

Modélisation Spatiale Des Habitations A Betafo

RANDRIATAHINAMALALA Livaso Moratiavina¹, Docteur RAHAAMANANA Jasmin¹, Professeur Titulaire RANDRIANJA Roger¹

¹Université d'Antananarivo

Auteur correspondant: RANDRIATAHINAMALALA Livaso Moratiavina, livasou@gmail.com



Résumé: Dans le district de Betafo, la répartition des habitations présente de fortes variations entre les communes, liées à la superficie, à la densité et à l'organisation spatiale du peuplement. Cette étude vise à modéliser cette distribution afin d'identifier les principales formes de concentration et les relations entre les indicateurs communaux. L'analyse porte sur 18 communes et combine corrélations, valeurs normalisées, courbe de Lorenz, indice de Gini et représentations spatiales par grille et hexagones. Les résultats montrent une forte corrélation positive entre la superficie communale et le nombre d'habitations ($r = 0,84$), tandis que la densité est négativement liée à l'espacement moyen entre habitations ($r = -0,69$). Andrembesoa se distingue avec 17 habitations sur environ 1 220 km², mais une faible densité d'environ 1,4 habitation pour 100 km². À l'inverse, Alakamisy Anativato et Antohobe atteignent des densités proches de 6,5 habitations pour 100 km². L'indice de Gini de 0,386 révèle une concentration modérée des habitations entre les communes. Les analyses spatiales montrent enfin une dispersion dominante, avec généralement 0 à 1 habitation par unité spatiale et un maximum local de 2 habitations par hexagone. Ces résultats fournissent ainsi une base quantitative pour caractériser l'organisation territoriale de l'habitat à Betafo.

Mots-clés : Modélisation spatiale ; Habitations ; Concentration ; Densité ; Betafo.

Abstract: In the Betafo District, the distribution of housing shows marked variations among municipalities, mainly related to municipal area, density, and the spatial organization of settlements. This study aims to model this distribution in order to identify the main patterns of concentration and the relationships between municipal indicators. The analysis covers 18 municipalities and combines correlation analysis, normalized values, the Lorenz curve, the Gini index, and spatial representations using grids and hexagons. The results show a strong positive correlation between municipal area and the number of housing units ($r = 0.84$), while density is negatively related to the mean nearest-neighbour distance ($r = -0.69$). Andrembesoa stands out with 17 housing units over approximately 1,220 km², but with a low density of about 1.4 housing units per 100 km². In contrast, Alakamisy Anativato and Antohobe reach densities close to 6.5 housing units per 100 km². The Gini index of 0.386 indicates a moderate concentration of housing among municipalities. Spatial analyses further reveal a predominantly dispersed pattern, generally ranging from 0 to 1 housing unit per spatial unit, with a local maximum of 2 housing units per hexagon. These results provide a quantitative basis for characterizing the territorial organization of housing in Betafo.

Keywords: Spatial modelling; Housing; Concentration; Density; Betafo.

1. INTRODUCTION

La compréhension de la répartition des habitations constitue un enjeu important pour l'analyse et la planification territoriales. Les phénomènes géographiques sont rarement indépendants dans l'espace, les entités proches pouvant présenter des caractéristiques similaires [1]. L'analyse spatiale permet ainsi de détecter les concentrations, les dispersions et les disparités locales à partir d'indicateurs statistiques et cartographiques [2]. Dans les territoires ruraux, la distribution des habitations dépend notamment de la superficie disponible, de la densité et de l'espacement entre les implantations [3]. L'utilisation de mesures de concentration, telles que la courbe de Lorenz et l'indice de Gini, complète cette approche en quantifiant les inégalités de répartition territoriale

[4]. Les systèmes d'information géographique constituent alors un outil pertinent pour intégrer, analyser et représenter ces différentes dimensions spatiales [5]. Dans ce contexte, cette étude vise à modéliser la distribution spatiale des habitations dans le district de Betafo, en analysant leur répartition communale, leur densité, leur niveau de concentration et les relations entre les principales variables spatiales. L'approche combine analyses statistiques, corrélations, indice de Gini, distance au plus proche voisin, grilles spatiales et représentation par hexagones afin de caractériser les principaux profils d'occupation du territoire.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les matériels mobilisés pour cette étude reposent principalement sur des données géographiques et statistiques relatives au district de Betafo. Les données SIG provenant du Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM) ont servi de référentiel cartographique pour la délimitation du district et des communes ainsi que pour la localisation et l'organisation des objets géographiques étudiés [6]. Elles ont été complétées par les documents issus du Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-3) de l'Institut National de la Statistique de Madagascar, utilisés comme source documentaire pour caractériser le contexte démographique et territorial des communes [7]. L'INSTAT met notamment à disposition les résultats globaux, les rapports thématiques et l'Atlas démographique issus du RGPH-3 réalisé en 2018. Le traitement des données a été réalisé sous environnement Python. La bibliothèque Pandas a été utilisée pour la structuration, le nettoyage et l'organisation des tableaux de données communales, tandis que NumPy a facilité les opérations numériques et la manipulation des variables quantitatives [8], [9]. GeoPandas a permis d'intégrer les données attributaires aux géométries et d'effectuer les traitements relatifs aux données vectorielles et aux relations spatiales entre les différentes entités géographiques. GeoPandas étend notamment les structures de données de Pandas afin de permettre la manipulation directe de géométries et de données géospatiales [10].

La modélisation a d'abord consisté à harmoniser les données géographiques dans un système de coordonnées projetées adapté aux mesures de distances et de superficies. Les habitations ont ensuite été rattachées aux communes correspondantes par traitement spatial, permettant de calculer pour chaque commune le nombre d'habitations, la superficie, la part relative des habitations et leur densité. Une normalisation des variables sur une échelle comprise entre zéro et un a également été appliquée afin de rendre comparables des indicateurs exprimés dans des unités différentes. Ce type de transformation est couramment utilisé pour ramener plusieurs variables quantitatives dans une plage commune avant une comparaison multivariée [11]. Les relations entre les variables communales ont été explorées au moyen du coefficient de corrélation de Pearson, notamment entre le nombre d'habitations, la superficie, la densité, la part communale et la distance moyenne au voisin le plus proche. Cette approche permet d'apprécier le sens et l'intensité des relations linéaires entre deux variables quantitatives [12]. Les coefficients obtenus ont été représentés sous forme de matrice de corrélation et de carte thermique afin de faciliter l'identification des associations positives ou négatives entre les indicateurs. L'organisation spatiale des habitations a également été examinée à partir de la distance au plus proche voisin. Pour chaque habitation, la distance vers l'habitation la plus proche a été déterminée, puis synthétisée à l'échelle communale. Cette méthode permet de distinguer des situations caractérisées par un rapprochement important des points de celles où les implantations sont davantage espacées. L'analyse du plus proche voisin constitue une méthode classique d'étude de la configuration des distributions ponctuelles dans l'espace [13]. La concentration spatiale a ensuite été étudiée à plusieurs échelles. Une agrégation des habitations dans des mailles régulières et des cellules hexagonales a permis de compter le nombre de points présents dans chaque unité spatiale et de mettre en évidence les secteurs présentant les concentrations locales les plus fortes. En complément, la répartition des habitations entre les communes a été analysée à l'aide de la courbe de Lorenz et de l'indice de Gini afin d'évaluer le degré d'inégalité de leur distribution territoriale. Enfin, les indicateurs normalisés ont été comparés par représentation multivariée, notamment au moyen d'une carte thermique et d'un diagramme radar pour les communes présentant les effectifs d'habitations les plus importants. Les représentations graphiques et cartographiques ont été réalisées avec Matplotlib et les outils de visualisation associés, qui permettent la production de graphiques scientifiques et de représentations spatiales sous Python.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Modélisation spatiale de la concentration des habitations dans le district de Betafo

La figure 1 suivante présente la distribution spatiale des habitations dans le district de Betafo à partir de deux représentations complémentaires : une surface de densité lissée en deux dimensions et une carte de chaleur associée à des courbes de niveau. La surface lissée a été estimée avec des bandes passantes d'environ 6 611 m selon l'axe Est-Ouest et 9 249 m selon l'axe Nord-Sud, permettant d'identifier les principaux foyers de concentration de l'habitat.

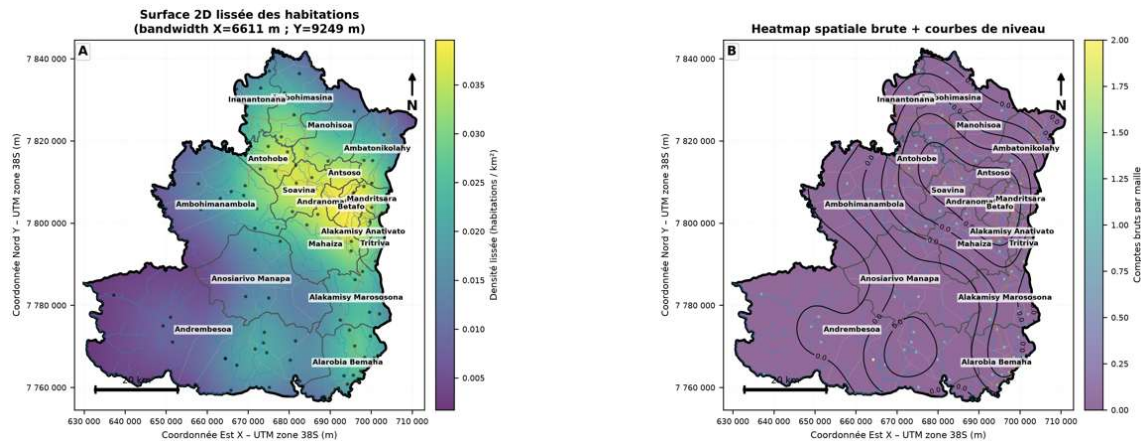


Figure 1: Modélisation spatiale de la concentration des habitations dans le district de Betafo

Source : Auteur

Interprétation

Les résultats montrent une répartition inégale des habitations, avec une concentration plus importante dans la partie centrale et centre-est du district, notamment autour de Soavina, Andranomafana, Betafo, Antsoha et Mandritsara. Dans ces secteurs, la densité lissée atteint approximativement 0,035 à 0,039 habitation/km², contre des valeurs généralement inférieures à 0,010 habitation/km² dans certaines zones périphériques, notamment vers le sud-ouest. La carte de chaleur confirme cette organisation en faisant apparaître localement jusqu'à 2 habitations par maille, principalement dans le centre et l'est du district. Les courbes de niveau matérialisent également plusieurs noyaux secondaires, notamment autour d'Andrembesoa et dans le secteur méridional. Cette configuration met en évidence des espaces où la proximité entre zones habitées et secteurs potentiellement miniers pourrait accroître l'exposition des populations aux effets socio-économiques et environnementaux liés à l'exploitation minière artisanale.

3.2 Répartition communale et concentration spatiale des habitations

La figure 2 ci-dessous caractérise l'organisation spatiale des habitations dans le district de Betafo à travers quatre indicateurs complémentaires : le nombre d'habitations par commune, leur densité rapportée à 100 km², la distance au plus proche voisin et leur contribution cumulée selon le diagramme de Pareto. Ces indicateurs permettent d'identifier les principaux foyers d'habitat et leur degré de concentration territoriale.

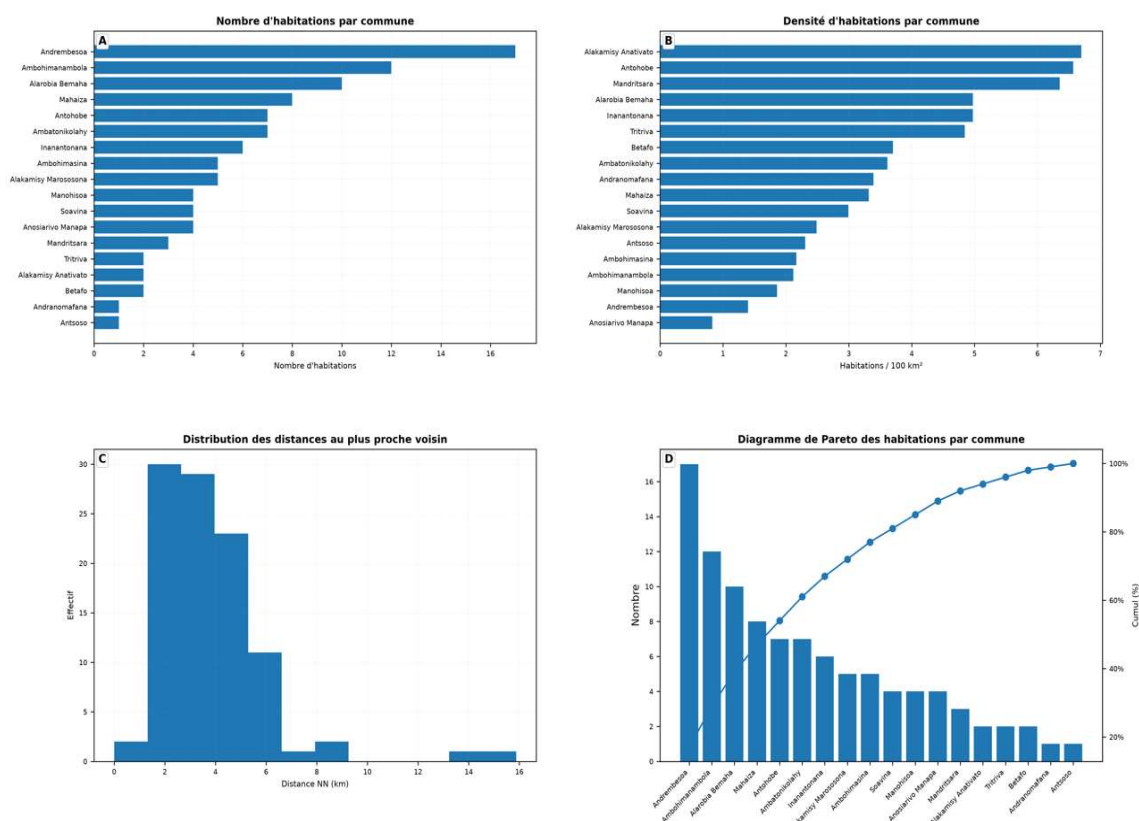


Figure 2: Répartition communale et concentration spatiale des habitations

Source : Auteur

Interprétation

Au total, 100 habitations sont recensées. Andrembesoa en regroupe le plus grand nombre avec 17 habitations (17 %), suivie d'Ambohimambola (12 %), d'Alarobia Bemaha (10 %) et de Mahaiza (8 %). Toutefois, la densité la plus élevée est observée à Alakamisy Anativato avec environ 6,7 habitations/100 km², devant Antohobe et Mandritsara, qui dépassent 6 habitations/100 km². Cette différence montre qu'un nombre élevé d'habitations ne correspond pas nécessairement à une forte densité spatiale. La distribution des distances au plus proche voisin indique que la majorité des habitations se situe à environ 1 à 5 km les unes des autres, tandis que quelques unités isolées atteignent près de 14 à 16 km. Le diagramme de Pareto montre enfin que les six premières communes concentrent environ 61 % des habitations, et les dix premières près de 81 %. Ces résultats permettent d'identifier les zones d'habitat à considérer prioritairement lors du croisement spatial avec les zones d'exploitation minière artisanale afin d'évaluer l'exposition potentielle des populations aux impacts socio-économiques et environnementaux.

3.3 Analyse multivariée et distribution spatiale des habitations

La figure 3 ci-dessous présente conjointement les relations entre les principales métriques communales, leur variation d'une commune à l'autre et la répartition spatiale des habitations dans le district de Betafo. Elle permet ainsi d'identifier les variables fortement associées et de mettre en évidence les zones de concentration ou de dispersion des habitations.

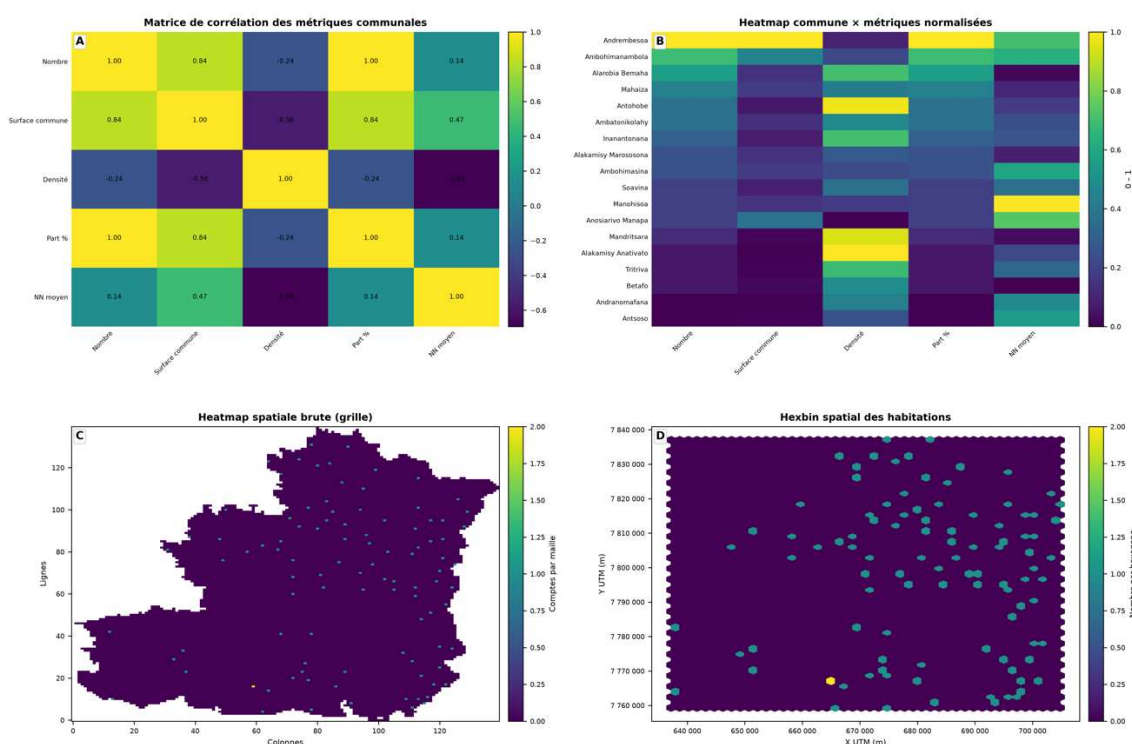


Figure 3: Analyse multivariée et distribution spatiale des habitations

Source : Auteur

Interprétation

La matrice de corrélation montre une relation positive forte entre le nombre d'habitations et la superficie communale, avec un coefficient de 0,84. Le nombre d'habitations est parfaitement corrélé à la part communale, avec $r = 1,00$, ce qui s'explique par le fait que cette part est directement liée au nombre observé. La densité présente au contraire une corrélation négative avec la superficie ($r = -0,56$) et surtout avec la distance moyenne au plus proche voisin, notée NN moyen ($r = -0,69$). Ainsi, les communes les plus denses tendent à présenter des habitations plus rapprochées. La relation entre la superficie et le NN moyen reste modérément positive ($r = 0,47$). Le heatmap des valeurs normalisées, comprises entre 0 et 1, confirme une forte hétérogénéité entre les communes. Andrembesoa se distingue notamment par des valeurs maximales ou proches de 1 pour le nombre d'habitations, la superficie et la part communale, tandis que certaines communes comme Antohobe, Mandritsara et Alakamisy Anavato présentent des niveaux élevés de densité. Manohisoa se caractérise par la valeur normalisée la plus élevée du NN moyen, proche de 1, traduisant un espacement relativement important entre les habitations. Enfin, les représentations spatiales montrent une distribution globalement dispersée des habitations. Les effectifs par maille ou par hexagone varient principalement entre 0 et 1, avec de rares unités atteignant 2 habitations. Le maximum de 2 habitations par hexagone apparaît notamment autour de $X \approx 665\,000$ m et $Y \approx 7\,767\,000$ m UTM, ce qui indique que les fortes concentrations locales restent limitées dans le district de Betafo.

3.4 Relations entre superficie, densité et concentration des habitations dans les communes du district de Betafo

La figure 4 ci-après met en relation la superficie communale, le nombre et la densité des habitations, tout en évaluant leur niveau de concentration entre les communes du district de Betafo. Elle permet également de comparer le profil des cinq communes comptant le plus d'habitations.

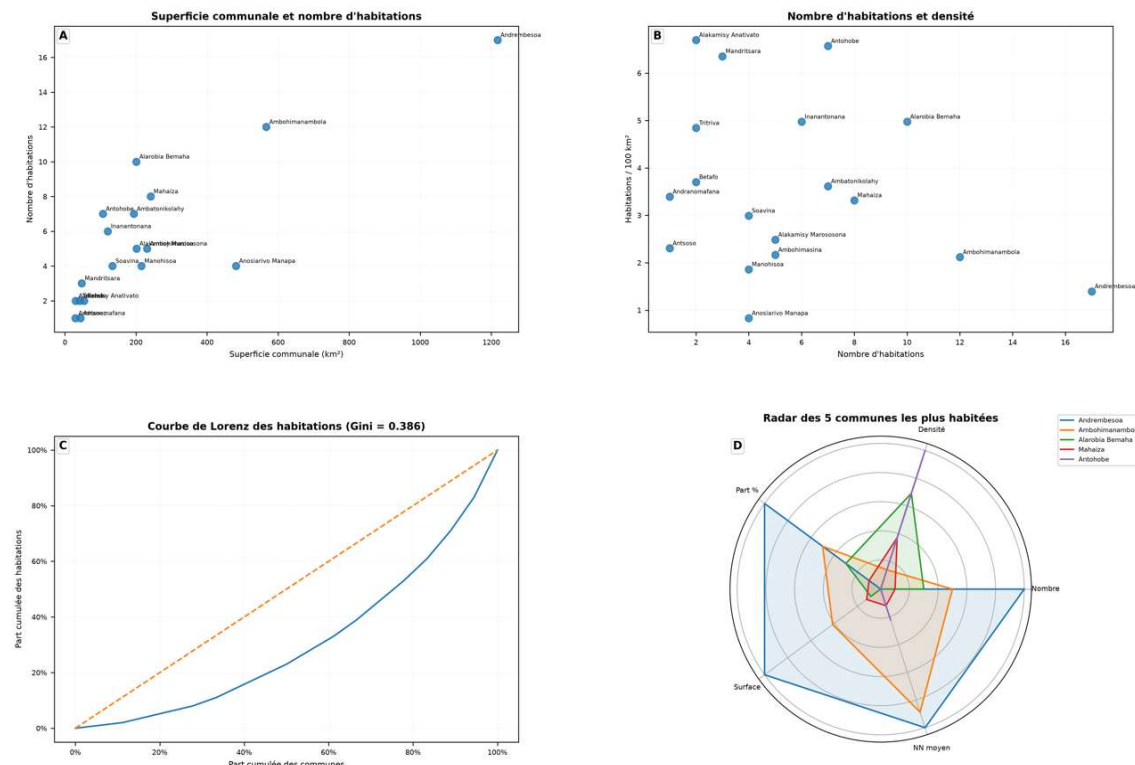


Figure 4: Relations entre superficie, densité et concentration des habitations dans les communes du district de Betafo
Source : Auteur

Interprétation

La relation entre superficie et nombre d'habitations montre une tendance globalement positive. Andrembesoa se distingue nettement avec environ 1 220 km² et 17 habitations, suivie d'Ambohimanambola avec près de 570 km² et 12 habitations. Alarobia Bemaha compte 10 habitations pour environ 200 km², tandis que Mahaiza en compte 8 et Antohobe 7. Toutefois, la superficie n'explique pas à elle seule le nombre d'habitations, comme le montre Anosiarivo Manapa, qui possède une superficie proche de 480 km² mais seulement 4 habitations. La densité fait apparaître une configuration différente. Les niveaux les plus élevés sont observés à Alakamisy Anativato, Antohobe et Mandritsara, avec environ 6,3 à 6,7 habitations pour 100 km². À l'inverse, Andrembesoa, malgré ses 17 habitations, présente une faible densité d'environ 1,4 habitation pour 100 km², en raison de sa très grande superficie. Ambohimanambola présente également une densité relativement faible, proche de 2,1 habitations pour 100 km². La courbe de Lorenz confirme une répartition modérément inégale des habitations entre les communes, avec un indice de Gini de 0,386. L'écart entre la courbe observée et la droite d'égalité indique qu'une partie relativement limitée des communes concentre une proportion importante des habitations, sans toutefois révéler une concentration extrême. Enfin, le diagramme radar souligne la diversité des profils des cinq communes les plus habitées. Andrembesoa domine par le nombre d'habitations, la superficie, la part relative et l'espacement moyen entre habitations, tandis qu'Antohobe se distingue surtout par sa forte densité. Ces résultats montrent que le poids résidentiel d'une commune dépend à la fois de son étendue territoriale, du nombre d'habitations et de leur degré de concentration spatiale.

4. DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une organisation spatiale contrastée des habitations dans le district de Betafo. La forte corrélation entre la superficie communale et le nombre d'habitations ($r = 0,84$) montre que les communes les plus étendues

tendent globalement à regrouper davantage d'habitations. Toutefois, cette relation n'est pas systématique, car certaines communes de grande superficie conservent une faible densité résidentielle. Le cas d'Andrembesoa illustre bien cette situation : avec 17 habitations sur environ 1 220 km², cette commune concentre le plus grand effectif observé, mais sa densité reste faible, autour de 1,4 habitation pour 100 km². À l'inverse, des communes comme Alakamisy Anativato et Antohobe présentent des densités proches de 6,5 habitations pour 100 km², traduisant une occupation plus concentrée de l'espace. La corrélation négative entre la densité et la distance moyenne au plus proche voisin ($r = -0,69$) confirme que les zones les plus denses sont caractérisées par un rapprochement plus important des habitations. L'indice de Gini de 0,386 indique par ailleurs une concentration modérée des habitations entre les communes. Enfin, les analyses par mailles et par hexagones montrent une distribution globalement dispersée, avec généralement 0 à 1 habitation par unité spatiale et un maximum local de 2 habitations. Ces résultats traduisent ainsi une occupation résidentielle hétérogène et spatialement peu concentrée à l'échelle du district de Betafo.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser la distribution spatiale des habitations dans le district de Betafo à partir d'indicateurs statistiques et cartographiques complémentaires. Les résultats montrent que la répartition des habitations varie fortement d'une commune à l'autre et dépend à la fois de la superficie, de la densité et du degré d'espacement entre les implantations. La forte corrélation entre la superficie communale et le nombre d'habitations ($r = 0,84$) met en évidence une tendance générale à l'augmentation des effectifs dans les communes les plus étendues. Toutefois, les niveaux de densité restent contrastés, comme l'illustre Andrembesoa, qui regroupe le plus grand nombre d'habitations mais conserve une faible densité. La relation négative entre densité et distance au plus proche voisin ($r = -0,69$) confirme que les secteurs les plus denses présentent des habitations plus rapprochées. L'indice de Gini de 0,386 traduit une concentration modérée entre les communes, tandis que les analyses par mailles et par hexagones révèlent une organisation globalement dispersée. La modélisation spatiale met ainsi en évidence une occupation résidentielle hétérogène dans le district de Betafo et fournit une base utile pour la planification territoriale, l'aménagement communal et l'orientation des futures analyses spatiales.

REFERENCES

- [1] Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46, 234–240.
- [2] Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93–115.
- [3] Yang, R., Xu, Q., & Long, H. (2016). Spatial distribution characteristics and optimized reconstruction analysis of China's rural settlements during the process of rapid urbanization. *Journal of Rural Studies*, 47, 413–424.
- [4] Benassi, F., Mucciardi, M., & Pirrotta, G. (2023). Looking for a New Approach to Measuring the Spatial Concentration of the Human Population. *Journal of Official Statistics*, 39(3), 285–324.
- [5] UN-Habitat. (2008). GIS as a Planning Support System for the Planning of Harmonious Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.
- [6] Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM). Données SIG et fonds cartographiques de référence utilisés pour l'analyse territoriale du district de Betafo. Antananarivo, Madagascar.
- [7] INSTAT. (2021). Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de Madagascar (RGPH-3) : Résultats globaux. Institut National de la Statistique, Antananarivo, Madagascar.
- [8] McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 56–61.
- [9] Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362.
- [10] Fleischmann, M., Van den Bossche, J., Jordahl, K., et al. (2026). GeoPandas: Fundamental data structures for vector spatial data in Python. *Computers, Environment and Urban Systems*, 130, 102495.

- [11] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- [12] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272.
- [13] Clark, P. J. & Evans, F. C. (1954). Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations. *Ecology*, 35(4), 445–453.