

Modélisation Spatiale Et Statistique Du Réseau Hydrographique D'Analamanga : Analyse Hiérarchique Et Enjeux Pour La Planification Territoriale

RAKOTONDRAINIBE Herilanjia Andriamihamina.^{1,1}, RAVELOALISON Haja Nirina.^{1,2},
RAHARINIERANA Hantaniaina^{1,3}, RAKOTO David Rambinintsoa.^{1,4}

^{1,1} rakotondrainibeh@gmail.com ^{1,2} univ.espa.igat@gmail.com ^{1,3} raharinieranahanta@gmail.com ^{1,4}
rakotodav@yahoo.fr

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences^{1,1 1,2 1,4},
Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation^{1,3},
Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo
Auteur correspondant : RAKOTONDRAINIBE Herilanjia Andriamihamina



Resume : Cette étude propose une modélisation spatiale et statistique du réseau hydrographique de la Région Analamanga, incluant l'agglomération du Grand Antananarivo, à partir de données vectorielles issues de la base HOTOSM. L'analyse repose sur la caractérisation morphométrique des segments de cours d'eau, l'examen de la distribution des longueurs selon une approche log-log et l'évaluation d'indicateurs territoriaux tels que la longueur cumulée et la densité kilométrique par district. Les résultats mettent en évidence une organisation hiérarchique marquée du drainage régional, caractérisée par une forte dominance de segments courts et l'existence d'axes structurants plus longs, traduisant une structure multi-échelle proche d'une distribution à queue lourde. La classification des districts selon des seuils médians révèle des contrastes significatifs en termes de complexité hydrographique et d'exposition potentielle aux risques hydrologiques. Cette modélisation fournit un cadre analytique robuste pour appuyer la planification territoriale, la gestion intégrée des bassins versants et l'orientation des stratégies d'aménagement urbain résilient face aux contraintes hydromorphologiques et aux dynamiques climatiques.

Mots-clés : Modélisation spatiale ; Réseau hydrographique ; Analamanga ; Hiérarchisation territoriale ; Aménagement urbain

Abstract: This study proposes a spatial and statistical modeling of the hydrographic network of the Région Analamanga, including the Greater Antananarivo metropolitan area, based on vector data derived from the Humanitarian OpenStreetMap Team (HOTOSM) database. The analysis relies on the morphometric characterization of river segments, the examination of length distributions using a log-log approach, and the evaluation of territorial indicators such as cumulative length and kilometer density by district. The results highlight a marked hierarchical organization of the regional drainage system, characterized by a strong dominance of short segments and the presence of longer structuring axes, reflecting a multi-scale structure close to a heavy-tailed distribution. The classification of districts based on median thresholds reveals significant contrasts in terms of hydrographic complexity and potential exposure to hydrological risks. This modeling framework provides a robust analytical basis to support territorial planning, integrated watershed management, and the orientation of resilient urban development strategies in response to hydromorphological constraints and climate dynamics.

Keywords: Spatial modeling; Hydrographic network; Analamanga; Territorial hierarchy; Urban planning.

INTRODUCTION

Les réseaux hydrographiques constituent des structures géomorphologiques fondamentales qui organisent les dynamiques hydrologiques, écologiques et territoriales à différentes échelles spatiales. Leur analyse quantitative a montré que ces systèmes présentent des propriétés hiérarchiques et auto-organisées, souvent décrites par des lois d'échelle et des distributions de type puissance [1][2]. La modélisation spatiale et statistique des réseaux de drainage permet ainsi de caractériser leur complexité morphométrique et d'identifier les mécanismes structurant la connectivité hydrologique des bassins versants [3]. Dans les contextes tropicaux soumis à une urbanisation rapide, comme celui du Grand Antananarivo au sein de la Région Analamanga, la compréhension de cette organisation hydrographique revêt une importance stratégique pour la planification territoriale. L'expansion urbaine, l'imperméabilisation des sols et la transformation des plaines alluviales modifient les régimes d'écoulement et accroissent la vulnérabilité aux inondations [4][5]. Une approche fondée sur des indicateurs morphométriques tels que la longueur cumulée des cours d'eau, la densité surfacique et la distribution statistique des segments permet d'objectiver les contrastes territoriaux et de hiérarchiser les unités administratives selon leur complexité hydrologique [6].

Les travaux récents en géomatique et en analyse spatiale soulignent l'intérêt de combiner modélisation géospatiale et méthodes statistiques pour appuyer les décisions d'aménagement, notamment dans les métropoles exposées aux aléas hydrométéorologiques [7]. Dans cette perspective, l'étude du réseau hydrographique d'Analamanga vise à proposer un cadre analytique intégré permettant de relier structure hiérarchique du drainage, organisation territoriale et enjeux de résilience urbaine.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude porte sur la Région Analamanga, située dans les Hautes Terres centrales de Madagascar et englobant l'agglomération du Antananarivo, espace marqué par une topographie contrastée et une forte pression anthropique sur les plaines alluviales. L'analyse repose sur l'exploitation de données hydrographiques vectorielles issues de la base collaborative de la Humanitarian OpenStreetMap Team, qui fournit une cartographie détaillée des entités de type waterways. Les limites administratives nécessaires à l'agrégation territoriale des indicateurs ont été extraites de la base GADM. L'ensemble des couches a été reprojeté en coordonnées métriques (WGS 84 / UTM zone 38S) afin de garantir la précision des calculs de distances et de surfaces. Les traitements ont été réalisés dans l'environnement scientifique open source Anaconda, assurant la gestion intégrée des dépendances logicielles, et exécutés via Jupyter Notebook, plateforme interactive favorisant la traçabilité des scripts et la reproductibilité analytique. Cette démarche s'inscrit dans les principes de la recherche reproductible en géomatique, qui soulignent l'importance de l'ouverture des données, de la transparence des méthodes et de la documentation des processus analytiques [8]. Les opérations géospatiales ont mobilisé les bibliothèques GeoPandas, Shapely et Fiona, tandis que les traitements statistiques ont été conduits à l'aide de Pandas et NumPy, conformément aux approches de structuration et d'analyse des données en environnement Python décrites par McKinney [9]. L'usage d'outils géospatiaux open source dédiés à l'analyse vectorielle s'appuie notamment sur les développements méthodologiques récents en science des données géographiques [10].

Après vérification de la validité géométrique des entités et découpage spatial selon les limites administratives, la longueur métrique de chaque segment hydrographique a été calculée. À partir de ces mesures, deux indicateurs principaux ont été produits : la longueur cumulée des cours d'eau par district et la densité hydrographique, définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau et la superficie correspondante. Lorsque nécessaire, un Modèle Numérique d'Élévation (SRTM 30 m) a été mobilisé afin de contextualiser les dynamiques d'écoulement et de vérifier la cohérence topographique du réseau, en référence aux méthodes d'analyse hydrologique des modèles altimétriques proposées par Tarboton [11]. L'organisation hiérarchique du réseau hydrographique a été examinée à travers l'analyse statistique de la distribution des longueurs de segments. Une transformation logarithmique des données a permis de représenter la relation fréquence-longueur en échelle log-log afin d'identifier une éventuelle loi de puissance de la forme $P(L) \sim L^\alpha$. L'estimation du paramètre α a été réalisée selon les méthodes de maximum de vraisemblance recommandées pour l'identification robuste des distributions à queue lourde dans les systèmes complexes [12]. Cette approche

permet d'évaluer si la structure du drainage présente une organisation multi-échelle caractérisée par la dominance de segments courts combinée à l'existence d'axes structurants plus longs.

Enfin, une classification comparative des districts a été effectuée à partir des valeurs médianes de densité hydrographique et de longueur cumulée. Cette méthode non paramétrique permet de distinguer les territoires à forte complexité hydrographique de ceux présentant une structuration plus modérée, tout en évitant les biais liés aux distributions asymétriques. L'interprétation des résultats s'inscrit dans le cadre théorique des systèmes territoriaux auto-organisés, où les réseaux naturels et urbains présentent des propriétés hiérarchiques et fractales contribuant à structurer l'espace géographique [13]. Cette combinaison d'analyse spatiale, de modélisation statistique et de classification territoriale vise ainsi à proposer un cadre méthodologique intégré, apte à éclairer les dynamiques hydromorphologiques et à soutenir la planification territoriale dans un contexte métropolitain soumis à de fortes contraintes environnementales.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1-Analyse statistique de la structure du réseau hydrographique et hiérarchisation des districts selon la longueur totale et la densité des cours d'eau dans la Région Analamanga

La figure ci-dessous présente une double approche analytique du réseau hydrographique régional à partir d'indicateurs quantitatifs dérivés des données vectorielles. Le premier graphique correspond à un histogramme en échelle log-log des longueurs de segments du réseau, permettant d'examiner la distribution statistique des tronçons et d'évaluer la structure hiérarchique du drainage. Le second graphique représente les districts dans un plan bidimensionnel croisant la longueur totale cumulée des cours d'eau et leur densité surfacique, avec des lignes médianes servant de seuils de comparaison relative.

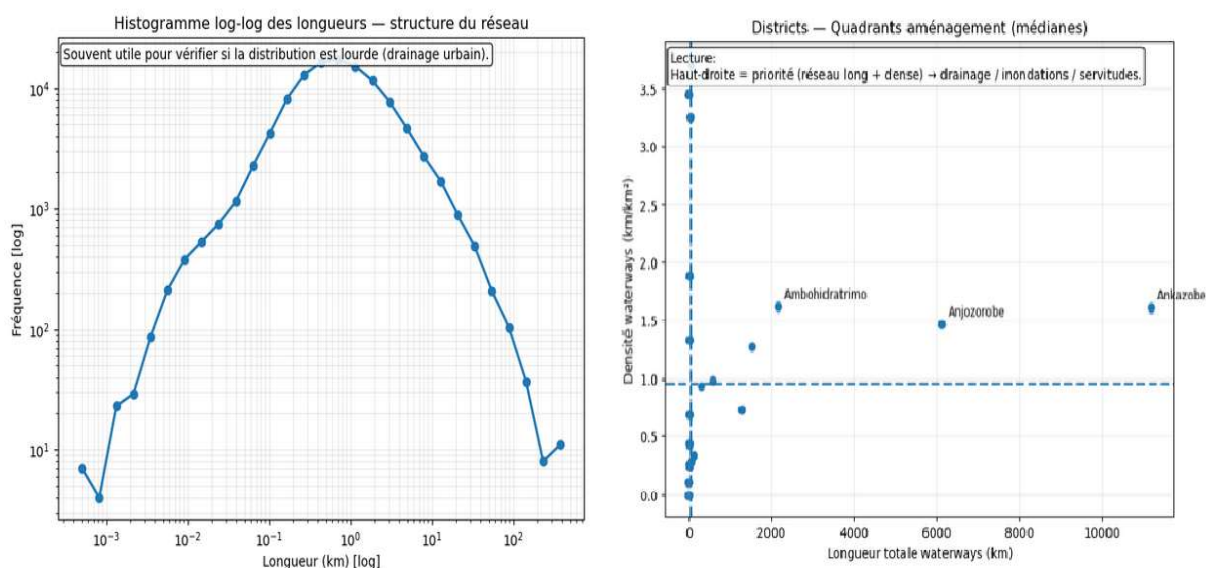


Figure 1: Analyse statistique de la structure du réseau hydrographique et hiérarchisation des districts selon la longueur totale et la densité des cours d'eau dans la Région Analamanga, Source : Auteur

Interprétation

L'histogramme en échelle logarithmique met en évidence une distribution fortement asymétrique caractérisée par une dominance de segments courts et une décroissance progressive vers les grandes longueurs. Ce type de distribution, souvent proche d'une loi de puissance ou d'une distribution à queue lourde, est typique des réseaux hydrographiques naturels organisés selon des principes de hiérarchisation fractale. La forte fréquence des tronçons de faible longueur traduit une fragmentation importante du réseau secondaire et tertiaire, indiquant une capacité de collecte fine des écoulements superficiels. La présence de segments longs, bien que moins fréquente, témoigne de l'existence d'axes structurants jouant un rôle majeur dans le transfert hydrologique à l'échelle régionale. Cette organisation hiérarchique influence directement la dynamique des crues, la connectivité hydrologique et la rapidité de concentration des flux vers les plaines alluviales. Le graphique de dispersion des districts met en relation deux indicateurs structurants pour l'aménagement : la longueur totale du réseau hydrographique et la densité kilométrique rapportée à la surface administrative. Les lignes médianes divisent l'espace en quadrants permettant une lecture comparative. Les districts situés dans le quadrant supérieur droit combinent une longueur totale élevée et une forte densité, ce qui suggère une complexité hydrologique accrue et une probabilité plus élevée d'interactions entre urbanisation et écoulements naturels. Ces territoires peuvent être considérés comme prioritaires en matière de gestion du drainage, de prévention des inondations et de définition de servitudes hydrauliques. Les districts caractérisés par une longueur totale importante mais une densité modérée traduisent généralement de grandes superficies administratives intégrant des bassins versants étendus. À l'inverse, une densité élevée associée à une longueur totale modérée peut refléter une concentration du réseau dans un espace restreint, situation fréquemment observée dans des zones topographiquement disséquées ou urbanisées. Les districts positionnés en quadrant inférieur gauche présentent un réseau relativement peu développé ou une surface importante diluant la densité, ce qui peut correspondre à des zones moins urbanisées ou à des plateaux à drainage moins ramifié.

2- Organisation spatiale du réseau hydrographique de la Région Analamanga (Antananarivo)

La figure ci-dessous représente l'organisation spatiale du réseau hydrographique de la Région Analamanga (Antananarivo) à partir des données HOTSM, projetées en UTM 38S (EPSG:32738). Elle met en évidence la hiérarchisation fonctionnelle des écoulements de surface distinguant rivières principales, cours d'eau secondaires, drains, fossés et canaux. Cette représentation constitue une base d'analyse hydromorphologique pertinente pour l'évaluation des dynamiques territoriales et des contraintes physiques pesant sur l'aménagement urbain du Grand Antananarivo.

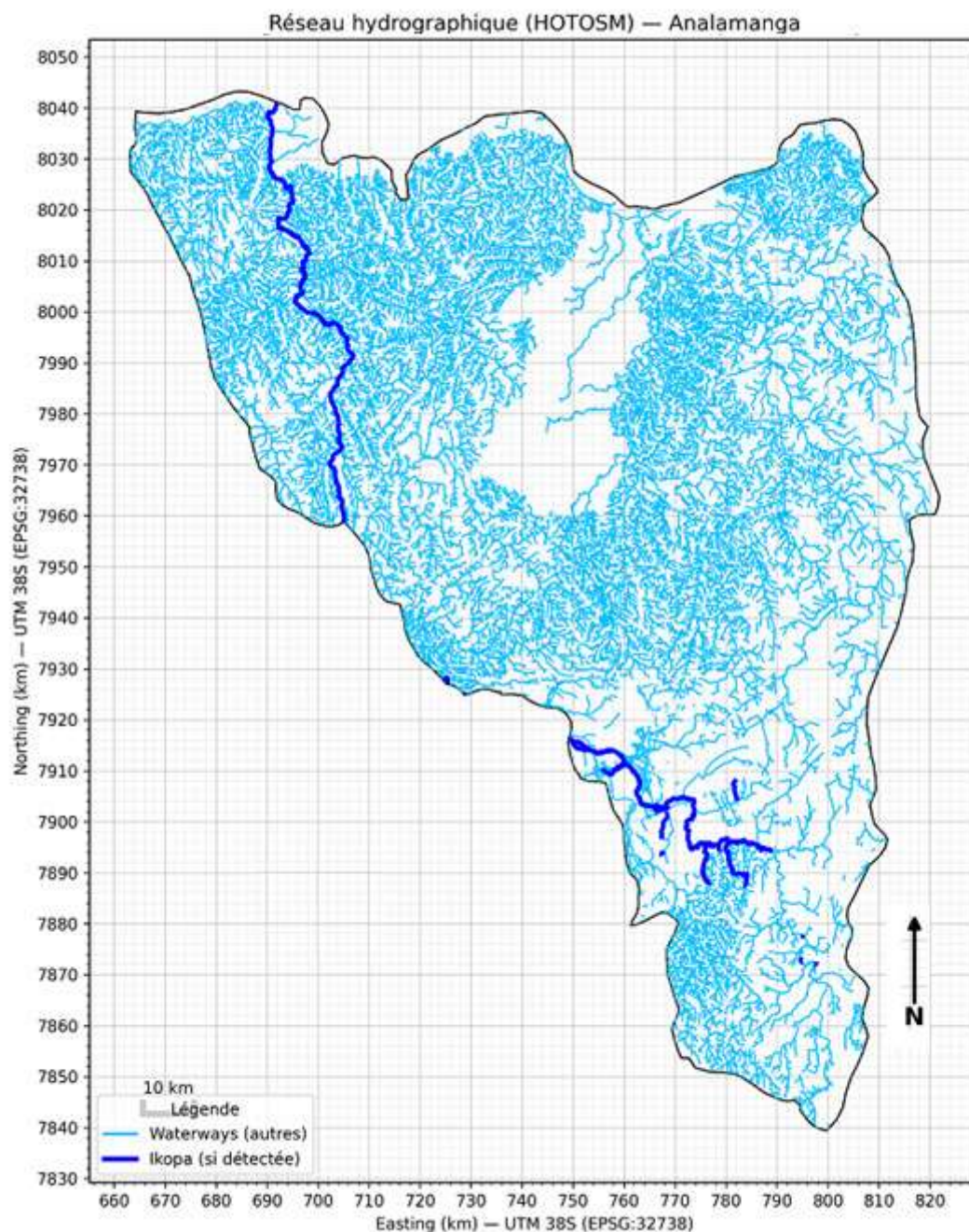


Figure 2: Organisation spatiale du réseau hydrographique de la Région Analamanga (Antananarivo), Source : Auteur

Interprétation

La configuration du réseau révèle une structure majoritairement dendritique caractéristique de bassins versants développés sur substrat relativement homogène, avec une forte densité de cours d'eau secondaires répartis sur l'ensemble du territoire régional.

Cette densité traduit un maillage hydrographique fin, associé à des pentes variables et à une capacité de concentration rapide des écoulements en période de pluies intenses. Les secteurs amont présentent une fragmentation hydrographique élevée, indiquant une forte connectivité hydrologique entre versants et talwegs. Cette organisation favorise des réponses hydrauliques rapides, susceptibles d'engendrer des crues soudaines en aval, notamment dans les zones à faible déclivité. Les rivières principales structurent l'ossature hydrologique régionale et convergent vers les plaines centrales correspondant aux zones urbanisées historiques du Grand Tana. Ces plaines alluviales, topographiquement basses et faiblement inclinées, constituent des espaces de dissipation naturelle des crues mais également des secteurs à forte exposition au risque d'inondation. La superposition des axes fluviaux majeurs et des zones densément urbanisées souligne une contrainte morphologique forte dans l'organisation spatiale de l'agglomération. L'expansion urbaine vers ces zones basses accroît mécaniquement la vulnérabilité face aux événements hydrométéorologiques extrêmes. La présence marquée de drains, fossés et canaux dans les secteurs urbanisés traduit un processus d'artificialisation progressive du réseau hydrographique. Cette modification anthropique vise à réguler les écoulements superficiels et à maîtriser les débordements saisonniers, mais elle altère les régimes naturels d'infiltration et de stockage temporaire des eaux. L'intensification de l'imperméabilisation des sols réduit la capacité d'absorption du bassin versant, augmentant le coefficient de ruissellement et la charge hydraulique transférée vers les axes principaux. Dans ce contexte, le réseau artificiel devient un élément critique du système urbain, dont la performance conditionne la résilience de l'agglomération. L'analyse spatiale met également en évidence une différenciation fonctionnelle entre les zones amont, dominées par un drainage naturel dense, et les zones centrales et méridionales où l'intervention anthropique est plus prononcée. Cette dissymétrie reflète l'interaction entre topographie, occupation du sol et dynamique d'urbanisation. Les secteurs à forte densité de cours d'eau secondaires constituent des réservoirs hydrologiques essentiels à la régulation des flux, tandis que les plaines alluviales jouent un rôle de tampon hydraulique. Toute transformation structurelle de ces espaces, notamment par comblement ou remblaiement, modifie l'équilibre hydrodynamique régional. Dans une perspective d'aménagement territorial, cette configuration hydrographique impose une approche intégrée fondée sur la gestion des bassins versants. La hiérarchisation naturelle des écoulements doit être considérée comme une armature écologique structurante, orientant la localisation des zones constructibles, des corridors écologiques et des espaces à vocation de rétention hydraulique. L'intégration systématique des contraintes hydromorphologiques dans les documents de planification urbaine apparaît essentielle afin de limiter l'exposition aux risques et de renforcer la résilience territoriale face à l'intensification probable des précipitations liée aux changements climatiques. Ainsi, le réseau hydrographique de la Région Analamanga ne constitue pas seulement un élément physique du paysage, mais un déterminant majeur de l'organisation spatiale et fonctionnelle du Grand Antananarivo. Son analyse détaillée offre un cadre scientifique robuste pour l'élaboration de stratégies d'aménagement durable conciliant développement urbain, sécurité hydrologique et préservation des fonctions écosystémiques.

3- Structuration hydromorphologique du Grand Antananarivo

La figure ci-après représente la distribution spatiale et la typologie des cours d'eau de la Région Analamanga à partir des données HOTSM, projetées en système UTM 38S (EPSG:32738). La cartographie distingue les rivières principales, les cours d'eau secondaires, ainsi que les infrastructures hydrauliques artificielles telles que canaux, drains et fossés. Cette représentation offre une lecture intégrée de l'armature hydrographique régionale et constitue un support d'analyse essentiel pour comprendre les interactions entre dynamique naturelle des écoulements et processus d'urbanisation dans l'agglomération du Grand Antananarivo.

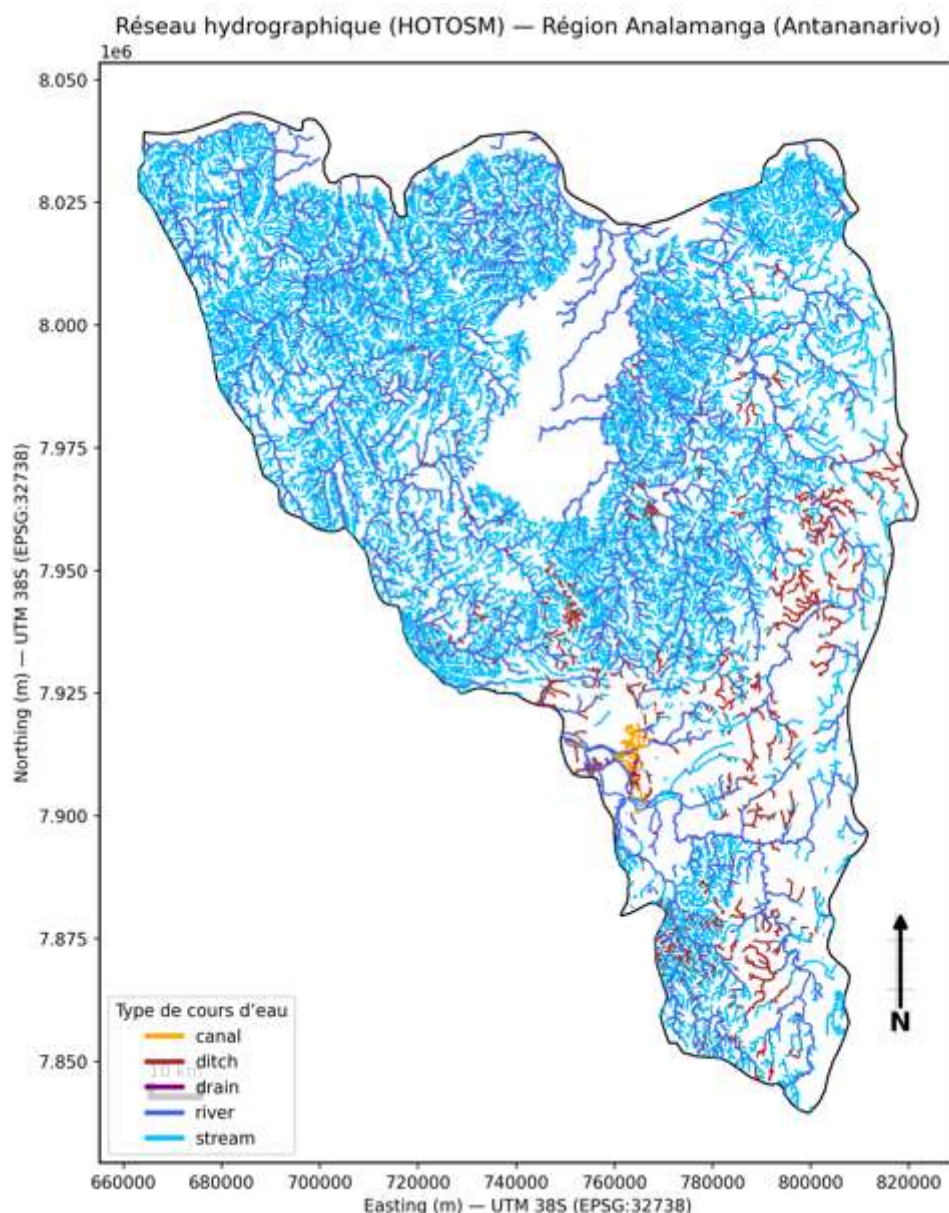


Figure 2: Structuration hydromorphologique du Grand Antananarivo, Source : Auteur

Interprétation

L'organisation spatiale du réseau révèle une hiérarchisation nette des écoulements, dominée par une forte densité de ruisseaux et de cours d'eau secondaires qui structurent l'ensemble du territoire. Cette trame hydrographique dense traduit une morphologie de bassin versant fortement connectée, favorisant une concentration rapide des eaux de ruissellement vers les axes fluviaux majeurs. Les rivières principales apparaissent comme des axes structurants orientés vers les plaines centrales et méridionales, correspondant aux secteurs urbanisés et aux zones de faible altitude relative. Cette convergence hydrographique vers les zones basses souligne une contrainte topographique majeure dans l'organisation spatiale régionale. La distribution différenciée

des types de cours d'eau met en évidence une transition progressive entre les zones amont dominées par un drainage naturel ramifié et les secteurs centraux et sud caractérisés par une présence accrue d'ouvrages hydrauliques artificiels. Les canaux, drains et fossés se concentrent principalement dans les espaces urbanisés, témoignant d'une adaptation anthropique du réseau naturel afin de contrôler les flux hydriques. Cette artificialisation modifie les régimes d'écoulement, accélère le transfert des eaux vers l'aval et peut contribuer à l'augmentation des pics de crue en période pluvieuse. La configuration observée révèle également une forte dépendance du système urbain vis-à-vis de son substrat hydromorphologique. Les plaines alluviales, situées au cœur de la région, fonctionnent comme des zones de dissipation hydraulique mais constituent simultanément des espaces de vulnérabilité accrue face aux inondations. L'intensification de l'occupation du sol et l'imperméabilisation progressive des surfaces réduisent la capacité d'infiltration, augmentent le ruissellement superficiel et renforcent la pression sur les infrastructures de drainage.

4- Cartographie intégrée des milieux aquatiques de la Région Analamanga (Antananarivo) à partir des données HOTOSM

La figure ci-après présente une synthèse cartographique des composantes majeures de l'hydrographie de la Région Analamanga, construite à partir des jeux de données HOTOSM et mise en contexte sur un fond de carte OpenStreetMap. Deux représentations complémentaires sont proposées afin de distinguer, d'une part, les surfaces en eau associées aux polygones et le réseau hydrographique linéaire lorsque disponible, et d'autre part les surfaces en eau combinées à la localisation des points d'eau. L'ensemble est affiché en projection Web Mercator (EPSG:3857) avec graduations géographiques en longitude/latitude, ce qui facilite la lecture spatiale et l'intégration dans un document de planification urbaine ou territoriale.

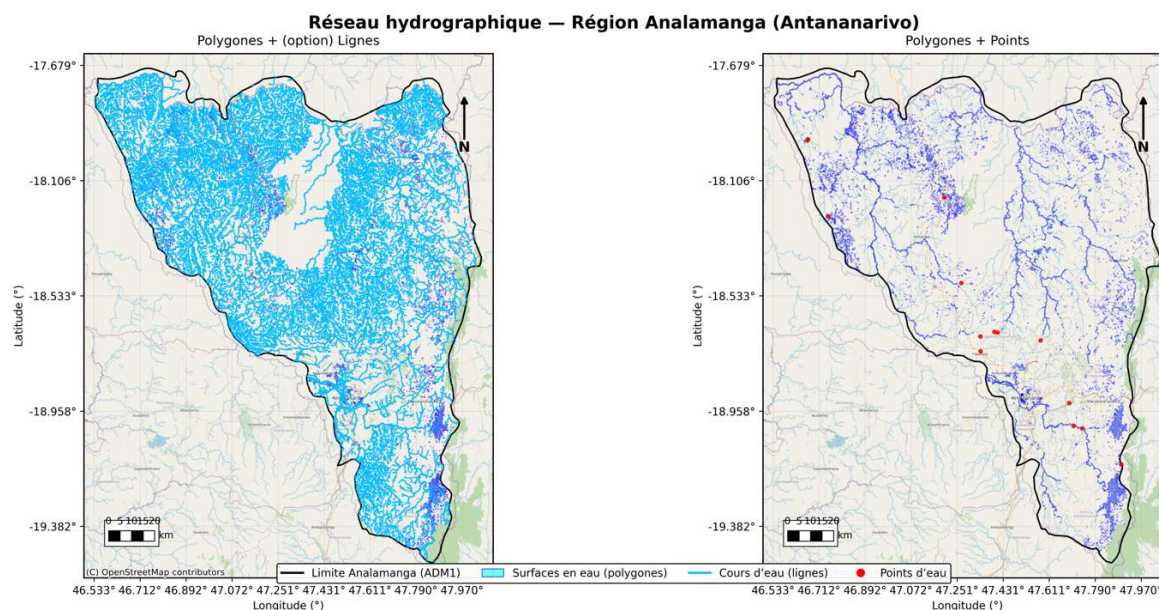


Figure 3: Matrice de corrélation entre l'enveloppe altimétrique des digues, les pentes longitudinales et l'asymétrie latérale le long de la rivière Ikopa, Source : Auteur

Interprétation

L'observation conjointe des deux panneaux met en évidence la structuration hiérarchique du système hydrologique régional, où un réseau dense de cours d'eau secondaires encadre et alimente des axes de drainage plus structurants. La distribution des surfaces en eau, plus ponctuelle et localisée, suggère des zones d'accumulation et de stockage temporaire ou permanent,

susceptibles de correspondre à des zones humides, marais, plans d'eau ou élargissements de lit majeur. Ces entités jouent un rôle hydrologique et écologique déterminant dans la régulation des écoulements, l'atténuation des crues et la recharge potentielle des nappes, tout en constituant des espaces particulièrement sensibles à l'artificialisation et au changement d'usage des sols. La carte mettant en évidence les points d'eau indique une répartition non uniforme, avec des concentrations apparentes dans certains secteurs, ce qui peut traduire soit une densité réelle de sources, puits, captages ou infrastructures hydrauliques, soit une hétérogénéité de la collecte et de la complétude des données selon les zones. Dans une perspective d'aménagement, cette variabilité souligne la nécessité d'une validation terrain ciblée et d'un croisement avec des informations complémentaires telles que la topographie, l'occupation du sol et les limites administratives fines. Les zones où coexistent un réseau linéaire dense, des surfaces en eau et une présence notable de points d'eau représentent des secteurs stratégiques pour la gestion intégrée de l'eau, car elles concentrent à la fois des fonctions de drainage, de stockage et d'usage potentiel de la ressource. Au regard des enjeux urbains du Grand Antananarivo, la figure met en évidence l'importance d'intégrer la trame hydrographique comme armature structurante de la planification. Le maintien de la continuité des écoulements, la préservation des zones d'expansion naturelle des crues et la protection des surfaces en eau apparaissent comme des conditions essentielles pour réduire la vulnérabilité aux inondations et limiter les impacts de l'imperméabilisation croissante. Ainsi, cette cartographie fournit un support analytique robuste pour orienter un zonage opérationnel, définir des servitudes hydrauliques, prioriser les actions de restauration ou d'entretien et renforcer la résilience territoriale face à l'évolution des régimes pluviométriques.

DISCUSSION

La modélisation spatiale et statistique du réseau hydrographique de la Région Analamanga met en évidence une organisation hiérarchique marquée, caractérisée par une forte dominance de segments courts et la présence d'axes structurants plus longs. Cette configuration est cohérente avec les modèles classiques d'organisation des réseaux de drainage décrits par Horton [14], qui soulignent le caractère ordonné et non aléatoire des structures hydrographiques. La distribution observée, proche d'une loi de puissance en représentation log-log, confirme que le réseau étudié présente des propriétés d'auto-organisation similaires à celles identifiées dans de nombreux bassins versants naturels. La hiérarchisation des segments reflète ainsi des mécanismes morphogénétiques liés à l'érosion différentielle, à la pente et à la connectivité hydrologique. Les résultats obtenus corroborent également les principes énoncés par Strahler [15], selon lesquels les réseaux hydrographiques s'organisent selon une structure ramifiée où l'ordre des cours d'eau augmente de manière systématique à mesure que l'on progresse vers l'aval. La prédominance de segments de faible longueur dans la région étudiée peut être interprétée comme l'expression d'un maillage fin de drainage, typique des environnements à topographie compartimentée et à forte densité de ravinement. Toutefois, dans le contexte du Grand Antananarivo, cette organisation naturelle est désormais influencée par les transformations anthropiques, notamment l'imperméabilisation des sols et l'occupation des plaines alluviales.

La relation entre structure hydrographique et dynamiques urbaines apparaît particulièrement significative. Les districts présentant une forte densité hydrographique correspondent souvent à des zones où la pression foncière et l'expansion urbaine sont importantes, ce qui accroît la vulnérabilité aux inondations. Cette interaction entre morphologie du drainage et urbanisation rejoint les analyses de Leopold et Maddock [16], qui démontrent que les caractéristiques géométriques des cours d'eau sont étroitement liées aux conditions hydrologiques et aux perturbations anthropiques. Dans un contexte tropical soumis à des épisodes pluviométriques intenses, la modification des régimes d'écoulement peut amplifier les phénomènes de crue, notamment lorsque la continuité écologique et hydraulique est altérée. Par ailleurs, l'identification d'une distribution à queue lourde suggère que le réseau hydrographique d'Analamanga fonctionne comme un système complexe multi-échelle, où quelques axes structurants jouent un rôle disproportionné dans la connectivité hydrologique régionale. Cette propriété rejoint les approches contemporaines des systèmes territoriaux complexes, qui considèrent les réseaux naturels et urbains comme des structures adaptatives sensibles aux perturbations externes [17]. Dans cette perspective, la planification territoriale doit intégrer la dimension hiérarchique du drainage afin d'éviter des aménagements susceptibles de rompre les équilibres hydromorphologiques. Ainsi, la discussion met en évidence la pertinence d'une approche combinant indicateurs morphométriques et analyse statistique pour éclairer les choix d'aménagement. La

hiérarchisation territoriale fondée sur la densité et la longueur cumulée des cours d'eau constitue un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les zones nécessitant des stratégies spécifiques de gestion des eaux pluviales, de préservation des corridors hydrauliques et de limitation de l'urbanisation en zones inondables. Dans le cas de la Antananarivo et de sa périphérie, ces résultats soulignent l'importance d'une planification intégrée articulant développement urbain et résilience hydrologique.

CONCLUSION

La présente étude a permis de proposer une modélisation spatiale et statistique intégrée du réseau hydrographique de la Région Analamanga, en mettant en évidence sa structuration hiérarchique et sa complexité multi-échelle. L'analyse morphométrique des segments de cours d'eau, combinée à l'examen de leur distribution en échelle log-log, révèle une organisation caractérisée par la dominance de segments courts et l'existence d'axes structurants plus longs. Cette configuration traduit une structuration non aléatoire du drainage régional, conforme aux dynamiques géomorphologiques propres aux systèmes hydrographiques des Hautes Terres centrales de Madagascar. La quantification des indicateurs territoriaux, notamment la longueur cumulée et la densité hydrographique par district, a permis d'objectiver les contrastes intra-régionaux et de dégager une hiérarchisation spatiale pertinente. Certains districts apparaissent caractérisés par une forte complexité hydrographique, traduisant un maillage dense et une connectivité hydrologique élevée, tandis que d'autres présentent une structuration plus lâche. Ces disparités soulignent l'importance d'intégrer les paramètres morphométriques dans l'évaluation des vulnérabilités territoriales, notamment dans le contexte de l'expansion urbaine du Grand Antananarivo. Les résultats démontrent que la modélisation statistique appliquée aux données géospatiales constitue un outil robuste pour appréhender les propriétés structurelles des réseaux naturels et pour éclairer les dynamiques d'aménagement. L'identification d'une distribution à queue lourde suggère qu'une proportion réduite d'axes hydrographiques joue un rôle déterminant dans l'organisation fonctionnelle du territoire, ce qui implique que toute intervention d'aménagement sur ces axes peut avoir des effets systémiques à l'échelle régionale.

En termes opérationnels, cette approche fournit un cadre analytique susceptible d'appuyer la planification territoriale, la gestion intégrée des bassins versants et les stratégies de résilience face aux risques hydrologiques. Elle met en évidence la nécessité de préserver les corridors hydrauliques structurants, de contrôler l'urbanisation dans les zones de forte densité hydrographique et d'intégrer les paramètres morphométriques dans les documents de planification. Ainsi, la modélisation spatiale et statistique du réseau hydrographique d'Analamanga contribue à une meilleure compréhension des interactions entre structure physique du territoire et dynamiques anthropiques, tout en proposant une base méthodologique reproductible et adaptable à d'autres contextes régionaux soumis à des pressions environnementales comparables.

Référence

- [1] Horton, R.E. (1945) 'Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology', Geological Society of America Bulletin, 56(3), pp. 275–370.
- [2] Strahler, A.N. (1957) 'Quantitative analysis of watershed geomorphology', Transactions of the American Geophysical Union, 38(6), pp. 913–920.
- [3] Rodríguez-Iturbe, I. and Rinaldo, A. (1997) Fractal River Basins: Chance and Self-Organization. Cambridge: Cambridge University Press.
- [4] Paul, M.J. and Meyer, J.L. (2001) 'Streams in the urban landscape', Annual Review of Ecology and Systematics, 32, pp. 333–365.
- [5] Bronstert, A. et al. (2002) 'Floods and climate change: interactions and impacts', Natural Hazards and Earth System Sciences, 2, pp. 1–11.

- [6] Tarboton, D.G. (1997) 'A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models', *Water Resources Research*, 33(2), pp. 309–319.
- [7] Meerow, S., Newell, J.P. and Stults, M. (2016) 'Defining urban resilience: a review', *Landscape and Urban Planning*, 147, pp. 38–49.
- [8] Goodchild, M.F., 2018. Reproducible research in GIScience. *GIScience & Remote Sensing*, 55(1), pp.1–5.
- [9] McKinney, W., 2010. Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp.51–56.
- [10] Jordahl, K. et al., 2020. GeoPandas: Python tools for geographic data analysis.
- [11] Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), pp.309–319.
- [12] Clauset, A., Shalizi, C.R. & Newman, M.E.J., 2009. Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 51(4), pp.661–703.
- [13] Batty, M., 2013. *The New Science of Cities*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [14] Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp.275–370.
- [15] Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), pp.913–920.
- [16] Leopold, L.B. & Maddock, T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 252.
- [17] Newman, M.E.J., 2010. *Networks: An Introduction*. Oxford: Oxford University Press.