



ANALYSE INTÉGRÉE DES DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES PAR TÉLÉDÉTECTION ET SIG DANS LA COMMUNE RURALE D'AMBOHIMIADANA, RÉGION ANALAMANGA (2015–2024)

¹RAVELOALISON Haja Nirina, ²RASOANAIVO Tovohery Christo

³ANDRIAMPANARIVO Haingo Laza Herinandrasana, ⁴RAHARINIERANA Hantaniana

1- Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCES- UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

2- EDPA -Ecole Doctorale PHYSIQUE ET APPLICATIONS-UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

3- EDPA -Ecole Doctorale PHYSIQUE ET APPLICATIONS-UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

4- Ecole Doctorale en SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIERIE ET DE L'INNOVATION -UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

RESUME : Cette étude analyse les dynamiques environnementales dans la commune rurale d'Ambohimadana (région Analamanga) entre 2015 et 2024 à partir de la télédétection et des systèmes d'information géographique. Les résultats montrent une amélioration initiale de la couverture végétale, avec un NDVI moyen passant de 0,511 en 2015 à 0,600 en 2020, suivie d'une légère baisse à 0,549 en 2024. La distribution des valeurs indique une dominance des classes de végétation moyenne à dense, malgré une variabilité marquée (écart-type $\approx 1,27$). L'analyse des changements révèle une forte hétérogénéité spatiale, avec des zones de régénération localisées à l'est et des dégradations persistantes au centre et à l'ouest. La matrice de transition met en évidence une expansion du sol nu, notamment depuis la savane (21,5 %) et la forêt claire (10,8 %), traduisant une pression anthropique croissante. Par ailleurs, les ratios de risque indiquent des transitions critiques supérieures à 1,5 vers des états dégradés. Ces résultats confirment une dynamique contrastée, marquée par une tendance globale à la dégradation environnementale.

Mots-clés : Ambohimadana, télédétection ; SIG ; NDVI ; occupation du sol ; dynamique environnementale

ABSTRACT: This study analyzes environmental dynamics in the rural commune of Ambohimadana (Analamanga region) between 2015 and 2024 using remote sensing and geographic information systems. The results show an initial improvement in vegetation cover, with mean NDVI increasing from 0.511 in 2015 to 0.600 in 2020, followed by a slight decline to 0.549 in 2024. The distribution of values indicates a dominance of moderate to dense vegetation classes despite marked variability (standard deviation ≈ 1.27). Change analysis reveals strong spatial heterogeneity, with regeneration zones localized in the eastern part and persistent degradation in the central and western areas. The transition matrix highlights an expansion of bare soil, particularly from savanna (21.5%) and open forest (10.8%), reflecting increasing anthropogenic pressure. Furthermore, risk ratios indicate critical transitions greater than 1.5 toward degraded states. These results confirm a contrasted dynamic marked by an overall trend of environmental degradation.

Keywords: Ambohimadana; remote sensing; GIS; NDVI; land use/land cover; environmental dynamics

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.21245778>

1 Introduction

Les dynamiques environnementales liées aux changements d'occupation du sol et à la dégradation des écosystèmes constituent aujourd'hui un enjeu majeur pour les territoires ruraux, en particulier dans les régions tropicales où la pression anthropique et les variations climatiques sont particulièrement marquées [1]. Dans ce contexte, le suivi spatio-temporel de la végétation et des transformations du paysage apparaît comme un outil essentiel pour comprendre les processus de dégradation et orienter les stratégies de gestion durable [2]. L'intégration de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) offre des perspectives innovantes pour l'analyse des dynamiques environnementales à différentes échelles spatiales et temporelles [3]. L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est largement utilisé pour évaluer l'état et l'évolution de la couverture végétale, permettant de détecter les variations de biomasse et d'identifier les zones de stress écologique [4]. Par ailleurs, les matrices de transition d'occupation du sol et les analyses de risque environnemental permettent de quantifier les changements et d'évaluer leur impact sur les écosystèmes [5]. Dans les hautes terres centrales de Madagascar, notamment dans la région Analamanga, les paysages ruraux sont soumis à des transformations rapides liées à l'expansion agricole, à la déforestation et à la dégradation des sols [6]. La commune rurale d'Ambohimadana illustre ces dynamiques complexes, caractérisées par une mosaïque d'unités paysagères en constante évolution. Ainsi, cette étude vise à analyser de manière intégrée les dynamiques spatio-temporelles de la végétation, des transitions d'occupation du sol et du risque environnemental entre 2015 et 2024, en mobilisant les outils de la télédétection et des SIG. Elle ambitionne de fournir une meilleure compréhension des processus en cours et de contribuer à la mise en place de stratégies de gestion durable adaptées au contexte local [7].

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

La présente étude repose sur l'exploitation de données satellitaires multispectrales, combinée à des outils de traitement numérique et d'analyse spatiale, afin de caractériser les dynamiques environnementales dans la commune rurale d'Ambohimadana. Les données utilisées proviennent principalement des images Landsat 8 OLI/TIRS et Sentinel-2 MSI, qui offrent des résolutions spatiales comprises entre 10 et 30 m et permettent un suivi diachronique fiable sur la période 2015–2024 [8]. Ces images ont été acquises à partir des plateformes USGS EarthExplorer et Copernicus Open Access Hub, garantissant un accès standardisé et reproductible. Le traitement des données a été réalisé dans un environnement Python via Jupyter Notebook intégré à la plateforme Anaconda, facilitant la reproductibilité et l'automatisation des analyses. Plusieurs bibliothèques spécialisées ont été mobilisées, notamment rasterio et GDAL pour la manipulation des données raster, numpy et pandas pour le traitement numérique et statistique, ainsi que matplotlib et seaborn pour la visualisation des résultats [9]. Le calcul du NDVI et les analyses temporelles ont également été réalisés à l'aide de Google Earth Engine, permettant le traitement de grandes séries d'images satellitaires [10]. Les corrections radiométriques et atmosphériques ont été appliquées afin d'assurer la comparabilité des images, en s'appuyant sur des méthodes standard de correction d'images satellitaires [11]. L'analyse des changements d'occupation du sol a été effectuée à l'aide d'algorithmes de classification supervisée, notamment Random Forest, reconnu pour sa robustesse et sa précision dans les études environnementales [12].

2.2 Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée combinant le traitement d'images satellitaires, l'analyse temporelle du NDVI et l'évaluation des dynamiques d'occupation du sol. Dans un premier temps, les images Landsat 8 et Sentinel-2 ont été prétraitées dans un environnement Python sous Jupyter Notebook (Anaconda), incluant la sélection des scènes sans couverture nuageuse significative, l'harmonisation des résolutions spatiales et l'application de corrections radiométriques et atmosphériques afin d'assurer la comparabilité interannuelle des données. Les bibliothèques Rasterio et GDAL ont été utilisées pour la lecture, la conversion et le découpage des images selon les limites de la zone d'étude, tandis que numpy et pandas ont permis la gestion et la structuration des données numériques [13]. Dans un second temps, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a été calculé à partir des bandes spectrales rouge et proche infrarouge, suivi d'une classification en plusieurs classes de densité de végétation. Une analyse temporelle a été menée pour les années 2015, 2020 et 2024 afin d'identifier les tendances d'évolution, complétée par une analyse statistique des distributions et des anomalies du NDVI. Les

bibliothèques matplotlib et seaborn ont été mobilisées pour la visualisation des résultats et l'interprétation des variations spatiales et temporelles [14]. Enfin, l'analyse des changements d'occupation du sol a été réalisée à travers des classifications supervisées basées sur l'algorithme Random Forest, permettant de générer des cartes thématiques et une matrice de transition entre les différentes classes. Cette matrice a servi à quantifier les conversions et à évaluer les dynamiques de dégradation ou de régénération. Par ailleurs, des indicateurs de risque environnemental ont été dérivés en combinant les probabilités de transition et les variations du NDVI, offrant une lecture intégrée des transformations du paysage [15].

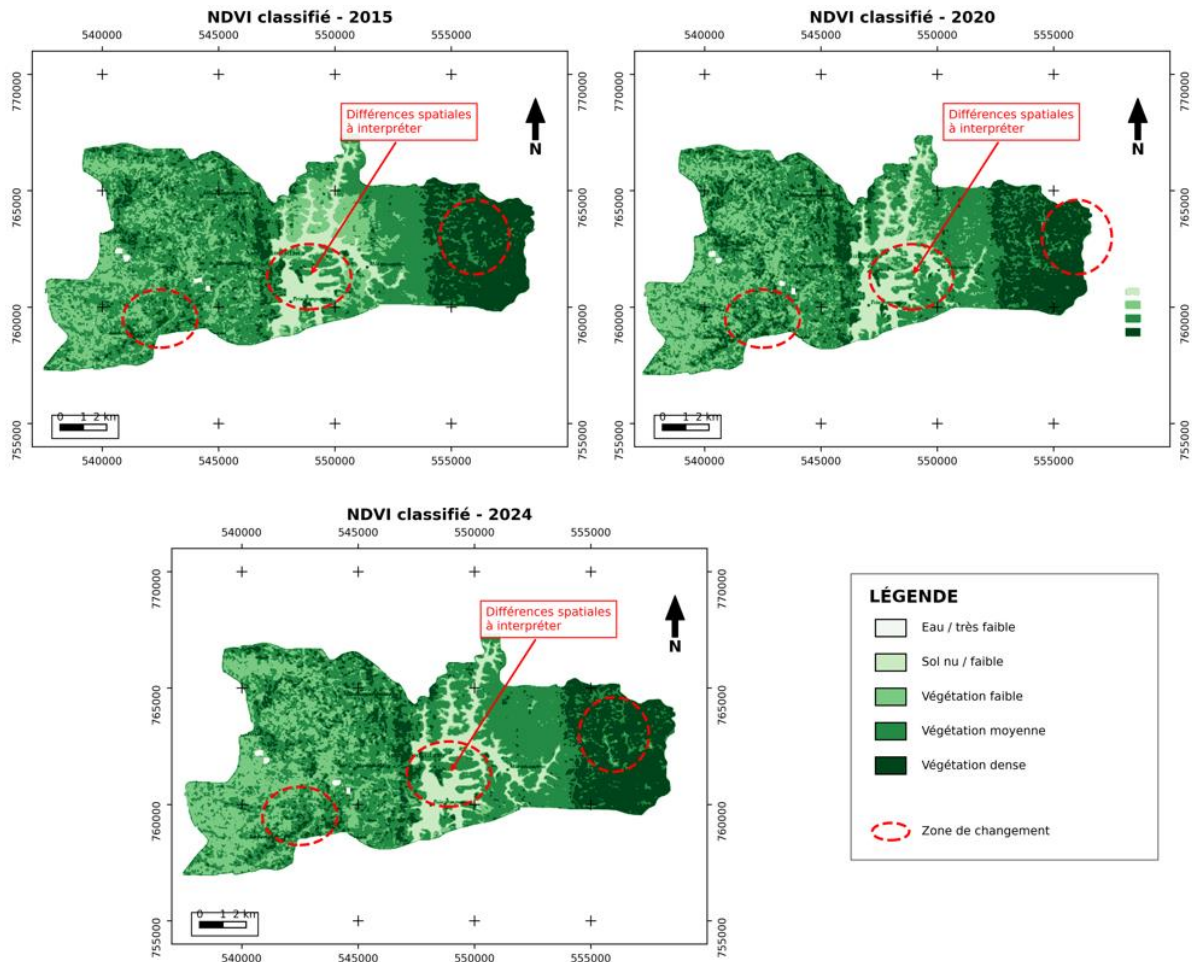
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Dynamique spatio-temporelle de la végétation par NDVI dans la commune rurale d'Ambohimiadana

La figure suivante illustre l'évolution spatio-temporelle de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans la commune rurale d'Ambohimiadana pour les années 2015, 2020 et 2024. Issue du traitement d'images satellitaires intégrées dans un système d'information géographique, cette classification met en évidence les niveaux de densité de la couverture végétale ainsi que les zones de changement significatif au cours du temps.

Figure 1: Dynamique spatio-temporelle de la végétation par NDVI dans la commune rurale d'Ambohimiadana



Source : Auteur 2026

Interprétation

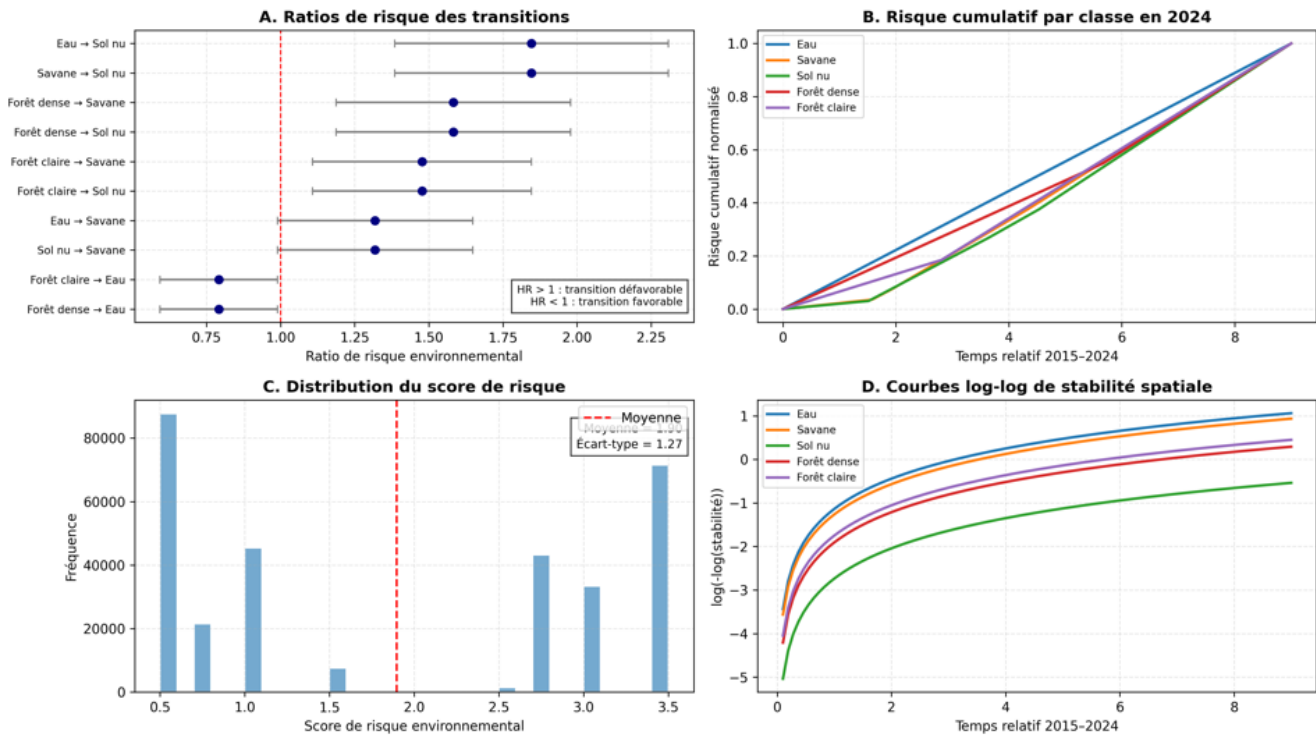
L'analyse comparative des cartes de NDVI classifié montre une structuration spatiale contrastée de la végétation au sein de la commune, avec une dominance des classes de végétation moyenne à dense, notamment dans la partie

orientale de la zone d'étude. En 2015, les formations végétales denses apparaissent concentrées à l'est, tandis que les zones centrales et occidentales présentent davantage de végétation moyenne et faible, avec des poches localisées de sol nu ou de très faible couverture végétale. Cette hétérogénéité spatiale traduit des usages différenciés du sol et des conditions écologiques variables. En 2020, une évolution notable est observée avec une légère extension des surfaces à végétation moyenne, particulièrement dans les zones centrales, tandis que certaines zones initialement denses montrent des signes de fragmentation. Les zones identifiées comme sensibles aux changements, notamment dans la partie sud-ouest et au centre, révèlent une alternance entre amélioration et dégradation de la couverture végétale. La persistance de zones à faible NDVI indique une pression continue liée aux activités anthropiques ou aux contraintes environnementales. En 2024, les dynamiques spatiales confirment une tendance à la recomposition du couvert végétal. La partie orientale conserve globalement une végétation dense, suggérant une relative stabilité écologique dans cette zone. En revanche, les zones centrales présentent une augmentation des surfaces à végétation faible à moyenne, traduisant une possible dégradation progressive ou une transformation des pratiques d'occupation du sol. La zone sud-ouest, déjà identifiée comme instable, montre une persistance des faibles valeurs de NDVI, indiquant une vulnérabilité accrue et une difficulté de régénération végétale. Les zones de changement mises en évidence sur les trois périodes correspondent à des espaces de transition où les variations de NDVI sont les plus marquées. Ces zones traduisent des dynamiques actives d'anthropisation ou de reconfiguration écologique, avec des fluctuations entre végétation faible, moyenne et dense. L'ensemble des résultats met en évidence une dynamique spatio-temporelle non homogène, caractérisée par une relative stabilité des zones à forte densité végétale et une instabilité accrue des zones intermédiaires et dégradées. Cette évolution confirme l'intérêt de l'approche combinant télédétection et SIG pour le suivi fin des transformations environnementales et l'identification des zones prioritaires pour la gestion durable des ressources naturelles dans la commune rurale d'Ambohimiadana.

3.1.2 Analyse intégrée des dynamiques de transition et du risque environnemental par télédétection et SIG dans la zone d'Ambohimiadana (2015–2024)

La figure ci-dessous présente une analyse synthétique des dynamiques d'occupation du sol et des niveaux de risque environnemental dans la zone d'Ambohimiadana sur la période 2015–2024, issue de l'intégration des données de télédétection au sein d'un système d'information géographique. Elle met en évidence à la fois les probabilités de transition entre classes d'occupation, l'évolution du risque cumulé, la distribution statistique des scores de risque et la stabilité spatiale des différentes unités paysagères.

Figure 2: Analyse intégrée des dynamiques de transition et du risque environnemental par télédétection et SIG dans la zone d'Ambohimiadana (2015–2024)



Source : Auteur 2026

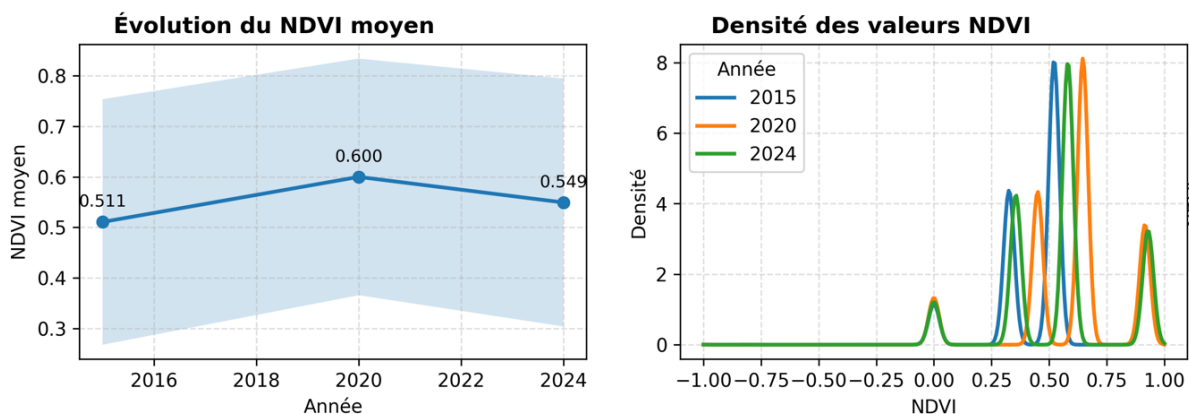
Interprétation

Les ratios de risque des transitions montrent que plusieurs conversions présentent un risque environnemental supérieur à la moyenne, matérialisée par le seuil critique fixé à 1. Les transitions "eau vers sol nu" et "savane vers sol nu" affichent des ratios élevés, proches de 1,8 à 2,0, traduisant une forte dégradation des surfaces initialement plus stables vers des états plus vulnérables. De même, les passages de "forêt dense" ou "forêt claire" vers le sol nu présentent des valeurs supérieures à 1,5, ce qui confirme une pression significative sur les formations forestières. À l'inverse, les transitions telles que "forêt claire vers eau" ou "forêt dense vers eau" présentent des ratios inférieurs à 1, autour de 0,7 à 0,8, indiquant des dynamiques relativement favorables du point de vue environnemental. L'évolution du risque cumulé entre 2015 et 2024 révèle une tendance générale à l'augmentation pour l'ensemble des classes. La classe "eau" atteint rapidement un niveau élevé, avec un risque cumulé avoisinant 1,0 en fin de période, traduisant une sensibilité accrue aux transformations environnementales. La savane et le sol nu suivent une trajectoire similaire mais légèrement inférieure, atteignant respectivement des valeurs proches de 0,95 et 0,9. La forêt dense, bien que partant d'un niveau plus faible, montre une progression continue pour atteindre environ 0,85, tandis que la forêt claire présente une évolution intermédiaire, témoignant d'une vulnérabilité croissante mais moins rapide. La distribution du score de risque environnemental met en évidence une dispersion notable des valeurs, avec une moyenne située autour de 2,0 et un écart-type de 1,27, indiquant une forte variabilité des conditions environnementales au sein de la zone d'étude. Les fréquences les plus élevées se concentrent entre 0,5 et 1,0 d'une part, et entre 3,0 et 3,5 d'autre part, traduisant la coexistence de zones relativement stables et de zones fortement dégradées. Cette distribution bimodale suggère une structuration spatiale contrastée du risque. Enfin, les courbes log-log de stabilité spatiale montrent que la classe "eau" conserve les niveaux de stabilité les plus élevés sur l'ensemble de la période, avec des valeurs atteignant environ 1,0 en fin de série. La savane suit une trajectoire similaire mais légèrement inférieure, tandis que le sol nu présente des valeurs intermédiaires. En revanche, la forêt dense se caractérise par les niveaux de stabilité les plus faibles, avec des valeurs négatives persistantes, inférieures à -1 sur une grande partie de la période, ce qui traduit une forte instabilité spatiale. La forêt claire se situe dans une position intermédiaire, confirmant une dégradation progressive mais moins marquée que celle de la forêt dense. L'ensemble de ces résultats met en évidence une dynamique de transformation rapide des paysages, avec une tendance globale à l'augmentation du risque environnemental, confirmant la pertinence de l'approche couplant SIG et télédétection pour le suivi spatio-temporel des écosystèmes.

3.1.3 Analyse de l'évolution temporelle et de la distribution statistique du NDVI dans la commune rurale d'Ambohimiadana (2015–2024)

La figure ci-après présente l'évolution du NDVI moyen ainsi que la distribution de ses valeurs dans la commune rurale d'Ambohimiadana entre 2015 et 2024. Cette analyse, basée sur des données de télédétection intégrées dans un système d'information géographique, permet d'évaluer les tendances globales de la couverture végétale et d'examiner la structure statistique des variations observées au cours du temps.

Figure 3: Analyse de l'évolution temporelle et de la distribution statistique du NDVI dans la commune rurale d'Ambohimiadana (2015–2024)



Source : Auteur 2026

Interprétation

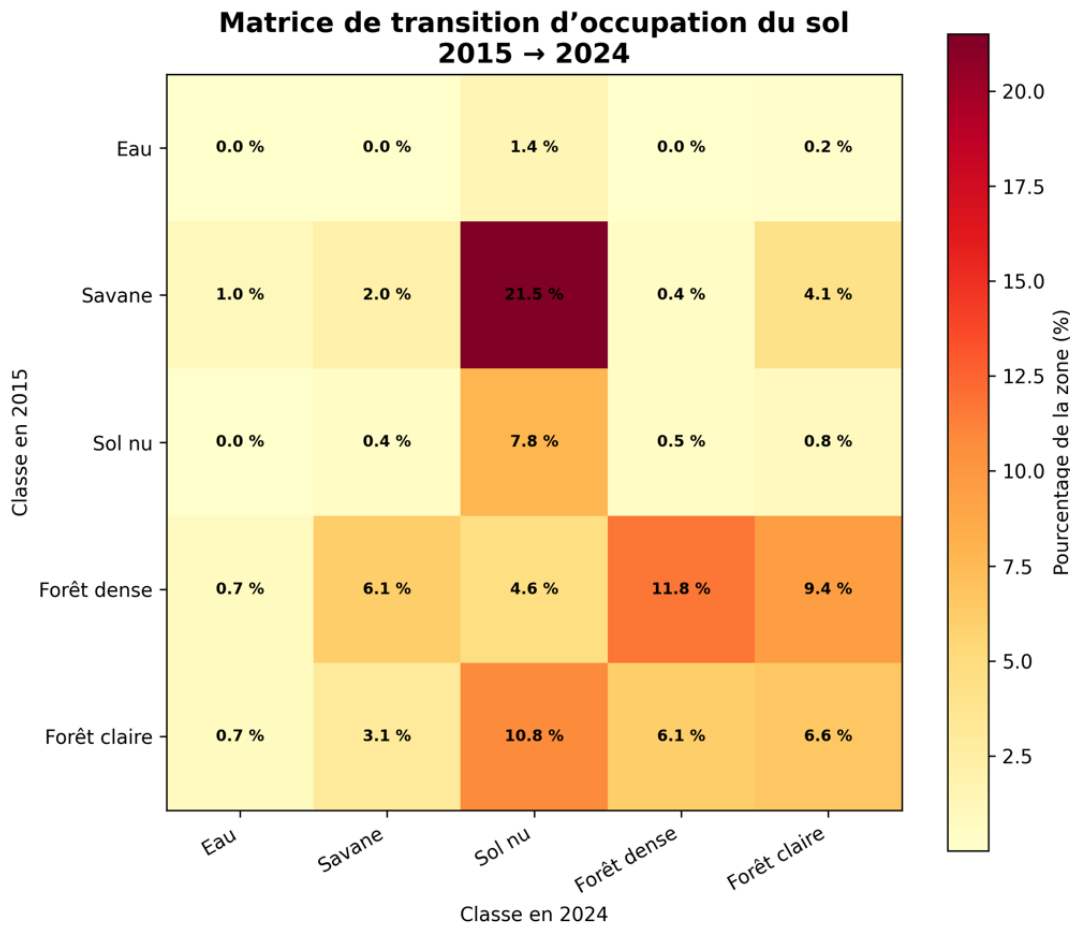
L'évolution du NDVI moyen met en évidence une amélioration globale de la couverture végétale entre 2015 et 2020, suivie d'une légère diminution en 2024. La valeur moyenne passe de 0,511 en 2015 à 0,600 en 2020, traduisant une densification notable de la végétation sur cette période. Cette progression peut être associée à des

conditions climatiques favorables ou à des dynamiques de régénération végétale. En revanche, le recul observé en 2024, avec une valeur moyenne de 0,549, suggère une dégradation partielle ou une stabilisation après une phase d'expansion, bien que le niveau reste supérieur à celui de 2015, indiquant un bilan globalement positif sur l'ensemble de la période étudiée. La dispersion des valeurs, matérialisée par l'intervalle autour de la moyenne, montre une variabilité relativement importante du NDVI, avec des valeurs minimales proches de 0,27–0,30 et des maximas atteignant environ 0,80–0,83. Cette amplitude traduit une hétérogénéité marquée des états de la couverture végétale, allant de zones faiblement végétalisées à des formations denses et bien établies. L'analyse des densités de distribution du NDVI révèle des structures différenciées selon les années. En 2015, les valeurs se concentrent principalement autour de 0,5 à 0,6, indiquant une dominance de végétation moyenne. En 2020, la distribution se décale vers des valeurs plus élevées, avec un pic marqué autour de 0,7 à 0,75, ce qui confirme l'amélioration globale de la biomasse végétale observée dans la moyenne. En 2024, la distribution montre un léger recentrage vers des valeurs intermédiaires, avec une présence accrue autour de 0,6 à 0,7, traduisant une réduction relative des zones à végétation très dense. La présence de faibles densités autour de valeurs proches de 0 indique que les surfaces non végétalisées ou très dégradées restent marginales mais persistantes. Par ailleurs, les pics élevés de densité autour des classes dominantes traduisent une certaine homogénéisation des états de végétation au sein de la commune, bien que des contrastes subsistent.

3.1.4 Analyse des dynamiques de transition de l'occupation du sol dans la commune rurale d'Ambohimiadana (2015–2024)

La figure ci-dessous présente la matrice de transition des classes d'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la commune rurale d'Ambohimiadana. Issue de l'analyse diachronique des données de télédétection intégrées dans un système d'information géographique, elle permet de quantifier les conversions entre les différentes classes et d'identifier les principales tendances d'évolution du paysage.

Figure 4: Analyse des dynamiques de transition de l'occupation du sol dans la commune rurale d'Ambohimiadana (2015–2024)



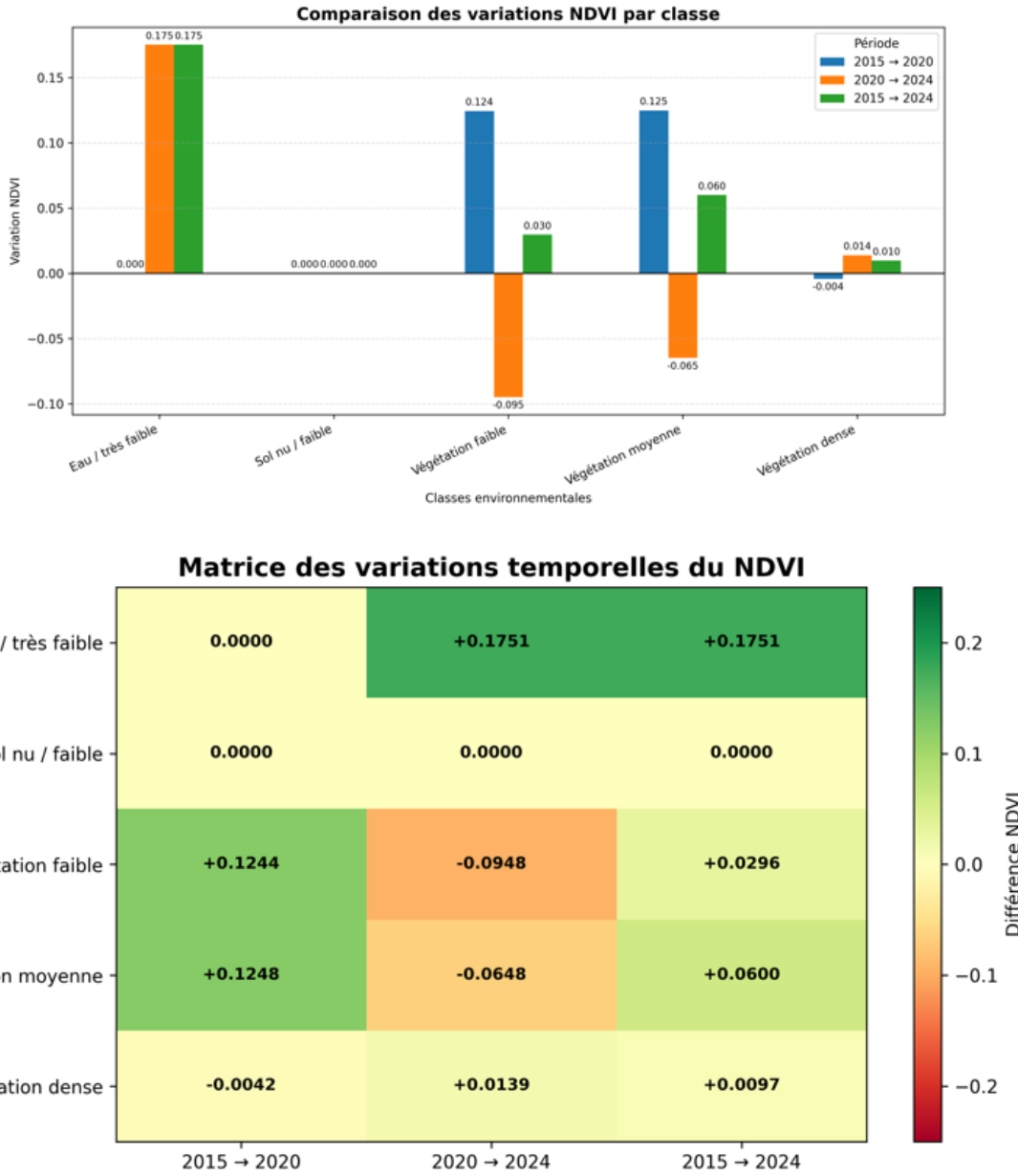
Interprétation

L'analyse de la matrice de transition met en évidence des transformations significatives de l'occupation du sol, dominées par une progression notable des surfaces de sol nu au détriment des formations végétales. La transition la plus marquante correspond au passage de la savane vers le sol nu, qui représente 21,5 % de la surface totale, traduisant un processus important de dégradation ou de dénudation des sols. Cette tendance est également observée pour la forêt claire, dont 10,8 % évoluent vers le sol nu, ainsi que pour la forêt dense avec 4,6 %, confirmant une pression généralisée sur les formations végétales. Les classes forestières présentent néanmoins des dynamiques internes contrastées. La forêt dense conserve une part de stabilité relative avec 11,8 % de sa surface qui demeure inchangée entre 2015 et 2024, tandis que 9,4 % évoluent vers la forêt claire, suggérant un processus de dégradation progressive de la structure forestière. Par ailleurs, une proportion non négligeable de forêt dense se transforme en savane (6,1 %), traduisant une ouverture du couvert forestier. De même, la forêt claire montre une certaine capacité de maintien avec 6,6 % de stabilité, mais elle subit également des transitions vers des états plus dégradés, notamment vers le sol nu (10,8 %) et vers la forêt dense (6,1 %), ce qui traduit des dynamiques à la fois de régression et de régénération. La classe « sol nu » apparaît comme un état de convergence important, recevant des apports significatifs depuis plusieurs classes, notamment la savane (21,5 %) et la forêt claire (10,8 %), mais conservant également une part de stabilité de 7,8 %. Cela confirme le rôle central de cette classe dans les processus de dégradation environnementale observés dans la zone. En parallèle, les transitions vers des classes plus végétalisées restent limitées, avec seulement 0,5 % du sol nu évoluant vers la forêt dense et 0,8 % vers la forêt claire, ce qui suggère une faible capacité de régénération naturelle. Les surfaces en eau montrent une stabilité quasi nulle, avec 0,0 % de maintien, et des transitions très faibles vers d'autres classes, notamment 1,4 % vers le sol nu, indiquant une possible réduction ou variabilité des surfaces en eau. De manière générale, les transitions vers des états plus favorables, comme l'augmentation de la densité forestière, restent marginales comparativement aux dynamiques de dégradation.

3.1.5 Analyse comparative des variations temporelles du NDVI par classe environnementale dans la commune rurale d'Ambohimiadana (2015–2024)

La figure suivante présente une analyse détaillée des variations du NDVI selon les différentes classes environnementales dans la commune rurale d'Ambohimiadana entre 2015 et 2024. Elle combine une comparaison des changements par période (2015–2020, 2020–2024 et 2015–2024) ainsi qu'une matrice synthétique des différences temporelles, permettant d'identifier les tendances d'évolution de la couverture végétale au sein des différentes unités paysagères.

Figure 5: Analyse comparative des variations temporelles du NDVI par classe environnementale dans la commune rurale d’Ambohimiadana (2015–2024)



Source : Auteur 2026

Interprétation

L’analyse des variations du NDVI met en évidence des dynamiques différenciées selon les classes environnementales et les périodes considérées. La classe « eau / très faible » présente une augmentation notable du NDVI entre 2020 et 2024 avec une valeur de +0,175, conduisant à une variation globale identique de +0,175 sur l’ensemble de la période 2015–2024, ce qui peut traduire une amélioration locale de la couverture végétale dans des zones initialement peu productives. En revanche, la classe « sol nu / faible » reste stable avec des variations nulles sur toutes les périodes, indiquant une absence d’évolution significative et une persistance des conditions de faible végétation. Les classes de végétation montrent des évolutions contrastées. La végétation faible enregistre une augmentation importante entre 2015 et 2020 (+0,124), suivie d’une diminution marquée entre 2020 et 2024 (-0,095), aboutissant à une variation globale modérée de +0,030 sur l’ensemble de la période. Une dynamique similaire est observée pour la végétation moyenne, avec une hausse initiale de +0,125, suivie d’une baisse de -0,065, pour un bilan global positif de +0,060. Ces résultats traduisent une phase de régénération végétale

entre 2015 et 2020, suivie d'un ralentissement ou d'une dégradation partielle au cours de la période récente. La végétation dense présente une dynamique plus stable, avec une légère diminution entre 2015 et 2020 (-0,004), suivie d'une faible augmentation entre 2020 et 2024 (+0,014), conduisant à une variation globale de +0,010. Cette relative stabilité suggère une résilience des formations végétales les plus denses face aux pressions environnementales, bien que leur progression reste limitée.

3.2 Discussions

La présente étude met en évidence des dynamiques environnementales contrastées dans la commune rurale d'Ambohimiadana sur la période 2015–2024, révélant à la fois des processus de régénération végétale et des tendances marquées de dégradation. L'évolution du NDVI moyen, passant de 0,511 en 2015 à 0,600 en 2020 puis à 0,549 en 2024, traduit une amélioration initiale de la couverture végétale suivie d'une phase de stabilisation ou de légère régression. Cette trajectoire suggère que les conditions favorables observées entre 2015 et 2020, possiblement liées à des facteurs climatiques ou à des pratiques de gestion locales, n'ont pas été maintenues sur l'ensemble de la période. L'analyse spatiale des changements du NDVI met en évidence une forte hétérogénéité, avec des zones de régénération concentrées principalement dans la partie orientale, tandis que les zones centrales et occidentales présentent des signes persistants de dégradation. Cette distribution spatiale suggère une influence différenciée des facteurs anthropiques, notamment l'expansion agricole, la pression foncière et l'exploitation des ressources naturelles, qui contribuent à la fragmentation du couvert végétal. Les anomalies négatives observées en 2024 dans certaines zones confirment l'existence de foyers de dégradation active, nécessitant une attention particulière en termes de gestion environnementale. Les résultats issus de la matrice de transition renforcent cette interprétation en montrant une expansion significative du sol nu, notamment à partir de la savane (21,5 %) et de la forêt claire (10,8 %). Cette dynamique traduit une dégradation progressive des formations végétales vers des états plus vulnérables, caractérisés par une faible couverture et une sensibilité accrue à l'érosion. La faible proportion de transitions inverses vers des classes plus végétalisées indique une capacité limitée de régénération naturelle, ce qui peut être attribué à des conditions écologiques défavorables ou à une pression anthropique continue. Par ailleurs, l'analyse des ratios de risque met en évidence des transitions critiques vers des états dégradés, avec des valeurs supérieures à 1,5 pour plusieurs conversions vers le sol nu. Ces résultats confirment que certaines dynamiques d'occupation du sol contribuent de manière disproportionnée à l'augmentation du risque environnemental. L'évolution du risque cumulé, qui tend à augmenter pour la plupart des classes, souligne une dégradation progressive des conditions environnementales, malgré la présence de zones localisées de stabilité. Dans l'ensemble, les résultats révèlent une dynamique complexe caractérisée par une coexistence de processus de régénération et de dégradation, mais avec une tendance globale orientée vers la vulnérabilité accrue des écosystèmes. Cette situation met en évidence la nécessité de renforcer les stratégies de gestion durable, en ciblant prioritairement les zones les plus affectées par la dégradation. L'intégration de la télédétection et des SIG s'avère ainsi particulièrement pertinente pour le suivi continu des transformations environnementales et pour l'aide à la décision dans un contexte de pression croissante sur les ressources naturelles.

4 Conclusion

La présente étude a permis de mettre en évidence les dynamiques environnementales au sein de la commune rurale d'Ambohimiadana sur la période 2015–2024 à travers l'intégration des données de télédétection et des systèmes d'information géographique. Les résultats obtenus révèlent une évolution contrastée de la couverture végétale, caractérisée par une amélioration initiale du NDVI suivie d'une légère régression, tout en maintenant un niveau global supérieur à celui observé au début de la période. Cette dynamique traduit à la fois des capacités de régénération et des pressions persistantes sur les écosystèmes. L'analyse des changements spatiaux met en évidence une forte hétérogénéité, avec des zones de stabilité relative coexistant avec des secteurs en dégradation marquée. La progression significative du sol nu, notamment au détriment de la savane et des formations forestières, constitue un indicateur clé de la dégradation environnementale en cours. Par ailleurs, les transitions identifiées et les niveaux de risque associés confirment une tendance globale à l'augmentation de la vulnérabilité des paysages, malgré la présence de zones localisées de régénération. Ces résultats soulignent l'importance d'un suivi spatio-temporel continu pour mieux comprendre les processus de transformation des écosystèmes et anticiper leurs impacts. L'approche méthodologique adoptée, combinant NDVI, analyse de transition et évaluation du risque, s'avère pertinente pour fournir une vision intégrée des dynamiques environnementales. Elle constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour orienter les politiques de gestion durable, en mettant l'accent sur la restauration des zones dégradées et la préservation des espaces encore relativement stables.

REFERENCES

- [1] Lambin, E.F. and Geist, H.J., 2006. Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts. Berlin: Springer.
- [2] Turner, B.L. et al., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), pp.20666–20671.
- [3] Longley, P.A. et al., 2015. *Geographic Information Science and Systems*. 4th ed. Wiley.
- [4] Pettorelli, N., 2013. *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford: Oxford University Press.
- [5] Pontius, R.G. et al., 2004. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological Modelling*, 179(4), pp.445–461.
- [6] Harper, G.J. et al., 2007. Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*, 34(4), pp.325–333.
- [7] Eastman, J.R., 2016. *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System Manual*. Clark University.
- [8] Roy, D.P. et al., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, pp.154–172.
- [9] Van Rossum, G. and Drake, F.L., 2009. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley: CreateSpace.
- [10] Gorelick, N. et al., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, pp.18–27.
- [11] Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), pp.1025–1036.
- [12] Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), pp.5–32.
- [13] Reuter, H.I. et al., 2007. Pre-processing of digital elevation models for geomorphometric analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1), pp.1–17.
- [14] Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp.90–95.
- [15] Belgiu, M. and Drăguț, L., 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, pp.24–3