



ANALYSE MULTI-DIMENSIONNELLE DU NDVI : DISTRIBUTION STATISTIQUE, GRADIENTS SPATIAUX ET STRUCTURE ÉCOLOGIQUE DES PAYSAGES DANS LA RÉGION ANALAMANGA (MADAGASCAR)

¹RAVELOALISON Haja Nirina, ²ANDRIAMPANARIVO Haingo Laza Herinandrasana,

³RASOANAIVO Tovohery Christo, 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 propose une analyse multi-dimensionnelle du NDVI afin de caractériser la structure environnementale de la région Analamanga (Madagascar) à partir de données satellitaires issues de l'USGS. L'approche combine des analyses statistiques, des profils spatiaux et des indicateurs écologiques pour évaluer la distribution et l'organisation de la végétation. Les résultats montrent une dominance des valeurs élevées de NDVI, avec une moyenne de 0,643 et une médiane de 0,633, traduisant une couverture végétale globalement bien développée. Environ 69,6 % des pixels présentent des valeurs supérieures à 0,6, indiquant une prédominance de végétation dense, tandis que les classes intermédiaires (0,4–0,6) représentent près de 30,4 %. Les analyses de gradients spatiaux révèlent une relative homogénéité du NDVI, avec des valeurs majoritairement comprises entre 0,60 et 0,66, et une augmentation locale jusqu'à 0,83 dans les zones périphériques. Les indicateurs d'hétérogénéité et de fragmentation mettent en évidence une variabilité spatiale modérée, associée à des paysages mixtes. L'indice de Shannon confirme une complexité écologique plus élevée en périphérie, reflétant l'influence combinée des facteurs naturels et anthropiques.

Mots-clés : NDVI ; télédétection ; hétérogénéité spatiale ; fragmentation du paysage ; Analamanga

ABSTRACT: This study proposes a multidimensional analysis of NDVI to characterize the environmental structure of the Analamanga region (Madagascar) using satellite data obtained from the USGS. The approach combines statistical analyses, spatial profiles, and ecological indicators to assess the distribution and organization of vegetation. The results show a dominance of high NDVI values, with a mean of 0.643 and a median of 0.633, indicating generally well-developed vegetation cover. Approximately 69.6% of pixels exhibit values above 0.6, reflecting a predominance of dense vegetation, while intermediate classes (0.4–0.6) account for nearly 30.4%. Spatial gradient analyses reveal a relative homogeneity of NDVI, with values predominantly ranging from 0.60 to 0.66, and local increases up to 0.83 in peripheral areas. Heterogeneity and fragmentation indicators highlight moderate spatial variability associated with mixed landscapes. The Shannon index confirms higher ecological complexity in peripheral zones, reflecting the combined influence of natural and anthropogenic factors.

Keywords: NDVI; remote sensing; spatial heterogeneity; landscape fragmentation; Analamanga

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.21245725>

1 Introduction

L'analyse de la végétation constitue un élément central dans la compréhension des dynamiques environnementales et de l'occupation du sol, en particulier dans les régions soumises à une pression anthropique croissante. Le développement de la télédétection a permis d'améliorer significativement les capacités d'observation et de suivi des écosystèmes à différentes échelles spatiales et temporelles. Parmi les indicateurs les plus utilisés, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) s'impose comme un outil robuste pour évaluer la densité et l'état de la couverture végétale à partir des images satellitaires [1]. Le NDVI repose sur la différence de réflectance entre le proche infrarouge et le rouge, permettant ainsi de discriminer efficacement les surfaces végétalisées des zones urbaines ou dégradées. De nombreuses études ont démontré son efficacité pour analyser la productivité végétale, détecter les changements d'occupation du sol et caractériser les gradients écologiques [2][3]. En outre, l'intégration d'analyses statistiques avancées, telles que les distributions cumulatives, les densités de probabilité et les profils spatiaux, permet d'affiner l'interprétation des structures environnementales [4]. Par ailleurs, l'analyse du paysage ne se limite pas à la simple observation des valeurs du NDVI, mais s'étend à l'évaluation de l'hétérogénéité et de la fragmentation spatiale. Des indicateurs tels que la variance locale, le nombre de classes et l'indice de diversité de Shannon permettent de quantifier la complexité écologique et la structure des paysages [5]. Ces approches sont particulièrement pertinentes dans les contextes urbains et périurbains, où les interactions entre les activités humaines et les milieux naturels génèrent des configurations spatiales complexes [6]. Dans ce contexte, la région Analamanga, qui abrite la capitale Antananarivo, constitue un terrain d'étude pertinent en raison de la coexistence de zones urbaines denses, d'espaces agricoles et de formations végétales naturelles. L'expansion urbaine rapide observée au cours des dernières décennies a entraîné des transformations significatives de l'occupation du sol, nécessitant une analyse approfondie des dynamiques environnementales [7]. Ainsi, cette étude vise à proposer une analyse multi-dimensionnelle du NDVI combinant des approches statistiques, spatiales et écologiques afin de caractériser la structure et l'organisation des paysages dans la région Analamanga. L'objectif est de mettre en évidence les gradients de végétation, les niveaux d'hétérogénéité et la complexité écologique du territoire à partir de données satellitaires récentes.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Les analyses réalisées dans cette étude reposent sur une combinaison de données géospatiales et d'outils de traitement adaptés à l'analyse environnementale par télédétection. Les données de base utilisées proviennent de plusieurs sources complémentaires. Les informations administratives et vectorielles, notamment les limites régionales et communales, sont issues des bases de données géographiques nationales fournies par le Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM) et le Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC), qui constituent des références institutionnelles pour la cartographie et la gestion territoriale à Madagascar [8][9]. Ces données ont été utilisées pour la délimitation précise de la zone d'étude et pour les analyses spatiales à l'échelle communale. Par ailleurs, les données satellitaires nécessaires au calcul et à l'analyse du NDVI ont été téléchargées à partir de la plateforme USGS EarthExplorer, qui offre un accès libre à des images issues de différents capteurs optiques à moyenne résolution spatiale [10]. Ces données ont permis de caractériser la couverture végétale et d'extraire des indicateurs environnementaux fiables sur l'ensemble de la région Analamanga. Le traitement des données a été effectué à l'aide de l'environnement de programmation Python, reconnu pour sa flexibilité et ses capacités avancées en analyse géospatiale. Plusieurs bibliothèques spécialisées ont été mobilisées, notamment Rasterio pour la manipulation des données raster, geopandas pour le traitement des données vectorielles, numpy pour les opérations numériques, matplotlib pour la visualisation graphique, ainsi que des modules statistiques tels que ceux de SciPy pour l'analyse des distributions et des densités [11][12]. L'ensemble des traitements a été réalisé dans l'environnement Jupyter Notebook intégré à la distribution Anaconda, facilitant l'exécution interactive du code, la reproductibilité des analyses et la documentation des résultats [13].

2.2 Méthodes

Les méthodes mises en œuvre dans cette étude reposent sur une approche intégrée combinant le traitement d'images satellitaires, l'analyse statistique et l'analyse spatiale afin de caractériser la distribution et la dynamique du NDVI dans la région Analamanga. Dans un premier temps, les données rasters issus de la télédétection ont été

prétraitées, notamment par le découpage spatial selon l'emprise de la zone d'étude, la gestion des valeurs aberrantes et la normalisation des valeurs du NDVI afin de garantir leur cohérence dans l'intervalle théorique compris entre -1 et 1. Cette étape a permis d'obtenir une base de données fiable pour les analyses ultérieures [14]. L'analyse statistique a ensuite été réalisée à travers plusieurs représentations graphiques, notamment les histogrammes, les courbes de densité (KDE) et les fonctions de distribution cumulée (CDF), permettant de caractériser la structure globale des valeurs du NDVI et d'identifier les classes environnementales dominantes. Les courbes de densité ont été estimées à l'aide de méthodes non paramétriques afin de représenter la distribution continue des valeurs, tandis que les courbes cumulatives ont permis d'évaluer la proportion relative des différentes classes de végétation [15]. Par ailleurs, l'analyse spatiale a été conduite à travers l'extraction de profils le long de transects orientés selon différentes directions, ainsi que par l'étude des gradients spatiaux du NDVI en fonction de la position géographique. Ces méthodes ont permis de mettre en évidence les transitions entre zones urbaines et zones végétalisées, ainsi que les variations locales de la couverture végétale [16]. Enfin, des indicateurs avancés tels que la variance locale, la fragmentation du paysage et l'indice de diversité de Shannon ont été calculés à l'aide de fenêtres mobiles afin de quantifier l'hétérogénéité et la complexité écologique du territoire, fournissant ainsi une lecture fine de la structure du paysage [17].

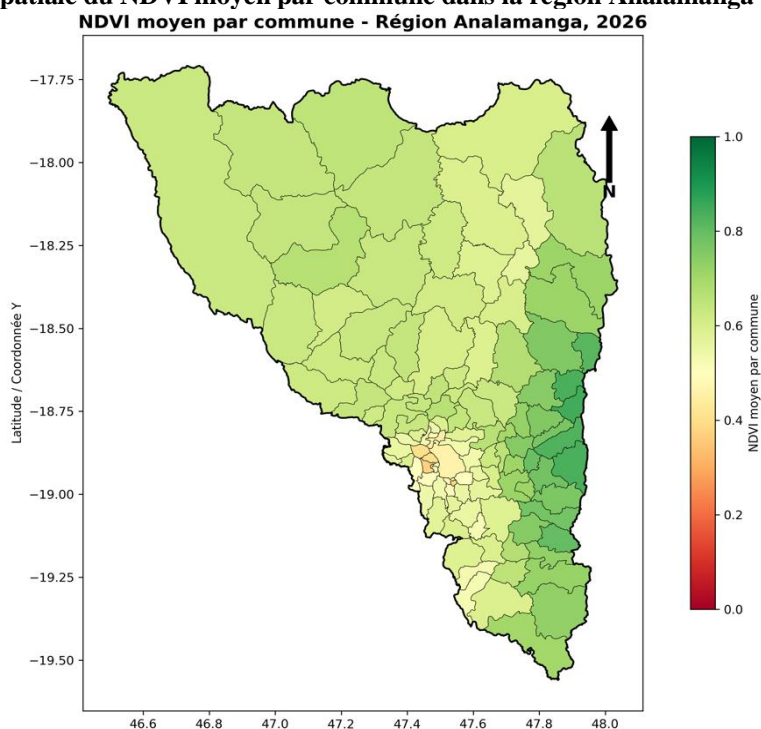
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Analyse spatiale du NDVI moyen par commune dans la région Analamanga en 2026

La figure suivante présente la distribution spatiale du NDVI moyen à l'échelle communale dans la région Analamanga, obtenue à partir des données satellitaires issues de l'USGS EarthExplorer. Cet indicateur permet d'évaluer l'état de la végétation et de mettre en évidence les contrastes environnementaux entre les différentes unités territoriales, notamment entre les zones fortement urbanisées et les espaces à dominante naturelle ou agricole.

Figure 1: Analyse spatiale du NDVI moyen par commune dans la région Analamanga en 2026



Source : Auteur 2026

Interprétation

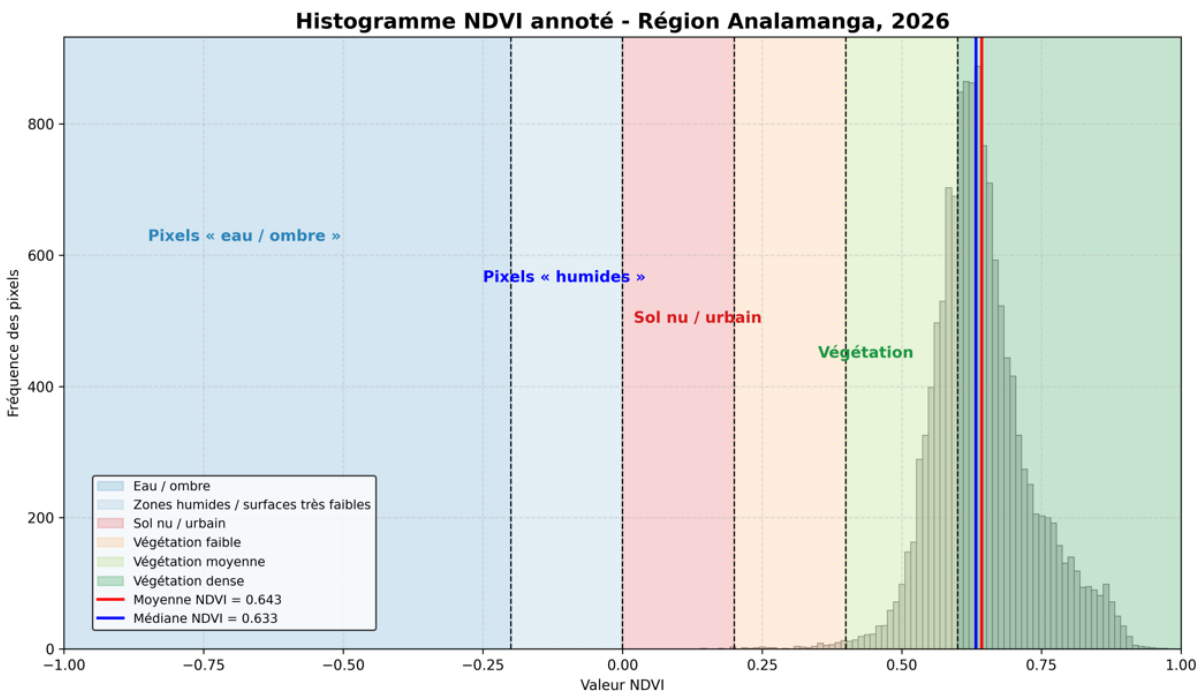
L'analyse des données révèle que certaines universités, notamment Antsiranana, affichent des performances. L'analyse de la carte révèle une structuration spatiale nette du NDVI au sein de la région Analamanga. Les valeurs les plus faibles, généralement comprises entre 0,30 et 0,45, se concentrent dans la partie centrale correspondant à

l'agglomération d'Antananarivo. Cette zone se caractérise par une forte densité urbaine et une artificialisation importante des sols, limitant la présence de couverture végétale. À mesure que l'on s'éloigne du centre urbain, le NDVI moyen augmente progressivement, atteignant des valeurs comprises entre 0,55 et 0,70 dans les communes périphériques. Cette augmentation traduit la transition vers des paysages moins anthropisés, dominés par des activités agricoles et des formations végétales plus continues. Les communes situées à l'est et au sud-est de la région présentent les valeurs les plus élevées, souvent supérieures à 0,70, indiquant une végétation dense et relativement bien préservée. À l'inverse, certaines communes du sud et du sud-ouest affichent des valeurs intermédiaires, de l'ordre de 0,45 à 0,60, reflétant des paysages mixtes où coexistent zones cultivées, espaces ouverts et habitats dispersés. Globalement, la distribution du NDVI met en évidence un gradient spatial marqué, allant d'un noyau urbain faiblement végétalisé vers des périphéries plus riches en biomasse végétale, traduisant l'influence directe de l'urbanisation sur la dynamique environnementale régionale.

3.1.2 Distribution statistique et interprétation écologique du NDVI dans la région Analamanga en 2026

La figure ci-dessous illustre la distribution des valeurs du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) au sein de la région Analamanga à partir des données satellitaires issues de l'USGS EarthExplorer. Cet histogramme annoté permet d'analyser la fréquence des différentes classes de surfaces, allant des zones non végétalisées aux formations végétales denses, tout en mettant en évidence les seuils caractéristiques utilisés pour la classification environnementale. L'intégration des indicateurs statistiques, notamment la moyenne et la médiane du NDVI, facilite une lecture synthétique de l'état global de la couverture végétale régionale.

Figure 2: Distribution statistique et interprétation écologique du NDVI dans la région Analamanga en 2026



Source : Auteur 2026

Interprétation

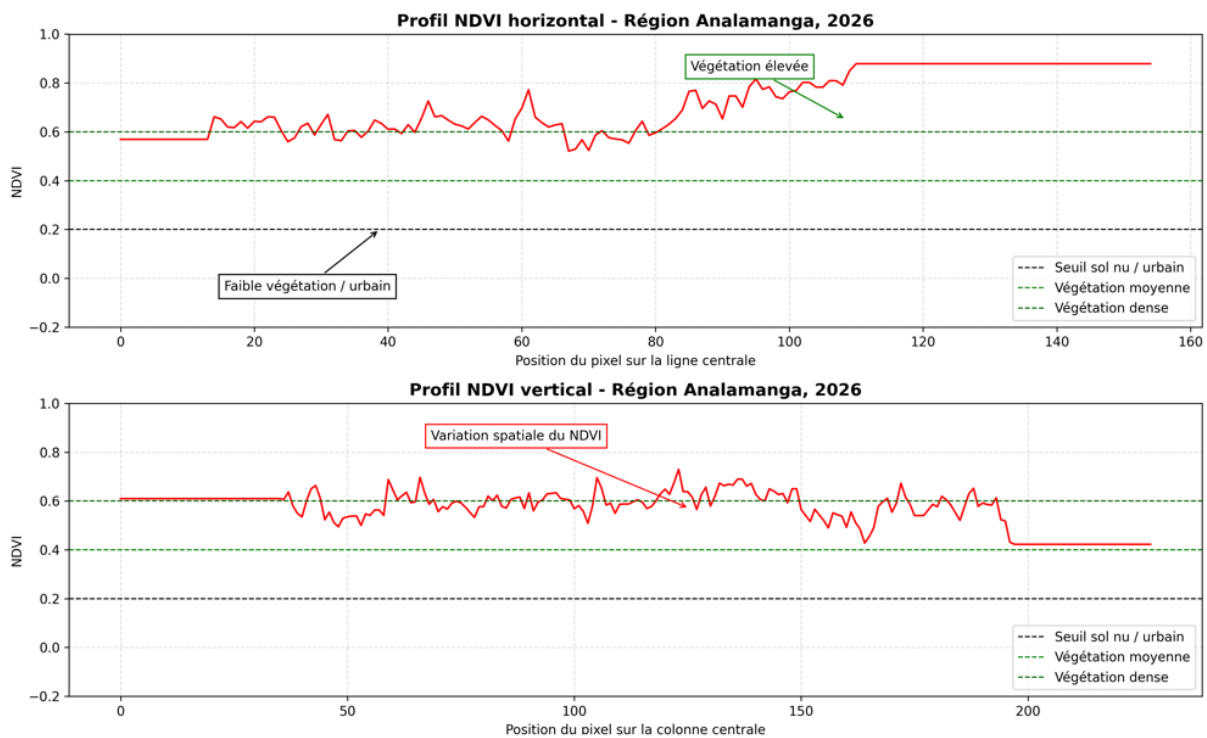
L'analyse de la distribution montre une concentration marquée des valeurs NDVI dans les classes comprises entre 0,5 et 0,8, traduisant une dominance de surfaces végétalisées dans la région. La moyenne du NDVI, estimée à 0,643, ainsi que la médiane à 0,633, confirment cette tendance vers une couverture végétale globalement bien développée. La proximité entre ces deux indicateurs suggère une distribution relativement symétrique, bien que légèrement orientée vers les valeurs élevées, indiquant une prépondérance de végétation moyenne à dense. Les classes correspondant aux surfaces urbaines ou aux sols nus, comprises entre 0 et 0,2, présentent une fréquence nettement plus faible, ce qui reflète la concentration spatiale de l'urbanisation principalement autour de l'agglomération d'Antananarivo. Les valeurs négatives du NDVI, associées aux plans d'eau, aux ombres ou aux surfaces très humides, apparaissent marginales et peu représentées, ce qui est cohérent avec la faible proportion de surfaces aquatiques à grande échelle dans la région étudiée. La transition progressive entre les classes, notamment entre 0,2 et 0,6, traduit la présence de paysages mixtes où coexistent zones agricoles, végétation clairsemée et

espaces en transition. Enfin, la forte fréquence observée au-delà de 0,6 met en évidence des zones à végétation dense, souvent localisées en périphérie urbaine ou dans des zones moins anthropisées, confirmant l'existence d'un gradient écologique allant des espaces urbains vers des milieux plus naturels.

3.1.3 Analyse des profils spatiaux du NDVI selon les axes horizontal et vertical dans la région Analamanga en 2026

La figure ci-après présente les variations du NDVI le long de deux transects traversant la région Analamanga selon les directions horizontale et verticale. Ces profils permettent d'analyser la dynamique spatiale de la végétation à une échelle fine, en mettant en évidence les transitions entre zones urbaines, espaces agricoles et milieux à forte couverture végétale. L'intégration de seuils de classification facilite l'interprétation des niveaux de végétation observés le long des gradients spatiaux.

Figure 3: Analyse des profils spatiaux du NDVI selon les axes horizontal et vertical dans la région Analamanga en 2026



Source : Auteur 2026

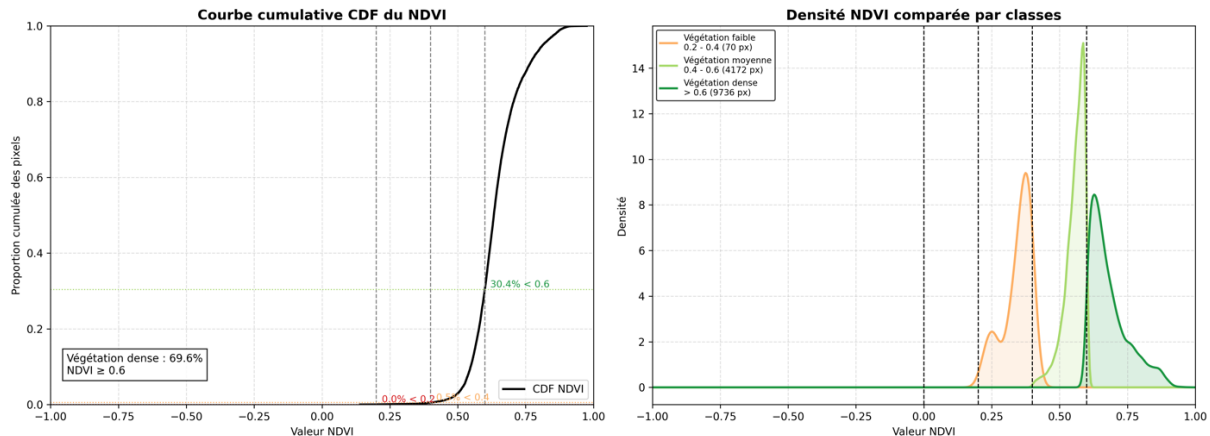
Interprétation

Le profil horizontal met en évidence une évolution progressive du NDVI, avec des valeurs initiales autour de 0,58 à 0,62 correspondant à des zones de végétation moyenne ou à des paysages semi-urbanisés. À mesure que l'on avance le long du transect, les valeurs augmentent pour atteindre des niveaux compris entre 0,75 et 0,85, traduisant la présence de zones à végétation dense. Cette progression reflète un gradient spatial typique allant de milieux plus anthropisés vers des espaces moins perturbés. La présence ponctuelle de fluctuations intermédiaires, avec des valeurs descendant vers 0,55, indique l'existence de zones de transition où coexistent différentes formes d'occupation du sol. Le profil vertical présente quant à lui une variabilité plus marquée, avec des valeurs oscillantes majoritairement entre 0,50 et 0,65. Cette dispersion traduit une hétérogénéité spatiale plus importante le long de cet axe, suggérant un mélange plus complexe de zones urbaines, agricoles et végétalisées. Une baisse notable du NDVI vers la fin du profil, avec des valeurs proches de 0,40 à 0,45, indique une transition vers des surfaces moins végétalisées, possiblement liées à des zones d'occupation humaine plus intense ou à des sols dénudés. Globalement, ces deux profils confirment l'existence d'un gradient écologique structuré dans la région Analamanga, marqué par une opposition entre zones centrales plus anthropisées et périphéries à végétation plus dense, tout en révélant une variabilité spatiale significative liée à l'organisation du paysage.

3.1.4 Analyse statistique de la distribution et de la densité du NDVI dans la région Analamanga en 2026

La figure ci-dessous présente une double analyse statistique du NDVI à travers, d'une part, la courbe cumulative (CDF) permettant d'évaluer la répartition globale des valeurs, et d'autre part, les courbes de densité comparées par classes environnementales. Cette approche combinée permet de mieux comprendre la structure de la couverture végétale en identifiant les proportions relatives des différentes classes de végétation et leur distribution statistique au sein de la région Analamanga.

Figure 4: Analyse statistique de la distribution et de la densité du NDVI dans la région Analamanga en 2026



Source : Auteur 2026

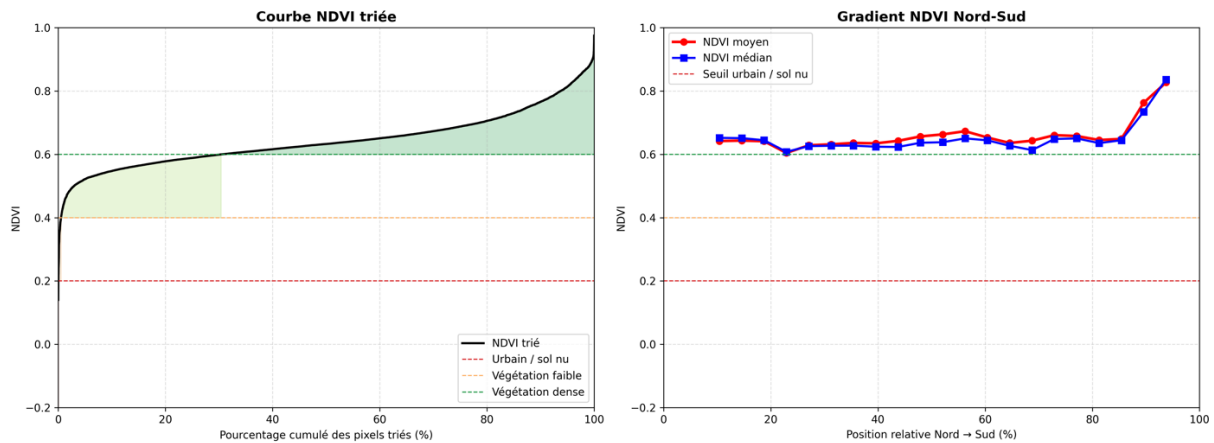
Interprétation

La courbe cumulative met en évidence une forte concentration des valeurs NDVI dans les classes élevées, avec une montée rapide de la courbe à partir de 0,6. Environ 69,6 % des pixels présentent des valeurs supérieures ou égales à 0,6, traduisant une dominance de la végétation dense dans la région. À l'inverse, les classes faibles, notamment celles inférieures à 0,2, sont quasiment inexistantes, avec une proportion proche de 0 %, ce qui confirme la faible représentation des surfaces fortement urbanisées ou dénudées à l'échelle régionale. La zone intermédiaire, correspondant aux valeurs comprises entre 0,4 et 0,6, représente environ 30,4 % des pixels, indiquant une présence significative de végétation moyenne, souvent associée à des zones agricoles ou à des paysages en transition. Les courbes de densité par classe viennent compléter cette analyse en mettant en évidence la distribution interne des valeurs au sein de chaque catégorie. La végétation faible, située entre 0,2 et 0,4, présente une distribution resserrée avec un pic autour de 0,3, traduisant une faible variabilité et une présence limitée. La végétation moyenne, comprise entre 0,4 et 0,6, montre une distribution plus étalée avec un maximum autour de 0,55, indiquant une diversité de situations intermédiaires. Enfin, la végétation dense, au-delà de 0,6, domine largement la distribution avec un pic marqué autour de 0,65 à 0,70, confirmant la prédominance de surfaces fortement végétalisées. Cette structuration des densités traduit une organisation écologique caractérisée par un noyau majoritairement végétalisé, accompagné de zones de transition et de faibles surfaces dégradées, ce qui reflète un paysage globalement favorable au maintien de la biomasse végétale dans la région Analamanga.

3.1.5 Classement des valeurs NDVI et du gradient spatial Nord–Sud dans la région Analamanga en 2026

La figure ci-après présente une matrice de corrélation des taux de réussite entre les différentes universités, La figure ci-dessous présente une double approche analytique du NDVI dans la région Analamanga à travers, d'une part, la courbe des valeurs triées permettant d'observer la distribution cumulative des pixels, et d'autre part, l'évolution du NDVI moyen et médian selon un gradient spatial orienté du nord vers le sud. Cette représentation met en évidence la structure globale des niveaux de végétation ainsi que leur organisation spatiale le long d'un axe géographique.

Figure 5: Classement des valeurs NDVI et du gradient spatial Nord–Sud dans la région Analamanga en 2026



Source : Auteur 2026

Interprétation

La courbe NDVI triée met en évidence une progression régulière des valeurs, avec une forte concentration des pixels dans les classes de végétation moyenne à dense. Dès les premiers pourcentages cumulés, les valeurs dépassent rapidement 0,5, indiquant que la majorité des surfaces présentent déjà un niveau de végétation significatif. La courbe franchit le seuil de 0,6 aux alentours de 30 % des pixels, ce qui confirme la dominance de la végétation dense dans la région. En fin de distribution, les valeurs atteignent des niveaux élevés proches de 0,85 à 0,90, traduisant la présence de zones à forte biomasse végétale. Les classes correspondant aux valeurs inférieures à 0,2 restent marginales et concentrées dans les premiers percentiles, ce qui reflète la faible proportion de surfaces fortement urbanisées ou dénudées. Le gradient NDVI nord-sud montre une relative stabilité des valeurs autour de 0,62 à 0,66 sur une grande partie du profil, ce qui indique une homogénéité globale de la couverture végétale à l'échelle régionale. Cependant, des variations locales apparaissent, avec des fluctuations modérées autour de ces valeurs, traduisant la présence de paysages mixtes. Une augmentation plus marquée du NDVI est observée vers les positions finales du profil, où les valeurs atteignent environ 0,80 à 0,83, indiquant des zones à végétation plus dense situées probablement dans les parties méridionales ou périphériques. La proximité entre les courbes du NDVI moyen et médian suggère une distribution relativement équilibrée, sans forte asymétrie, ce qui confirme la cohérence des structures écologiques observées. Globalement, cette double analyse met en évidence un paysage majoritairement végétalisé, avec un gradient spatial modéré et des variations locales reflétant l'influence combinée des facteurs naturels et anthropiques.

3.2 Discussions

La présente étude met en évidence une structuration spatiale marquée de la végétation dans la région Analamanga à partir de l'analyse du NDVI. Les résultats obtenus confirment la prédominance des valeurs élevées, traduisant une couverture végétale globalement importante, avec une moyenne de 0,643 et une médiane de 0,633. Cette proximité entre les deux indicateurs traduit une distribution relativement équilibrée, suggérant que la majorité des surfaces présentent un niveau de végétation intermédiaire à dense. La forte proportion de pixels supérieurs à 0,6, estimée à environ 69,6 %, témoigne d'un paysage majoritairement végétalisé, tandis que les classes intermédiaires, comprises entre 0,4 et 0,6, représentent près de 30,4 %, révélant l'importance des zones de transition. L'analyse des profils spatiaux met en évidence l'existence d'un gradient environnemental structuré, caractérisé par des valeurs plus faibles du NDVI dans les zones centrales fortement urbanisées, notamment autour d'Antananarivo, et une augmentation progressive vers les périphéries. Les profils horizontaux et verticaux montrent une relative stabilité des valeurs entre 0,60 et 0,66 sur une grande partie du territoire, avec des augmentations ponctuelles atteignant 0,80 à 0,83 dans certaines zones périphériques, indiquant la présence de formations végétales plus denses. Ces variations traduisent l'influence combinée de l'urbanisation, de l'agriculture et des conditions naturelles sur la distribution de la végétation. Les analyses statistiques avancées, notamment les courbes cumulatives et les densités, confirment cette structuration en mettant en évidence une dominance des classes de végétation dense et une faible représentation des surfaces dégradées. La quasi-absence de valeurs inférieures à 0,2 indique que les zones fortement urbanisées ou dénudées restent spatialement limitées à l'échelle régionale, bien qu'elles puissent être localement significatives. Par ailleurs, les indicateurs d'hétérogénéité et de fragmentation du paysage apportent un éclairage complémentaire sur l'organisation spatiale du territoire. Les zones présentant une variance élevée du NDVI correspondent à des paysages hétérogènes, où coexistent plusieurs types d'occupation du sol, notamment en périphérie urbaine. À l'inverse, les zones à faible variance traduisent des espaces plus homogènes, qu'ils soient fortement urbanisés ou dominés par une végétation continue. L'indice de fragmentation met en évidence une mosaïque paysagère plus complexe dans les zones de transition, où plusieurs classes

environnementales coexistent à l'échelle locale. Ainsi, l'ensemble des résultats met en évidence un territoire caractérisé par une dominance de la végétation, mais également par une organisation spatiale contrastée, marquée par un gradient urbain-rural et une variabilité locale significative. Cette configuration reflète les dynamiques actuelles d'urbanisation et d'utilisation des terres, tout en soulignant l'intérêt du NDVI comme outil pertinent pour l'analyse environnementale et la compréhension des structures paysagères.

4 Conclusion

L'analyse multi-dimensionnelle du NDVI appliquée à la région Analamanga a permis de mettre en évidence la structure et l'organisation spatiale de la végétation à travers une approche combinant des méthodes statistiques, spatiales et écologiques. Les résultats obtenus montrent une dominance des valeurs élevées du NDVI, avec une moyenne de 0,643 et une médiane de 0,633, traduisant une couverture végétale globalement importante et relativement bien conservée à l'échelle régionale. La forte proportion de pixels supérieurs à 0,6, estimée à environ 69,6 %, confirme la prépondérance de la végétation dense, tandis que les classes intermédiaires reflètent la présence de paysages mixtes en transition. L'analyse des gradients spatiaux a permis d'identifier une structuration territoriale marquée, caractérisée par des valeurs plus faibles du NDVI dans les zones centrales urbanisées et une augmentation progressive vers les périphéries, où les valeurs atteignent localement 0,80 à 0,83. Cette organisation met en évidence l'influence de l'urbanisation sur la distribution de la végétation, ainsi que le rôle des espaces périphériques dans le maintien de la biomasse végétale. Les analyses de variance, de fragmentation et d'entropie ont également révélé une hétérogénéité spatiale modérée, associée à une mosaïque paysagère plus complexe dans les zones de transition, confirmée par des valeurs plus élevées de l'indice de Shannon. Ces résultats soulignent l'intérêt du NDVI comme indicateur fiable pour l'évaluation des dynamiques environnementales et la caractérisation des paysages. L'approche adoptée permet non seulement de quantifier l'état de la végétation, mais également de comprendre les interactions entre les facteurs naturels et anthropiques qui façonnent le territoire. Elle constitue ainsi un outil pertinent pour appuyer les politiques d'aménagement du territoire, de gestion durable des ressources naturelles et de planification urbaine dans la région Analamanga.

REFERENCES

- [1] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA.
- [2] Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- [3] Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press.
- [4] Eastman, J.R. (2016). *IDRISI GIS Analysis and Image Processing*. Clark Labs.
- [5] McGarigal, K., Cushman, S.A. & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. University of Massachusetts.
- [6] Turner, M.G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 171–197.
- [7] UN-Habitat (2020). *Urbanization and land use dynamics in Sub-Saharan Africa*. United Nations.
- [8] FTM (Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara). *Données cartographiques nationales de Madagascar*. Antananarivo.
- [9] BNGRC (Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes) (2018). *Base de données géospatiales pour la gestion territoriale*. Antananarivo.
- [10] USGS (United States Geological Survey) (2022). *EarthExplorer: Data Access Platform*. Disponible sur : <https://earthexplorer.usgs.gov>
- [11] Gillies, S. et al. (2013). *Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers*.
- [12] McKinney, W. (2010). *Data structures for statistical computing in Python*. Proceedings of the 9th Python in Science Conference.
- [13] Project Jupyter (2023). *Jupyter Notebook: Interactive Computing Environment*. Disponible sur : <https://jupyter.org>

- [14] Jensen, J.R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall.
- [15] Silverman, B.W. (1986). *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman & Hall.
- [16] Eastman, J.R. (2016). *IDRISI GIS Analysis and Image Processing*. Clark Labs.
- [17] McGarigal, K., Cushman, S.A. & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. University of Massachusetts.