

CARTOGRAPHIE PAR TELEDETECTION DE LA DEGRADATION DES SOLS DU SITE RAMSAR 1018

REMOTE SENSING MAPPING OF LAND DEGRADATION AT RAMSAR SITE 1018

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

Date de soumission : 15/11/2025

Date d'acceptation : 28/01/2026

Pour citer cet article :

OGNONDOUN A. & TCHIBOZO. E.A.M. (2026) « Cartographie par télédétection de la dégradation des sols du site Ramsar 1018 », Revue Internationale du chercheur « Volume 7 : Numéro 1 » pp : 234-261

Résumé

Le site Ramsar 1018 est une zone humide d'importance Internationale jouant un rôle essentiel dans la conservation de la biodiversité, la régulation hydrologique et le soutien aux activités socio-économiques locales. Cependant, il est soumis à de fortes pressions anthropiques liées à la croissance démographique, à l'urbanisation rapide et à l'intensification des activités agricoles, entraînant une dégradation progressive des sols. Cette étude a pour objectif d'évaluer les niveaux de dégradation des sols du site Ramsar 1018 et de proposer des alternatives de conservation. La méthodologie adoptée repose sur une approche géomatique combinant la photo-interprétation, le calcul d'indices spectraux à partir d'images satellitaires, l'analyse multicritère dans un système d'information géographique (SIG) et l'évaluation environnementale à l'aide du modèle PEIR. Les résultats montrent une corrélation significative entre l'évolution de la population et l'intensité de la dégradation des sols. Les zones à très forte (21,80 %), forte dégradation (45,22 %) et la moyenne dégradation (28,93 %) concernent principalement les sols ferralitiques et hydromorphes des grandes agglomérations urbanisées, périurbains et ruraux qui sont soumises à une pression agricole croissante. Les zones de faible dégradation (4,05 %), se localisent dans les plaines inondables, où l'humidité et la couverture végétale jouent un rôle protecteur.

Mots clés: Site Ramsar 1018, dégradation des sols, Télédétection, SIG multicritère

Abstract

Ramsar site 1018 is a wetland of international importance that plays a vital role in biodiversity conservation, hydrological regulation, and supporting local socio-economic activities. However, it is subject to significant anthropogenic pressures related to population growth, rapid urbanization, and the intensification of agricultural activities, leading to progressive soil degradation. This study aims to assess the levels of soil degradation at Ramsar site 1018 and propose conservation alternatives. The methodology employed is based on a geomatics approach combining photo-interpretation, the calculation of spectral indices from satellite imagery, multi-criteria analysis within a geographic information system (GIS), and environmental assessment using the PEIR model. The results show a significant correlation between population growth and the intensity of soil degradation. Areas of very high (21.80%), high (45.22%), and medium (28.93%) degradation primarily concern ferralitic and hydromorphic soils in large urban, peri-urban, and rural areas subject to increasing agricultural pressure. Areas of low degradation (4.05%) are located in floodplains, where moisture and vegetation cover play a protective role.

Keywords: Ramsar Site 1018, land degradation, remote sensing, multi-criteria GIS

Introduction

Dans de nombreux pays à travers le monde, les actions humaines constituent un facteur déterminant de la dynamique environnementale. Sous l'effet combiné des pressions anthropiques et des aléas climatiques, les conditions météorologiques, écologiques et environnementales se dégradent progressivement (Hounto, et al., 2022). Les zones humides sont particulièrement vulnérables à ces changements, en raison de leur forte attractivité pour les activités humaines et de leur sensibilité écologique. Ces milieux connaissent une détérioration croissante liée à l'urbanisation, l'agriculture intensive, l'exploitation des ressources naturelles et aux changements climatiques (UICN, 2009).

Le continent africain figure parmi les régions les plus touchées par la dégradation des sols, un phénomène qui favorise la désertification et compromet durablement les écosystèmes (Kirui, 2015). D'après les estimations de (Gonzalez-Roglich, 2015), près de 45 % de la surface terrestre africaine est déjà affectée par la dégradation des terres, dont plus de la moitié présente actuellement un risque élevé ou très élevé d'aggravation. Les pressions anthropiques croissantes, combinées aux perturbations naturelles récentes, accentuent cette vulnérabilité, notamment dans les zones humides. La caractérisation spatiale et la quantification des niveaux de dégradation des sols constituent un enjeu majeur pour l'aide à la prise de décision environnementale (Bendahmane, 2015). Dans ce contexte, comment caractériser spatialement et quantifier les niveaux de dégradation des sols du site Ramsar 1018 à partir des outils de la télédétection et du SIG, afin d'identifier les zones les plus vulnérables et d'orienter ainsi les stratégies de leur gestion durable ? L'utilisation de la télédétection pour caractériser l'occupation du sol et les pressions anthropiques a été appliquée avec succès dans plusieurs bassins versants d'Afrique de l'Ouest (Akognongbe et al., 2014). Le Bénin est particulièrement concerné. Il compte quatre sites Ramsar, couvrant une superficie totale de 1179 354 hectares (Hamel, 2011). Parmi eux, le site Ramsar 1018, situé au sud-est du pays, abrite de nombreuses agglomérations urbaines et des écosystèmes riches en biodiversité. Il constitue à la fois un patrimoine écologique et touristique important, servant de refuge à la végétation, à la faune aquatique et à l'avifaune. Cependant, il est exposé aux pressions anthropiques liées surtout à la croissance démographique, l'urbanisation rapide et à l'intensification des activités agricoles, qui favorisent la dégradation progressive des sols. En effet, l'évolution de la population apparaît comme le facteur majeur de pression sur l'environnement. Mais, de nombreuses études mettent en évidence les relations statistiques qui existent entre la densité de population et la dégradation

continue des sols, en s'appuyant sur des méthodes de corrélation largement utilisées en sciences de l'environnement (Geist et Lambin, 2004). Mais, cette relation demeure toutefois complexe et dépend surtout des modes d'occupation du sol utilisés, des pratiques agricoles et des contextes socio-économiques locaux. L'objectif principal de cette étude est de cartographier les niveaux de dégradation des sols du site Ramsar 1018 à partir des indices spectraux issus de la télédétection et d'une approche SIG multicritère. Le présent article est structuré en quatre parties à savoir : le milieu d'étude, le matériel et méthodes, l'analyse des résultats et la discussion.

1. Milieu d'étude

Le site Ramsar 1018 (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 totale de 6528 km², avec un périmètre de 301 km. Son altitude maximale est de 135 m (région de Pobè). La figure 1 présente la situation géographique du Site Ramsar 1018.

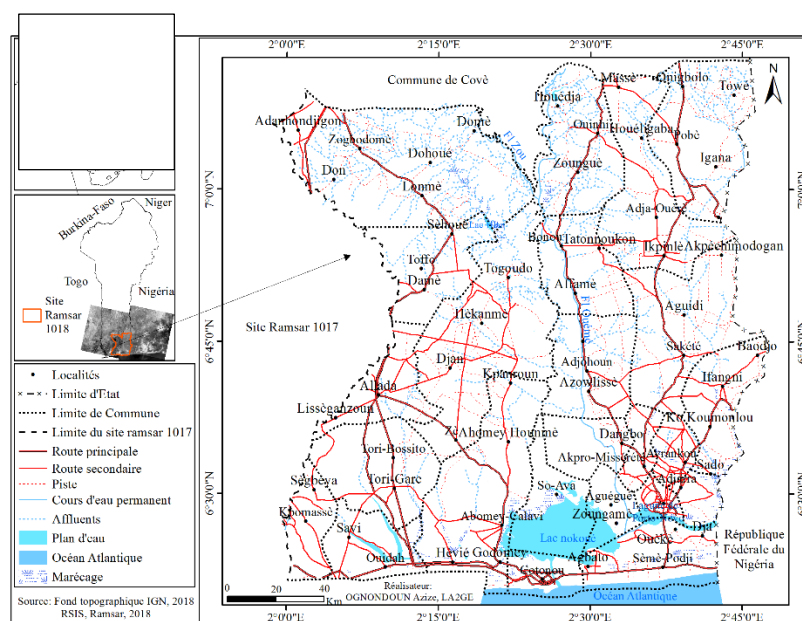


Figure 1 : Situation géographique du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, décembre 2024

Le site Ramsar 1018 est limité au Nord par les communes de Covè et Kéto (dont elle couvre une partie des territoires), au Sud par l'Océan Atlantique (à l'embouchure du fleuve Ouémé), à l'Est par le Nigeria et à l'Ouest par le site Ramsar 1017. Il est découpé en 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, les marécages d'Adjarra et la moyenne vallée de l'Ouémé (Plan de Gestion, Site 1018).

1.1 Climat

Le Bénin est situé dans la zone intertropicale chaude et humide et subit 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 de cette étude est sous l'influence d'un climat tropical humide appelé climat subéquatorial (un régime pluviométrique bimodal). La figure 2 présente le diagramme climatique du site Ramsar 1018.

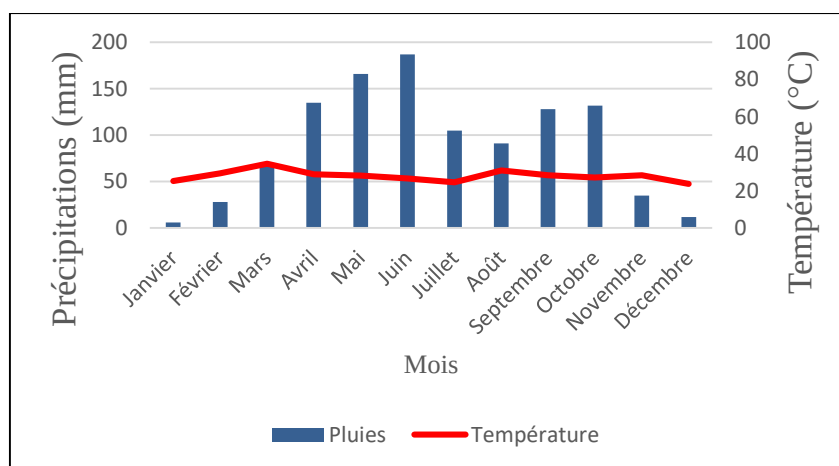


Figure 2 : Diagramme climatique du milieu d'étude

Source : Météo-Benin, octobre 2024

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 il expose également le milieu à des inondations récurrentes, à l'érosion et à la dégradation des sols.

2. Matériel et méthodes

Pour réaliser cette étude, plusieurs types de données ont été nécessaires. L'analyse de ces dernières a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels en fonction du type de traitement requis.

2.1. Matériel

Le matériel utilisé est constitué de GPS, des logiciels (Envi 5.3, ArcGIS 10.5), d'un ordinateur portable, d'un appareil photographique. Les données collectées sont spatiales, morphologiques et climatiques. Elles sont utilisées pour réaliser la cartographie du site d'étude et des facteurs de sa dégradation. Les caractéristiques des données utilisées pour la présente étude sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des données utilisées

Types	Format	Bandes spectrales et résolution	Sources
Image (DEM) SRTM, 2024	Numérique (Raster)	20 m ré-échantillonnée 30 m	https://earthexplorer.usgs.gov
Image Landsat 9 OLI/TIRS, 2024	Path/Row Date d'acquisition	191-192 / 55 - 191 / 56 08/02/2024	USGS/Earth Explorer
		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/ Type de données L2	30 m / OLI/TIRS L2SP	
	(Dimension des pixels) / Masque de nuage	Bande 8 : 15 m Bande 10 et 11 : 100 m/ 1,70	
	Dimension d'une scène	185 x 185 km	

	Fréquence de passage	16 jours	
--	----------------------	----------	--

Source : Travaux de laboratoire LA2GE, novembre 2024

2.2. Méthodes

La méthodologie adoptée a suivi plusieurs étapes. La première a porté sur les corrections radiométriques propres aux images Landsat 9 Oli/Tirs à l'aide du logiciel ENVI 5.3 à l'aide du module FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), basé sur le modèle de transfert radiatif MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission). Les paramètres utilisés incluent un modèle atmosphérique tropical, un modèle d'aérosols de type rural (ENVI → Radiometric Correction → FLAASH Atmospheric Correction). Cette correction a permis d'obtenir des réflectances de surface fiables pour le calcul des indices spectraux. La deuxième a permis de réaliser les travaux de terrain, le traitement des données, la cartographie des unités de l'occupation du sol, de la pédologie (types de sols), de la pente (MNT) et la détermination des critères du processus de dégradation des sols (Indices spectraux). Pour cela, le traitement des données de télédétection et l'usage du Système d'Information Géographique (SIG) sont réalisés enfin d'avoir une connaissance géo-spatialisée des facteurs de différenciation des niveaux de dégradation des terres. A cet effet, l'image SRTM de 20 m de résolution a été rééchantillonnée à 30 m sous ENVI 5.3 (ENVI → Raster Management → Resize Data (Spatial)) par interpolation bilinéaire afin d'assurer une harmonisation spatiale avec les images Landsat utilisées. Cette opération, couramment appliquée aux variables continues, permet de limiter les erreurs de superposition lors des analyses SIG multicritères. L'impact du rééchantillonnage sur les paramètres morphométriques (pente, facteur LS) reste faible compte tenu du faible relief du site Ramsar 1018. Le choix approprié des indices pour l'étude de la dégradation des sols est fait en fonction de plusieurs facteurs, notamment : le type de phénomène qui doit être étudié, l'échelle d'investigation, la qualité, la résolution, l'échelle, le type d'information requis, la disponibilité des outils d'analyse de l'information, etc. (Roose, 2005).

Pour cartographier la dégradation des sols, les indices spectraux sont utilisés. Ils sont obtenus par des méthodes de traitement d'images satellites appelées communément transformations multispectrales. Ces dernières permettent de 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 multi-spectral des données satellitaires et permettent à cet effet

de décrire l'état d'un phénomène. Leurs calculs reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Il en existe une multitude, mais le présent travail s'est limité à quelques-uns pour étudier la dégradation des sols. Notamment :

Indice de Brillance (IB) : L'indice de brillance est construit à partir des canaux rouges (R) et proches infra - rouge (PIR) du spectre suivant la formule $IB = \sqrt{(R \times R + PIR \times PIR)}$ (Escadafal, 2012). Il est utilisé pour extraire des informations sur des caractéristiques ou propriétés spécifiques de la surface terrestre, telles que la densité de la végétation, l'humidité du sol ou la qualité de l'eau. Sa sensibilité est relativement élevée pour la brillance des sols liée à son humidité et à la présence de sels en surface. Les valeurs obtenues par le calcul de cet indice caractérisent surtout l'albédo.

Indice NDVI : L'indice de végétation par différence normalisée, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux rouges (R) et proche infra-rouge (PIR) du spectre. Il met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge suivant la formule $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$. Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Ses valeurs sont comprises entre -1 et +1. Celles négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages. Pour les sols nus où les réflectances sont à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0.

Indice NDMI : L'indice Normalized Difference Moisture Indexd (NDMI) est un indice spectral reconnu pour sa sensibilité à l'humidité des sols et de la végétation. Elle est dérivée de la combinaison des bandes proche-infrarouge et infrarouge à ondes courtes. Contrairement aux indices biométéorologiques tels que le Humidex, le NDMI repose sur les propriétés spectrales du proche et du moyen infrarouge, ce qui le rend pertinent pour l'analyse environnementale par télédétection (Gao, 1996). On le calcul de la manière suivante : $NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$. NIR : proche infrarouge, fortement réfléchi par une végétation saine. SWIR : infrarouge à ondes courtes, fortement absorbé par l'eau.

Indice de coloration des sols (IC) : L'indice de coloration (IC) renseigne principalement sur la présence relative des oxydes de fer et l'état de surface des sols. Bien qu'il puisse être associé à certains processus de dégradation (décapage, latéritisation), son interprétation doit être prudente, car il est également influencé par la texture, l'humidité et les conditions d'illumination. Dans cette étude, l'IC est utilisé comme indicateur complémentaire et non exclusif de la dégradation des sols. De nombreux travaux ont souligné l'intérêt du calcul de ces

indices pour la caractérisation des états de surface. Plus le sol est dégradé, plus cet indice est faible (Gower, 1988). $IC = (R-V) / (R+V)$ Où : R : canal rouge ; V : canal vert.

Indice de bâtis (NDBI) : L'indice de bâtis est un indice spectro - radiométrique qui utilise des combinaisons de bandes spectrales satellitaires (principalement le moyen infrarouge et le proche infrarouge) pour identifier et cartographier les zones bâties artificiellement. Afin de limiter les confusions spectrales entre surfaces bâties et sols nus, le NDBI a été interprété conjointement avec le NDVI et l'indice d'humidité (NDMI). Cette approche croisée permet une meilleure discrimination des classes d'occupation du sol et une interprétation plus fiable des pressions anthropiques. Il est calculé de la manière suivante : $NDBI = (SWIR - PIR) / (SWIR+PIR)$.

La carte des sols utilisés pour la présente étude est extraite de la carte pédologique de reconnaissance au 1: 200.000 et du CENAP Bénin (Agoussou et Igué, 1987). Cela a permis de mieux appréhender la perméabilité et la capacité de rétention d'eau des différents types de sols. La figure 3 présente le diagramme méthodologique de la recherche.

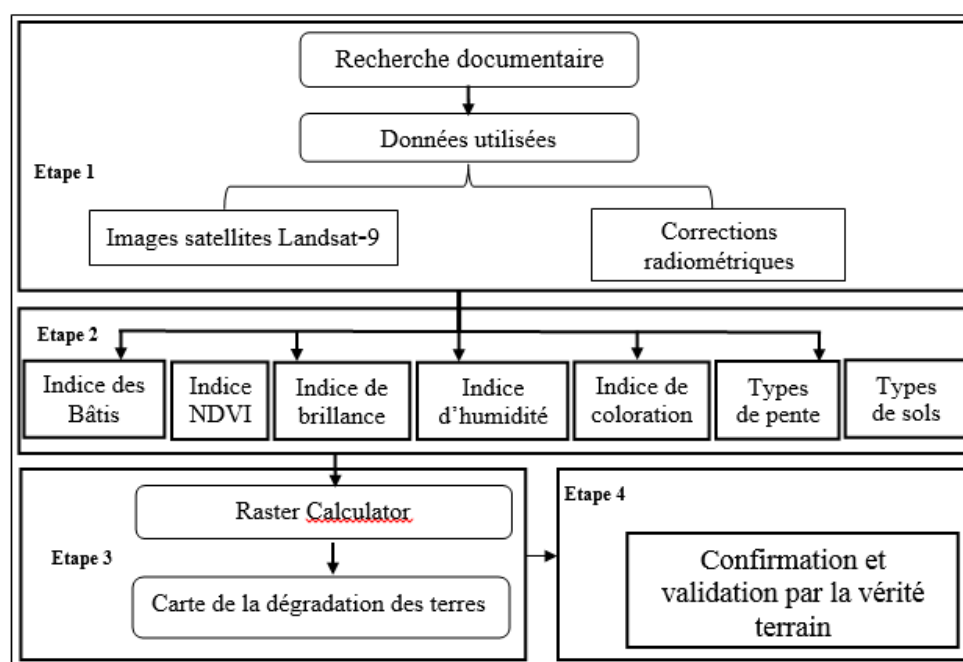


Figure 3 : Diagramme méthodologique

Source : Travaux de laboratoire, décembre 2024

2.2.1 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. 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 0,83 traduisant 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).

2.2.2 Méthode d'analyse des résultats

Dans le cadre de cette étude, cinq indices spectraux principaux ont été retenus pour la construction de l'indice synthétique de dégradation des sols, en raison de leur complémentarité et de leur pertinence pour l'analyse environnementale en zone humide. Ces cinq indices représentent respectivement les dimensions biophysique, hydrique et anthropique de la dégradation des sols. Ils présentent des échelles et des amplitudes différentes, ce qui rend nécessaire leur normalisation avant toute agrégation. Cette approche est largement utilisée dans les analyses SIG multicritères (Eastman, 2012). Les relations entre les indices et la dégradation des sols ne sont pas toutes monotones dans le même sens. Une harmonisation directionnelle a donc été réalisée afin que des valeurs élevées correspondent systématiquement à un niveau élevé de dégradation ainsi comme suit :

- NDVI : relation inverse (NDVI élevé = faible dégradation) ;
- NDMI : relation inverse (humidité élevée = faible dégradation) ;
- NDBI : relation directe (NDBI élevé = forte artificialisation) ;
- IC : indicateur complémentaire et non exclusif de la dégradation des sols ;
- IB : sensibilité : relativement élevée et présence de sels en surface.

Cette étape d'harmonisation est essentielle pour garantir la cohérence de l'indice composite (Malczewski, 1999). Ainsi, le SIG multicritère repose sur la sélection d'indicateurs spectraux pertinents (NDVI, NDMI, NDBI, IC, IB), leur normalisation et harmonisation directionnelle et leur agrégation spatiale à pondération égale. Cette démarche vise à la synthèse spatiale de

l'information et non la construction d'une matrice de décision multi-acteurs. L'importation de ces données dans le logiciel ArcGIS 10.5 a permis de calculer la superficie de chaque niveau de dégradation des sols. L'indice synthétique de dégradation des sols a été construit à partir de cinq indices spectraux préalablement normalisés par la méthode min-max et est harmonisés directionnellement afin d'assurer une relation monotone entre les valeurs élevées et les niveaux élevés de dégradation. L'agrégation a été réalisée par moyenne arithmétique à pondération égale, garantissant la transparence et la reproductibilité de la démarche. Ce qui a été classé en quatre niveaux de dégradation (faible à très forte) à l'aide de la méthode des seuils naturels, permettant de respecter la structure statistique des données. Le modèle PEIR est mobilisé comme outil d'analyse systémique et de structuration de la discussion, permettant de relier les résultats cartographiques aux dynamiques anthropiques et aux enjeux de gestion environnementale, sans prétendre à une évaluation quantitative normative.

3. Résultats

3.1. Cartographie des facteurs de la dégradation des terres du site Ramsar 1018

3.1.1. Types de sols

Le site Ramsar 1018 fait partie du grand bassin sédimentaire côtier du Bénin et est en discordance avec le socle cristallin ancien. Dans la vallée de l'Ouémé, plusieurs types de sols se distinguent au pied du plateau de terre de barre. La figure 4 présente la répartition spatiale des types de sols du site Ramsar 1018.

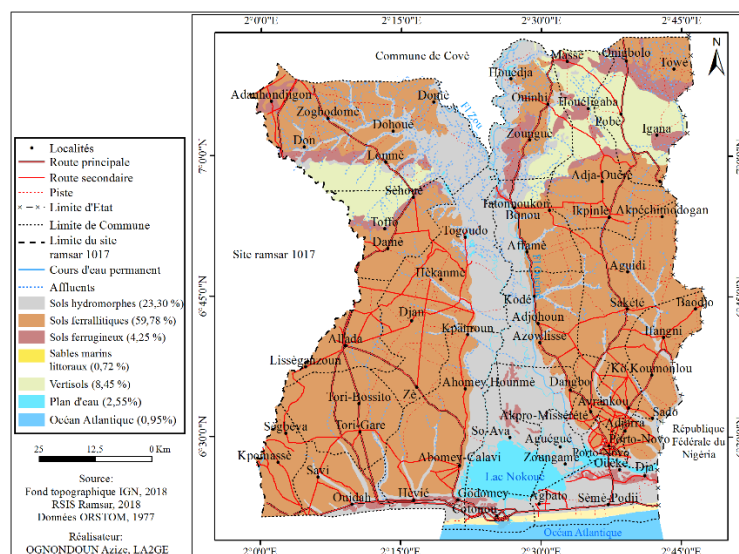


Figure 4 : Types de sols du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, janvier 2025

L'analyse de la figure 4 montre que les sols ferrallitiques dominent largement le secteur d'étude (59,78 %) et sont relativement présent dans les zones centrales et méridionales. Ils sont favorables à l'installation humaine et à l'agriculture diversifiée. Les sols hydromorphes (23,30 %) sont concentrés le long des vallées inondables et particulièrement au niveau du bassin versant de l'Ouémé où ils mettent en évidence, les limites du site Ramsar 1018 et constituent un fort potentiel pour les cultures de contre-saison.

3.1.2 Pente (%)

L'aspect topographique le plus important à prendre en compte ici est l'inclinaison de la pente. Cette dernière exerce une influence variable sur le ruissellement. C'est pour cela que son calcul s'est appuyé principalement sur l'image Digital Elevation Model-DEM (Saley, 2003 ; Tchibozo, 2014 ; Danumah, 2016). En effet, grâce au logiciel ArcGIS 10.5 et à l'aide de la fonction contour de l'outil spatial analyst, les courbes de niveaux ont été extraites de l'image DEM 2024, ce qui a permis de restituer le relief. Enfin, grâce l'outil "slope", les pentes ont été calculées automatiquement. La figure 5 présente la répartition de la pente sur le site Ramsar 1018.

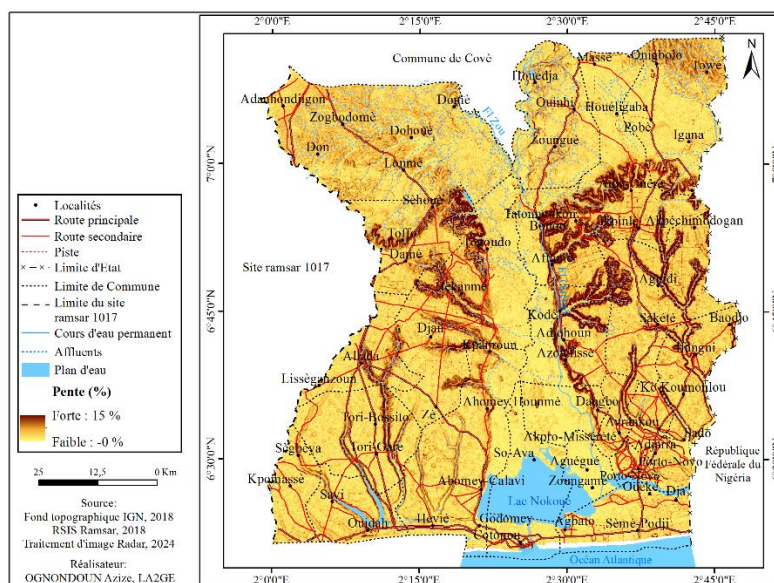


Figure 5 : Pente du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, janvier 2025

L'analyse de la figure 5 montre que les zones à pente forte et modérée (jusqu'à 15 %) sont localisées surtout au Nord-est du secteur d'étude (plateaux de Kétou, Ifangni, Pobè) et dans certaines zones du centre du secteur d'étude (Bonou). Ces dernières abritent des reliefs collinaires qui limitent les zones de cultures intensives afin favoriser le développement de

certaines cultures pérennes ou forestières. Les zones à faible pente (0 - 5 %) dominent largement le secteur d'étude et couvrent la majeure partie des plaines alluviales et des zones côtières. Ces dernières abritent les vallées fluviales (Ouémé, Zou) et les zones littorales qui favorisent le développement de l'agriculture, des installations humaines et des activités de pêche.

3.1.3 Occupation du sol

L'occupation du sol du site Ramsar 1018 est caractérisée par une représentation faible de certaines unités. Notamment la forêt dense, la forêt claire, les savanes arborée et arbustive, la plage sablonneuse et les eaux. Les zones bâties et celles des cultures sont plus importantes. Cette situation traduit l'importance de la pression anthropique sur le site d'étude (figure 6).

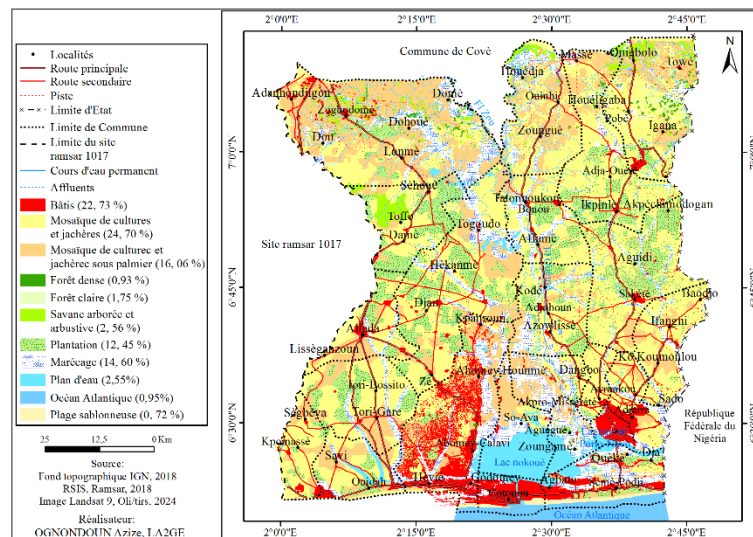


Figure 6 : Occupation du sol du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, février 2025

L'analyse de la figure 6 montre une diversité des formations dans l'occupation du sol du site Ramsar 1018. On y distingue principalement la mosaïque de culture et jachère (24,70 %) et la mosaïque de culture et jachère sous palmier (16,06 %). Ces deux classes dominent largement le paysage, traduisant la vocation agricole de la zone. La présence de jachères témoigne d'une rotation culturale, essentielle pour préserver la fertilité des sols. Les plantations (12,45 %) représentent un apport économique non négligeable, souvent en cultures pérennes (palmier à huile, anacardier). Les marécages (14,60 %) sont des zones humides associées aux plaines inondables. Ils jouent un rôle clé pour l'agriculture irriguée, la pêche et la régulation hydrique, mais sont vulnérables aux aménagements agricoles et aux changements climatiques. Les bâties (22,73 %) occupent une forte proportion d'espaces urbanisés ou semi-urbanisés et traduisent

ainsi une pression humaine croissante. Les plans d'eau (3,50 %) sont utilisés pour la pêche, le transport et l'irrigation. Ils offrent un potentiel non négligeable pour l'agro-transformation. Au total, il est important de noter une forte anthropisation du territoire, où l'agriculture vivrière coexiste avec des pressions concurrentes de l'urbanisation et des plantations industrielles.

3.1.4 Indice de brillance (IB)

L'indice de brillance est un indicateur radiométrique dérivé des images satellitaires, qui met en évidence le degré de réflectance globale des surfaces. La figure 7 présente la carte de l'indice de brillance du secteur d'étude.

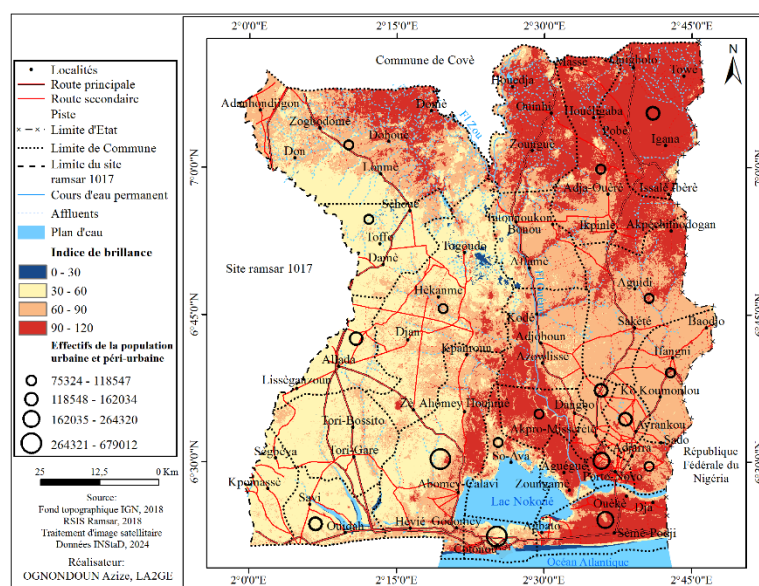


Figure 7 : Indice de brillance du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, février 2025

La lecture de la carte montre que les zones à très forte brillance (90 – 120) caractérisent les agglomérations urbaines les plus importantes au Sud-est du secteur d'étude (Cotonou, Porto-Novo, Sèmè-Podji, Abomey – Calavi). Les valeurs élevées (60 – 90) de cet indice traduisent une dégradation importante des zones périurbaines (Akpro - Missérété, Dangbo, Bonou, Adjohoun, Avrancou, Adja-Ouèrè, Pobè, Ouinhi) où l'effectif de la population n'est pas négligeable. Cette situation est à la base de la forte dégradation du couvert végétal à cause de l'intensité importante de l'agriculture et le potentiel de sols nus exposé à l'érosion différentielle. Ces dernières zones constituent des espaces de transition, susceptibles de basculer le potentiel du bon sol vers des stades de dégradation plus critiques. La faible à moyenne brillance (30–60) indique des zones encore partiellement couvertes de végétation ou en mosaïque agroforestière. Elle met également en évidence une forte hétérogénéité spatiale de l'indice de brillance,

traduisant ainsi une dynamique contrastée entre les zones humides (faible brillance) et celles anthropisées (forte brillance).

3.1.5 Indice NDVI

Le couvert végétal est un facteur important qui permet de minimiser les effets de la dégradation des sols. L'indice NDVI est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Sa valeur varie de -1 à +1. La figure 8 présente la répartition spatiale de l'indice NDVI dans la zone d'étude.

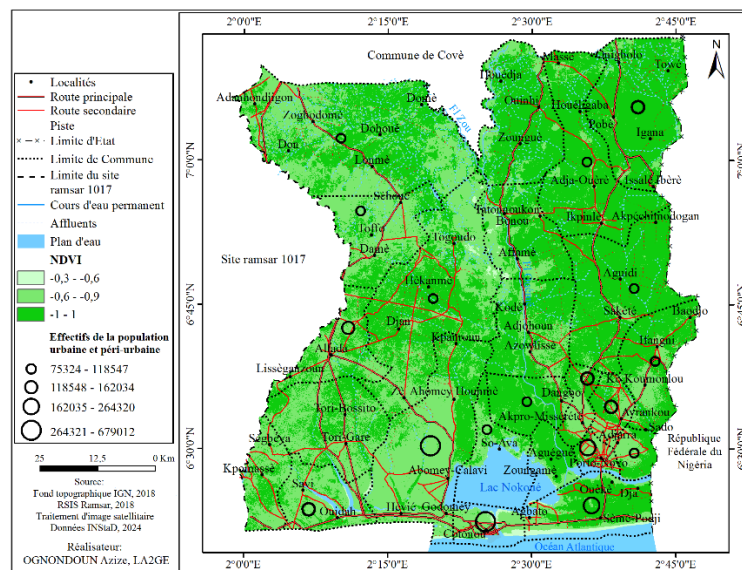


Figure 8 : Indice NDVI du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, février 2025

L'analyse de la figure 8 montre que les zones présentant des valeurs faibles de NDVI (-0,3 à -0,6) correspondent à une végétation sous pression, dégradée ou absente, associée à une forte densité de population comprise entre 162 035 et 264 320 habitants, traduisant une pression anthropique importante. Les valeurs de -0,6 à -0,9 caractérisent une végétation discontinue et peu représentée, observée principalement dans les grands centres urbains et périurbains tels que Cotonou, Porto-Novo, Sèmè-Podji, Abomey-Calavi et Ouidah, où la dégradation de la couverture végétale est marquée. Dans les zones côtières, cette pression anthropique se manifeste également par une végétation faible. Les valeurs de -0,6 à -0,9 sont aussi observées dans les communes périphériques d'Allada, Zè et Tori-Bossito, indiquant une végétation peu dense. À l'inverse, les valeurs de NDVI comprises entre -1 et +1 traduisent une végétation modérée à très dense, localisée dans les communes périurbaines d'Adja-Ouère, Pobè, Kétou,

Sakété, Ifangni et Covè, ainsi que le long des fleuves Ouémé et Couffo, témoignant d'un bon état écologique et d'une forte activité photosynthétique.

3.1.6 Indice de bâtis (NDBI)

Le NDBI permet de générer une image où les valeurs élevées indiquent une forte présence de surfaces bâties, tandis que les valeurs faibles correspondent à d'autres types de couvertures terrestres comme la végétation ou l'eau. La figure 9 présente l'indice NDBI de la zone d'étude.

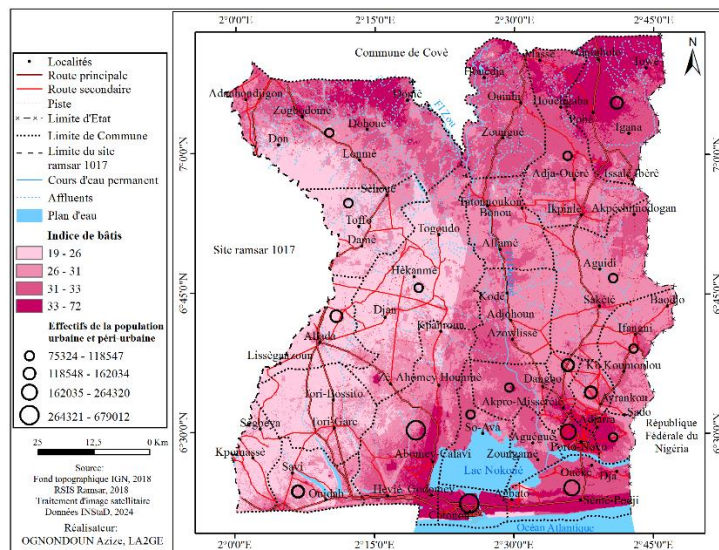


Figure 9 : Indice NDBI du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, février 2025

La croissance démographique entraîne une intensification de l'urbanisation et une extension des terres agricoles au détriment des forêts et des savanes. L'indice des bâtis constitue un outil pertinent pour évaluer la densité et l'extension des surfaces artificialisées, traduisant la pression urbaine et l'occupation humaine autour du site Ramsar 1018. Les valeurs les plus élevées de l'indice, comprises entre 33 et 72, se concentrent dans la partie sud du site d'étude, notamment dans les zones fortement urbanisées de Cotonou, Abomey-Calavi et Porto-Novo, révélant une très forte densité de bâti et une urbanisation rapide, responsable d'une artificialisation marquée des sols. Les valeurs intermédiaires (31-33) caractérisent les villes secondaires et les zones périurbaines en expansion telles que Sèmè-Podji, Ouidah et Adjara, où le processus d'urbanisation est en cours. À l'inverse, les valeurs faibles (19-26 et 26-31), dominent au nord et à l'ouest du site, notamment autour de Zogbodomey, Covè, Zè, Toffo et de la vallée de l'Ouémé, où l'occupation du sol demeure majoritairement agricole et naturelle, avec des implantations humaines dispersées. Sur le plan environnemental, la distribution de l'indice des

3.1.7 Indice d'humidité (NDMI)

• Localités
 — Route principale
 - - - Route secondaire
 ... Piste
 x - x - Limite d'Etat
 - - - Limite de Commune
 - - - Limite du site ramsar 1017
 — Cours d'eau permanent
 ... Affluents
 Plan d'eau
Indice d'humidité
 - 0,3
 -0,1 - 0,3
 0
 0,1 - 0,3

25 12,5 0 Km
 Source: Fond topographique IGN, 2018
 RSIS Ramsar, 2018
 Traitement d'image satellitaire
 Réalisateur: OGNONDOUN Azize, LA2GE

Source : Travaux de laboratoire, mars 2025

L'analyse de la distribution de cet indice, met en évidence une forte variabilité spatiale de l'humidité des sols et de la végétation du site Ramsar 1018. Les valeurs comprises entre $-0,3$ et $+0,3$, traduisent un contraste net entre les zones sèches et celles humides. Celles positives ($0,1$ à $0,3$) sont indicatrices d'une bonne disponibilité en eau d'une végétation particulièrement humide, observée principalement autour du lac Nokoué, des plaines inondables de la vallée de l'Ouémé et aussi le long des cours d'eau permanents (fleuves Ouémé et Zou). Ces milieux hydromorphes et marécageux caractérisent une activité photosynthétique importante et un potentiel écologique non négligeable. Les valeurs intermédiaires ($NDMI = 0$) représentent les zones de transition, notamment les espaces périurbains et agricoles, où l'humidité du sol reste

modérée mais fortement influencée par les variations saisonnières et les pratiques anthropiques. À l'inverse, les valeurs faibles et négatives ($-0,1$ à $-0,3$) sont observées dans les zones urbanisées notamment anthropisées telles que les villes (Cotonou, Abomey-Calavi, Porto-Novo, Sèmè-Podji et Ouidah), traduisent un stress hydrique, une faible couverture végétale et une imperméabilisation accrue des sols.

3.1.8 Indice de coloration du sol

L'Indice de Coloration (IC) est un indicateur qui mesure le contraste entre les valeurs spectrales dans le vert et le rouge. La figure 11 présente l'indice de coloration du sol dans la zone d'étude

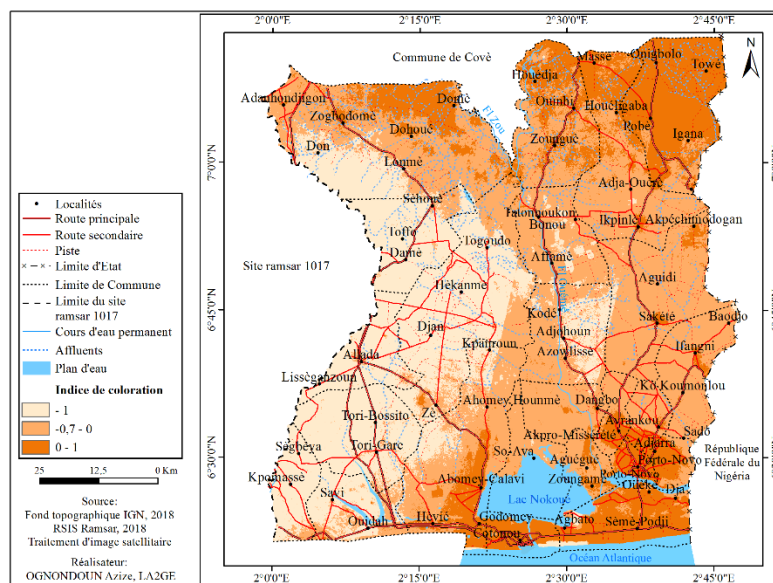


Figure 11 : Indice de coloration des sols du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, mars 2025

La figure 11 montre l'aspect du sol et des éléments qui l'occupe sous l'effet de la lumière du soleil. Son analyse révèle que les zones (0 à 1) sont fortement colorées et situées dans les centres urbains : Cotonou, Porto-Novo, Abomey-Calavi, Sèmè-Podji. Elles sont constituées de zones naturelles (hydromorphes ou forestières) et de zones anthropisées. Les zones ($-0,7$ à 0) caractérisent les espaces agricoles (Communes de Sakété, Adjohoun, Bonou, Dangbo, Adja-Ouère) avec un couvert végétal discontinu. Ce dernier subit une pression foncière modérée, caractéristique typique des paysages ruraux interstitiels. Les zones (-1) se situent principalement à l'ouest du secteur d'étude et particulièrement dans les communes d'Allada, de Toffo, de Zogbodomey et de Tori - Bossito où l'agriculture est intense.

3.2 Cartographie de la dégradation des sols du site Ramsar 1018

La carte de dégradation des sols est obtenue à partir de la synthèse de celles des facteurs de dégradation des terres en corrélation avec la densité de la population du site Ramsar 1018 (figure 12 et 13).

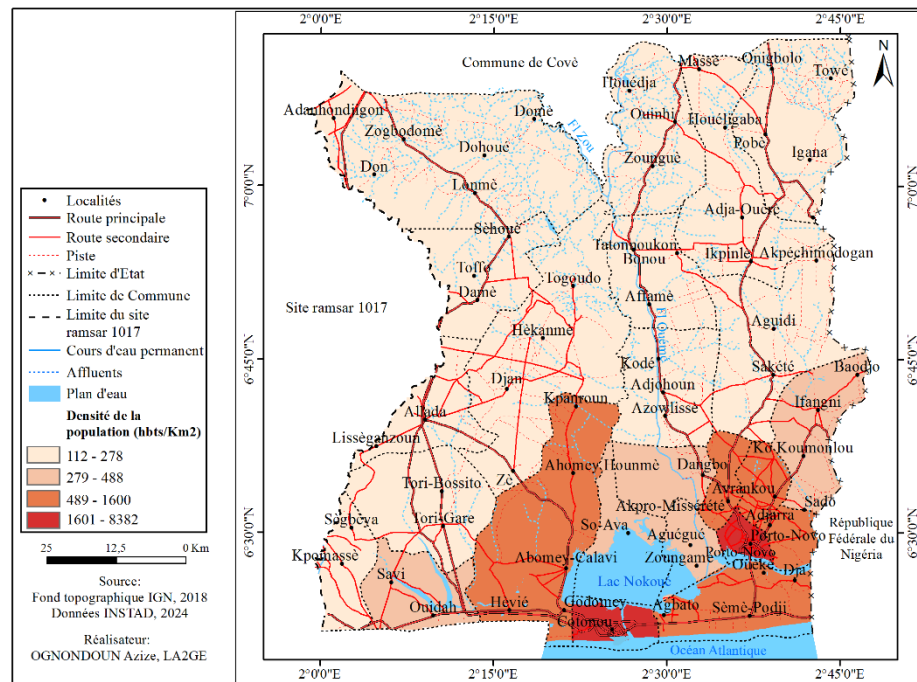


Figure 12 : Densité de la population des communes du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, mars 2025

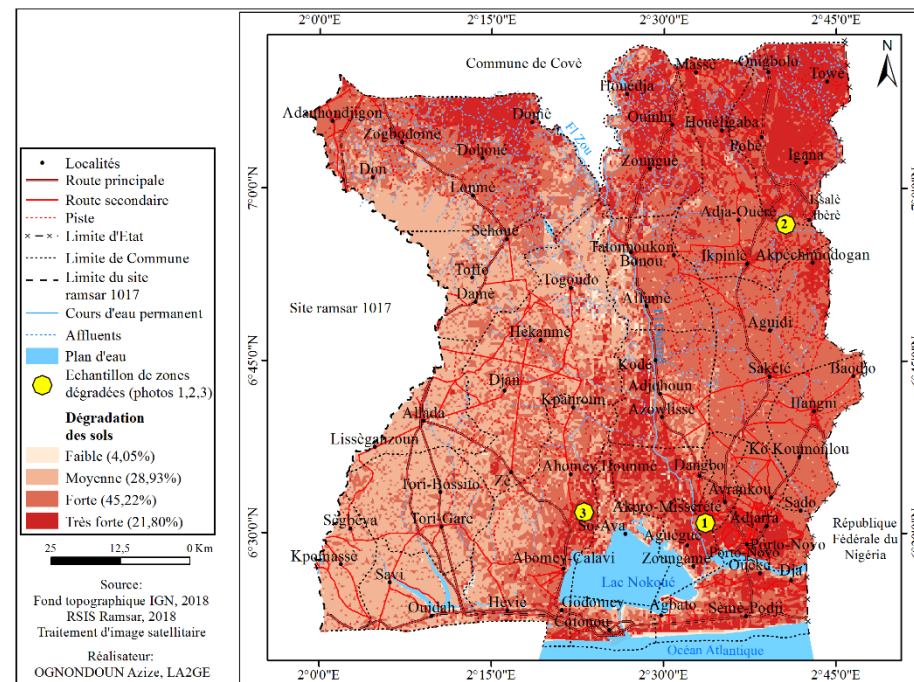


Figure 13 : Zones des sols dégradés du site Ramsar 1018

Source : Travaux de laboratoire, mars 2025

La lecture de la carte de densité de la population (figure 12) révèle une forte disparité spatiale dans l'utilisation des terres du site Ramsar 1018. En effet, certaines communes se caractérisent par des densités très élevées de population, alors que d'autres se distinguent par des valeurs nettement plus faibles. Cette hétérogénéité traduit une organisation contrastée de l'espace, particulièrement dominée par une forte concentration des populations surtout dans les pôles urbains au sud et du sud-est du secteur d'étude, notamment à Cotonou, Abomey-Calavi, Porto-Novo et Sèmè-Podji. Ces derniers espaces urbains constituent de véritables pôles d'attraction, portés par une croissance démographique rapide, une urbanisation soutenue et une dynamique socio-économique intense. À l'inverse, les communes situées au centre et à l'ouest du site d'étude, telles que Toffo, Zè et Zogbodomè, présentent des densités plus faibles, reflétant ainsi une occupation humaine diffuse particulièrement dominée par les activités agricoles et rurales. L'analyse croisée de la carte de la densité (figure 12) avec celle de la dégradation des sols (figure 13) révèle une corrélation directe entre les espaces de fortes densités de population et ceux des niveaux élevés de dégradation des sols. Ce constat est en pleine adéquation avec les résultats des études de plusieurs auteurs (Ozer, 2002 ; Lambin, 2004 ; Akognongbe et al., 2014), qui ont établi la corrélation directe entre la pression démographique et la dégradation accrue des terres. Au-delà de cette évidence, les résultats obtenus par la présente étude permettent de relativiser cette assertion notamment par l'existence de zones à faible densité humaine présentant quand même des niveaux de dégradation. Cette situation souligne le rôle de facteurs supplémentaires particulièrement indépendants de la pression démographique, notamment l'érosion différentielle observée sur les plateaux de certaines communes du nord-est du secteur d'étude (Pobè, Adja-Ouèrè et Ouinhi). Par ailleurs, la dégradation des sols s'intensifie progressivement vers le Sud-est du site Ramsar 1018, en particulier à proximité du lac Nokoué. Les zones de très forte dégradation (21,80 %) et de forte dégradation (45,22 %) menacent les sols ferralitiques et hydromorphes déjà érodés. Ces derniers sont déjà affectés par l'urbanisation périphérique, l'artificialisation des surfaces et l'implantation d'infrastructures urbaines peu planifiées. La dégradation moyenne (28,93 %) occupe les espaces de transition entre milieux naturels et ceux habités qui sont essentiellement les espaces périurbains et ruraux au centre-est du secteur d'étude. Ces derniers sont soumis à une pression agricole croissante et une urbanisation diffuse en expansion. Les zones de faible dégradation (4,05 %), sont relativement limitées et localisées dans certains secteurs particulièrement humides, notamment à proximité des plans d'eau, cours d'eau permanents et sur les plaines inondables où l'humidité et la couverture végétale jouent un rôle protecteur malgré la vulnérabilité ait augmenté avec

l'évolution progressive future des usages du sol. Afin de ralentir la dégradation progressive des sols du site Ramsar 1018, le modèle PEIR (Pression–État–Impact–Réponse) a été utilisé pour identifier de manière intégrée les facteurs de dégradation des sols et proposer des orientations de gestion durable (Gobina, 2004). Cette dernière approche aidera à mettre en place un outil d'aide à la décision permettant de renforcer les mesures de conservation des sols afin d'assurer une gestion intégrée et durable du site Ramsar 1018.

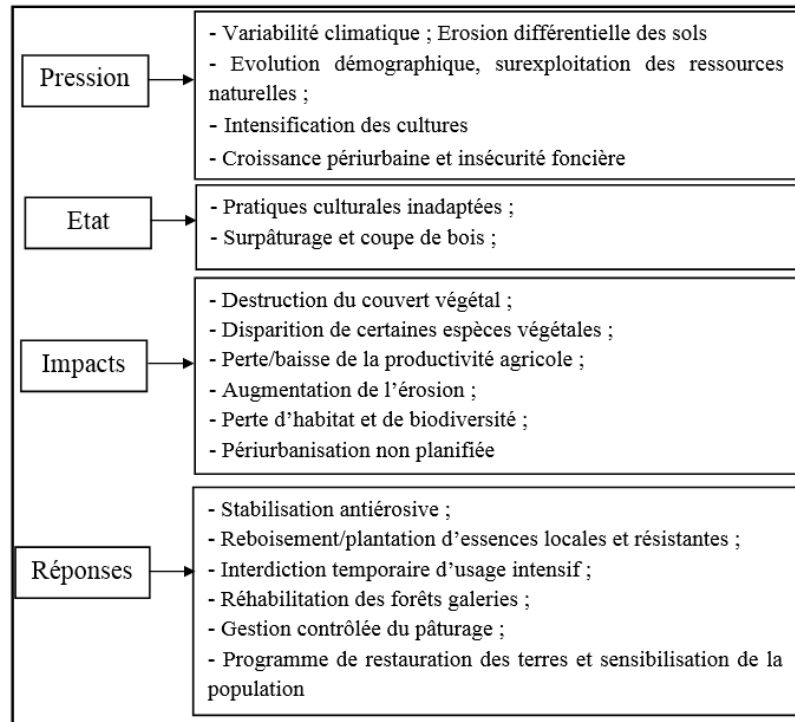


Figure 13 : Modèle PEIR (Pression - État - Impact - Réponse)

La cartographie de la dégradation des sols a mis en évidence la pression anthropique sans cesse croissante sur la zone humide du site Ramsar 1018. Cette situation est particulièrement visible autour des axes routiers et dans les zones urbaines et périurbaines en pleine expansion. La répartition spatiale des différents niveaux de dégradation des sols plaide pour une gestion différenciée en lien avec les résultats de l'analyse PEIR. Pour cela, des actions environnementales de conservation stricte des sols faiblement dégradés seront mise en place et une restauration active de ceux dégradés sera réalisée dans les zones très affectées. A cet effet, plusieurs formations sur l'agriculture intelligente seront réalisées afin de mettre en place des pratiques agricoles durables dans les zones à dégradation moyenne, forte et très forte des sols. La planche 1 montre quelques sols dégradés du site Ramsar 1018.



2° 33' 06" E ; 6° 31' 58" N

2° 40' 35" E ; 6° 56' 51" N

2° 23' 30" E ; 6° 31' 47" N

Planche 1 : Quelques échantillons de sols dégradés du site Ramsar 1018.

Source : Prise de vue, Ognondoun, juillet 2025

La photo 1.1 illustre des ravinements profonds traduisant une forte vulnérabilité des sols face aux pluies intenses, aggravée par l'absence de couvert végétal et par des aménagements inadaptés tels que les pistes non protégées et les écoulements d'eau concentrés. La photo 1.2 montre une parcelle agricole exploitée malgré un état de dégradation prononcé, caractérisé par une végétation clairsemée, un sol compacté et une faible fertilité. Cette situation résulte de la surexploitation agricole, de la diminution de la matière organique et de la baisse de la capacité de rétention d'eau des sols. La photo 1.3 révèle une érosion linéaire en bordure de piste, accentuée par le passage fréquent des véhicules et le ruissellement sur des surfaces compactées, témoignant d'un déficit de drainage et d'une fragilisation des infrastructures locales. À long terme, ces processus favorisent l'apparition de ravines plus profondes. Une gestion environnementale durable des sols apparaît donc indispensable pour préserver les écosystèmes.

Discussion

La présente étude porte sur la cartographie de la dégradation des sols à partir des techniques de télédétection, fondées sur l'analyse des changements de l'état de la surface terrestre à l'aide d'indices spectraux dérivés d'images satellitaires. Ces indices, basés sur des combinaisons de réflectances, permettent de distinguer le comportement spectral de composantes naturelles telles que la végétation, les sols et l'eau. Toutefois, leur interprétation requiert une maîtrise méthodologique rigoureuse, car le choix des indices les plus pertinents demeure complexe et dépend des objectifs spécifiques de chaque étude. Comme le soulignent Tchibozo et Toundoh (2014), aucune méthode unique ne permet de rendre compte de l'ensemble des processus de dégradation des sols. La dégradation des sols est un phénomène multidimensionnel englobant l'érosion, la salinisation, la perte de matière organique et la dégradation de la structure des sols. De ce fait, plusieurs auteurs recommandent l'utilisation combinée de différentes approches

méthodologiques afin d'obtenir une vision globale et intégrée (Gervais, 2017). Les travaux d'Ozer (2002) montrent que l'intensification des pressions anthropiques dans les zones densément peuplées accentue la dégradation des sols, notamment par la réduction de la couverture végétale et l'augmentation du ruissellement. Lambin (2004) souligne également le rôle indirect de la croissance démographique à travers l'urbanisation, l'extension des infrastructures et les changements d'occupation du sol. Ces dynamiques ont été confirmées par Akognongbé et al. (2014) dans le bassin de l'Ouémé, mettant en évidence des relations spatiales structurées entre pression humaine, occupation du sol et dégradation environnementale. Plusieurs études se sont appuyées sur les indices spectraux de la végétation, notamment le NDVI, pour caractériser la dégradation des terres, car ils constituent de bons indicateurs de la santé de la végétation et, indirectement, de la qualité des sols. Une baisse du NDVI dans le temps est souvent interprétée comme un signe de dégradation. D'autres indices, tels que les indices de brillance des sols ou les indices d'humidité dérivés d'images radar et thermiques, permettent d'identifier le stress hydrique et la salinisation. L'analyse diachronique, fondée sur la comparaison d'images satellitaires de différentes périodes, s'avère particulièrement efficace pour suivre l'évolution de la dégradation, identifier ses causes naturelles ou anthropiques, et évaluer l'efficacité des mesures de conservation et de restauration. Appliquée au site Ramsar 1018, cette approche a révélé une dégradation forte à très forte sur près de la moitié du territoire (49,93 %), traduisant une forte pression environnementale. Cette situation s'explique principalement par une croissance démographique soutenue et une agriculture intensive. Les données issues des différents recensements montrent une augmentation continue de la population depuis cinquante ans, avec des densités parmi les plus élevées du pays, entraînant une surexploitation des terres et une fragilisation des écosystèmes de cette zone humide d'importance internationale.

Conclusion

La présente étude de la dégradation des sols du site Ramsar 1018 par télédétection a permis de mettre en évidence l'ampleur et la répartition spatiale du phénomène dans cet écosystème sensible à partir des indices spectraux déduits des images satellites. Les résultats montrent que les zones à très forte (21,80 %) et forte dégradation (45,22 %) abritent les sols ferralitiques et hydromorphes autour desquels sont implantées les grandes agglomérations (Porto-Novo, Cotonou, Abomey-Calavi, Sèmè-Podji) et les périurbaines et rurales (Ifangni, Sakété, Adja-Ouèrè, Bonou, Adjohoun, Ouinhi, Pobè). Cette situation est liée à la pression démographique,

l'agriculture intensive et l'urbanisation. Les zones de moyenne (28,93%) et de faible dégradation (4,05 %) sont localisées à l'ouest du secteur d'étude où la population est moins importante (Toffo, Zè, Zogbodomè). Le site Ramsar 1018 connaît une dynamique de dégradation préoccupante, avec des conséquences directes sur la fertilité des sols, la productivité agricole, la régulation hydrologique et la conservation de la biodiversité. Ils soulignent également la pertinence des outils de télédétection et du SIG pour analyser les changements environnementaux et orienter la gestion durable des ressources naturelles.

Ainsi, la cartographie réalisée constitue un outil d'aide à la décision pour les autorités locales, les gestionnaires du site et les partenaires techniques. Elle appelle à la mise en œuvre de mesures de restauration ciblées (reboisement, lutte antiérosive, pratiques agro écologiques) et de stratégies de gestion intégrée afin de freiner la progression de la dégradation des sols et de préserver ainsi les services écosystémiques de cette zone humide d'importance internationale.

Bibliographie

- Agossou, V. et Igué, A. M. (1987) : Influence des systèmes d'exploitation agricole sur l'intensité de la dégradation des terres dans le Département des Collines au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*. Septembre 1987 19p.
- Akognongbe, A., Abdoulaye, D., Vissin, E.W. et Boko, M. (2014) Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Bénin), Afrique SCIENCE 10(2) (2014) 228-24, 15 p.
- Bendahmane, I. (2015) : Ecologie de la reproduction des oiseaux d'eau à Dayet Elferd (w. Tlemcen), Thèse de Doctorat, Université Abou BekrBelkaid., Faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers, Département de ressources forestières, 123p.
- Moukarim D. A. (2020) : Les indices de végétation, comme le NDVI. NDVI et qualité du sol.
- Dammak, J. (1982) : Évaluer l'efficacité des mesures de télédétection ou dégradation des sols.
- Danumah, J. H. (2016) : Évaluation et cartographie des risques d'inondation dans le district d'Abidjan à l'aide d'un modèle d'analyse multicritère (AHP) et de techniques de géoinformation (Côte d'Ivoire). *Catastrophes géo environnementales*, 2016.
- Escadafal, R. (2012) : Télédétection des terres arides : quand les sols entrent en scène » periodicos.fundaj.gov.br.
- Eastman, J. R. (2012) : IDRISI Selva Tutorial, Manual Version 17.0, Clark University, January Available:http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/eng/gis/idrisi_selva_tutorial.pdf, [Accessed Sep 11, 2015].
- Fournier, F. (1960). Climat et érosion : La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Presses Universitaires de France, 1960. (C'est la référence classique à l'origine de l'« indice de Fournier » utilisé en érosivité).
- Gao, B.-C. (1996) : NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
- Gervais, E. (2017) : La dégradation des sols englobe plusieurs processus et chacun nécessite des techniques d'analyse spécifiques. *Gervais terrain degradation soils remote sensing 2017*. P.56
- Geist, H. J. et Lambin, E. F. (2004) : Modèles causaux dynamiques de la désertification. *BioScience*, 54, 817-829. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0817:DCPOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0817:DCPOD]2.0.CO;2)
- Gibson, J. (2007) : NDVI pour caractériser la dégradation des terres.

- Gobina, A., Jones, R., Kirkby, M., Campling, P., Govers, G., Kosmas, C., Gentile, A. R. (2004) : Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science & Policy* 7 (2004) 25–38. doi:10.1016/j.envsci.2003.09.004. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/Images/ErosionIndsGobin.pdf
- Gonzalez-Roglich, M. (2020) : Synergie des outils mondiaux pour suivre les progrès vers la neutralité en matière de dégradation des terres : Trends.Earth and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies base de données sur la gestion durable des terres » agronomy.pagepress.org
- Gower, R. (1988) : The Fluorescence Line Imager: High-Resolution Imaging Spectroscopy Over Water and Land.
- Hamel, J. (2011) : Utilisation des oiseaux aquatiques comme bio indicateurs de l'intégrité des lacs de montagne marocains. Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement (CUFE) et au Département de biologie en vue de l'obtention des grades de maître en environnement (M. Env.) et de maître en écologie internationale (M.E.I), Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, 139p.
- Hounto, G., Mouzoun, S. & Yabi, I. (2022) : Implications socio-environnementales de la dynamique d'occupation du sol des zones humides du site Ramsar 1017, Sud-ouest du Bénin, p. 318.
- INStaD (2013) : Résultats définitifs RGPH4, 33p.
- Karnieli, A. (2008) : Soil and vegetation in semi-arid environments: remote sensing perspective. Télédétection de milieux semi-arides. [Remote Sensing Lab+2OUCI+2](#).
- 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>
- Malczewski, JA (1999) : SIG et analyse multicritères de décision. John Wiley & Sons, New York, 392 p.
- Masterton, J. M., & Richardson, F. A. (1979). Humidex : A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Downsview, Ontario: Environment Canada, Atmospheric Environment Service.
- Météo-Bénin (2024) : Rapport de la situation pluviométrique de 2024. Direction de la climatologie et de l'agro météorologie, 13 p.
- Oliver, K. (2015) : Les coûts de la dégradation des terres en Afrique de l'Est» (avec Alisher Mrzabaev).
- Roose, É. (2005) : 'Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols '. (CGES). Bulletin Pédologique N° 70 ; FAO. Rome. 240 pp.
- Saley, M. B. (2003) : Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau dans la région semi-montagneuse de Man (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat Unique, Université de Cocody/Abidjan (2003).

Tchibozo E. & Toundoh P. (2014) : Spatial dynamics and modeling of wetlands degradation by remote sensing: The case of the small valley Adjarra in the lower valley of Ouémé (Ramsar Site No. 1018, south-east of Benin).

Tchibozo, E. A. (2014) : Spatial dynamics and modeling of wetlands degradation by remote sensing: The case of the small valley Adjarra in the lower valley of Ouémé (Ramsar Site No. 1018, south-east of Benin). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 8, No. 2, 2014. Issr Journals.

UICN (2009) : Programme Aires Protégées (www.papaco.org) : Evaluation de l'efficacité de gestion d'un échantillon de site RAMSAR en Afrique de l'Ouest, p.11.

Volkoff, B. (1976) : Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : feuille d'Abomey. Paris : ORSTOM, 1976, 41 p. (Notice Explicative ; 66 (2)). ISBN 2-7099-0425-X. Analyse spatiale de la couverture pédologique [068SPASOL]. Fonds IRD [F A08689] ; Bondy ; Montpellier (Centre IRD) ; Niamey (LASDEL) ; Nouméa ; Ouagadougou ; Tunis.

Wessels, K. J., Prince, S. D., Frost, P. E. van Zyl, D. (2004) : Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series, researchspace.csir.co.za+2researchspace.csir.co.za+2.

Yengoh, G., Dent, D., Olsson, L., Slegh, A. (2021) : Challenges to the use of NDVI in land degradation assessments» (titre du rapport) 2015 mais mention 2021 peut être pour mise à jour ou nouvelle version. cdn.unenvironment.org.

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*, 2003, 24(3), pp. 583–594. DOI : 10.1080/01431160304987.