



Journal Homepage: [-www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/24169

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/24169>



RESEARCH ARTICLE

DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE LA PRODUCTIVITE DES TERRES ET INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES DANS LA COMMUNE RURALE DE BOUNE (SUD-EST DU NIGER)

Bagana Djadji, Bachir Abba and Moussa Malam Abdou

1. Lgge, Université André Salifou De Zinder.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 July 2026

Final Accepted: 12 August 2026

Published: September 2026

Key words:-

Vegetation productivity, NDVI, Landsat, Google Earth Engine, Rainfall, Land cover, Potential degradation, Sahel, Bouné, Niger

Abstract

Land degradation is a major challenge in the Sahelian regions, where ecosystem dynamics result from the interaction between climate variability and anthropogenic pressures. This study analyzes the spatiotemporal dynamics of vegetation productivity in the rural commune of Bouné between 2002 and 2024 and examines the respective influences of climatic and anthropogenic factors. Annual NDVI composites were generated from time series of Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, and 9 OLI-2 images, processed using Google Earth Engine. Productivity trends were assessed using Sen's slope and the Mann-Kendall test. Climate-productivity relationships and non-climatic factors were analyzed using multivariate regressions, the RESTREND method, and ANOVA. In addition, land-use maps were produced for 2002, 2013, and 2024 using supervised classification based on the maximum likelihood method, while a map of management practices was developed through the interpolation of survey data. The results reveal mixed trends in plant productivity. Between 2002 and 2013, 42% of the municipal land area showed improved productivity, compared with 18% that deteriorated and 40% that remained stable. Between 2013 and 2024, the proportion of land showing improvement drops to 25%, while the proportion showing decline rises to 30%. This functional shift coincides with a remarkable expansion of agricultural land, which increased from 31% to 43% of the municipality's total area between 2002 and 2024, at the expense of pastureland, which declined from 41% to 32%. The climate-productivity relationship reveals that after 2013, the historical influence of rainfall collapsed (the coefficient of determination (R^2) decreased from 0.81 to 0.58 and the correlation coefficient (r) from 0.85 to 0.10), while the influence of thermal stress and drying winds appears to have intensified.

"© 2026 by the Author(s). Published by IJAR under CC BY 4.0. Unrestricted use allowed with credit to the author."

Residual analysis suggests a significant contribution from anthropogenic factors, particularly the extensive monoculture of sesame on fragile dune formations. These results underscore the value of an integrated approach

combining plant productivity, climate, land use, and management practices to better characterize degradation processes and support sustainable land management.

Introduction:-

Les zones semi-arides du Sahel font face, depuis plusieurs décennies, à des défis écologiques et socio-économiques sans précédent. Sous l'influence conjuguée de la variabilité climatique et de la pression anthropique croissante, les écosystèmes sahéliens subissent des perturbations structurelles majeures (Bouzou Moussa et al., 2020; Tong et al., 2017). Ces déséquilibres se répercutent directement sur la sécurité alimentaire des populations, fragilisent leurs moyens d'existence et affaiblissent leur capacité de résilience face aux aléas climatiques (Jahel & Lambin, 2025; Yacouba et al., 2016). Pour contrer cette spirale de dégradation, la communauté internationale s'est dotée d'outils analytiques rigoureux, notamment à travers le concept de Neutralité en matière de Dégradation des Terres (NDT) promu par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD, 2018). Cette approche constitue la base méthodologique pour le suivi de l'indicateur 15.3.1 des Objectifs de Développement Durable (ODD 15), structuré autour de trois sous-indicateurs complémentaires : i) la couverture des terres, ii) la productivité des terres et iii) le carbone organique du sol. Elle permet d'appréhender de manière intégrée l'état et la dynamique des terres (Thomas et al., 2023; Bär et al., 2023).

Parmi ces trois composantes, la productivité des terres, mesurée à travers l'activité phénologique du couvert végétal et définie comme la capacité potentielle des terres à générer de la biomasse végétale (Gonzalez-Roglich et al., 2019; Ivits & Cherlet, 2013; Kapović Solomun et al., 2018, p. 21), apparaît comme un proxy fonctionnel dynamique (Fensholt et al., 2013; Schillaci et al., 2023; Shen et al., 2023). Son évaluation par télédétection permet de détecter les processus de dégradation et de restauration fonctionnelles indépendamment des seules transformations géomorphologiques ou morphologiques visibles du paysage, telles que l'ensablement ou la formation de dunes mobiles, ce qui la rend particulièrement importante dans les régions sahéliennes. Pour ce faire, l'indice de différence normalisée de végétation (NDVI) dérivé de chroniques satellitaires constitue à cet égard l'indicateur le plus largement validé pour apprécier la production de biomasse (Prince, 2019). Toutefois, en zone sahélienne, l'interprétation des tendances du NDVI est rendue complexe par un couplage historique très étroit avec le régime climatique, notamment avec les précipitations (Dardel et al., 2014; Fensholt et al., 2013). Un reverdissement peut ainsi refléter une simple réponse phénologique positive aux pluies sans pour autant traduire une restauration durable des conditions écologiques sous-jacentes. Inversement, une baisse de l'activité végétative peut découler d'une sécheresse temporaire sans équivaloir à une dégradation pérenne induite par l'homme. D'où la nécessité méthodologique d'isoler la variabilité climatique afin d'extraire la composante résiduelle imputable aux pratiques liées à l'homme (Dardel et al., 2014).

Dans le sud-est du Niger, ces interactions sont particulièrement intenses et complexes. Si la reprise globale des précipitations observée depuis la fin des grandes sécheresses des décennies 1970 et 1980 a favorisé une remontée générale du signal de reverdissement (Dardel et al., 2014), elle a également stimulé une expansion spectaculaire du front agricole pluvial qui s'opère au détriment des espaces pastoraux. La Commune Rurale de Bouné, connaissant des profondes réorganisations foncières liées à la poussée démographique et l'introduction de la culture de sésame, constitue à cet égard un observatoire représentatif particulièrement intéressant pour analyser ces interactions (productivité-climat-homme). Pourtant, la majorité des études environnementales menées jusqu'alors se concentrent sur les dynamiques morphologiques et sédimentaires locales, telles que la mobilité des dunes, l'ensablement des cuvettes ou l'apparition de surfaces dénudées (Bodart et al., 2010; Barké et al., 2018; Djadji et al., 2025). De plus, ces travaux, étant le plus souvent circonscrits dans le temps et l'espace, ne permettent pas de restituer les trajectoires fonctionnelles de long terme. Pour combler cette lacune, la présente étude se propose d'analyser la productivité végétale dans la commune de Bouné sur une séquence de 23 ans (2002-2024), en explicitant ses liens avec la variabilité des facteurs climatiques (pluie, température, vent), les mutations des usages des sols et les modes de gestion des terres.

Matériels and Méthodes :-

Présentation de la zone d'étude :-

La Commune Rurale de Bouné est située au sud-est de la région de Zinder (Figure 1). Elle s'insère dans un paysage géomorphologique dominé par des formations dunaires quaternaires reposant sur les grès de Mallaoua (Greigert & Pougnet, 1965). Le relief présente une organisation tripartite caractéristique : des sommets dunaires, des couloirs inter-dunaires et des cuvettes oasiennes à sols limono-argileux. Le climat est de type tropical sec, caractérisé par une pluviométrie annuelle moyenne de 380 mm (± 100 mm) calculée sur la série de 1981-2024

(Djadji et al., 2023). L'analyse hydro-climatique de long terme révèle deux ruptures statistiques positives en 1997 (+29 %) et 2016 (+52 % par rapport à 1998-2016), attestant d'un retour de la pluviométrie. L'activité éolienne y constitue le processus morpho-dynamique majeur. La population, essentiellement rurale, tire ses ressources de l'agriculture pluviale, du maraîchage dans les cuvettes et de l'élevage. Cela rend le territoire particulièrement sensible aux phénomènes de dégradation des terres.

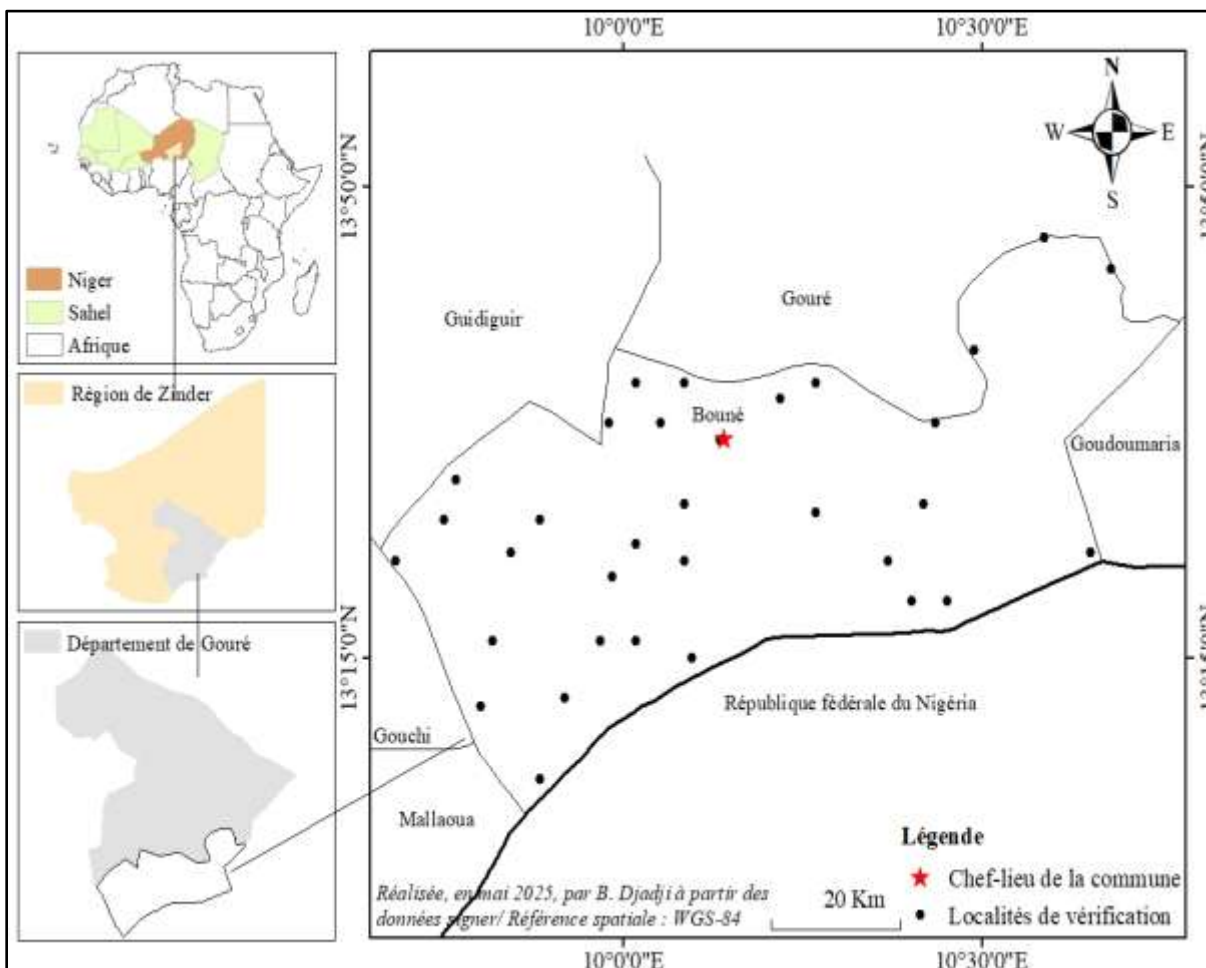


Figure 1: Localisation du cadre géographique de la recherche

Acquisition des données:-

L'évaluation intégrée de la productivité, du climat et de l'occupation des sols repose sur l'assemblage de données multi-sources sur la période 2002-2024. La série temporelle d'imagerie rassemble quatre générations de capteurs satellitaires Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 OLI, 9 OLI-2), offrant une résolution spatiale de 30 mètres et temporelle de 16 jours. Ce choix se justifie par leur adaptabilité aux analyses à l'échelle réduite comme une commune et la facilité de constitution d'images mensuelles en additionnant deux scènes consécutives. Le jeu de données climatiques inclut des grilles de précipitations à haute résolution spatiale (5 km) issues du produit CHIRPS¹, des températures à 2 m et du vent à 10 m, extraits de la réanalyse ERA5-Land du CEPMMT². Ces données couvrent la période de 1981-2024. Enfin, des enquêtes socio-environnementales, des observations et des relevés de terrain ont été mobilisés pour la validation cartographique.

¹Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

²Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

Tableau 1 : Synthèse des données géospatiales exploitées.

Données / Produits	Source	Période	Résolution
Landsat 5 TM	USGS / GEE	2002-2011	30 m
Landsat 7 ETM+		2002-2024	30 m
Landsat 8 OLI		2013-2024	30 m
Landsat 9 OLI-2		2021-2024	30 m
Précipitations-CHIRPS	UCSB CHG	1981-2024	0,05° (~5 km)
Température et Vent	ERA5-Land	1981-2024	0,1° (~9 km)

Prétraitement et masquage des effets atmosphériques :-

Les séries de réflectance de surface proviennent des produits Landsat Collection 2 Level-2 Surface Reflectance. La correction atmosphérique des scènes TM et ETM+ a été assurée par l'algorithme LEDAPS³, tandis que les produits OLI et OLI-2 ont été traités via l'algorithme LaSRC⁴ (Vermote et al., 2016). Pour éliminer les artéfacts optiques, un filtrage a été appliqué sur la base des bandes d'assurance qualité « QA_PIXEL et QA_RADSAT ». Toutes les scènes présentant une couverture nuageuse supérieure à 10 %, des ombres de nuages, des cirrus ou une saturation instrumentale ont été systématiquement exclues. L'ensemble du traitement a été effectué sur la plateforme de géo-traitement Google Earth Engine (GEE).

Harmonisation spectrale inter-capteurs :-

L'intégration de données acquises par des capteurs distincts, présentant des bandes spectrales légèrement décalées (notamment entre famille TM/ETM+ et OLI/OLI-2), requiert une harmonisation préalable pour éviter d'introduire des biais artificiels dans l'analyse des tendances (Roy et al., 2016, p. 21 ; Claverie et al., 2018, p. 149). A cet effet, les bandes Rouge et Proche Infrarouge (PIR) des capteurs OLI/OLI-2 ont été alignées sur la référence spectrale du capteur ETM+ par régression linéaire de type « Reduced Major Axis (RMA) », selon l'équation de transformation suivant :

$$SR_h = a(SR_i) + b$$

Où SR_h représente la réflectance harmonisée ; SR_i correspond à la réflectance initiale acquise par OLI/OLI-2 ; a et b sont des coefficients de transformation appliqués.

Ils s'établissent comme suit : i) Rouge harmonisé = $0,9797 * \text{Rouge} - 0,0041$; ii) Proche infrarouge harmonisé = $0,9983 * \text{PIR} - 0,0015$. Cette transformation permet d'assurer une continuité spectrale et donc du NDVI (Claverie et al., 2018) calculé sur la chronique de 23 ans.

Estimation de la productivité des terres par le NDVI :-

La productivité des terres a été estimée à partir de l'indice NDVI, reconnu comme un proxy fonctionnel de la biomasse végétale et de la phénologie active en zone semi-aride (Tucker, 1979; Pettorelli et al., 2005) :

$$NDVI = \frac{PIR - \text{Rouge}}{PIR + \text{Rouge}}$$

Où PIR est bande proche infrarouge et Rouge désigne bande rouge.

Afin de corriger les bruits intra-saisonniers et de surmonter d'éventuelles manques d'observations, des composites annuels moyens ont été générés en calculant la moyenne des valeurs valides de chaque pixel. Une série temporelle continue de 23 images annuelles de NDVI moyen (2002 à 2024) a ainsi été établie.

³Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System

⁴Landsat Surface Reflectance Code

Modélisation statistique des tendances et test de significativité:-

Les tendances de productivité ont été évaluées pixel par pixel en appliquant deux estimateurs complémentaires : i) une régression linéaire simple par moindres carrés ordinaires a été effectuée pour détecter la direction globale de l'évolution temporelle :

$$NDVI_t = \alpha + \beta t + \varepsilon$$

Où : α représente l'ordonnée à l'origine ; β correspond au taux annuel de changement ; t représente le temps ; ε correspond au terme résiduel.

Et ii) une pente de Sen, insensible aux valeurs aberrantes interannuelles et calculée comme la médiane de toutes les pentes Q_{ij} obtenues entre chaque paire d'années de la série temporelle (Sen, 1968), a été appliquée pour quantifier le taux de variation annuelle. La pente se calcule comme suit :

$$Q_{ij} = \frac{x_j - x_i}{j - i}$$

$$Q_{Sen} = \text{Med}(Q_{ij})$$

Où Q_{ij} pente, x_j et x_i représentent la valeur de NDVI pour l'année j et i et Q_{Sen} pente de Sen.

Ainsi, si $Q_{Sen} > 0$ indique une tendance à l'augmentation de la productivité, $Q_{Sen} < 0$ une tendance à la diminution, et $Q_{Sen} = 0$ une tendance faible ou nulle.

La significativité statistique du taux de variation annuel a été évaluée par le test de Mann-Kendall au seuil alpha de 0,05. Les pixels ont ainsi été classés en trois catégories : i) Amélioration significative (Pente de Sen positive et $p < 0,05$), ii) Dégradation potentielle (Pente de Sen négative et $p < 0,05$), et iii) Stabilité ($p \geq 0,05$).

Analyse RESTREND : Isolation des forçages climatiques et résiduels:-

Pour isoler le signal climatique des facteurs anthropiques et d'état de surface, la méthode de l'analyse des résidus (RESTREND) a été mise en œuvre (Dardel et al., 2014). Un modèle de régression multivariée a d'abord été ajusté pixel par pixel entre le NDVI observé et les variables climatiques (précipitations, température et vent) :

$$NDVI_{climatique} = B_0 + B_1 * \text{Précipitation} + B_2 * \text{Température} + B_3 * \text{Vent}$$

Où NDVI attendu compte tenu des conditions climatiques ; précipitations ; β_0 = constante (interception) du modèle ; β_1 = coefficient associé aux précipitations ; β_2 = coefficient associé à la température ; β_3 = coefficient associé au vent. Le NDVI résiduel est ensuite extrait par différence entre l'observation satellitaire et la prédiction climatique :

$$NDVI_{résiduel} = NDVI_{observé} - NDVI_{climatique}$$

Une tendance significative de la pente de Sen du résidu indique une modification fonctionnelle indépendante de la variabilité climatique et imputable aux transitions de l'occupation des sols ou aux pratiques humaines.

Classification de la couverture des terres et analyse des transitions:-

Pour cartographier les changements d'occupation des terres, des classifications supervisées par Maximum de vraisemblance, largement éprouvé pour sa robustesse dans les paysages fragmentés du Sahel (Lu & Weng, 2007; Olofsson et al., 2014), ont été effectuées sur des composites d'octobre à décembre pour les années repères (2002, 2013 et 2024). Le choix de la période post-culturelle trouve sa raison dans l'optimisation de la discrimination spectrale, surtout au Sahel (Solly et al., 2021). A cet effet, cinq classes thématiques ont été définies : i) Dunes vives, ii) Cultures irriguées (cuvettes), iii) Aires pastorales, iv) Cultures pluviales, et v) Plans d'eau. La précision de classifications a été validée par des matrices de confusion. Ainsi, les métriques tels que précision globale, coefficient Kappa, la précision du producteur et la précision de l'utilisateur conformément aux standards méthodologiques ont été calculés (Congalton et al., 2014; Congalton & Green, 2019; Olofsson et al., 2014).

Modélisation de l'impact des transitions et modes de gestion des terres:-

Pour quantifier l'effet des transitions de couverture des terres et des modes de gestion sur la productivité résiduelle, des analyses de variance univariées et factorielles (ANOVA) ont été appliquées à l'échelle du pixel. La part de variance expliquée a été estimée par l'êta-carré (η^2) :

$$\eta^2 = \frac{\text{Sommedescarrésintergroupes}}{\text{Sommedescarrésintragroupes}}$$

La somme des carrés intergroupes mesure les différences entre les moyennes des groupes et la moyenne générale. La somme des carrés intragroupes mesure la variabilité totale autour de la moyenne générale.

La carte de modes de gestion et de pressions dans la commune a été produite pour la période récente 2013-2024, afin d'approfondir la caractérisation de l'emprise humaine. Elle a été réalisée à partir de la spatialisation suivie de l'extrapolation des données d'enquêtes sur les modes de gestion des terres.

Résultats:-

Validation et précision des classifications de l'occupation des terres:-

La validation statistique des classifications pour les années 2002, 2013 et 2024, confirme une haute précision globale (Tableau 2). Les précisions globales s'établissent à 86,5 % pour 2002, 88,2 % pour 2013 et 89,7 % pour 2024, associées à des coefficients Kappa respectifs de 0,81, 0,83 et 0,86. Les cultures pluviales présentent les meilleures précisions du producteur, avec 92,1 % en 2002, 93,4 % en 2013 et 94,5 % en 2024, suivies des dunes vives. Les confusions spectrales mineures identifiées se situent aux franges d'interconnexion entre cultures irriguées et plans d'eau au sein des cuvettes oasiennes et à la lisière cuvettes-aires pastorales. Cette évolution indique une amélioration générale de la concordance entre les classifications et les données de référence.

Tableau 2 : Synthèse des métriques de validation des classifications

Période d'analyse	2002	2013	2024
Dunes vives	90,2%	91,8%	93,1%
Cultures irriguées	82,7%	85,1%	87,0%
Aires pastorales	84,3%	86,0%	87,8%
Cultures pluviales	92,1%	93,4%	94,5%
Plans d'eau	80,6%	82,5	84,3
Précision globale	86,5%	88,2%	89,7%
Kappa	0,81%	0,83%	0,86%

Dynamique de la couverture des terres de 2002 à 2024 :-

L'analyse des trois cartes met en évidence une évolution de l'occupation des terres entre 2002, 2013 et 2024, caractérisée par une intensification des usages agricoles et une régression progressive des espaces pastoraux (figure 2). Toutefois, les changements ne sont pas homogènes dans l'espace et traduisent des dynamiques contrastées selon les unités géomorphologiques.

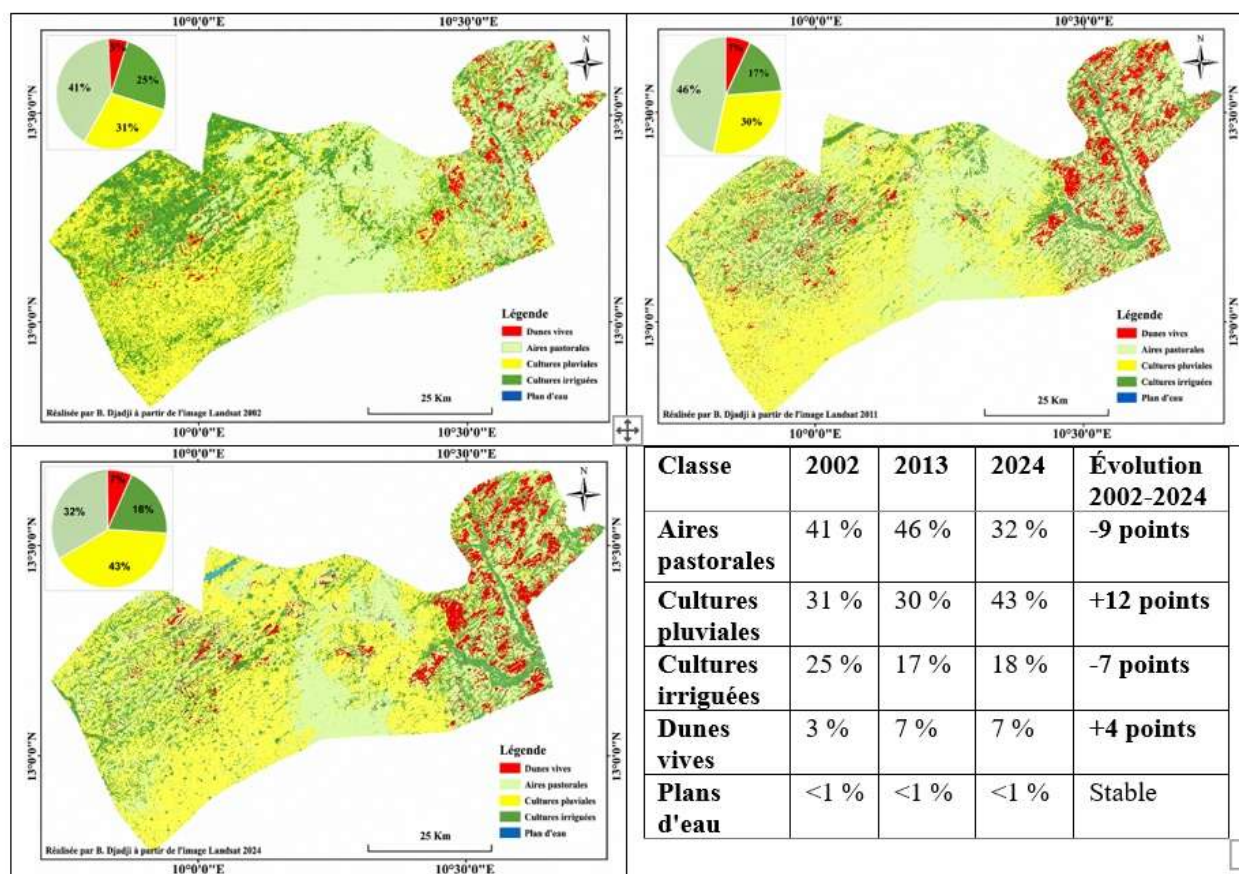


Figure 2. Dynamique de couverture des terres dans la commune de Bouné entre 2002 et 2024

Entre 2002 et 2013, la principale modification physique concerne le doublement de la superficie des dunes vives (passant de 3 à 7 %), traduisant une reprise de la dynamique éolienne dans les parties Est et Nord-Ouest. Les zones aptes aux cultures irriguées ont relativement régressé passant de 25 à 17 %. Cette dynamique traduit l'ensablement des cuvettes et leur transformation agricole.

La seconde période (2013-2024) matérialise une extension des cultures pluviales qui évolue de 30 % à 43 % de la commune (+13 points), au détriment des aires pastorales dont la superficie passe de 46 % à 32 %. Au terme de 23 ans, le bilan montre une anthropisation accrue (+12 points), unediminution des surfaces pastorales (-9 points) et une extension des dunes vives (+4 points). Ces évolutions traduisent une réorganisation des usages des sols dans un contextede l'amélioration pluviométrique observée depuis la fin des années 1990. Celle-ci a favorisé l'extension du front agricole pluvial au détriment des aires pastorales. Parallèlement, l'augmentation de la superficie des dunes vives témoigne la persistance des processus éoliens. Ces mutations soulignent l'intérêt de compléter l'analyse de l'occupation des sols par un indicateur fonctionnel de la productivité des terres (NDVI), afin de distinguer les véritables processus de dégradation des simples mutations des usages des sols.

Évolution temporelle de la productivité des terres et facteurs climatiques:-

La série temporelle du NDVI moyen met en évidence deux sous-périodes au comportement phénologique très contrasté. Durant la première phase (2002-2013), le NDVI moyen enregistre une hausse continue, passant de 0,2096 en 2002 à un record de 0,2356 en 2012. L'année 2012 correspond à une saison des pluies exceptionnelle (609,26 mm). À l'inverse, l'année 2009 marque le creux le plus prononcé de la chronique avec une productivité moyenne de 0,2037, en lien direct avec un déficit pluviométrique (319,85 mm) et une contrainte thermique forte (28,93 °C). Cette phase s'inscrit dans le mouvement de reverdissement régional du Sahel. En revanche, durant la seconde phase (2013-2024), la productivité moyenne stagne entre 0,2159 (en 2015) et 0,2384 (en 2018), sans réussir à franchir de nouveaux seuils malgré des pluviosités particulièrement abondantes et excédentaires en 2019 (610,73 mm), 2022 (652,13 mm) et 2024 (687,81 mm).Ce découplage suggère que si les pluies maintiennent le niveau de base de la

phénologie active, des processus de dégradation fonctionnelle sous-jacents atténuent la réponse biologique de la végétation à la disponibilité des pluies.

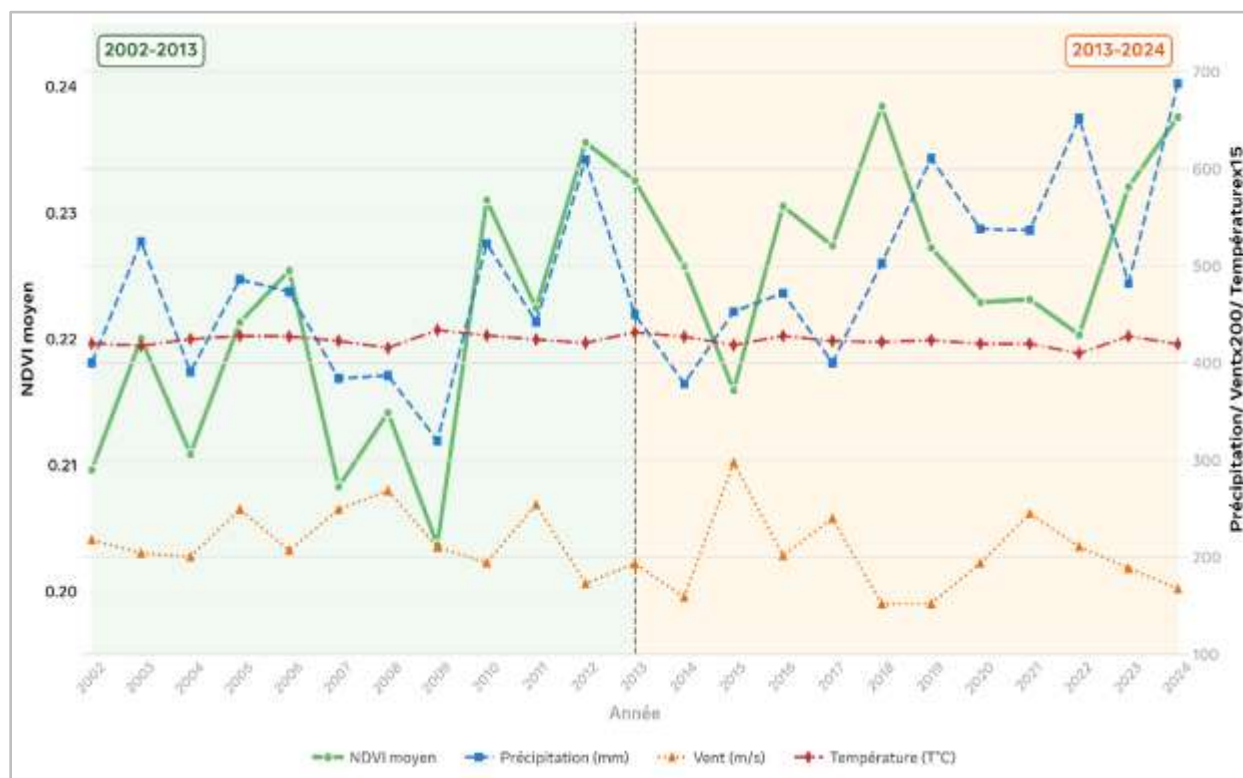


Figure 3 : Évolution temporelle du NDVI moyen annuel et des facteurs climatiques

Evolution spatiale des tendances par la pente de Sen et le test de Mann-Kendall:-

La spatialisation des pentes de Sen montre une hétérogénéité spatiale des tendances de productivité selon les périodes. Entre 2002 et 2013, les pentes oscillent entre $-0,0065$ et $+0,0081$ /an, traduisant un reverdissement spatialement homogène dans l'ouest de la commune (figure 4). De 2013 à 2024, le signal se fragmente et d'importantes poches de régression de la productivité émergent de manière éparpillée. Ces points chauds se localisent principalement au centre et dans les terroirs agricoles de l'ouest de la commune, avec des taux variant de $-0,0074$ à $+0,0104$ /an (figure 5). Cette inversion de tendance pourrait être liée aux pressions agricole et pastorale auxquelles est soumise cette partie de la commune du fait du poids démographique qui la caractérise.

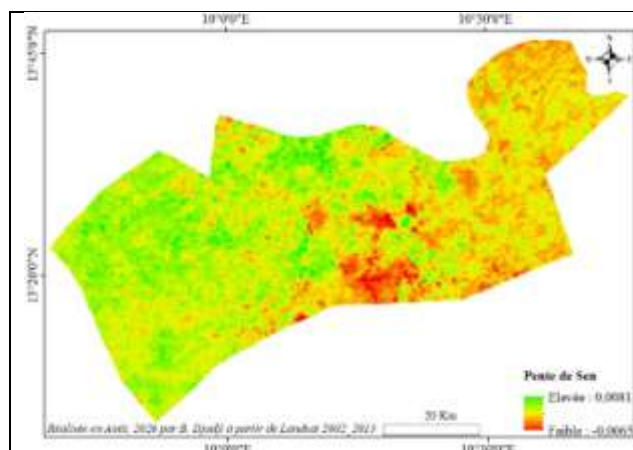


Figure 4 : Evolution spatio-temporelle de la productivité observée entre 2002-2013

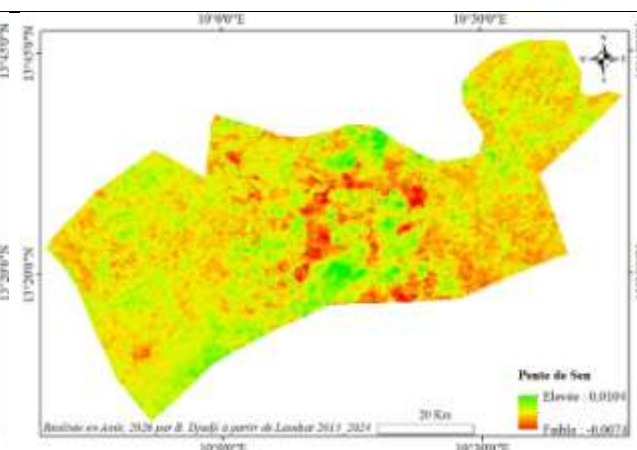


Figure 5 : Evolution spatio-temporelle de la productivité observée entre 2013-2024

L'analyse des trajectoires de productivité des terres confirme le renversement structurel entre les deux sous-périodes (figures 6 et 7). De 2002 à 2013, la dynamique fonctionnelle s'avère très favorable. Les surfaces en amélioration de la productivité végétale couvrent 42 % de la commune. Cela s'exprime de manière continue dans la moitié occidentale de la commune, au niveau des cuvettes et des glaciis dunaires restaurés. Les zones subissant une dégradation de la productivité restent marginales, ne couvrant que 18 % du territoire. Ces zones sont principalement localisées dans la moitié orientale et sous forme d'îlots dénudés au centre. Les zones stables couvrent 40 % de la superficie.

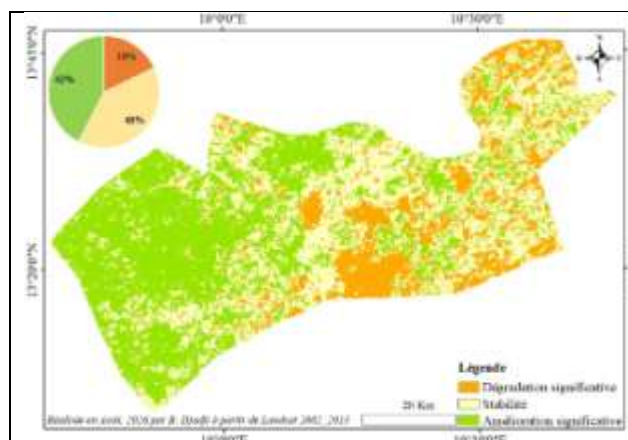


Figure 6 : Evolution spatio-temporelle de la significativité de Mann Kendall (trajectoires) de la productivité observée entre 2002-2013

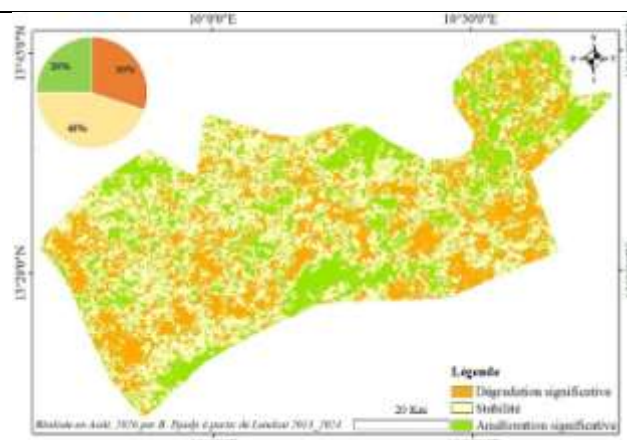


Figure 7 : Evolution spatio-temporelle de la significativité de Mann Kendall (trajectoires) de la productivité observée entre 2013-2024

De 2013-2024, les trajectoires subissent une détérioration marquée. Les zones d'amélioration se fragmentent et déclinent fortement pour ne couvrir que 25 % de la commune, soit une baisse de -17 points (Tableau 3). En contrepartie, les zones de dégradation potentielle s'étendent de manière diffuse sur 30 % du territoire (+12 points), affectant des terroirs autrefois préservés. Les surfaces stables deviennent majoritaires, couvrant 45 % de la commune (+5 points). Ce recul de la productivité suggère que les effets combinés de l'intensification agricole pluviale extensive, de la pression de pâturage accrue sur des terroirs rétrécis et des forçages climatiques, notamment liées au vent ont rompu l'équilibre de reverdissement.

Tableau 3 : Evolution des trajectoires de la productivité des terres observée entre 2002-2024

Trajectoire de productivité	2002-2013	2013-2024	Évolution
Amélioration significative	42 %	25 %	-17 points
Stabilité (changement non significatif)	40 %	45 %	+5 points
Dégradation potentielle significative	18 %	30 %	+12 points

Modélisation de la relation entre la productivité des terres et le climat:-

L'ajustement multivarié entre la productivité et les variables climatiques (pluie, température, vent) met en lumière l'évolution de l'influence relative des facteurs climatiques sur la productivité végétale entre 2002 et 2024. Au cours de la première période (2002-2013), les variables climatiques expliquent 81 % de la variabilité de la productivité végétale ($R^2 = 0,81$), avec une contribution particulièrement importante des précipitations ($B\grave{e}ta = +0,96$, $r = 0,86$, $p < 0,001$) (Tableau 4). À partir de 2013, le pouvoir explicatif du modèle diminue à 58 % ($R^2 = 0,58$), indiquant une réduction de la part de la variabilité de la productivité associée aux variables climatiques considérées. La relation entre les précipitations et la productivité devient alors faible et non significative ($r = 0,11$, $B\grave{e}ta = +0,29$, $p = 0,74$). Dès lors, le système écologique bascule vers un antagonisme éolien et thermique. En revanche, la température présente une association positive avec la productivité ($r = 0,46$; $B\grave{e}ta = +0,49$), tandis que la vitesse du vent est associée négativement à celle-ci et constitue la contrainte la plus marquée au cours de cette période ($r = -0,69$, $B\grave{e}ta = -0,47$, $p = 0,01$).

Tableau 4 : Indicateurs statistiques des régressions multivariées entre NDVI et facteurs climatiques

Période	R ²	R ² ajusté	Bêta Pluie	Bêta Température	Bêta Vent
2002-2013	0,81	0,74	+0,96	+0,08	-0,31
2013-2024	0,58	0,42	+0,29	+0,49	-0,47

La diminution de l'association entre la productivité et les précipitations au cours de la période récente ne traduit pas nécessairement une absence d'effet de la disponibilité en eau. Elle suggère plutôt une modification des facteurs associés à la dynamique du couvert végétal. L'augmentation des températures qui favorise l'évapotranspiration potentielle. Par ailleurs, l'influence négative de la vitesse du vent pourrait être liée à des contraintes physiques plus importantes sur les sols sableux dunaires, notamment à travers l'ensablement, l'érosion éolienne et l'abrasion, susceptibles de limiter le développement et le maintien du couvert végétal.

Analyse RESTREND : tendances de la productivité climatique et résiduelle:-

Il ressort de l'analyse résiduelle que les pentes de Sen moyennes de productivité des terres observée présentent des comportements divergents selon les périodes considérées. Entre 2002 et 2013, l'augmentation de la productivité observée (+0,00167/an) était soutenue conjointement par les forçages climatiques (+0,00081/an) et la composante résiduelle (+0,00074/an). À l'inverse, la seconde période (2013-2024) se caractérise par un net ralentissement de la dynamique de la productivité végétale. Le taux d'évolution moyen de la productivité observée moyenne s'établit seulement +0,00008/an, traduisant une quasi-stagnation, sous l'effet notamment du ralentissement de la tendance climatique (+0,00005/an). Cette diminution de la contribution climatique est toutefois partiellement compensée à l'échelle locale par le maintien d'une pente résiduelle positive de +0,00024/an, qui contribue ainsi à atténuer le ralentissement observé au cours de cette période.

Tableau 5 : Évolution des taux de variation moyens (pentes de Sen / an) et score de Mann Kendall de productivités observée, climatique et résiduelle.

Période	Pente du NDVI observé	Pente du NDVI climatique	Pente du NDVI résiduel	MK Z observé	MK Z résiduel
2002–2013	+0,00167 / an	+0,00089 / an	+0,00078 / an	+1,335	+0,903
2013–2024	+0,00008 / an	+0,00005 / an	+0,00024 / an	+0,240	+0,321

Les résultats du test de Mann-Kendall (tableau 5) montrent que les valeurs du score Z, aussi bien pour la productivité observée que pour la productivité résiduelle restent en deçà du seuil critique de significativité bilatérale à 95 % ($|Z| < 1,96$). Ainsi, l'hypothèse d'une tendance significative à l'amélioration de la productivité ne peut être retenue au seuil de 5 %. Ces résultats suggèrent une phase de relative stabilisation de la productivité au cours de la période étudiée. La composante résiduelle, malgré l'absence de tendance statistiquement significative, semble toutefois contribuer au maintien du niveau de productivité atteint au cours de la phase initiale de reverdissement, dans un contexte marqué par l'évolution des contraintes climatiques.

Part contributive relative et attribution spatiale des facteurs:-

La modélisation de la contribution relative du climat et des facteurs résiduels met en évidence une influence conjointe de ces deux composantes sur la période 2002 à 2013. Durant cette période, la part de variance attribuée au climat s'élève à 52,1 %, tandis que celle associée aux facteurs non climatiques atteint 47,9 % (Tableau 6). Cette répartition relativement équilibrée suggère que le reverdissement observé au cours de cette période est associé à la fois aux conditions climatiques favorables et à des facteurs non climatiques, notamment l'essor de la régénération naturelle assistée (RNA) en relation avec les initiatives locales et certains programmes, tels que le PGRN, mis en œuvre depuis 1997. Au cours de la période 2013–2024, la contribution relative du climat diminue à 18,0 %, tandis que celle de la composante résiduelle atteint 82,0 % (Tableau 6). Cette évolution traduit une augmentation de la part relative des facteurs non climatiques dans la variabilité spatio-temporelle de la productivité. Les transformations de l'occupation des terres et les modes de gestion apparaissent ainsi comme des composantes importantes de la dynamique récente de la productivité.

Tableau 6 : Contribution relative du climat et de la composante résiduelle non climatique aux tendances de productivité

Période	Part contributive du climat	Part de la composante résiduelle
2002–2013	52,1 %	47,9 %
2013–2024	18,0 %	82,0 %

Les résultats de l'attribution spatiale des facteurs montrent une prédominance des superficies caractérisées par une amélioration de la productivité au cours des deux périodes étudiées. Les classes d'amélioration associées principalement au climat et aux facteurs anthropiques représentent respectivement 79,1 % de la superficie communale entre 2002 et 2013 et 57,4 % entre 2013 et 2024 (Tableau 7). Cette évolution témoigne toutefois d'une diminution de l'étendue spatiale des zones en amélioration au cours de la période récente.

Tableau 7 : Attribution spatiale des facteurs de la dynamique de productivité des terres

Classes d'attribution	2002-2013	2013-2024
Dégradation principalement climatique	1,5 %	22,7 %
Dégradation principalement anthropique	15,3 %	13,8 %
Dégradation mixte	0,1 %	0,1 %
Stable	4,0 %	6,0 %
Amélioration principalement climatique	36,4 %	29,3 %
Amélioration principalement anthropique	42,5	27,8 %
Amélioration mixte	0,2 %	0,3 %

L'évolution des classes d'attribution met également en évidence une augmentation de la superficie concernée par la dégradation d'origine climatique. Celle-ci passe de 1,5 % de la superficie communale entre 2002 et 2013 à 22,7 % entre 2013 et 2024 (Tableau 7). Parallèlement, les superficies caractérisées par une amélioration principalement climatique diminuent passant de 36,4 % à 29,3 %, tandis que celles associées à une amélioration d'origine anthropique passent de 42,5 % à 27,8 % (figure 8). Ces changements traduisent une redistribution spatiale des classes d'attribution et une progression des superficies soumises à des facteurs de dégradation principalement climatiques au cours de la période récente. Cette évolution pourrait notamment être associée à une exposition accrue de certains terroirs aux contraintes physiques liées aux conditions éoliennes. Au cours de la période initiale, les zones d'amélioration principalement climatique semblent se concentrer davantage dans les parcours pastoraux situés au centre de la commune, caractérisés par une pression anthropique relativement faible. Dans ces espaces, les conditions pluviométriques favorables pourraient avoir davantage contribué à l'amélioration de la productivité végétale en raison d'une moindre influence des perturbations liées aux activités humaines.

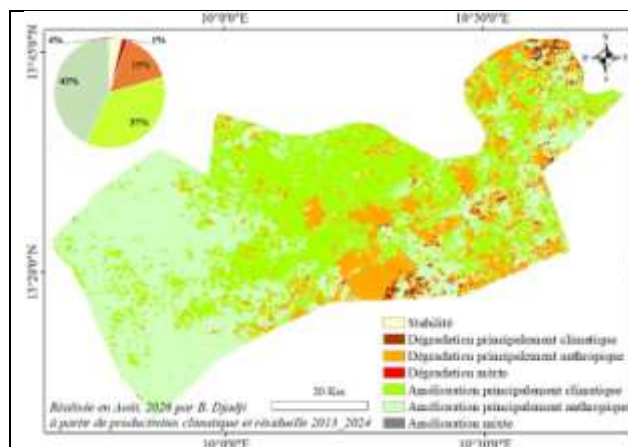


Figure 8 : Attribution des facteurs de variabilité de productivité des terres entre 2002-2013

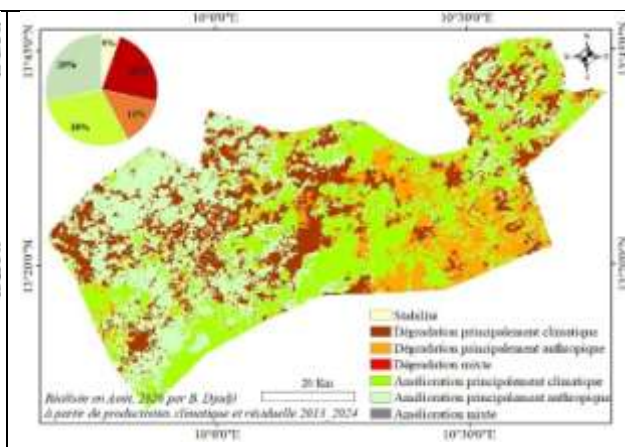


Figure 9 : Attribution des facteurs de variabilité de productivité des terres entre 2013-2024

Analyse statistique de l'effet des transitions et des modes de gestion des terres :-

L'ANOVA univariée appliquée aux trajectoires de transition confirme que les mutations physiques d'occupation des terres constituent un facteur important de différenciation de la productivité résiduelle dans la commune. Pour la période 2002-2013, le test se révèle hautement significatif ($F = 1177,69$; $p < 0,001$). La part de variance expliquée de la tendance résiduelle par la nature de la transition d'occupation des terres s'établit à 56,06 % ($\hat{\eta}^2 = 0,5606$). Pour l'intervalle récent 2013-2024, l'effet reste statistiquement significatif ($F = 376,65$; $p < 0,001$), bien que la part de variance expliquée diminue à 40,45 % ($\hat{\eta}^2 = 0,405$). Cette diminution de la taille d'effet entre les deux périodes suggère que la différenciation de la productivité résiduelle selon les trajectoires d'occupation des terres est moins marquée durant la période récente, ce qui pourrait traduire une diversification des facteurs non climatiques associés aux variations spatiales de la productivité.

L'analyse selon les modes de gestion (2013-2024) démontre également un impact hautement significatif. L'ANOVA réalisée confirme que l'effet des modes de gestion est hautement significatif ($F = 2543,07$; $p < 0,001$). Il explique 37,84 % de la variance spatiale des tendances de la productivité résiduelle ($\hat{\eta}^2 = 0,3784$). L'ANOVA factorielle croisée met en exergue le rôle critique de l'effet d'interaction combiné entre les trajectoires de transition physique d'occupation et les modes de gestion des terres ($F = 221,11$, $p < 0,001$). L' $\hat{\eta}^2$ s'élève à 0,609, révélant que près de 61 % de la variance spatiale des tendances de la productivité résiduelle découlent de l'effet interagi de ces deux facteurs. Ce score, nettement supérieur à ceux des facteurs pris isolément, démontre que la dynamique de la productivité résiduelle dans la commune de Bouné résulte d'un couplage systémique et indissociable entre les mutations physiques de la couverture des terres et les logiques d'usage ou d'aménagement appliquées par les communautés locales.

Tableau 8 : Test d'effet des transitions d'occupation des sols et les modes de gestion des terres sur la productivité résiduelle

Période	Analyse	Facteur / effet	F	p-value	Taille d'effet
2002-2013	ANOVA univariée	Transition	1177,69	< 0,001	0,5606
2013-2024	ANOVA univariée	Transition	376,65	< 0,001	0,4050
2013-2024	ANOVA univariée	Mode de gestion	2543,07	< 0,001	0,3784
2013-2024	ANOVA factorielle	Transition et Gestion	221,11	< 0,001	0,609

Discussion:-

Désynchronisation de la relation Climat-productivité végétale au Sahel : de la dépendance pluviométrique aux contraintes éoliennes :-

Les résultats obtenus dans la commune rurale de Bouné apportent un éclairage novateur sur le débat classique du reverdissement sahélien. Depuis la fin des grandes sécheresses des années 1970 et 1980, une vaste littérature scientifique a documenté une reprise globale de la verdure satellitaire, attribuée au retour des précipitations (Dardel

et al., 2014; Fensholt et al., 2012). Dans la commune, cette dépendance pluviométrique directe est parfaitement confirmée durant la période 2002-2013, où la pluie décrivait plus de 80 % de la variance de la productivité. Toutefois, le décrochage observé après 2013 traduit une mutation profonde du fonctionnement biophysique de l'écosystème. Cette désynchronisation ne s'explique pas par un retour de la sécheresse puisque les cumuls pluviométriques récents demeurent excédentaires. Mais, elle traduit plutôt l'émergence de contraintes physiques secondaires (Prince, 2019; Schillaci et al., 2023 ; Shen et al., 2023). Lorsque la disponibilité en eau dépasse un certain seuil, les températures élevées accentuent l'évapotranspiration potentielle, tandis que l'action du vent d'harmattan provoque une déflation, un déchaussement racinaire et un ensablement du couvert végétal sur les édifices dunaires déjà fragilisés.

Poussée du front agricole pluvial et culture du sésame : le paradoxe de la productivité apparente:-

La mutation spatiale majeure réside dans la progression du front agricole pluvial (+12 points entre 2002 et 2024), qui s'est opérée au détriment direct des parcours pastoraux (-9 points). Stimulée par la pression démographique et la forte demande du marché nigérien pour le sésame, cette extension génère un paradoxe phénologique remarquable (Bouzou Moussa et al., 2020; Tong et al., 2017). Dans un premier temps (2002-2013), l'essor agricole a entraîné une hausse apparente de la productivité résiduelle, suggérant que la biomasse cultivée en période humide génère une réflectance supérieure à celle de la steppe dégradée. Néanmoins, la période récente (2013-2024) révèle les limites biophysiques de ce modèle d'exploitation. Près de 44 % des surfaces cultivées basculent désormais vers une dégradation potentielle de la productivité. À la différence d'autres cultures qui procurent des résidus végétaux protégeant les sols après la récolte, le sésame est récolté de manière intégrale. Les sols sableux, laissés entièrement dénudés durant la saison sèche sous les vents d'harmattan, subissent une érosion éolienne sévère qui réactive la mobilité des sables dunaires et dégrade la fertilité organique des sols (Yacouba et al., 2016 ; Jahel & Lambin, 2025)

Les aménagements agroécologiques et la cuvette comme tampons microclimatiques et hydriques:-

En contraste avec la fragilité des milieux dunaires, les cuvettes oasiennes et les zones de dépression constituent les pôles majeurs de résilience dans la commune. Bien que l'emprise spatiale des zones irriguées se soit repliée en raison de la submersion des parcelles liée à la remontée de la nappe consécutive au retour des pluies (Badamassi Malam Abdou et al., 2026; Ibrahim Ibro et al., 2026), ces espaces maintiennent une productivité résiduelle stable voire en amélioration. Cette stabilité repose sur le maintien d'une nappe phréatique sub-affleurante et sur les réalisations d'aménagements agroforestiers (fixation de dunes, haies vives). De plus, la persistance d'une pente résiduelle positive (+0,00024/an) à l'échelle communale entre 2013 et 2024, en dépit de l'atonie du signal climatique (+0,00005/an), confirme le rôle protecteur joué par l'extension de la Régénération Naturelle Assistée (RNA) pratiquée dans la commune. Ces aménagements agissent comme des barrières mécaniques, réduisant la vitesse du vent et amortissant l'impact des variations climatiques.

Pertinence de l'évaluation intégrée Neutralité en matière de Dégradation des Terres (ODD 15.3.1) pour le suivi opérationnel de la dégradation des terres:-

Sur le plan méthodologique, cette étude démontre les insuffisances d'une évaluation de la dégradation fondée exclusivement sur la cartographie des changements d'occupation des sols. L'observation seule des états de surface aurait conclu à une dynamique agricole favorable en raison de l'expansion agricole. Or, l'analyse couplée de la productivité fonctionnelle observée et résiduelle révèle qu'une part importante de cette extension agricole subit une perte d'activité phénologique, matérialisant une dégradation silencieuse des sols (Ivits & Cherlet, 2013 ; Gonzalez-Roglich et al., 2019). La combinaison systématique de la couverture des terres et de la productivité fonctionnelle, préconisée par la CNULCD pour le suivi de l'indicateur ODD 15.3.1, s'impose ainsi comme une des démarches capables de capturer la complexité des trajectoires environnementales sahéliennes (Kapović Solomun et al., 2018 ; Thomas et al., 2023; Bär et al., 2023).

Conclusion :-

L'analyse intégrée sur 23 ans (2002-2024) de la productivité végétale, du climat et de l'occupation des terres apporte des enseignements décisifs sur le fonctionnement des systèmes agropastoraux dans la Commune Rurale de Bouné. L'étude met en évidence une rupture temporelle majeure. La première période (2002-2013) a été marquée par un reverdissement (42 % du territoire en amélioration), principalement lié au retour des précipitations ($R^2 = 0,81$). En revanche, la sous-période récente (2013-2024) matérialise une stagnation fonctionnelle et une extension des surfaces dégradées (30 % de la commune), caractérisée par un découplage vis-à-vis de la pluie au profit de contraintes éoliennes et thermiques émergentes. Cette dégradation récente découle en priorité d'une anthropisation mal maîtrisée, marquée par une poussée du front agricole pluvial (+12 points) au détriment des parcours pastoraux (-9 points). L'expansion de la monoculture du sésame sur des formations dunaires fragiles, sans conservation des résidus de

récolte au sol, expose directement le substrat sableux à la déflation éolienne. À l'inverse, l'analyse confirme le rôle tampon déterminant des aménagements agroforestiers et de la Régénération Naturelle Assistée (RNA), qui permettent de maintenir des pentes résiduelles positives, notamment dans les terroirs du sud-ouest et dans les zones des cuvettes oasiennes.

Les résultats d'ANOVA montrent que les transitions d'occupation expliquent 56,06% de la variance résiduelle en 2002-2013, contre 40,5% en 2013-2024. Les modes de gestion expliquent 37,84% en 2013-2024. L'interaction entre les transitions et les modes de gestion montre un résultat significatif aussi ($\eta^2=0,609$), soit 60,9 % de variabilité expliquée. Cela confirme un couplage systémique des facteurs influençant la productivité résiduelle dans la commune. Au-delà du cas d'étude, ce travail fournit des informations utiles pour orienter les stratégies locales de gestion durable des terres en identifiant les secteurs prioritaires pour les actions de restauration et le suivi des écosystèmes.

Références Bibliographiques :-

1. BadamassiMalam Abdou, M., Malam Abdou, M., & Abba, B. (2026). Augmentation de la pluviométrie et vulnérabilité des maraichers de la cuvette de Guidimouni (Zinder, Niger). *Revue Roumaine de Géographie / Romanian Journal of Geography*, 70(1), 161-173. <https://doi.org/10.59277/RRG.2026.1.09>
2. Barké, M. K., Tychon, B., Ousseini, I., Ambouta, K. J.-M., &LaminouManzo, O. (2018). Analyse de l'évolution des paysages de cuvettes oasiennes et de leurs alentours dans le centre-est du Niger. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 42(2), 259-273.
3. Bär, R., Thomas, R. J., & Belyaeva, I. (2023). Integrating Earth Observation data for monitoring SDG Indicator 15.3.1: A global perspective. *Environmental Science & Policy*, 142, 198-210.
4. Bodart, C., &Ozer, A. (2009). Apports de la télédétection dans l'étude de la remise en mouvement du sable dunaire dans la région de Gouré (sud-est du Niger). *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 33, 57-68.
5. Bodart, C., Ozer, A., & De Rauw, D. (2010). Suivi de l'activité des dunes au Niger au moyen de la cohérence interférométrique ERS ½. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 54(1), Article 1.
6. Bouzou Moussa I., Malam Abdou, M., IngatanWarzaganA., Boubacar Na-AllahA., BahariIbrahimM., Mamadou I., Abba B., Descroix L., Le BretonE., &VandervaereJ.Pi. (2020). Dynamique Hydro-Erosive Actuelle Des Bassins Versants Endoreiques De La Region De Niamey (Sud-Ouest Du Niger). *European Scientific Journal*, 16. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>
7. CNULCD. (2018). Données par défaut: Méthodes et interprétation—Document d'orientation relatif à l'élaboration des rapports à la CNULCD en 2018. CNULCD.
8. Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Third Edition (3e éd.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
9. Congalton, R. G., Gu, J., Yadav, K., Thenkabail, P., &Ozdogan, M. (2014). Global Land Cover Mapping: A Review and Uncertainty Analysis. *Remote Sensing*, 6(12), 12070-12093. <https://doi.org/10.3390/rs61212070>
10. Cui, Y., & Li, X. (2022). A new global land productivity dynamic product based on the consistency of various vegetation biophysical indicators. *Big Earth Data*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20964471.2021.2018789>
11. Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J. C., ... & Justice, C. O. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS) product: Calibration, processing, and validation. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145-161.
12. Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., & Tucker, C. J. (2014). Greening of the Sahel: A multi-scale analysis of vegetation response to rainfall (1981–2012). *Remote Sensing of Environment*, 150, 43-58.
13. Dengiz, O., & Sağlam, M. (2012). Determination of land productivity index based on parametric approach using GIS technique.
14. Djadji, B., Abba, B., Ibrahim Yahaya, S., &BouzouMoussaI. (2025). Evaluation par la télédétection des risques de la désertification à l'échelle locale : Cas de la Commune Rurale de Bouné (Sud-est Niger). *Environnement et Dynamique des Sociétés (EDS)*, (012), 580-591.
15. Djadji, B., Abba, B., Malam Abdou, M., &BadamassiMalam Abdou, M. (2023). Dynamique des saisons pluviométriques et pratiques culturelles dans la Commune Rurale de Bouné (Département de Gouré, Niger). *Revue des Sciences de l'Environnement*, 4(1), 1-17.
16. Fensholt, R., Rasmussen, K., Kaspersen, P., Huber, S., Horion, S., &Swinnen, E. (2013). Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships. *Remote Sensing*, 5(2), 664-686. <https://doi.org/10.3390/rs5020664>

17. Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S. D., Tucker, C., ... & Sandholt, I. (2012). Greenness in semi-arid areas—A global perspective on remote sensing-based vegetation trends. *Remote Sensing of Environment*, 121, 144-158.
18. Foody, G. M. (1996). Approaches for the production and evaluation of fuzzy land cover classifications from remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1317-1340. <https://doi.org/10.1080/01431169608948706>
19. Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
20. Gonzalez, M., Zvoleff, A., Noon, M., Liniger, H., Fleiner, R., Harari, N., & Garcia, C. (2019). Synergizing global tools to monitor progress towards land degradation neutrality: Trends.Earth and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies sustainable land management database. *Environmental Science & Policy*, 93, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.019>
21. Greigert, J., & Pougnet, R. (1965). Carte géologique du Niger au 1/2 000 000 [Géologique].
22. Ibrahim Ibro, Y., Amadou Boukary, M. B., & Malam Abdou, M. (2026). Des cuvettes productives aux cuvettes inondées : Conséquences socioéconomiques des inondations dans les cuvettes oasiennes de Kojémeri au Niger. *International Journal of Advanced Research*, 14(07), 233-245.
23. INS. (2012). 4ème recensement général de la population et de l'habitat 2012.
24. Ivits, E., & Cherlet, M. (2013). Land-productivity dynamics towards integrated assessment of land degradation at global scales. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/59315>
25. Jahel, C., & Lambin, E. F. (2025). Reversing degradation of social-ecological systems: Explaining the outcomes of interventions in Africa. *Sustainability Science*, 20(2), 439-468. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01568-5>
26. KapovićSolomun, M., Barger, N., Cerda, A., Keesstra, S., & Marković, M. (2018). Assessing land condition as a first step to achieving land degradation neutrality: A case study of the Republic of Srpska. *Environmental Science & Policy*, 90, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.09.014>
27. Karimoune, S., Ozer, A., & Erpicum, M. (1990). Les modelés éoliens de la région de Zinder (Niger méridional), étude de photogéomorphologie, note préliminaire. *Télédétection et Sécheresse*, 145-161.
28. Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
29. Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
30. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510.
31. Prince, S. D. (2019). Satellite remote sensing of land degradation in semi-arid areas: Remote sensing proxies vs. biophysical realities. *Remote Sensing*, 11(1), 3-18.
32. Prince, S. D. (2019). Challenges for remote sensing of the Sustainable Development Goal SDG 15.3.1 productivity indicator. *Remote Sensing of Environment*, 234, 111428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111428>
33. Rotllan-Puig, X., Ivits, E., & Cherlet, M. (2021). LPDynR: A new tool to calculate the land productivity dynamics indicator. *Ecological Indicators*, 133, 108386. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108386>
34. Roy, D. P., Kovalsky, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Roger, J. C., & Boschetti, L. (2016). Characterizing the Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI spectral response differences and RMA regression coefficients. *Remote Sensing of Environment*, 185, 16-30.
35. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
36. Schillaci, C., Jones, A., Vieira, D., Munafò, M., & Montanarella, L. (2023). Evaluation of the United Nations Sustainable Development Goal 15.3.1 indicator of land degradation in the European Union. *Land Degradation & Development*, 34(1), 250-268. <https://doi.org/10.1002/ldr.4457>
37. Shen, T., Li, X., Chen, Y., Cui, Y., Lu, Q., Jia, X., & Chen, J. (2023). HiLPD-GEE: High spatial resolution land productivity dynamics calculation tool using Landsat and MODIS data. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 671-690. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2179675>
38. Solly, B., Dieye, E. H. B., Sy, O., Jarju, A. M., & Sane, T. (2021). Détection des zones de dégradation et de régénération de la couverture végétale dans le sud du Sénégal à travers l'analyse des tendances de séries temporelles MODIS NDVI et des changements d'occupation des sols à partir d'images Landsat. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 223(numéro Spécial Afrique), 15.

39. Tidjani, A. A., Ozer, A., & Karimoune, S. (2009). Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger). *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 33, 69-80.
40. Tong, X., Brandt, M., Hiernaux, P., Herrmann, S. M., Tian, F., Prishchepov, A. V., & Fensholt, R. (2017). Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger. *Remote Sensing of Environment*, 191, 286-296. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.030>
41. Thomas, R. J., Bär, R., & Belyaeva, I. (2023). Land Degradation Neutrality indicators: Frameworks and implementation under SDG 15.3.1. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103289.
42. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
43. Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the Landsat 8 OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 3-15.
44. Yacouba, B. K., Wang, Z., & Boubacar, Y. (2016). Land-Use and Land-Cover Change in the Sahel Area of Keita Valley, Republic of Niger. *Journal of Environmental Protection*, 7(4), Article 4. <https://doi.org/10.4236/jep.2016.74050>