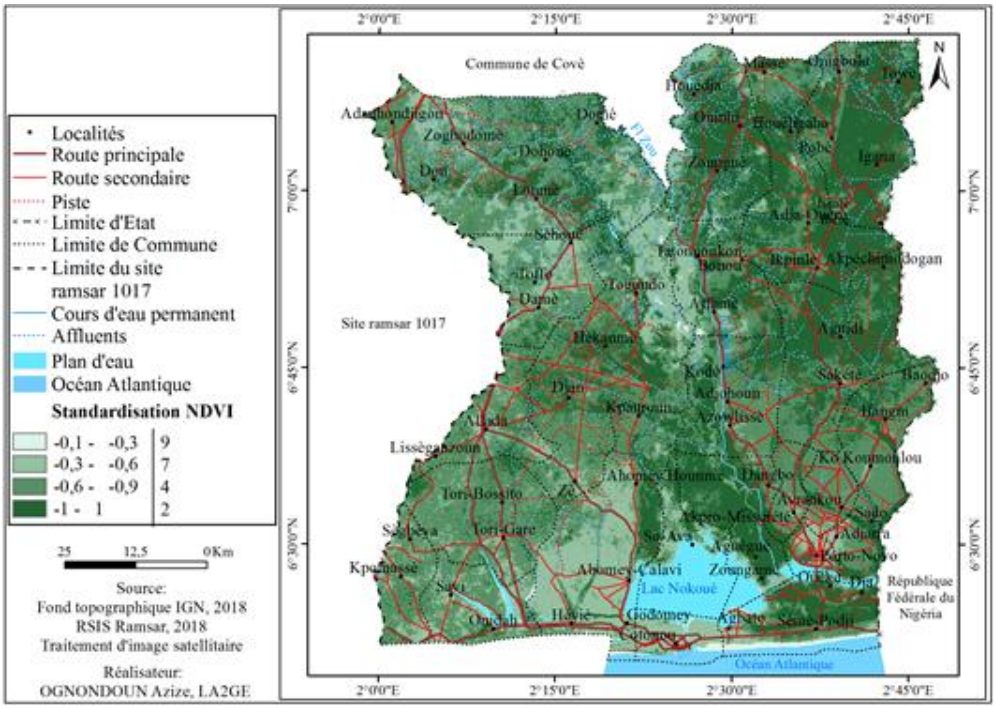



**Figure 7:** Standardisation du NDVI

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

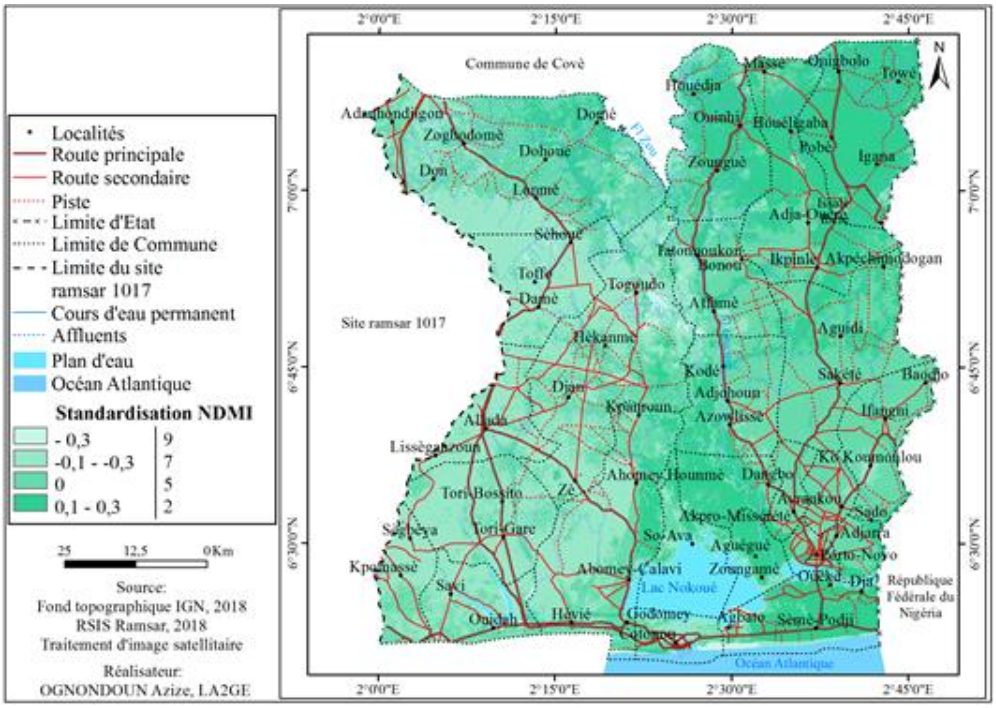



**Figure 8:** Standardisation du NDMI

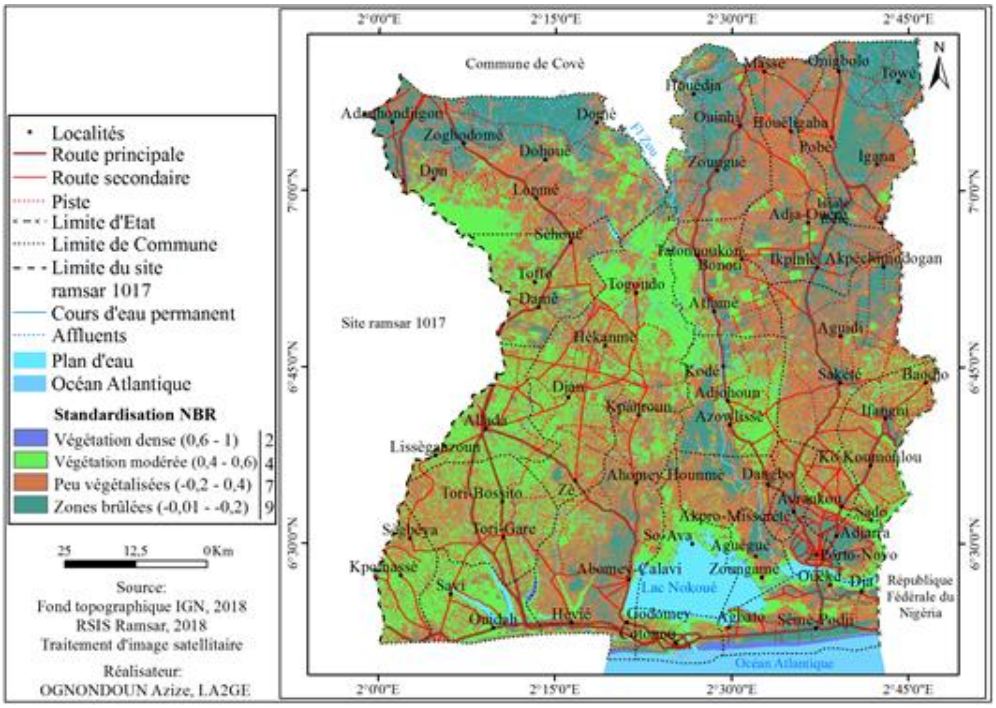



**Figure 9:** Standardisation du NBR

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

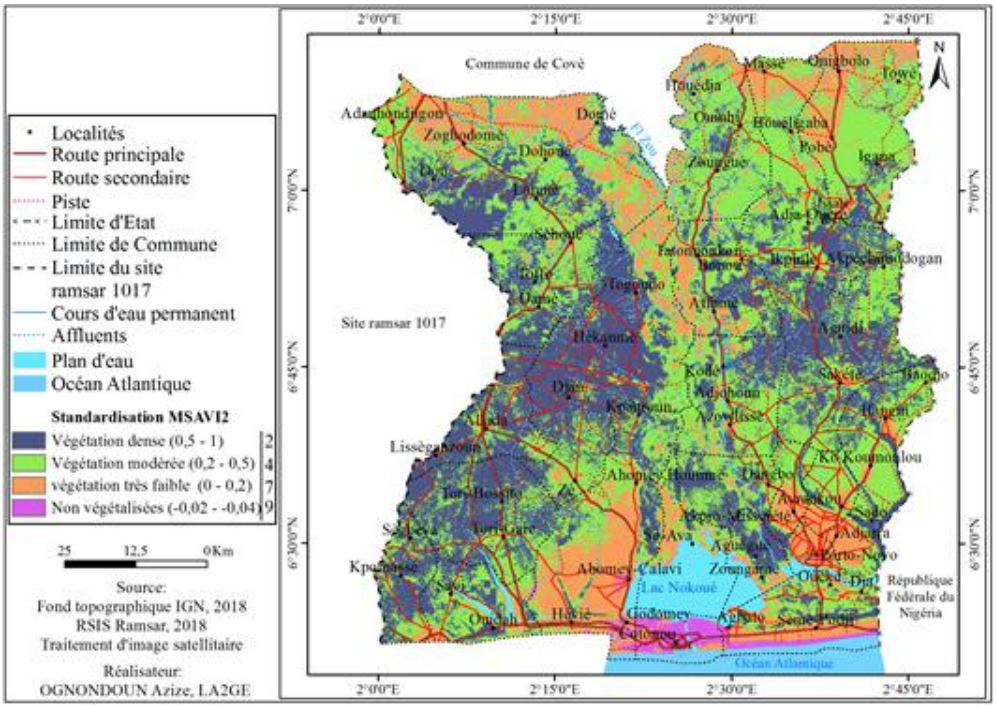



**Figure 10:** Standardisation du MSAVI2

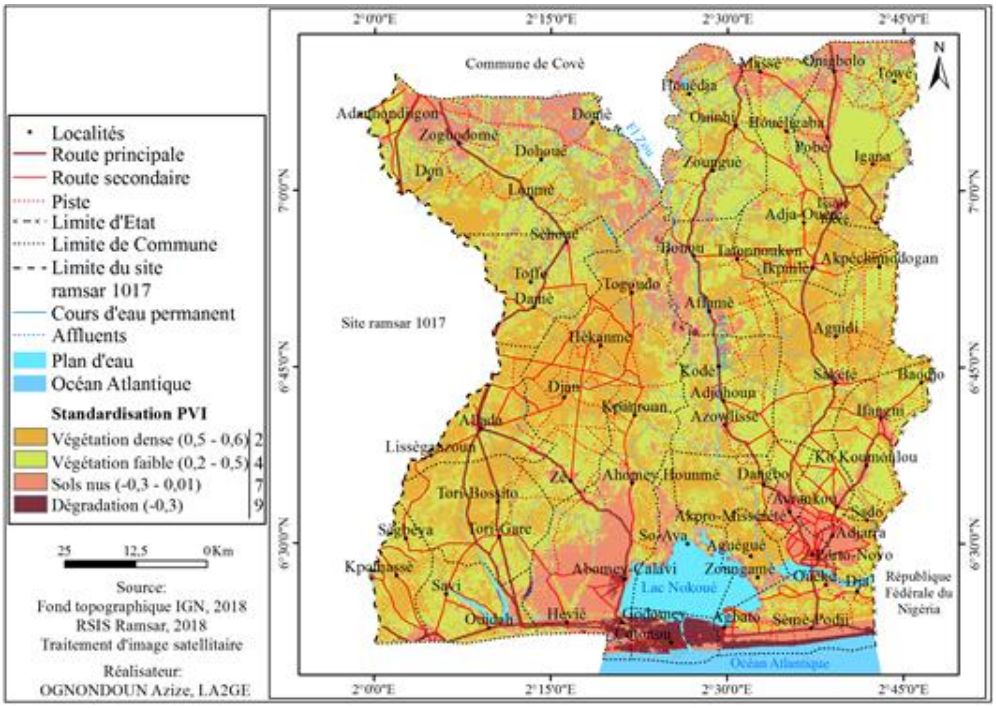



**Figure 11:** Standardisation du PVI

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

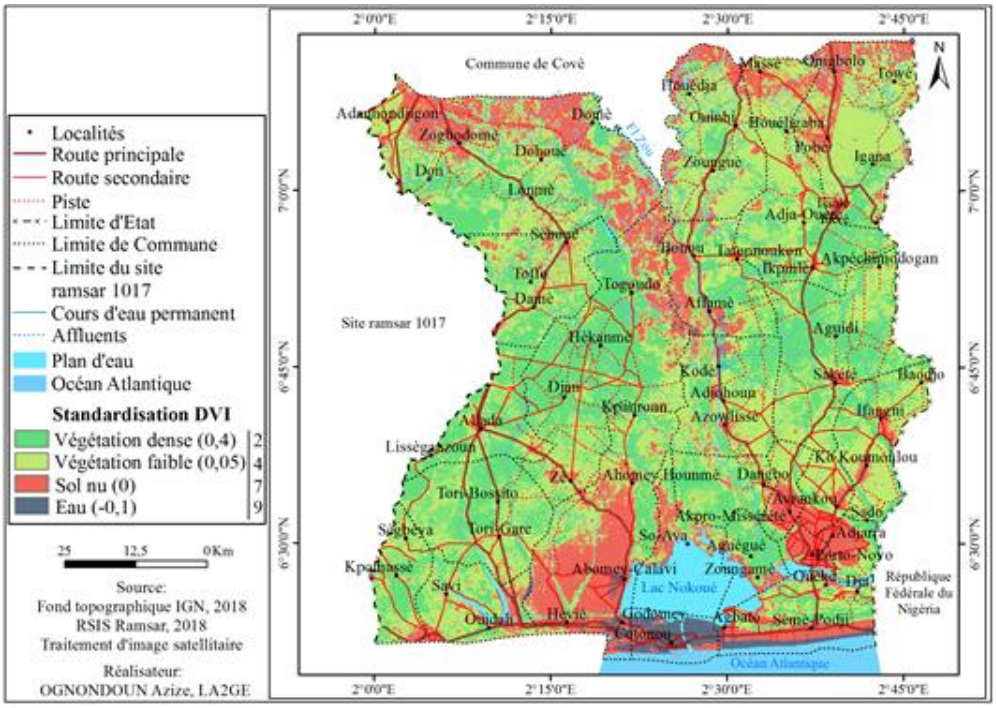



**Figure 12:** Standardisation du DVI

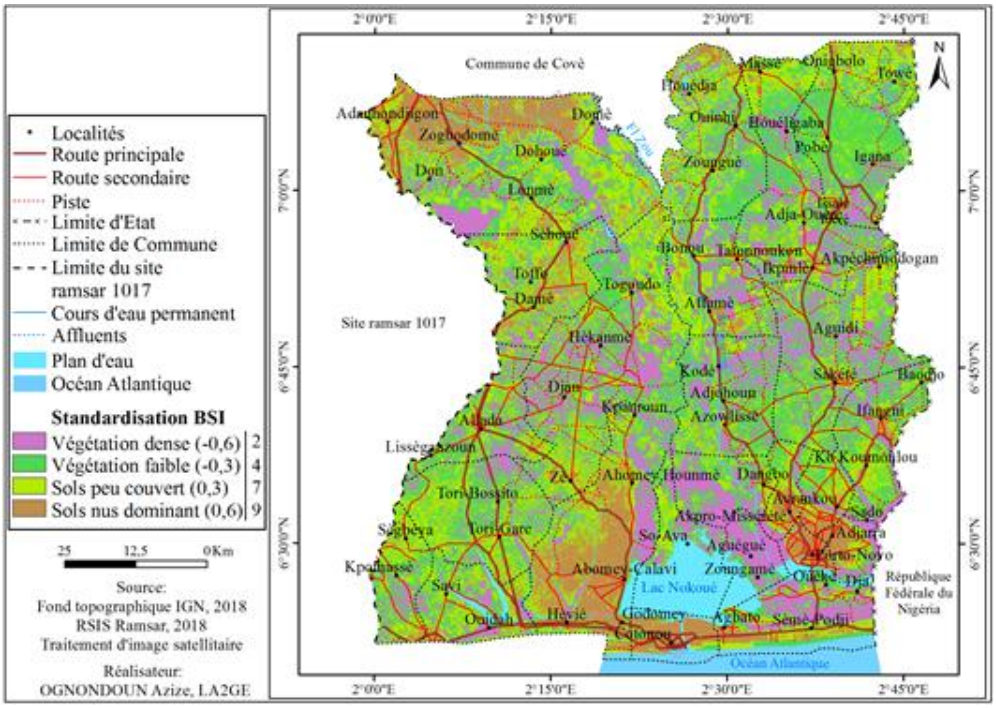



**Figure 13:** Standardisation du BSI

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

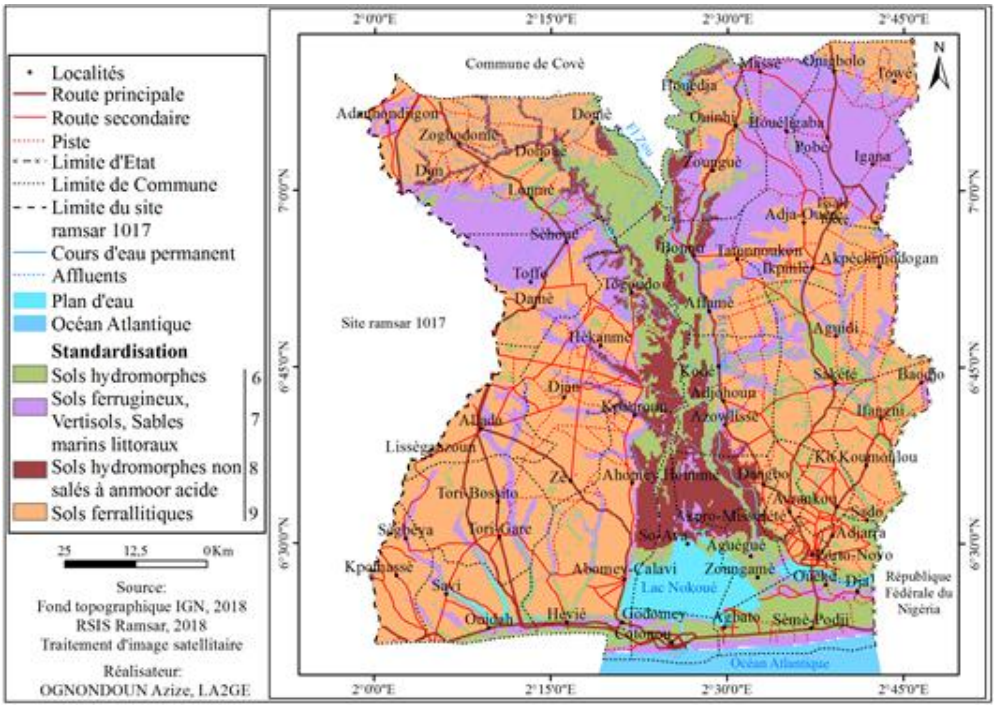



**Figure 14:** Standardisation des types de sols

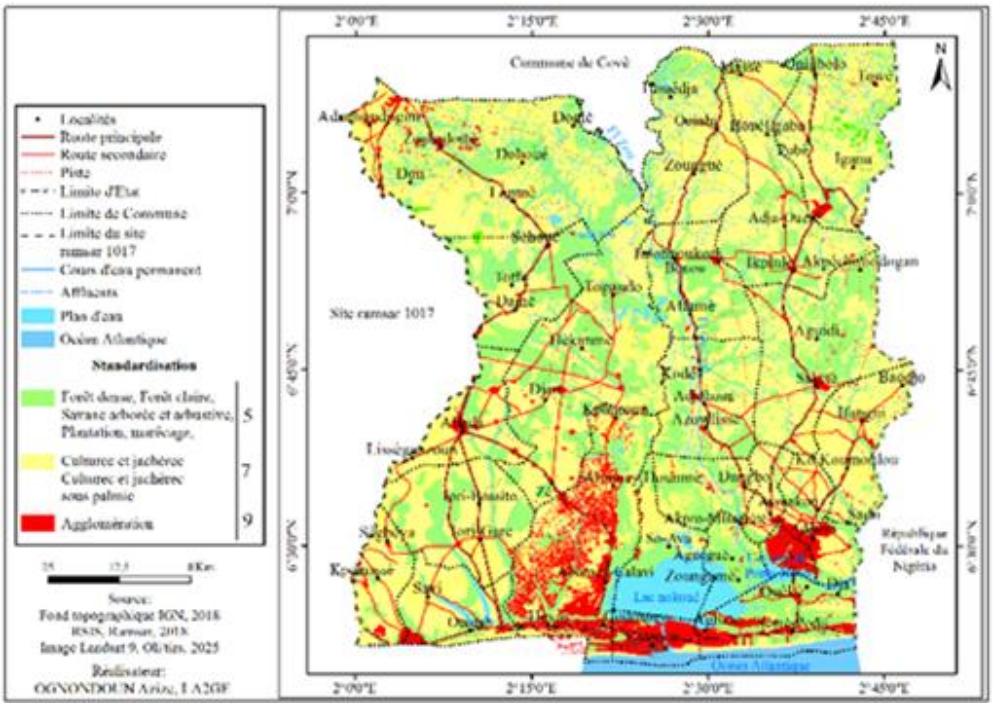



**Figure 15 :** Standardisation de l'occupation du sol

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

### 3.2.2 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 | Occupation du sol | NDVI | NDMI | NBR | MSAVI2 | Sols | BSI | PVI | DVI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Occupation 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 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| **Ti (%)** | 27 | 24 | 16 | 11 | 9 | 6 | 3 | 2 | 2 |

Source : Ognondoun et al., 2026

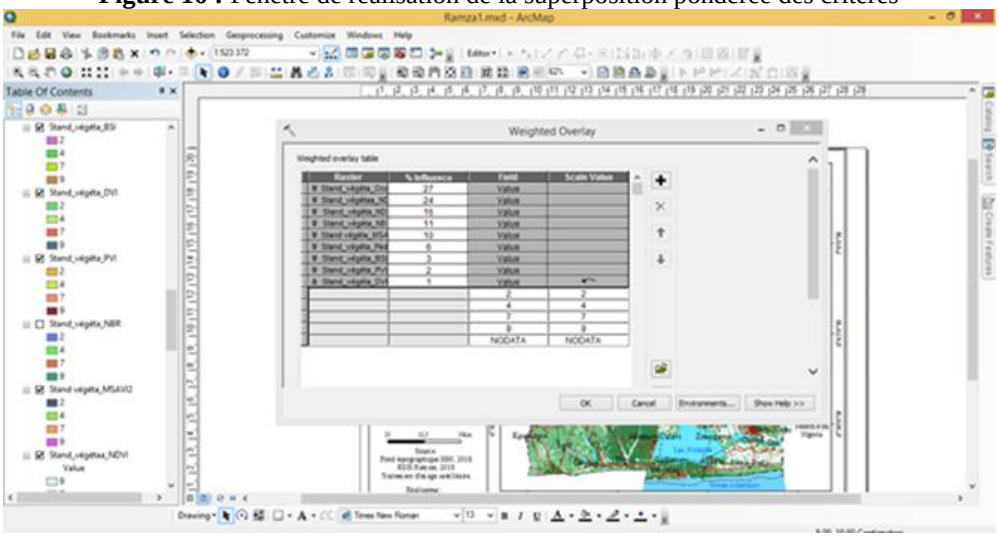
La matrice de comparaison par paires met en évidence la prédominance de l'occupation du sol, du NDVI et du NDMI dans l'évaluation de la dégradation de la végétation, avec des poids respectifs de 27 %, 24 % et 16 %. Le NBR et le MSAVI2 présentent également une contribution relativement importante, avec 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.

### 3.2.3 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).

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

**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.

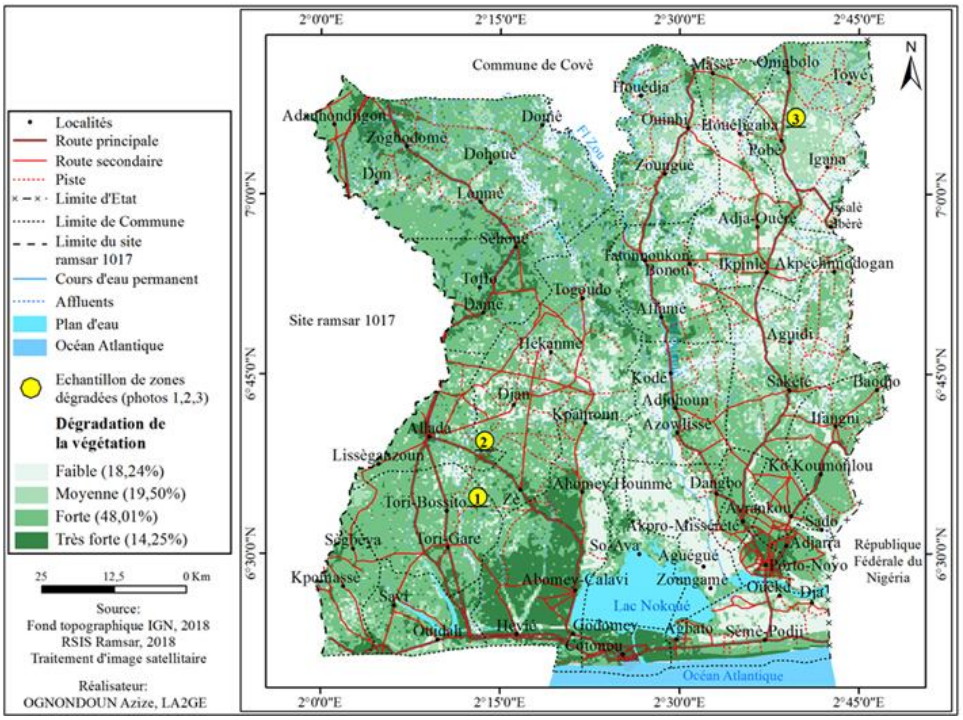



**Figure 17 :** Distribution spatiale de la dégradation de la végétation

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

X = 2,2338674 Y = 6,6472322

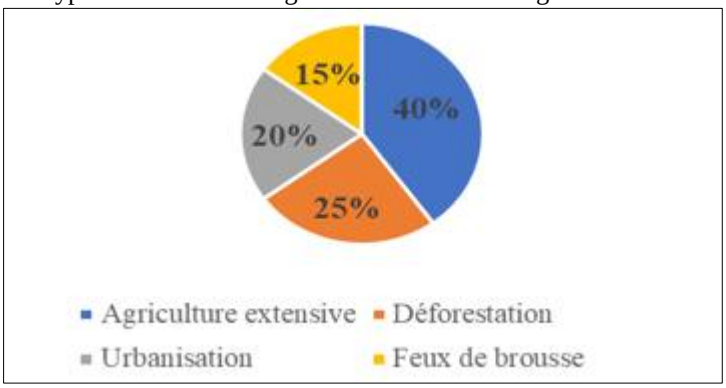
X = 2,6857073 Y = 6,9943084
Source : Prise de vue par drone, Ognondoun, janvier 2026

L'analyse de la planche 1 montre quelques zones de végétation en dégradation au profit de l'urbanisation et l'agriculture. La photo 1.a 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,

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

traduisant une conversion partielle des formations végétales en terres agricoles interprétant ainsi une pression anthropique accentuée. La photo 1.b 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.c 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



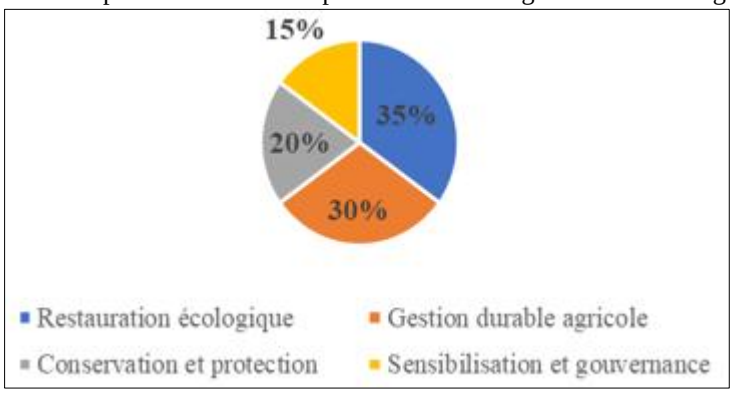

Source : Travaux de terrain, janvier 2026

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.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

**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 révèle une transformation importante de l'occupation du sol du site Ramsar 1018 entre 2000 et 2025. Les cultures et jachères augmentent de 20,45 % à 40,92 %, tandis que les agglomérations passent de 7,18 % à 17,39 %. À l'inverse, les cultures et jachères sous palmiers diminuent de 35,12 % à 18,69 %, les plantations de 13,54 % à 8,44 %, les marécages de 14,11 % à 9,50 % et les plans d'eau de 3,86 % à 2,12 %. Cette évolution traduit une expansion des espaces agricoles et bâtis au détriment de plusieurs formations végétales et milieux humides, suggérant une intensification des pressions anthropiques. Ces résultats rejoignent ceux d'Anagonou et al., (2023) sur les transformations des espaces naturels et semi-naturels du site Ramsar 1018. Ils concordent également avec Brun et al. (2018), Tchibozo et Toundoh (2014) et Lambin et Geist (2006), qui soulignent les effets des activités humaines et des changements d'usage des terres sur les écosystèmes. L'extension des cultures et des agglomérations peut favoriser la

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

fragmentation des habitats et l'altération des fonctions écologiques des zones humides. Toutefois, les données cartographiques ne permettent pas, à elles seules, de déterminer la contribution respective de chaque facteur ni les trajectoires précises de conversion des classes. La cartographie indique que les niveaux de dégradation forte et très forte couvrent respectivement 48,01 % et 14,25 % du site, soit 62,26 % au total. Les classes moyenne et faible représentent respectivement 19,50 % et 18,24 %, révélant une répartition spatiale hétérogène de la dégradation. Cette situation est cohérente avec les transformations observées de l'occupation du sol, sans toutefois établir de lien causal direct. Les secteurs faiblement dégradés pourraient être privilégiés pour la conservation, tandis que les zones fortement dégradées nécessiteraient des actions de restauration, après vérification sur le terrain. Sur le plan méthodologique, la combinaison de la télédétection et de l'évaluation multicritère fondée sur l'AHP permet d'intégrer plusieurs indicateurs de l'état de la végétation. Le NDVI, le NDMI, le MSAVI2 et le PVI apportent des informations complémentaires sur la vigueur végétale, l'humidité et l'influence des sols, conformément aux travaux de Huete (1988), Richardson et Wiegand (1977) et Bannari et al. (1995). Néanmoins, les résultats restent sensibles au choix des critères, à leur pondération et aux seuils de classification. La subjectivité de l'AHP et la corrélation entre certains indicateurs peuvent également influencer les niveaux de dégradation obtenus. Une validation indépendante et une analyse de sensibilité permettraient ainsi de renforcer la robustesse des résultats. Par ailleurs, les variations climatiques, hydrologiques et saisonnières peuvent influencer la réponse spectrale de la végétation et des milieux humides. La diminution des marécages et des plans d'eau peut donc résulter de transformations durables, de variations saisonnières ou d'une combinaison des deux. En l'absence de données complémentaires, la contribution de ces facteurs ne peut être déterminée avec certitude. En définitive, la prédominance de la dégradation forte à très forte, qui concerne 62,26 % du site, souligne la nécessité de renforcer les actions de conservation et de restauration du Ramsar 1018. L'approche combinant télédétection et EMC-AHP constitue un outil pertinent d'aide à la décision, dont les résultats gagneraient à être consolidés par des observations de terrain, des données climatiques et socio-économiques ainsi que des tests de sensibilité, afin d'améliorer la gestion durable de ce site

## Conclusion

La présente étude a pour objectif de cartographier la dynamique de l'occupation du sol et d'évaluer la dégradation de la végétation du site Ramsar 1018, dans le Sud-Bénin, entre 2000 et 2025, à partir de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Les résultats ont permis de caractériser les transformations spatio-temporelles du paysage et de mettre en évidence

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

une dégradation importante du couvert végétal, avec 14,25 % de la zone étudiée classée en dégradation très forte et 48,01 % en dégradation forte, soit 62,26 % au total. Ces changements s'accompagnent notamment d'une progression des cultures, des jachères et des agglomérations, ainsi que d'une régression de plusieurs formations végétales et zones humides. L'analyse spatiale et l'utilisation des indices spectraux ont permis de localiser les secteurs les plus affectés et ceux présentant encore un potentiel de conservation et de restauration. Ces résultats soulignent l'importance de renforcer la gestion durable des terres, la protection des formations végétales restantes et la restauration des secteurs dégradés. Ils constituent une base d'information utile pour orienter les interventions de conservation du site Ramsar 1018. Toutefois, cette étude présente certaines limites. L'interprétation de la dégradation à partir des indices spectraux reste sensible aux conditions d'acquisition des images, à la saisonnalité et aux caractéristiques des formations végétales. Par ailleurs, la contribution respective des pressions anthropiques et des facteurs climatiques n'a pas pu être quantifiée de manière indépendante en l'absence d'une analyse explicative suffisamment approfondie. La fiabilité des résultats dépend également de la qualité des classifications et des données de validation disponibles. Les recherches futures gagneraient ainsi à intégrer des séries climatiques plus détaillées, des données socio-économiques et des observations de terrain afin de mieux distinguer les effets des activités humaines de ceux de la variabilité climatique. L'utilisation d'images satellitaires plus fréquentes, associée à des campagnes de suivi écologique, permettrait également d'améliorer la précision du diagnostic et d'évaluer l'efficacité des mesures de restauration. Une telle démarche contribuerait à renforcer les outils d'aide à la décision pour la conservation durable des écosystèmes 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

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

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. Convention sur les zones humides (2022): Zones humides et agriculture : effets des pratiques agricoles et pistes pour la durabilité. Note d'information n° 13, Secrétariat de la Convention sur les zones humides, Gland, Suisse.
10. Davranche, A. (2008) : Télédétection et analyse des milieux naturels.
11. Diof, A., & Lambin, E. F. (2001) : Suivi de la dynamique de la végétation par télédétection.
12. Drobne, S., & Lisec, A. (2009): Multi-attribute decision analysis in GIS: weighted overlay and standardization approaches.
13. El Morjani, Z. (2002) : Contribution à l'utilisation des SIG et de l'analyse multicritère pour l'aide à la décision.
14. Elvidge, C. D. (1998): Global change and remote sensing of vegetation.
15. FAO (1997) : Situation des forêts du monde. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
16. FAO (2000) : Évaluation des ressources forestières mondiales. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

17. FAO : (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture). Rapports et recommandations sur la gestion durable des écosystèmes. Rome.
18. Fritz, A. (1996) : Études complémentaires sur les sols et leur dynamique. 31(B4), 273–282.
19. 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.
20. Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2002) : Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. BioScience.
21. Huete, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of
22. Environment.
23. IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Genève: Intergovernmental Panel on Climate Change.
24. 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.
25. Lal, R. (2001): Soil degradation by erosion. Land Degradation & Development.
26. Lal, R. (2004): Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science.
27. Lambin, E. F., & Geist, H. J. (2006): Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts. Berlin : Springer.
28. Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977): The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics, 33(1), 159–174. https://doi.org/10.2307/2529310.
29. Météo-Bénin (2024) : Rapport de la situation pluviométrique de 2024. Direction de la climatologie et de l'agro météorologie, 13 p.
30. Onibon, P. (1999) : Pression démographique et gestion des ressources naturelles au Bénin.
31. Paegelow, M., Monteil, C., & Sèdes, F. (2012) : Modélisation spatiale et télédétection de la végétation.
32. Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
33. Rikimaru, A., & Miyatake, S. (2002) : Méthodes de télédétection pour l'évaluation de la dégradation des terres.
34. Roose, E. (2005) : Erosion et gestion conservatoire des sols. Paris : IRD Éditions.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

35. 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.
36. Saaty, T. L. (1991): The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill.
37. Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, 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).
*38.* 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.*
39. Tchibozo, É. A. M. (2018) : Dynamique et dégradation des écosystèmes des zones humides au Bénin.
40. 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.
41. Volkoff, B. (1976) : Carte des sols du Bénin au 1:200 000. ORSTOM.
42. 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.