International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/

Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 833-839

Influence De La Densité Du Bati Et Du Réseau Routier Sur La Variabilité Spatiale Du Ndvi A Antsirabe I

[1,1] RAVERONIRINA Harimbola Sahondra, [1,2] TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, [1,3]RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, [1,4]RAJAONARISON Eddie Franck

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

Auteur Correspondant : RAVERONIRINA Harimbola Sahondra

(cc) BY

Résumé: Cette étude analyse l'influence apparente de la densité du bâti et du réseau routier sur la variabilité spatiale du NDVI à Antsirabe I à partir de données eMODIS à 250 m de résolution. Les relations ont été examinées à l'échelle des pixels en confrontant le NDVI à la proportion de surface bâtie et à la densité routière, complétées par des moyennes par quantiles et leurs intervalles de confiance à 95 %. Les résultats montrent que la majorité des pixels présentent une surface bâtie inférieure à 20 %, associée principalement à des valeurs de NDVI comprises entre 0,20 et 0,35. La relation entre NDVI et densité du bâti demeure faible et fortement dispersée, bien que les cellules très urbanisées présentent rarement des valeurs élevées de végétation. Pour le réseau routier, le NDVI moyen reste proche de 0,25–0,28 pour des densités comprises entre 0 et 15 km/km², puis tend légèrement à diminuer aux densités supérieures. Quelques observations atypiques dépassent 0,80 de NDVI. Ces résultats indiquent que le bâti et le réseau routier participent à la structuration spatiale de la végétation, mais n'expliquent qu'une partie de sa variabilité à Antsirabe I.

Mots-clés : NDVI ; densité bâtie ; densité routière ; urbanisation ; Antsirabe I.

Abstract: This study analyzes the apparent influence of built-up density and road network density on the spatial variability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Antsirabe I, using eMODIS data at a spatial resolution of 250 m. The relationships were examined at the pixel level by relating NDVI to the proportion of built-up area and road density, complemented by quantile-based means and their 95% confidence intervals. The results show that the majority of pixels have a built-up surface proportion below 20%, mainly associated with NDVI values ranging from 0.20 to 0.35. The relationship between NDVI and built-up density remains weak and highly dispersed, although highly urbanized cells rarely exhibit high vegetation values. Regarding the road network, mean NDVI remains close to 0.25–0.28 for road densities ranging from 0 to 15 km/km², and then tends to decrease slightly at higher densities. A few atypical observations exhibit NDVI values exceeding 0.80. These results indicate that built-up areas and the road network contribute to the spatial structuring of vegetation, but explain only part of its variability in Antsirabe I.

Keywords: NDVI; built-up density; road density; urbanization; Antsirabe I.

1. INTRODUCTION

L'urbanisation transforme profondément l'organisation spatiale des surfaces terrestres en favorisant l'extension du bâti, des infrastructures et des surfaces imperméabilisées au détriment, dans de nombreux contextes, des espaces végétalisés. Cette transformation modifie la structure du paysage urbain et peut entraîner une fragmentation progressive du couvert végétal, avec

des conséquences sur les fonctions écologiques associées. À l'échelle mondiale, l'expansion urbaine constitue ainsi un facteur important de conversion des terres et de modification des écosystèmes [1]. Dans ce contexte, la télédétection offre un moyen efficace de caractériser la distribution et l'état de la végétation en milieu urbain, notamment à travers le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), largement utilisé pour représenter l'activité photosynthétique et la densité relative de la végétation [2]. L'intérêt du NDVI pour l'étude des espaces verts urbains repose notamment sur sa capacité à mettre en évidence les contrastes spatiaux entre surfaces végétalisées et surfaces fortement artificialisées. Les travaux consacrés à la télédétection des espaces verts montrent que l'analyse satellitaire permet d'étudier leur abondance, leur distribution et leur organisation à différentes échelles spatiales [3]. Les produits eMODIS développés par l'USGS sont particulièrement adaptés à ce type d'analyse, puisqu'ils fournissent des composites NDVI accompagnés d'informations de qualité et d'acquisition à une résolution spatiale de 250 m. Pour l'Afrique, ces produits sont disponibles sous forme de composites NDVI de dix jours, ce qui constitue une base opérationnelle pour l'étude de la végétation à l'échelle urbaine et périurbaine [4]. Parallèlement, la densité du bâti et celle du réseau routier constituent deux indicateurs importants de l'intensité de l'occupation urbaine. Une augmentation de la surface bâtie peut réduire l'espace disponible pour la végétation, tandis que les infrastructures routières contribuent à la fragmentation des paysages et modifient les continuités écologiques. Les réseaux routiers influencent également les flux hydrologiques, les caractéristiques des sols et l'organisation spatiale des habitats, ce qui justifie leur prise en compte dans les analyses environnementales urbaines [5]. Dans cette perspective, la présente étude vise à analyser l'influence de la densité du bâti et du réseau routier sur la variabilité spatiale du NDVI à Antsirabe I. L'approche repose sur des données eMODIS à 250 m, associées à des informations spatiales sur le bâti et le réseau routier. Les relations sont examinées à l'échelle des pixels au moyen de distributions individuelles, de moyennes par quantiles et d'intervalles de confiance à 95 %. L'objectif est de déterminer dans quelle mesure l'intensification du bâti et du réseau routier est associée aux variations du couvert végétal et d'identifier si ces deux composantes urbaines suffisent à expliquer la variabilité spatiale observée du NDVI.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Matériels utilisés

Les matériels mobilisés reposent principalement sur les images satellitaires eMODIS NDVI de l'USGS à 250 m de résolution spatiale, utilisées pour caractériser la distribution de la végétation à Antsirabe I et accompagnées des couches de qualité nécessaires au filtrage des observations [6]. Les informations relatives à la densité du bâti et au réseau routier ont été extraites de la base géographique OpenStreetMap, qui fournit des données vectorielles ouvertes sur les bâtiments et les infrastructures routières [7]. Les limites administratives d'Antsirabe I ont été utilisées pour délimiter précisément la zone d'étude. Le traitement des données raster et vectorielles a été réalisé sous Python, notamment avec Rasterio pour les données satellitaires et GeoPandas pour les couches géographiques [8,9]. Ces ressources ont permis d'harmoniser les données dans un même système de coordonnées, de calculer les indicateurs urbains par cellule de 250 m et d'analyser leurs relations avec le NDVI.

2.2 Méthodes adoptés

Les données eMODIS ont d'abord été découpées selon la limite d'Antsirabe I, reprojetées dans un système de coordonnées métrique et filtrées à partir des informations de qualité afin de conserver uniquement les pixels NDVI exploitables. Les données OpenStreetMap relatives aux bâtiments et aux routes ont ensuite été agrégées sur une grille de 250 m correspondant à la résolution du NDVI. La densité du bâti a été calculée comme la proportion de surface occupée par les bâtiments dans chaque cellule, tandis que la densité routière a été exprimée en kilomètres de routes par kilomètre carré. Les relations avec le NDVI ont été analysées à l'échelle des pixels, puis synthétisées par classes quantiles afin de mettre en évidence les tendances générales. Les moyennes de NDVI et leurs intervalles de confiance à 95 % ont été estimés par rééchantillonnage bootstrap, en utilisant des blocs spatiaux d'environ 1 km afin de limiter l'influence de l'autocorrélation entre pixels voisins [10–12].

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 833-839

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Distribution spatiale du NDVI eMODIS à 250 m et organisation du couvert végétal à Antsirabe I

La figure suivante présente la localisation de la zone d'étude d'Antsirabe I ainsi que la distribution spatiale du NDVI issue des données eMODIS à 250 m de résolution. La première carte situe le centre urbain estimé et la trame spatiale du territoire, tandis que la seconde met en évidence les contrastes de végétation à l'échelle intra-urbaine et périphérique.

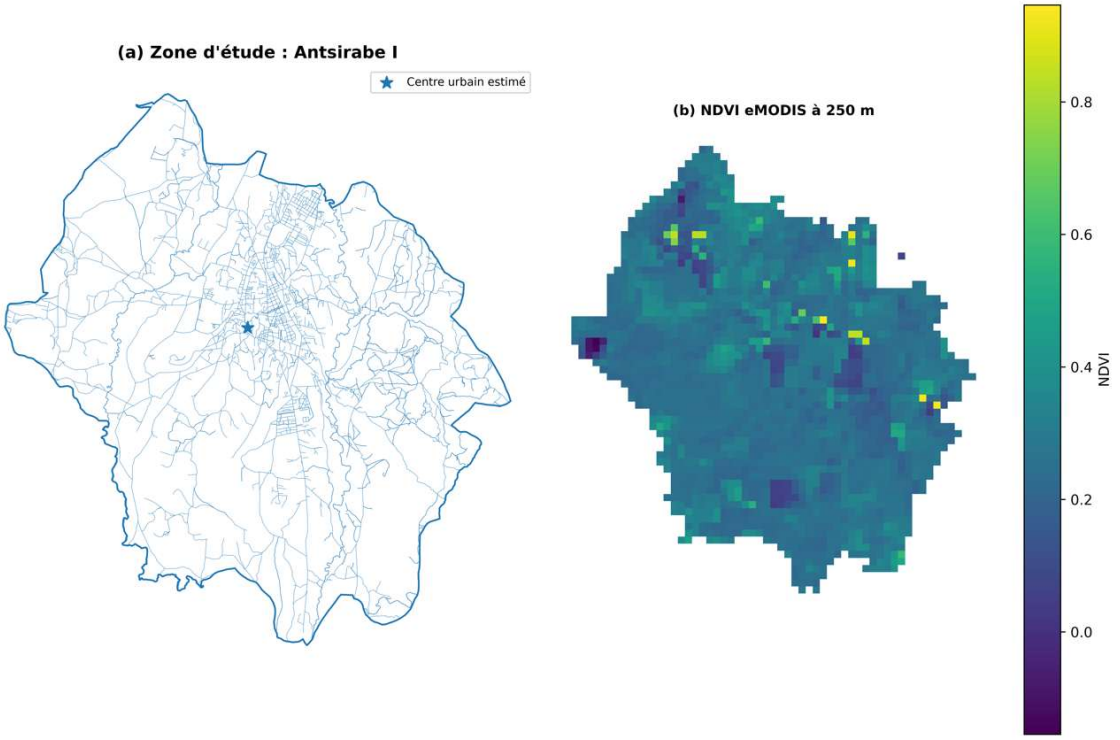


Figure 1: Distribution spatiale du NDVI eMODIS à 250 m et organisation du couvert végétal à Antsirabe I

Interprétation

Les valeurs du NDVI s'étendent approximativement de −0,15 à 0,95, avec une prédominance de valeurs comprises entre 0,20 et 0,40, traduisant une couverture végétale faible à modérée sur une grande partie du territoire. Des valeurs élevées, généralement comprises entre 0,60 et 0,90, apparaissent sous forme de noyaux localisés, notamment dans certains secteurs périphériques, et correspondent à des surfaces présentant une végétation plus dense ou plus active. À l'inverse, les valeurs proches de 0, voire légèrement négatives, indiquent des surfaces peu végétalisées ou dominées par des éléments minéraux, bâtis ou humides. Cette distribution met ainsi en évidence une forte hétérogénéité spatiale du couvert végétal à Antsirabe I, caractérisée par l'alternance de secteurs faiblement végétalisés et de poches localisées de végétation plus dense.

3.2 Variation du NDVI le long du gradient de distance au centre urbain à Antsirabe I

La figure ci-dessous présente, à gauche, la distance de chaque pixel au centre urbain estimé et, à droite, l'évolution du NDVI moyen le long de ce gradient urbain-rural. La courbe synthétise la valeur moyenne du NDVI par classe de distance, tandis que la zone ombrée représente l'intervalle interquartile et renseigne sur la variabilité spatiale du couvert végétal.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 833-839

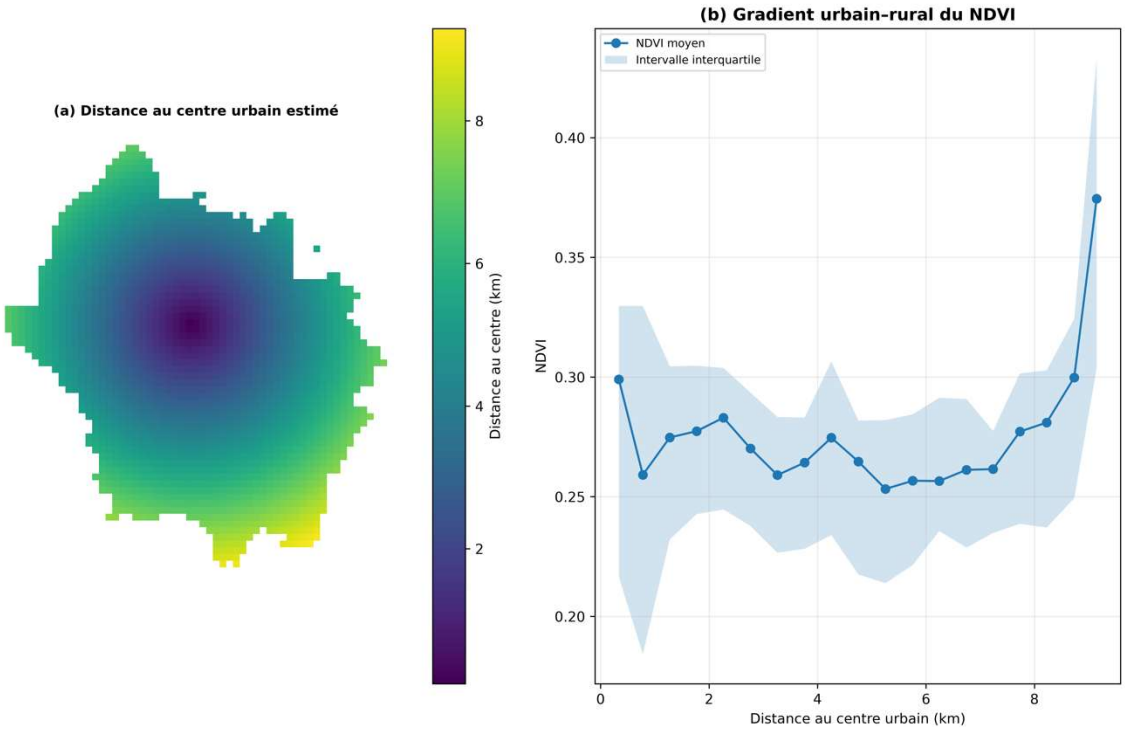


Figure 2: Variation du NDVI le long du gradient de distance au centre urbain à Antsirabe I

Interprétation

Le NDVI moyen reste relativement faible et stable dans les premiers kilomètres autour du centre urbain, avec des valeurs généralement comprises entre 0,25 et 0,30 jusqu'à environ 7 km. Les valeurs les plus basses apparaissent autour de 5 km, avec un NDVI moyen proche de 0,25, tandis qu'une augmentation progressive est observée à partir d'environ 7,5 km. Le NDVI atteint près de 0,30 à 8,7 km puis environ 0,37 à 9,1 km, traduisant une végétation plus importante dans les secteurs périphériques. L'intervalle interquartile s'élargit également aux distances extrêmes, indiquant une plus forte hétérogénéité spatiale. Dans l'ensemble, le profil met en évidence un gradient urbain-rural modéré, caractérisé par une végétation relativement limitée dans les secteurs centraux et intermédiaires et plus abondante en périphérie.

3.3 Relations entre le NDVI, la densité du bâti et la densité du réseau routier à Antsirabe I

La figure ci-dessous montre les relations entre le NDVI et deux indicateurs de pression urbaine à l'échelle des pixels de 250 m : la proportion de surface bâtie et la densité du réseau routier. Les points représentent les observations individuelles, tandis que les moyennes calculées par quantiles et leurs intervalles de confiance à 95 % permettent d'apprécier la tendance générale de ces relations.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 833-839

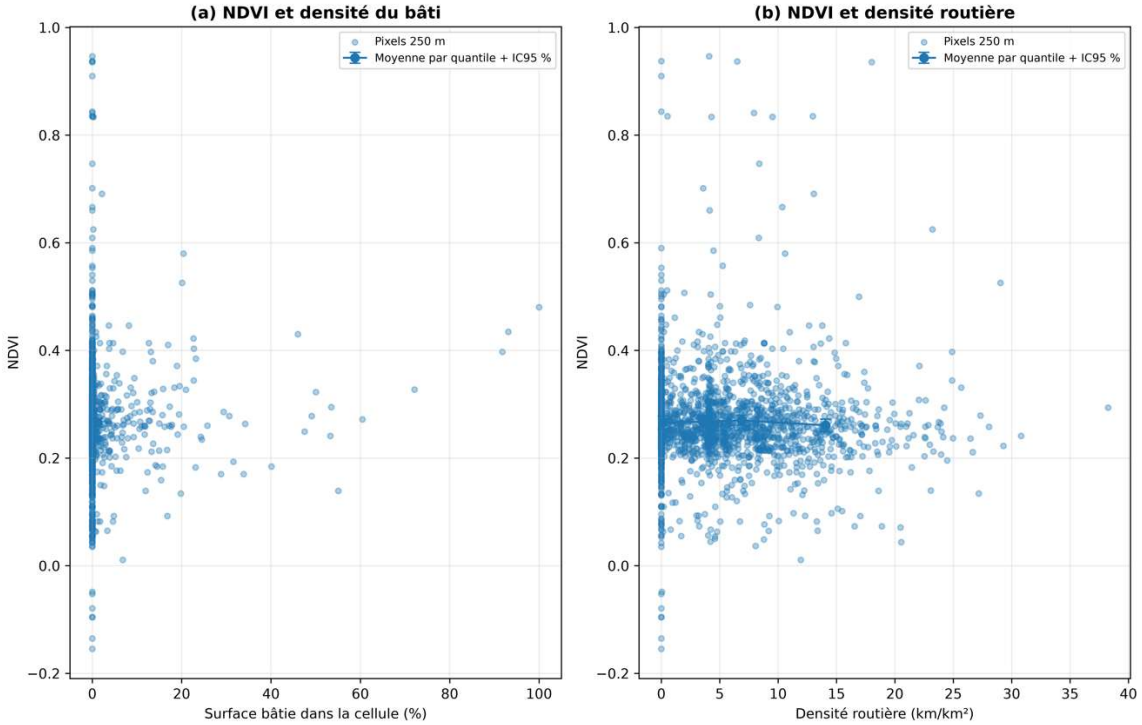


Figure 3: Relations entre le NDVI, la densité du bâti et la densité du réseau routier à Antsirabe I

Interprétation

La majorité des pixels présente une proportion bâtie inférieure à 20 %, avec des valeurs de NDVI principalement comprises entre 0,20 et 0,35. La relation entre NDVI et densité du bâti apparaît globalement faible, sans décroissance linéaire marquée, même si les secteurs les plus fortement bâtis présentent rarement des NDVI élevés. Pour le réseau routier, le NDVI moyen demeure approximativement compris entre 0,25 et 0,28 pour des densités allant de 0 à environ 15 km/km², puis tend légèrement à diminuer lorsque la densité routière augmente davantage. La forte dispersion des observations, ainsi que la présence de quelques valeurs extrêmes de NDVI supérieures à 0,8, indique que le bâti et le réseau routier ne suffisent pas, pris isolément, à expliquer la variabilité spatiale du NDVI à Antsirabe I.

3.4 Structure de dépendance spatiale et portée du NDVI à Antsirabe I estimées par semi-variogramme

La figure ci-dessous présente, à gauche, les anomalies locales du NDVI par rapport à la moyenne spatiale et, à droite, le semi-variogramme empirique ajusté par un modèle exponentiel. Cette représentation permet d'évaluer l'augmentation de la dissimilarité du NDVI avec la distance entre pixels et d'estimer la portée spatiale au-delà de laquelle la dépendance devient faible.

International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2026 Scholar AI LLC.
https://ijpsat.org/
Vol. 59 No. 2 October 2026, pp. 833-839

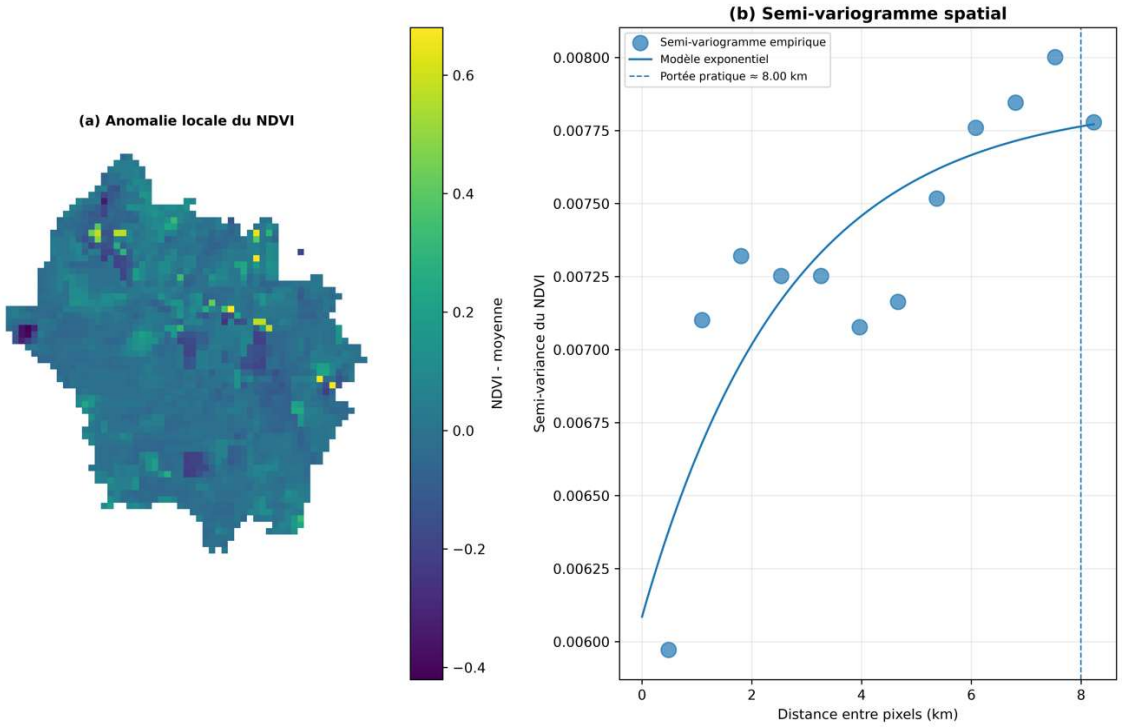


Figure 4 : Structure de dépendance spatiale et portée du NDVI à Antsirabe I estimées par semi-variogramme

Interprétation

La semi-variance est faible aux courtes distances, avec une valeur proche de 0,0060 vers 0,5 km, puis augmente progressivement pour atteindre environ 0,0072–0,0073 entre 2 et 3 km. Malgré quelques fluctuations entre 3 et 5 km, elle continue globalement à croître
jusqu'à environ 0,0078–0,0080 entre 6 et 8 km. Le modèle exponentiel estime une portée pratique d'environ 8 km, indiquant que les valeurs de NDVI demeurent spatialement dépendantes jusqu'à cette échelle. Au-delà, l'augmentation de la semi-variance devient très faible, ce qui traduit une perte progressive de similarité spatiale entre les pixels. Ces résultats confirment ainsi l'existence d'une structure spatiale du NDVI organisée à plusieurs échelles au sein d'Antsirabe I.

4. DISCUSSION

Les résultats montrent que la variabilité spatiale du NDVI à Antsirabe I n'est que partiellement associée à la densité du bâti et du réseau routier. La majorité des pixels présente une proportion bâtie inférieure à 20 %, pour des valeurs de NDVI principalement comprises entre 0,20 et 0,35, ce qui traduit une végétation faible à modérée dans les secteurs les plus urbanisés. Toutefois, l'absence d'une décroissance linéaire nette indique que l'augmentation de la densité bâtie n'entraîne pas systématiquement une diminution proportionnelle du NDVI. De manière comparable, le NDVI moyen reste globalement stable, autour de 0,25 à 0,28, pour des densités routières comprises entre 0 et 15 km/km², puis présente une légère diminution aux niveaux de densité plus élevés. La forte dispersion des observations, ainsi que la présence de quelques valeurs de NDVI supérieures à 0,80, montre que des facteurs locaux autres que le bâti et les routes interviennent dans l'organisation de la végétation. Cette hétérogénéité peut notamment refléter la présence d'espaces verts, de parcelles agricoles, de zones humides ou de secteurs périphériques faiblement artificialisés. Dans l'ensemble, les résultats suggèrent donc une influence réelle mais modérée des infrastructures urbaines sur le

NDVI, et confirment que la structure de la végétation à Antsirabe I résulte d'une combinaison de facteurs urbains et environnementaux.

5. CONCLUSION

Les résultats montrent que la densité du bâti et du réseau routier contribue à expliquer une partie de la variabilité spatiale du NDVI à Antsirabe I, sans toutefois constituer des facteurs suffisants pour rendre compte à eux seuls de l'organisation de la végétation. Les valeurs de NDVI restent majoritairement comprises entre 0,20 et 0,35 dans les secteurs où la proportion bâtie demeure inférieure à 20 %, tandis que le NDVI moyen se maintient autour de 0,25 à 0,28 pour des densités routières comprises entre 0 et 15 km/km². La légère diminution observée aux niveaux de densité urbaine les plus élevés confirme une relation globalement négative, mais de faible intensité. La forte dispersion des observations et la présence de valeurs de NDVI supérieures à 0,80 indiquent cependant l'intervention d'autres facteurs environnementaux et paysagers. Ainsi, la végétation d'Antsirabe I apparaît structurée par une combinaison de pressions urbaines et de caractéristiques locales, ce qui justifie l'intégration de variables complémentaires dans les analyses futures.

RÉFÉRENCE

[1] Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(40), 16083–16088. https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109.

[2] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

[3] Shahtahmassebi, A. R., Li, C., Fan, Y., et al. (2021). Remote sensing of urban green spaces: A review. Urban Forestry & Urban Greening, 57, 126946. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946.

[4] Jenkerson, C. B., Maiersperger, T., & Schmidt, G. (2010). eMODIS: A User-Friendly Data Source. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1055. https://doi.org/10.3133/ofr20101055.

[5] Forman, R. T. T., & Alexander, L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. Annual Review of Ecology and Systematics, 29, 207–231. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207.

[6] Jenkerson, C. B., Maiersperger, T., & Schmidt, G. (2010). eMODIS: A User-Friendly Data Source. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1055.

[7] OpenStreetMap Contributors. OpenStreetMap Data and Copyright. OpenStreetMap Foundation.

[8] Gillies, S. et al. Rasterio: Geospatial Raster I/O for Python. Rasterio Documentation.

[9] GeoPandas Developers. GeoPandas: Python Tools for Geographic Data. GeoPandas Documentation.

[10] Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). An Introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall/CRC.

[11] Lahiri, S. N. (2003). Resampling Methods for Dependent Data. Springer.

[12] Cressie, N. (1993). Statistics for Spatial Data. Wiley.