



Analyse multivariée des signatures spatiales et différenciation des profils urbains et environnementaux des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra

^{1,1} RAKOTOARIVELO José Alain Pachou ^{1,2} TOVONIRINA Mamiharizo Jackie, ^{1,3} RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa

¹Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d'Antananarivo

RESUME : Cette étude analyse les signatures spatiales et la différenciation des profils urbains et environnementaux des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra à partir d'une approche multivariée intégrant topographie, bâti, réseau routier, végétation et hydrographie. L'analyse en composantes principales montre que les deux premiers axes expliquent 63,8 % de la variance totale, avec 43,7 % pour PC1 et 20,1 % pour PC2, tandis que les trois premiers axes atteignent 80,2 %. L'analyse factorielle multiple confirme cette structuration, avec 42,9 % de variance expliquée par MFA1 et 19,3 % par MFA2. Les corrélations de Spearman révèlent une forte association entre le bâti et le réseau routier ($\rho = 0,74$), alors que la proximité hydrographique est négativement corrélée au réseau routier ($\rho = -0,42$) et à la végétation ($\rho = -0,35$). Les profils standardisés mettent en évidence un 1er arrondissement fortement urbanisé, tandis que le 6e se distingue par une forte influence hydrographique. Les distances euclidiennes confirment cette différenciation, avec une proximité minimale entre les 3e et 5e arrondissements (2,00) et un contraste maximal entre les 3e et 6e (4,46). Ces résultats révèlent une organisation territoriale fondée sur des gradients urbains, topographiques et environnementaux complémentaires.

Mots-clés : analyse multivariée ; signatures spatiales ; profils territoriaux ; urbanisation ; Antananarivo Renivohitra.

ABSTRACT: This study analyzes the spatial signatures and differentiation of urban and environmental profiles across the six districts of Antananarivo Renivohitra using a multivariate approach integrating topography, the built environment, road networks, vegetation, and hydrography. Principal Component Analysis (PCA) shows that the first two components explain 63.8% of the total variance, with 43.7% accounted for by PC1 and 20.1% by PC2, while the first three components jointly explain 80.2%. Multiple Factor Analysis (MFA) confirms this structure, with MFA1 explaining 42.9% of the variance and MFA2 19.3%. Spearman correlations reveal a strong association between the built environment and the road network ($\rho = 0.74$), whereas hydrographic proximity is negatively correlated with the road network ($\rho = -0.42$) and vegetation ($\rho = -0.35$). Standardized profiles highlight a highly urbanized 1st District, while the 6th District is characterized by a strong hydrographic influence. Euclidean distances further confirm this differentiation, with the smallest distance observed between the 3rd and 5th Districts (2.00) and the greatest contrast between the 3rd and 6th Districts (4.46). These findings reveal a territorial organization structured by complementary urban, topographic, and environmental gradients.

Keywords: multivariate analysis; spatial signatures; territorial profiles; urbanization; Antananarivo Renivohitra.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23323225>

1 Introduction

L'analyse des structures urbaines contemporaines nécessite de dépasser les approches descriptives fondées sur un indicateur isolé, car l'organisation territoriale résulte de l'interaction simultanée entre occupation du sol, accessibilité, topographie, végétation et hydrographie. Dans les villes en forte croissance, ces interactions produisent des configurations spatiales contrastées qui influencent la densification, la mobilité, l'exposition aux contraintes environnementales et les possibilités d'aménagement. À Madagascar, cette problématique est particulièrement importante : Antananarivo concentre une part majeure des fonctions économiques et administratives du pays, tandis que l'urbanisation rapide s'accompagne d'une expansion souvent insuffisamment planifiée et d'une forte pression sur les infrastructures et les espaces à risque [1]. À l'échelle intra-urbaine, l'identification de ces contrastes suppose des méthodes capables de synthétiser plusieurs dimensions territoriales tout en conservant leur structure statistique. Des travaux récents menés sur Antananarivo ont montré l'intérêt d'approches multidimensionnelles et de l'analyse en composantes principales pour révéler des disparités spatiales qui peuvent rester masquées lorsqu'elles sont étudiées à des échelles agrégées [2]. L'analyse en composantes principales constitue en effet une méthode de référence pour réduire la dimension d'un jeu de données corrélées et extraire des axes synthétiques représentant l'essentiel de la variabilité observée [3]. Elle permet ainsi d'identifier les gradients dominants et de positionner les unités spatiales selon leurs caractéristiques relatives. La corrélation de rang de Spearman complète cette lecture en mesurant l'intensité et le sens des associations monotones entre variables sans exiger une relation linéaire stricte [4]. Lorsque les variables sont organisées en groupes conceptuels, l'analyse factorielle multiple offre un cadre particulièrement adapté, car elle équilibre l'influence des différents groupes avant leur analyse conjointe et permet d'examiner simultanément les structures communes et spécifiques [5]. Cette approche est largement mobilisée en analyse multivariée lorsque plusieurs familles de variables décrivent les mêmes observations [6]. Dans ce contexte, la présente étude vise à caractériser les signatures spatiales et à différencier les profils urbains et environnementaux des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra. L'analyse repose sur six variables décrivant le relief, les objets topographiques, le bâti, le réseau routier, la végétation et la proximité hydrographique. Les signatures dominantes, les corrélations de Spearman, l'ACP, l'analyse factorielle multiple, les profils standardisés et les distances euclidiennes sont combinés afin d'identifier les gradients territoriaux, les similarités et les oppositions entre arrondissements. Cette démarche vise à fournir une lecture intégrée, quantitative et reproductible de la différenciation intra-urbaine, susceptible d'appuyer la compréhension des structures spatiales et la planification territoriale. Elle permet également de distinguer les secteurs dominés par les composantes urbaines de ceux davantage structurés par les facteurs topographiques et environnementaux.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Les matériels mobilisés pour cette étude reposent principalement sur des bases de données géographiques vectorielles décrivant les limites administratives, le tissu urbain et les composantes environnementales d'Antananarivo Renivohitra. Les données administratives et cartographiques de référence ont été appuyées par les informations géospatiales du Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM), autorité nationale compétente en matière de cartographie et d'information géographique [7]. Les données disponibles auprès du Bureau du Cadastre Minier de Madagascar (BCMM) ont également été considérées comme source institutionnelle complémentaire pour le contrôle du contexte territorial [8]. Les principales couches thématiques utilisées pour l'analyse multivariée proviennent toutefois de la base OSM2IGEO-Madagascar, constituée à partir des données OpenStreetMap et structurée pour une exploitation sous SIG [9]. Les couches relatives au bâti, au réseau routier, à la végétation, au réseau hydrographique et aux objets topographiques ont été extraites puis découpées selon les limites des six arrondissements. Les objets topographiques ont été exploités comme informations vectorielles de présence ou d'intensité spatiale et non comme données altimétriques continues. L'ensemble des couches a été harmonisé dans le système projeté WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG:32738) afin de disposer de coordonnées et de distances exprimées en mètres. La préparation, le contrôle géométrique et la visualisation des données ont été réalisés avec QGIS, qui permet notamment la gestion des projections, le traitement des couches vectorielles et la vérification cartographique [10]. Les traitements reproductibles ont ensuite été automatisés sous Python. La bibliothèque

GeoPandas a servi à la lecture, au reprojetage, au découpage et aux opérations spatiales sur les données géographiques [11], tandis que NumPy, pandas et Matplotlib ont été employés pour la manipulation numérique, l'organisation des matrices et la production des figures scientifiques. Enfin, scikit-learn a été utilisé pour la standardisation des variables et la réalisation de l'analyse en composantes principales, ainsi que pour certaines opérations statistiques nécessaires à la comparaison des profils territoriaux [12].

2.2 Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une analyse spatiale multivariée destinée à caractériser les contrastes urbains et environnementaux entre les six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra. Après harmonisation des couches géographiques dans le système WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG:32738), les informations relatives au bâti, au réseau routier, à la végétation, à l'hydrographie et aux objets topographiques ont été ramenées à une grille spatiale régulière. Les données topographiques disponibles étant vectorielles et dépourvues d'un champ altimétrique continu, elles ont été considérées comme des indicateurs de présence ou d'intensité spatiale et non comme un modèle numérique d'altitude. Afin de rendre comparables des variables exprimées dans des unités différentes, celles-ci ont été standardisées, notamment sous forme de scores centrés-réduits. Cette transformation permet d'exprimer chaque observation en nombre d'écarts-types par rapport à la moyenne et d'éviter qu'une variable de forte amplitude domine artificiellement les analyses multivariées. Pour la représentation des signatures spatiales dominantes, les différentes composantes ont également été ramenées sur une échelle commune ; chaque cellule a ensuite été affectée à la variable présentant l'intensité relative la plus élevée. Les proportions obtenues par arrondissement ont permis de quantifier la dominance respective des composantes urbaines, topographiques, végétales et hydrographiques. Les relations entre les variables ont été évaluées au moyen du coefficient de corrélation de rang de Spearman (ρ). Cette méthode non paramétrique mesure le sens et l'intensité d'une relation monotone et convient particulièrement lorsque la normalité des distributions ou la linéarité des relations ne peuvent être supposées [13]. Les coefficients varient entre -1 et $+1$, les valeurs positives traduisant une évolution dans le même sens et les valeurs négatives une évolution opposée. La significativité statistique des relations a été examinée parallèlement afin de distinguer les associations robustes des relations faibles ou non significatives. Une analyse en composantes principales (ACP) a ensuite été appliquée aux variables standardisées afin de réduire leur dimension tout en conservant la plus grande part possible de la variance initiale [14]. Les valeurs propres ont servi à mesurer la part de variance expliquée par chaque composante, tandis que les loadings ont permis d'identifier les variables responsables de la structuration des axes factoriels. Les scores des observations ont ensuite été projetés dans le plan principal afin de comparer les configurations spatiales des six arrondissements. Cette méthode permet de transformer plusieurs variables corrélées en un nombre plus réduit de dimensions synthétiques et interprétables. Une analyse factorielle multiple (AFM) a complété l'ACP afin de prendre explicitement en compte l'organisation des variables en trois groupes conceptuels : topographie, urbanisation et environnement. L'AFM équilibre préalablement l'influence de chaque groupe, puis réalise une analyse globale permettant d'étudier simultanément les contributions des groupes, les charges des variables et les positions des observations dans l'espace factoriel [15]. Cette procédure évite qu'un groupe plus fortement structuré ou comportant plusieurs variables corrélées ne domine à lui seul l'analyse globale [16]. Enfin, les profils moyens des six arrondissements ont été comparés à partir des variables standardisées et de leur distance euclidienne. Cette distance mesure l'écart global entre deux profils dans un espace multidimensionnel : une faible valeur traduit des caractéristiques territoriales proches, tandis qu'une valeur élevée indique une différenciation plus importante [17]. La combinaison des signatures dominantes, des corrélations de Spearman, de l'ACP, de l'AFM, des profils standardisés et des distances euclidiennes a ainsi permis d'identifier simultanément les gradients spatiaux, les associations entre variables et les similitudes ou oppositions entre arrondissements.

3 Résultats et discussions

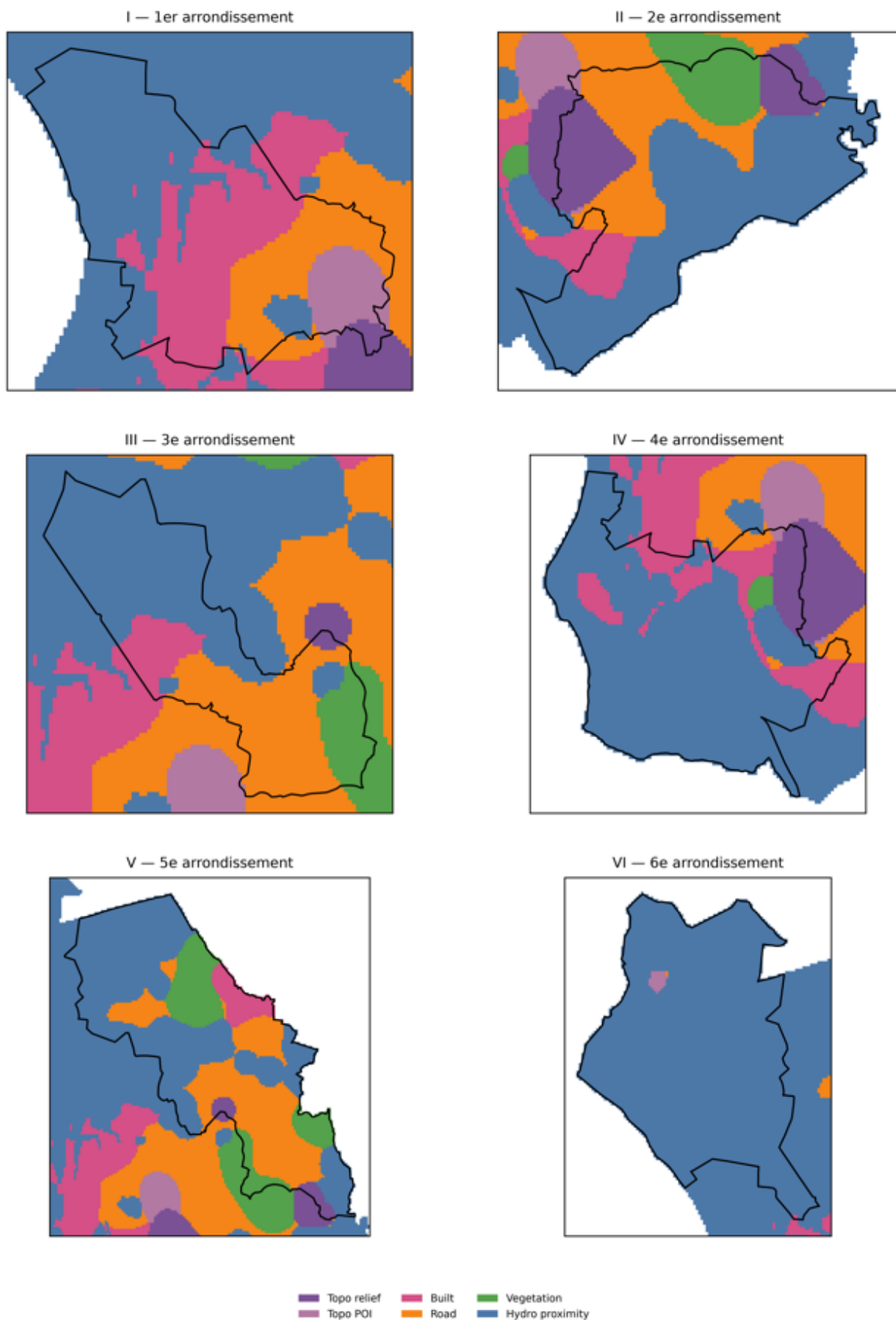
3.1 Résultats

3.1.1 Signatures spatiales dominantes des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra selon les composantes urbaines et environnementales

La Figure 1 ci-dessous présente la distribution des signatures spatiales dominantes obtenues à partir de six composantes territoriales : le relief topographique, les objets topographiques, le bâti, le réseau routier, la végétation

et la proximité au réseau hydrographique. La représentation par arrondissement permet d'identifier la composante qui exerce localement la plus forte influence relative et de mettre en évidence les principaux contrastes entre structures urbaines et environnementales.

Figure 1: Signatures spatiales dominantes des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra selon les composantes urbaines et environnementales



Source : Auteur 2026

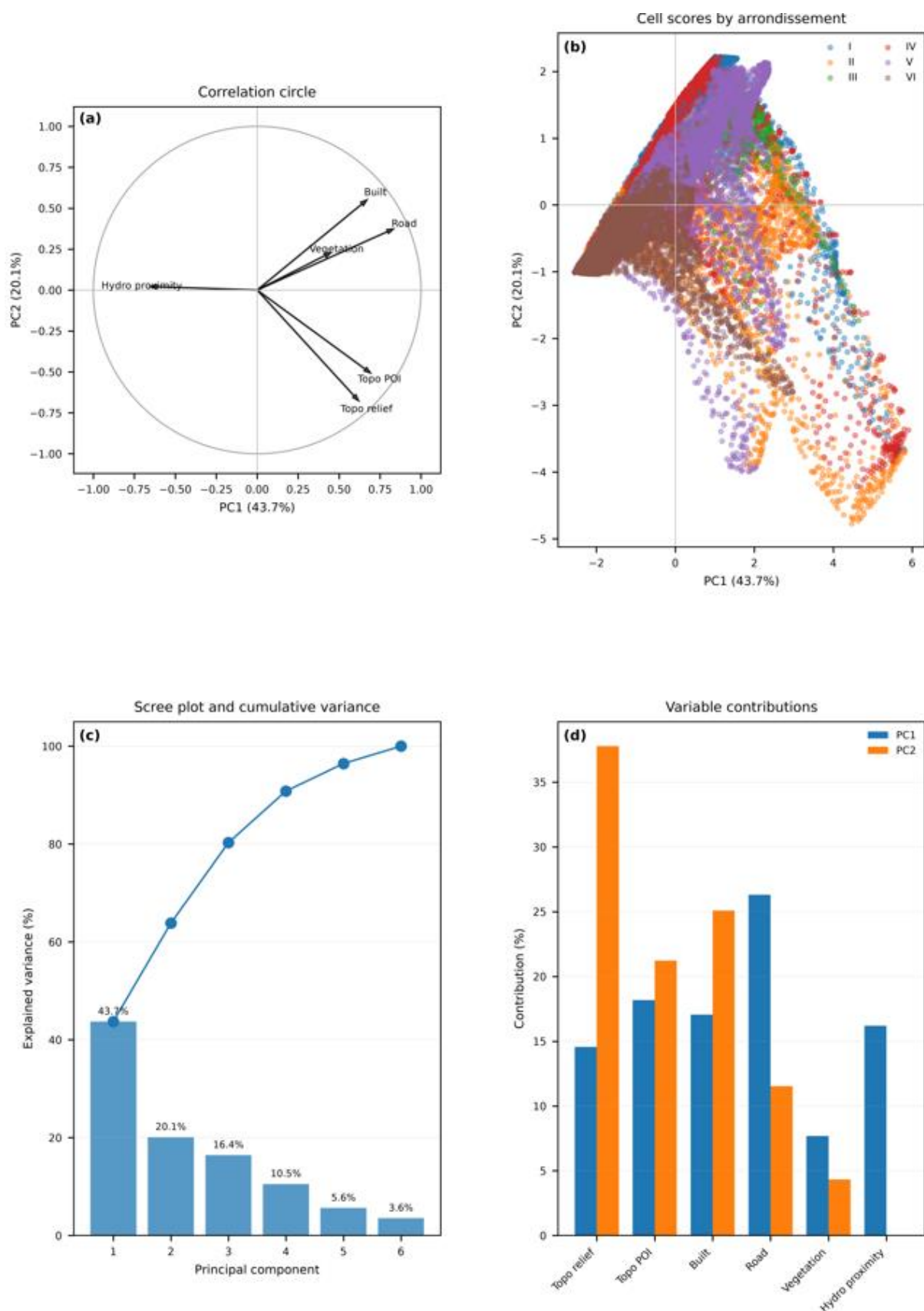
Interprétation

Les coefficients standardisés montrent que la diversité géologique constitue le déterminant positif le plus À l'échelle de l'ensemble étudié, la proximité hydrographique constitue la signature dominante, représentant approximativement 56,5 % du 1er arrondissement, 49,0 % du 2e, 46,4 % du 3e, 58,7 % du 4e et 48,0 % du 5e. Cette dominance devient particulièrement nette dans le 6e arrondissement, où elle atteint environ 99,3 % de la surface représentée, traduisant une organisation spatiale très fortement associée au réseau hydrographique. Les signatures liées à l'urbanisation présentent cependant des contrastes importants. Dans le 1er arrondissement, le bâti constitue environ 20,9 % des signatures dominantes, contre 14,5 % pour le réseau routier, confirmant le caractère fortement consolidé de ce secteur central. Le 3e arrondissement se distingue surtout par la composante routière, qui représente près de 30,0 %, tandis que le bâti atteint environ 12,9 %. Une configuration comparable apparaît dans le 5e arrondissement, où le réseau routier représente environ 26,9 %, devant le bâti avec 9,5 %. Dans le 4e arrondissement, le bâti atteint environ 16,0 %, alors que la signature routière représente 11,4 %. Les composantes environnementales secondaires sont davantage présentes dans les 2e et 5e arrondissements. Le 2e arrondissement présente notamment environ 13,6 % de signatures associées au relief topographique et 9,0 % à la végétation. Le 5e arrondissement enregistre la proportion végétale la plus importante, proche de 10,9 %, tandis que celle-ci atteint environ 6,0 % dans le 3e arrondissement. Les objets topographiques restent globalement minoritaires, avec des proportions généralement comprises entre 1,9 et 4,5 %. Ces résultats montrent ainsi que les six arrondissements ne présentent pas la même combinaison de facteurs structurants. Les secteurs centraux se caractérisent davantage par l'influence conjointe du bâti et du réseau routier, tandis que les secteurs périphériques présentent une empreinte plus forte des composantes hydrographiques, végétales ou topographiques. Cette différenciation fournit une base spatiale pertinente pour adapter les orientations d'aménagement aux caractéristiques propres de chaque arrondissement.

3.1.2 Structuration des variables spatiales d'Antananarivo Renivohitra par analyse en composantes principales

La Figure 2 suivante présente les résultats de l'analyse en composantes principales appliquée aux six variables spatiales retenues pour caractériser Antananarivo Renivohitra : relief topographique, objets topographiques, bâti, réseau routier, végétation et proximité hydrographique. Le cercle des corrélations, la distribution des scores par arrondissement, l'ébouli des valeurs propres et les contributions des variables permettent d'identifier les principaux gradients qui organisent le territoire et d'évaluer le poids relatif de chaque composante dans la différenciation spatiale.

Figure 2: Structuration des variables spatiales d'Antananarivo Renivohitra par analyse en composantes principales



Source : Auteur 2026

Interprétation

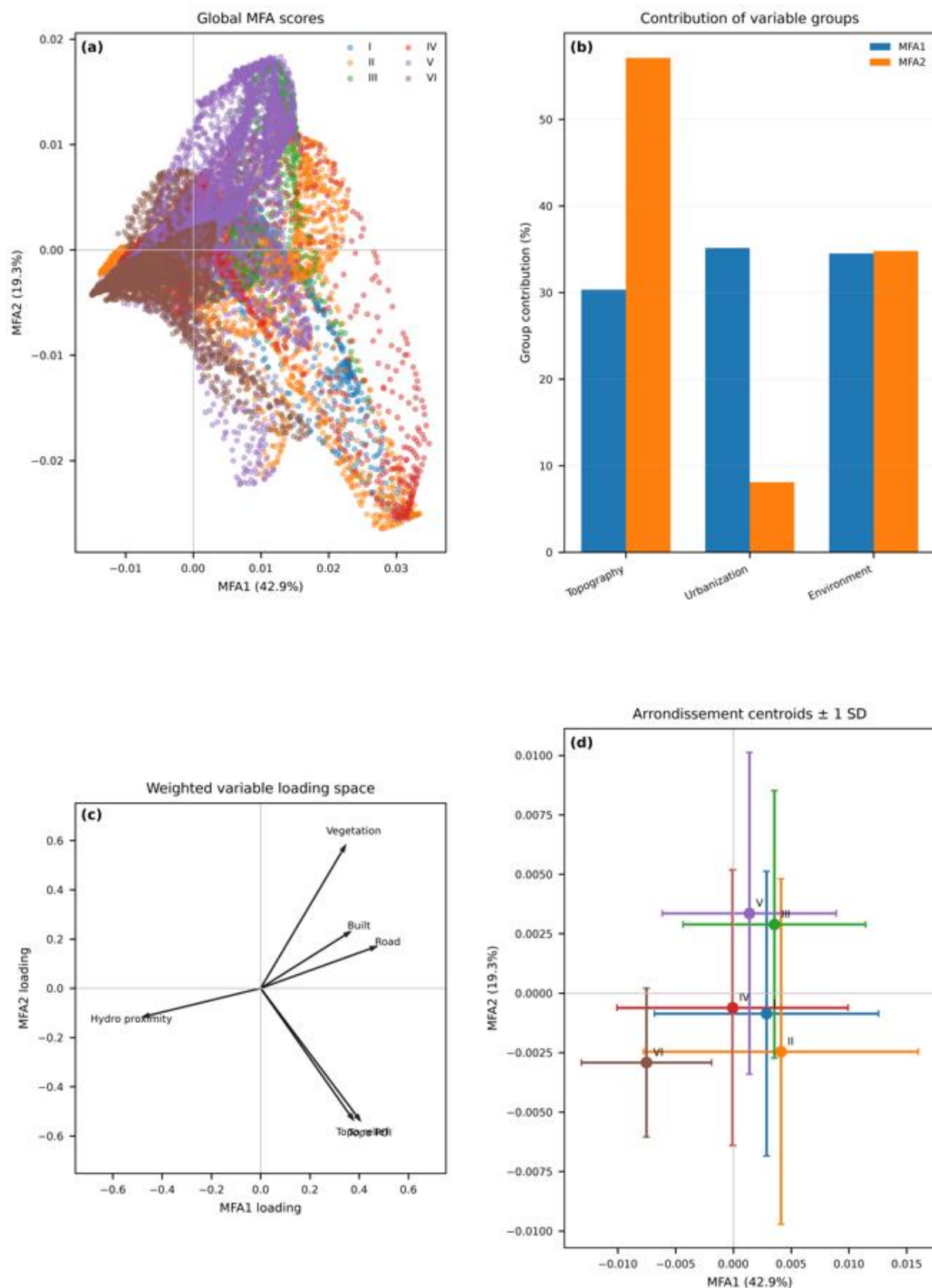
Le premier axe principal, PC1, explique 43,7 % de la variance totale, tandis que PC2 en explique 20,1 %, soit 63,8 % de l'information cumulée sur les deux premiers axes. L'ajout de PC3, qui représente 16,4 %, porte la variance

cumulée à environ 80,2 %, tandis que les quatre premières composantes atteignent près de 90,7 %. Les deux premiers axes fournissent ainsi une synthèse substantielle de l'organisation spatiale, même si une partie non négligeable de l'information demeure portée par PC3. Le cercle des corrélations montre que PC1 oppose principalement la proximité hydrographique, fortement positionnée du côté négatif de l'axe, aux variables de structure urbaine et territoriale situées du côté positif. Le réseau routier constitue la variable la plus contributive à PC1, avec environ 26 %, devant les objets topographiques ($\approx 18\%$), le bâti ($\approx 17\%$), la proximité hydrographique ($\approx 16\%$) et le relief ($\approx 15\%$). La végétation présente une contribution plus faible, de l'ordre de 8 %. PC1 peut ainsi être interprété comme un gradient opposant les espaces fortement influencés par la proximité du réseau hydrographique aux secteurs davantage structurés par l'urbanisation, l'accessibilité et les caractéristiques topographiques. Le deuxième axe est principalement contrôlé par le relief topographique, qui contribue à près de 38 % de PC2, suivi du bâti avec environ 25 % et des objets topographiques avec 21 %. Le réseau routier représente environ 11 à 12 %, tandis que la végétation contribue à moins de 5 % et la proximité hydrographique demeure très faiblement représentée sur cet axe. PC2 exprime donc surtout une différenciation entre les secteurs marqués par les caractéristiques topographiques et bâties et ceux présentant des configurations territoriales différentes. La distribution des scores confirme que les six arrondissements ne forment pas des groupes totalement séparés, puisqu'un recouvrement important subsiste dans l'espace factoriel. Certaines tendances restent néanmoins visibles : le 2^e arrondissement s'étend davantage vers les valeurs positives de PC1 et négatives de PC2, alors que le 4^e arrondissement occupe plus fréquemment la partie supérieure de l'espace factoriel. Le 6^e arrondissement se concentre davantage vers les valeurs négatives de PC1, tandis que les autres arrondissements présentent des positions intermédiaires et partiellement superposées. Ces résultats montrent que la différenciation territoriale d'Antananarivo Renivohitra repose davantage sur des gradients continus combinant urbanisation, hydrographie et topographie que sur des frontières statistiques strictes entre arrondissements.

3.1.3 Analyse factorielle multiple des composantes topographiques, urbaines et environnementales

La Figure 3 ci-après présente les résultats de l'analyse factorielle multiple (AFM) appliquée aux variables spatiales regroupées en trois dimensions complémentaires : topographie, urbanisation et environnement. Cette approche permet d'analyser simultanément la contribution de chaque groupe de variables, leur position dans l'espace factoriel et les différences de profils entre les six arrondissements, tout en limitant la domination d'un groupe comportant des variables fortement corrélées.

Figure 3: Analyse factorielle multiple des composantes topographiques, urbaines et environnementales



Source : Auteur 2026

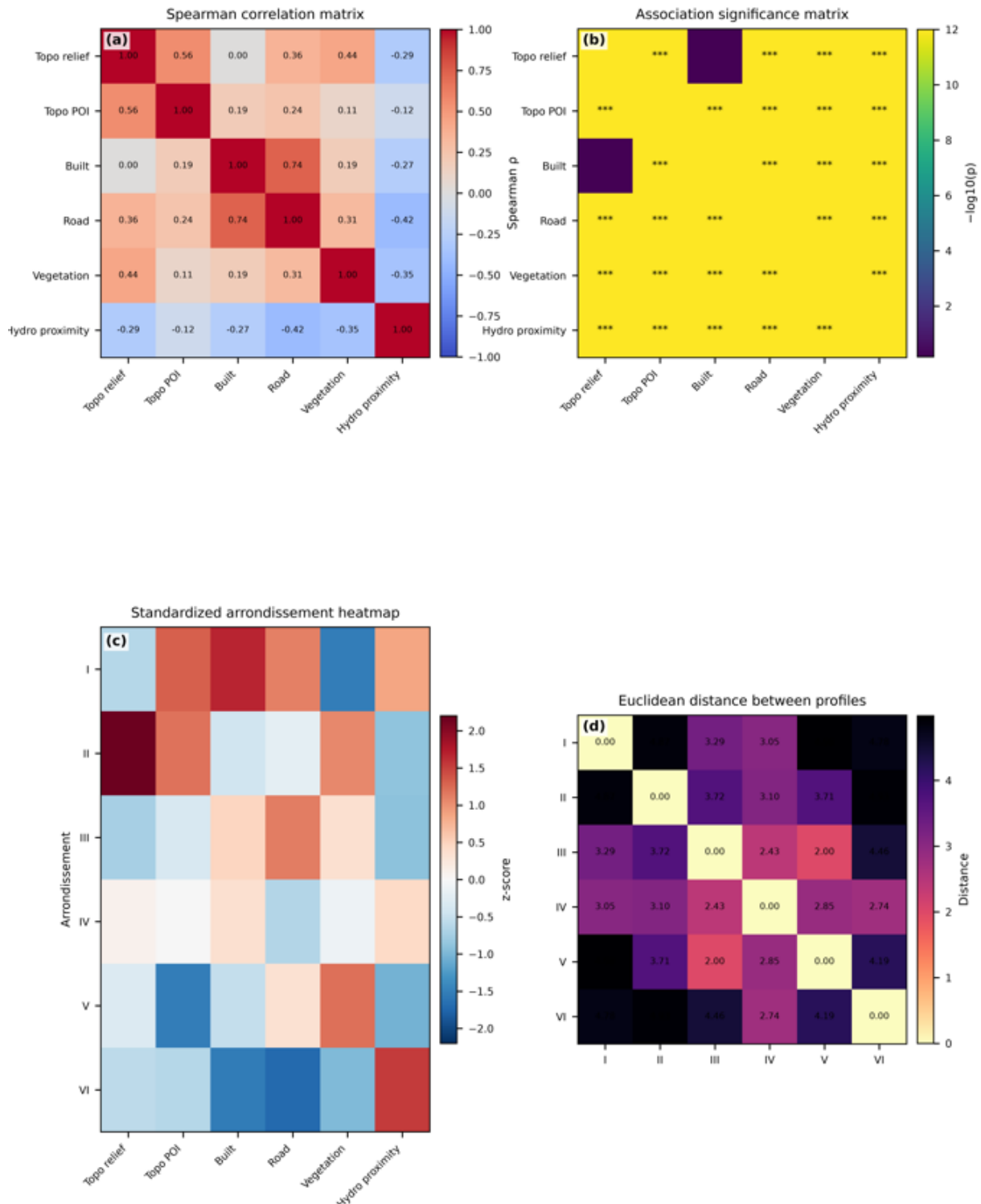
Interprétation

Les deux premiers axes de l'AFM expliquent ensemble 62,2 % de la variabilité totale, avec 42,9 % pour MFA1 et 19,3 % pour MFA2. Le premier axe est relativement équilibré entre les trois dimensions étudiées : l'urbanisation contribue à environ 35 %, l'environnement à 34–35 % et la topographie à près de 30 %. MFA1 traduit ainsi un gradient territorial composite plutôt qu'une dimension exclusivement urbaine ou environnementale. À l'inverse, le deuxième axe est principalement déterminé par la topographie, avec près de 57 % de contribution, suivie de l'environnement avec environ 35 %, tandis que l'urbanisation n'y contribue qu'à hauteur d'environ 8 %. MFA2 exprime donc davantage les contrastes topographiques et environnementaux du territoire. L'espace des charges factorielles précise cette structuration. Le réseau routier présente une charge positive importante sur MFA1, proche de +0,50, tandis que le bâti atteint environ +0,40. La proximité hydrographique se situe, à l'opposé, autour de – 0,50 sur ce même axe, montrant qu'elle contribue à différencier les secteurs fortement structurés par l'urbanisation de ceux davantage associés au réseau hydrographique. Sur MFA2, la végétation présente la charge positive la plus élevée, proche de +0,57, alors que les deux variables topographiques se situent autour de –0,50. Le deuxième axe oppose donc principalement les secteurs à dominante végétale aux espaces davantage marqués par les caractéristiques topographiques. Les scores individuels montrent toutefois un recouvrement important entre arrondissements, ce qui indique l'existence de gradients continus plutôt que de groupes territorialement totalement séparés. Les centroïdes confirment néanmoins certaines tendances. Le 6e arrondissement présente la position la plus négative sur MFA1, autour de –0,008, alors que les autres arrondissements se situent généralement entre 0 et +0,005. Sur MFA2, le 5e arrondissement présente le centroïde positif le plus élevé, proche de +0,0035, tandis que les 2e et 6e arrondissements atteignent environ –0,0025 à –0,003. Les écarts-types demeurent cependant importants et se chevauchent largement, ce qui invite à interpréter ces différences comme des tendances spatiales plutôt que comme des séparations statistiques strictes. Globalement, l'AFM confirme que la structuration d'Antananarivo Renivohitra résulte de l'interaction entre urbanisation, topographie, végétation et hydrographie, avec des combinaisons spécifiques selon les arrondissements.

3.1.4 Corrélations, profils standardisés et différenciation spatiale des six arrondissements

La Figure 4 ci-dessous présente conjointement la matrice de corrélation de Spearman, le niveau de significativité des associations, les profils standardisés des six arrondissements et leurs distances euclidiennes. Cette représentation permet d'identifier les relations entre les variables topographiques, urbaines et environnementales, puis d'évaluer le degré de similarité ou de différenciation des profils territoriaux à l'échelle intra-urbaine.

Figure 4: Corrélations, profils standardisés et différenciation spatiale des six arrondissements



Source : Auteur 2026

Interprétation

La matrice de Spearman met en évidence une relation positive particulièrement forte entre le bâti et le réseau routier, avec un coefficient de $\rho = 0,74$, traduisant la coïncidence spatiale entre densification urbaine et développement du maillage viaire. Une association positive relativement importante apparaît également entre le relief topographique et les objets topographiques ($\rho = 0,56$), tandis que le relief est modérément associé à la végétation ($\rho = 0,44$) et au réseau routier ($\rho = 0,36$). À l'inverse, la proximité hydrographique présente des relations négatives avec le réseau routier ($\rho = -0,42$), la végétation ($\rho = -0,35$), le relief ($\rho = -0,29$) et le bâti ($\rho = -0,27$). La relation entre relief et bâti est pratiquement nulle ($\rho = 0,00$), ce qui indique l'absence d'association monotone

notable entre ces deux variables. La matrice de significativité montre par ailleurs que la majorité des associations sont statistiquement significatives selon le codage présenté sur la figure, alors que la relation entre relief et bâti se distingue par son absence de relation significative. Les profils standardisés confirment ces contrastes. Le 1er arrondissement se caractérise principalement par des niveaux relativement élevés de bâti et de réseau routier, associés à une végétation inférieure à la moyenne. Le 2e arrondissement présente au contraire un profil davantage marqué par le relief et les objets topographiques. Le 3e arrondissement se distingue surtout par une composante routière relativement élevée, tandis que le 4e arrondissement présente un profil plus proche de la moyenne pour la plupart des variables. Le 5e arrondissement affiche notamment une faible représentation des objets topographiques, alors que le 6e arrondissement se caractérise par de faibles niveaux relatifs de bâti et de réseau routier, mais par une forte proximité hydrographique. Les distances euclidiennes précisent cette différenciation. Les profils les plus proches concernent les 3e et 5e arrondissements, avec une distance de 2,00, suivis des 3e et 4e arrondissements avec 2,43 et des 4e et 6e arrondissements avec 2,74. À l'inverse, les écarts sont nettement plus élevés entre les 3e et 6e arrondissements (4,46) ainsi qu'entre les 5e et 6e arrondissements (4,19). Ces résultats confirment que les six arrondissements présentent des structures territoriales différenciées, organisées principalement autour d'un contraste entre intensité de l'urbanisation, caractéristiques topographiques et influence hydrographique.

3.2 Discussions

Les résultats mettent en évidence une structuration territoriale nette des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra, fondée sur l'interaction entre urbanisation, accessibilité, topographie, végétation et hydrographie. La forte corrélation entre le bâti et le réseau routier ($\rho = 0,74$) confirme que la densification urbaine s'accompagne généralement d'un maillage viaire plus développé. À l'inverse, les corrélations négatives observées entre la proximité hydrographique et le réseau routier ($\rho = -0,42$), ainsi qu'avec la végétation ($\rho = -0,35$), montrent que les secteurs les plus influencés par l'hydrographie présentent une organisation spatiale différente de celle des zones les plus urbanisées. L'ACP confirme cette opposition, puisque les deux premiers axes expliquent 63,8 % de la variance totale, tandis que l'AFM en restitue 62,2 % sur ses deux premiers axes. Ces niveaux indiquent que l'essentiel des contrastes territoriaux peut être interprété à partir de quelques gradients dominants combinant composantes urbaines et environnementales. Le 1er arrondissement apparaît ainsi davantage marqué par le bâti et le réseau routier, alors que le 6e présente un profil fortement associé à l'hydrographie. Les distances euclidiennes renforcent cette lecture : les 3e et 5e arrondissements présentent les profils les plus proches (2,00), tandis que les 3e et 6e sont les plus différenciés (4,46). Ces résultats montrent que les arrondissements ne constituent pas des unités homogènes, mais s'inscrivent dans des gradients spatiaux continus. Cette différenciation justifie des stratégies d'aménagement adaptées aux profils locaux, en combinant consolidation urbaine, amélioration de la connectivité, préservation des composantes environnementales et prise en compte des contraintes hydrographiques.

4 Conclusion

Cette étude montre que les six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra présentent des profils urbains et environnementaux nettement différenciés. L'analyse multivariée met en évidence une opposition structurante entre les composantes liées à l'urbanisation, principalement le bâti et le réseau routier, et celles associées aux dimensions topographiques, végétales et hydrographiques. L'ACP et l'AFM confirment que l'essentiel de la variabilité territoriale peut être résumé par quelques gradients majeurs, tandis que les corrélations et les distances entre profils précisent les similitudes et contrastes entre arrondissements. Le 1er arrondissement apparaît davantage marqué par l'intensité urbaine, alors que le 6e se distingue par une influence hydrographique plus forte. Ces résultats fournissent une base quantitative utile pour mieux comprendre l'organisation intra-urbaine de Renivohitra et orienter des stratégies d'aménagement différenciées, adaptées aux caractéristiques propres de chaque arrondissement.

REFERENCES

- [1] . World Bank. Madagascar Urbanization Review: Leveraging Cities as Drivers of Growth and Structural Transformation. Washington, DC: World Bank; 2024. doi:10.1596/41220.
- [2] Ramiamanana FN, Teller J, Sliuzas R, Kuffer M. Using comparative approaches to model deprivation in Antananarivo, Madagascar: A multidimensional analysis using principal components analysis and

- weighting system across meso and macro scales. *Habitat International*. 2025;159:103359. doi:10.1016/j.habitatint.2025.103359.
- [3] Jolliffe IT, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016;374(2065):20150202.
- [4] Spearman C. The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*. 1904;15(1):72–101. doi:10.2307/1412159.
- [5] Escofier B, Pagès J. Multiple factor analysis (AFMULT package). *Computational Statistics & Data Analysis*. 1994;18(1):121–140. doi:10.1016/0167-9473(94)90135-X.
- [6] Lê S, Josse J, Husson F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*. 2008;25(1):1–18. doi:10.18637/jss.v025.i01.
- [7] United Nations Statistics Division. Second Administrative Level Boundaries – Madagascar: National Geospatial Information Authority, Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara. United Nations; 2024.
- [8] Bureau du Cadastre Minier de Madagascar. Rôles et missions du Bureau du Cadastre Minier de Madagascar. Antananarivo: BCM; 2026.
- [9] DATA\WAX. OSM2IGEO – Madagascar. Données OpenStreetMap mises en forme pour une utilisation orientée SIG. data.gouv.fr; mise à jour du 9 mars 2023.
- [10] QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System, Documentation 3.44. Open Source Geospatial Foundation; 2026.
- [11] GeoPandas Development Team. GeoPandas Documentation. Version 1.1.4; 2026.
- [12] Scikit-learn Developers. Scikit-learn: Machine Learning in Python – PCA and preprocessing documentation. Version 1.9; 2026.
- [13] Spearman C. The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*. 1904;15(1):72–101. doi:10.2307/1412159.
- [14] Jolliffe IT. *Principal Component Analysis*. 2nd ed. New York: Springer; 2002. doi:10.1007/b98835.
- [15] Escofier B, Pagès J. Multiple factor analysis (AFMULT package). *Computational Statistics & Data Analysis*. 1994;18(1):121–140. doi:10.1016/0167-9473(94)90135-X.
- [16] Lê S, Josse J, Husson F. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*. 2008;25(1):1–18. doi:10.18637/jss.v025.i01.
- [17] Everitt BS, Landau S, Leese M, Stahl D. *Cluster Analysis*. 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2011. doi:10.1002/9780470977811.