

Modélisation Hydrospatiale Du Bassin De L'IKOPA : Interactions Entre Altitude Interpolée, Aménagements Hydrauliques, Réponse Pluie-Débit Et Vulnérabilité De La Plaine D'Antananarivo

ANDRIAMBOLANIRINA Valisaona^{1,1}, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa^{1,2}, TOVONIRINA
Mamiharizo Jackie^{1,3}, RAZAFIARISERA Ralay Tiana^{1,4}, RAKOTO DAVID Rambintintsoa^{1,5}

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

Auteur Correspondant : ANDRIAMBOLANIRINA Valisaona, valynirina@gmail.com



Résumé : Cet article analyse le fonctionnement hydrospatial du bassin de l'Ikopa afin d'expliquer la vulnérabilité hydraulique de la plaine d'Antananarivo. La démarche repose sur une modélisation intégrée combinant surfaces d'altitude interpolée, réseau hydrographique, aménagements hydrauliques, isohyètes et relations pluie-débit. Les résultats montrent une opposition nette entre les zones basses de la plaine, souvent inférieures à 1275 m, et les reliefs orientaux et sud-orientaux dépassant 1500 à 1600 m. Les précipitations annuelles varient approximativement de 1330 mm à 1906 mm, avec des apports amont contribuant au renforcement des écoulements vers l'aval. Les barrages de Mantasoa et de Tsiazompaniry, respectivement de 72 Mm³ et 223 Mm³, participent à la régulation hydrologique, tandis que les prises d'eau de Mandroseza et de Tanjombato illustrent les usages urbains et agricoles du système. L'analyse pluie-débit révèle des réponses contrastées, avec des pics proches de 300 m³/s à Mahitsy Kely et supérieurs à 250 m³/s à Anosizato. La surface interpolée du débit moyen confirme une concentration aval, atteignant 110 à 125 m³/s à Mahitsy Kely contre 55 à 75 m³/s autour d'Andriantany et Tanjombato. Ces résultats soulignent le rôle déterminant de la faible pente, de la convergence hydrographique et de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation.

Mots-clés : Ikopa ; modélisation hydrospatiale ; pluie-débit ; altitude interpolée ; vulnérabilité hydraulique.

Abstract: This article analyzes the hydro-spatial dynamics of the Ikopa basin to explain the hydraulic vulnerability of the Antananarivo plain. The approach relies on integrated modeling that combines interpolated elevation surfaces, the river network, hydraulic structures, isohyets, and rainfall-discharge relationships. The results reveal a stark contrast between the plain's low-lying areas—often below 1,275 m—and the eastern and southeastern highlands, which exceed 1,500 to 1,600 m in elevation. Annual precipitation ranges from approximately 1,330 mm to 1,906 mm, with upstream inputs intensifying downstream flow. The Mantasoa and Tsiazompaniry dams (with capacities of 72 Mm³ and 223 Mm³, respectively) play a role in hydrological regulation, while the Mandroseza and Tanjombato water intakes illustrate the system's urban and agricultural uses. Rainfall-discharge analysis shows contrasting responses, with peak flows approaching 300 m³/s at Mahitsy Kely and exceeding 250 m³/s at Anosizato. The interpolated mean discharge surface confirms a downstream concentration of flow, reaching 110–125 m³/s at Mahitsy Kely, compared to 55–75 m³/s around Andriantany and Tanjombato. These findings highlight the critical roles played by low gradients, river network convergence, and urbanization in exacerbating flood risk.

Keywords: Ikopa; hydro-spatial modeling; rainfall-discharge; interpolated elevation; hydraulic vulnerability.

INTRODUCTION

Les bassins versants urbains situés en plaine alluviale sont particulièrement exposés aux inondations, car ils combinent souvent faible pente, concentration des écoulements, artificialisation des sols et forte densité d'occupation humaine. Dans un contexte de changement climatique, les épisodes pluviométriques intenses peuvent accentuer la fréquence et l'ampleur des crues, surtout dans les espaces urbains où les capacités naturelles de drainage sont réduites [1]. La gestion intégrée du risque d'inondation recommande ainsi d'analyser simultanément les paramètres physiques du bassin, les infrastructures hydrauliques, les usages du sol et les vulnérabilités territoriales [2]. La modélisation hydrospatiale constitue une approche pertinente pour comprendre ces interactions. Elle permet de croiser les données altimétriques, hydrographiques, pluviométriques et hydrauliques afin d'expliquer l'organisation des écoulements dans l'espace. Les relations pluie-débit sont particulièrement importantes, car elles traduisent la transformation des précipitations en débits observés, tout en révélant les effets du temps de réponse, de la saturation du bassin et des apports amont [3]. Cette approche rejoint les principes de la socio-hydrologie, selon lesquels les dynamiques de l'eau et les sociétés humaines doivent être étudiées comme un système interdépendant [4]. La plaine d'Antananarivo, située dans le bassin de l'Ikopa, illustre clairement cette problématique. Des travaux antérieurs ont montré que l'urbanisation de l'agglomération s'est progressivement étendue vers des zones inondables ; en 2018, environ 32 % de la population de l'agglomération vivait dans des secteurs exposés aux inondations [5]. Dans ce contexte, l'Ikopa joue un rôle central, car il reçoit les apports provenant des reliefs amont avant de traverser une plaine basse, fortement aménagée et densément occupée. Les études consacrées au bilan hydrique et sédimentaire de l'Ikopa soulignent également l'importance de la saisonnalité des pluies et des écoulements dans la dynamique d'inondation de la plaine [6]. Cette étude analyse donc le fonctionnement hydrospatial du bassin de l'Ikopa en mettant en relation l'altitude interpolée, les aménagements hydrauliques, la réponse pluie-débit et la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo. Les résultats obtenus montrent une opposition entre les zones basses, souvent inférieures à 1275 m, et les reliefs orientaux ou sud-orientaux dépassant 1500 à 1600 m. Les précipitations annuelles varient approximativement de 1330 mm à 1906 mm, tandis que les ouvrages de Mantasoa et de Tsiazompaniry, avec des capacités respectives de 72 Mm³ et 223 Mm³, structurent la régulation amont. L'analyse pluie-débit révèle des pics proches de 300 m³/s à Mahitsy Kely et supérieurs à 250 m³/s à Anosizato, alors que la surface interpolée du débit moyen atteint environ 110 à 125 m³/s à Mahitsy Kely contre 55 à 75 m³/s autour d'Andriantany et de Tanjombato. Ces résultats permettent d'identifier les secteurs de concentration hydraulique et d'expliquer la vulnérabilité différenciée de la plaine, dans une logique compatible avec les approches récentes de cartographie des inondations en milieux urbains pauvres en données [7].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les matériels mobilisés dans cette étude sont constitués principalement de données SIG institutionnelles et de données hydrologiques relatives au bassin de l'Ikopa et à la plaine d'Antananarivo. Les données cartographiques issues de la FTM ont été utilisées comme base géographique de référence pour représenter le réseau hydrographique, les voies de communication, les limites spatiales et les éléments topographiques nécessaires à l'analyse du bassin versant [8]. Les données provenant du BNGRC ont permis d'intégrer la dimension liée aux risques, aux zones exposées et aux enjeux territoriaux associés à la vulnérabilité de la plaine [9]. Les informations hydrologiques et hydrauliques issues de l'APIPA ont complété ces données en fournissant des éléments relatifs aux stations, aux ouvrages hydrauliques, aux niveaux d'eau, aux débits et aux dispositifs de gestion des inondations dans la plaine d'Antananarivo [10]. Le traitement et la modélisation ont été réalisés à l'aide du langage Python, choisi pour sa capacité à assurer une chaîne de traitement reproductible, automatisée et adaptée aux analyses spatiales et hydrologiques. Plusieurs bibliothèques ont été mobilisées selon la nature des opérations. GeoPandas a servi à la lecture, à la gestion et au traitement des couches vectorielles ; pandas a été utilisé pour l'organisation des tableaux et des séries hydrologiques ; NumPy a permis les calculs numériques ; Matplotlib a été employé pour la production des cartes, graphiques et visualisations scientifiques ; tandis que Shapely, pyproj, Rasterio et SciPy ont été utilisés pour les opérations géométriques, la gestion des projections, le traitement éventuel des données raster et certaines opérations d'interpolation ou d'analyse statistique [12], [13], [14], [15]. La première étape méthodologique a consisté à préparer les données spatiales afin de les rendre homogènes et exploitables. Les couches SIG ont été vérifiées, corrigées

si nécessaire, puis reprojétées dans un système de coordonnées métrique adapté à l'analyse spatiale du bassin. Cette harmonisation a permis de réaliser des mesures cohérentes de distance, de surface et de proximité. Les couches hydrographiques, routières, administratives et hydrauliques ont ensuite été découpées selon l'emprise d'étude afin de limiter l'analyse au bassin de l'Ikopa et à la plaine d'Antananarivo. Les entités structurantes, notamment les cours d'eau principaux, les stations hydrométriques, les ouvrages de régulation et les zones basses, ont été isolées pour construire une lecture hydrospatiale cohérente du territoire. La production cartographique a reposé sur une approche de superposition et de croisement spatial des différentes couches. Les cartes ont été élaborées en intégrant le réseau hydrographique, les limites du bassin, les infrastructures hydrauliques, les zones basses, les surfaces interpolées et les éléments d'exposition. Cette démarche a permis de représenter l'organisation spatiale du bassin et de mettre en évidence les relations entre les formes du relief, les axes d'écoulement, les aménagements et les espaces vulnérables. L'objectif n'était donc pas seulement de produire des cartes descriptives, mais de construire des documents d'analyse capables d'expliquer le fonctionnement hydrospatial de la plaine. Les surfaces continues utilisées dans la modélisation ont été obtenues par interpolation spatiale à partir de points de mesure ou de points de référence. La méthode d'interpolation par pondération inverse de la distance a été retenue, car elle permet d'estimer une valeur en un point non observée à partir des observations voisines, en accordant un poids plus important aux points les plus proches [11]. Cette méthode a été appliquée pour produire des surfaces spatialisées utiles à la lecture des gradients altimétriques, hydrologiques et hydrauliques. Les surfaces ainsi générées ont ensuite été classées et cartographiées afin de faciliter leur interprétation scientifique. La modélisation hydrospatiale a été conduite en combinant plusieurs paramètres physiques et hydrauliques. La proximité au réseau hydrographique, la configuration topographique, les zones de convergence des écoulements, la localisation des ouvrages hydrauliques et les secteurs d'exposition ont été mis en relation afin d'identifier les espaces les plus sensibles. Cette approche repose sur le principe que la vulnérabilité de la plaine ne dépend pas d'un seul facteur, mais de l'interaction entre les caractéristiques naturelles du bassin, les aménagements existants et les dynamiques d'occupation du territoire. Les graphiques de modélisation ont été produits à partir des données hydrologiques organisées sous forme de séries temporelles et de tableaux par station. Les analyses ont porté sur la relation entre les précipitations et les débits, la comparaison des stations, la spatialisation du débit moyen et la lecture des variations hydrologiques. Les nuages de points, les surfaces interpolées, les courbes et les graphiques comparatifs ont été utilisés pour représenter les dynamiques pluie-débit et pour mieux comprendre les différences de comportement entre les secteurs du bassin. Ces visualisations complètent les cartes, car elles apportent une lecture quantitative et dynamique du fonctionnement hydrologique. L'ensemble de la démarche repose ainsi sur une chaîne intégrée associant données institutionnelles, traitement SIG, modélisation spatiale, interpolation, analyse hydrologique et visualisation scientifique. Cette méthode permet d'articuler les informations cartographiques et hydrologiques afin d'expliquer le fonctionnement du bassin de l'Ikopa et la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo. Elle présente aussi l'avantage d'être reproductible, car les traitements réalisés sous Python peuvent être vérifiés, adaptés et réutilisés pour d'autres périodes, d'autres stations ou d'autres secteurs du bassin.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1- Organisation hydrospatiale du bassin de l'Ikopa : aménagements hydrauliques, réseau hydrographique, isohyètes et altitude interpolée

La figure suivante présente une lecture intégrée du bassin de l'Ikopa à partir de quatre composantes principales : le réseau hydrographique, les aménagements hydrauliques, la répartition spatiale des isohyètes annuelles et les classes d'altitude interpolée. Elle permet d'observer l'organisation générale du bassin entre les secteurs bas de la plaine d'Antananarivo, les zones intermédiaires de transition et les reliefs plus élevés situés vers l'est et le sud-est. L'intérêt de cette représentation est de mettre en relation les conditions physiques du bassin avec les ouvrages hydrauliques qui structurent la gestion de l'eau, notamment les barrages-réservoirs, les prises d'eau, les stations hydrométriques et la centrale hydroélectrique.

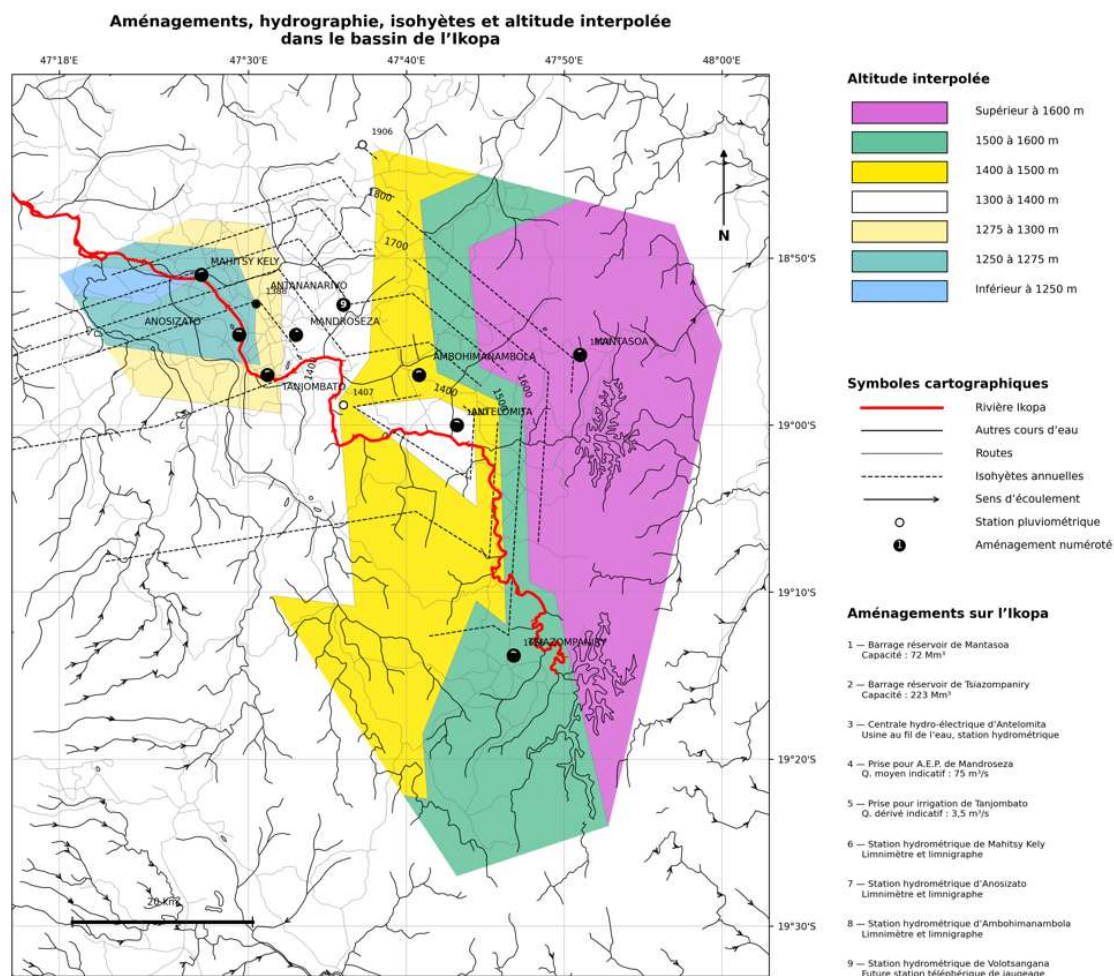


Figure 1: Organisation hydrospatiale du bassin de l'Ikopa : aménagements hydrauliques, réseau hydrographique, isohyètes et altitude interpolée

Source : Auteur

Interprétation

La carte met en évidence un bassin fortement contrasté du point de vue altimétrique. Les zones les plus basses, représentées par les classes inférieures à 1250 m et 1250 à 1275 m, se concentrent surtout dans la partie occidentale et nord-occidentale, autour de Mahitsy Kely, Anosizato, Antananarivo et Tanjombato. Ces secteurs correspondent à la plaine d'Antananarivo, où la faible altitude favorise le ralentissement des écoulements, la concentration des eaux et une plus grande sensibilité aux inondations. À l'inverse, les classes supérieures, notamment 1500 à 1600 m et plus de 1600 m, apparaissent davantage vers l'est et le sud-est, autour de Mantasoa, Tsiazompaniry et des reliefs périphériques. Cette opposition altimétrique traduit une organisation amont-aval nette : les eaux issues des zones hautes convergent progressivement vers les secteurs bas de la plaine. L'Ikopa, représenté en rouge, constitue l'axe hydrographique principal du bassin. Son tracé relie les secteurs amont situés vers Mantasoa, Antelomita et

Ambohimambola aux zones aval de Tanjombato, Anosizato et Mahitsy Kely. Cette disposition montre que la plaine d'Antananarivo n'est pas un espace isolé, mais un secteur de réception et de transfert des eaux venant de l'amont. Les autres cours d'eau, représentés en noir, forment un réseau dense qui alimente l'Ikopa et participe à la complexité du drainage. Le sens d'écoulement indiqué sur la carte confirme cette dynamique de convergence depuis les zones orientales et méridionales vers les parties basses du bassin. La répartition des isohyètes annuelles montre également une variabilité pluviométrique importante. Les valeurs indiquées sur la figure vont approximativement de 1330 mm à 1906 mm. Les secteurs les plus arrosés se situent dans la partie amont et orientale du bassin, avec une valeur maximale de 1906 mm, tandis que des valeurs plus faibles, autour de 1330 mm à 1407 mm, apparaissent dans les secteurs centraux et occidentaux. Cette distribution est importante sur le plan hydrologique, car les zones amont plus arrosées contribuent à l'alimentation du réseau hydrographique, alors que les zones basses aval reçoivent et évacuent ces apports. Le risque hydraulique ne dépend donc pas uniquement de la pluie locale dans la plaine, mais aussi des précipitations reçues dans les secteurs amont du bassin. Les aménagements hydrauliques jouent un rôle majeur dans cette organisation. Le barrage-réservoir de Mantasoa, d'une capacité de 72 Mm³, et celui de Tsiazompaniry, d'une capacité de 223 Mm³, apparaissent comme des ouvrages importants de régulation en amont. Leur position dans les zones plus élevées montre qu'ils participent au contrôle partiel des apports vers l'aval. La centrale hydroélectrique d'Antelomita constitue un autre point stratégique du système, car elle se situe sur le cours de l'Ikopa dans une zone de transition entre les reliefs amont et la plaine. Plus en aval, la prise d'eau de Mandroseza, avec un débit moyen indicatif de 75 m³/s, souligne l'importance de l'Ikopa pour l'alimentation en eau potable, tandis que la prise d'irrigation de Tanjombato, avec un débit dérivé indicatif de 3,5 m³/s, montre le rôle agricole et hydraulique du cours d'eau dans la plaine. La présence de plusieurs stations hydrométriques, notamment à Mahitsy Kely, Anosizato, Ambohimambola et Volotsangana, indique la nécessité d'un suivi régulier des niveaux et des débits. Leur localisation le long de l'Ikopa permet de suivre l'évolution du comportement hydrologique entre l'amont, la plaine centrale et l'aval. Les stations de Mahitsy Kely et d'Anosizato sont particulièrement importantes, car elles se situent dans des secteurs bas où la sensibilité aux crues et aux débordements est plus forte. La station d'Ambohimambola permet quant à elle de contrôler les apports venant de l'amont avant leur entrée dans la zone de plaine. L'interprétation générale de la figure montre que le bassin de l'Ikopa fonctionne comme un système hydrosatial hiérarchisé. Les zones élevées, situées principalement à l'est et au sud-est, reçoivent des précipitations importantes et alimentent les écoulements. Les zones intermédiaires assurent le transfert des eaux vers l'aval, tandis que la plaine d'Antananarivo, plus basse, concentre les écoulements et présente une plus forte vulnérabilité hydraulique. Cette situation explique pourquoi les secteurs d'Anosizato, Tanjombato, Mahitsy Kely et Antananarivo apparaissent comme des espaces sensibles : ils combinent une altitude faible, une proximité avec l'Ikopa, une densité hydrographique importante et une forte dépendance aux aménagements hydrauliques.

2- Structure hydrospatiale de la plaine d'Antananarivo dans le bassin versant de l'Ikopa à Farahantsana

La figure ci-dessous présente une représentation améliorée de la plaine d'Antananarivo à l'intérieur du bassin versant de l'Ikopa à Farahantsana. Elle met en relation le réseau hydrographique, la limite du bassin, les surfaces interpolées d'altitude, la plaine inondable, la zone centrale et les principaux repères interprétatifs tels que le seuil de Bevomanga, la confluence Ikopa-Sisaony et le ralentissement du val d'inondation. La carte est réalisée en projection UTM 38S, avec des coordonnées comprises approximativement entre 730 000 m et 840 000 m Est, et entre 7 820 000 m et 7 940 000 m Nord, ce qui permet une lecture métrique des distances, des surfaces et de l'organisation spatiale du bassin.

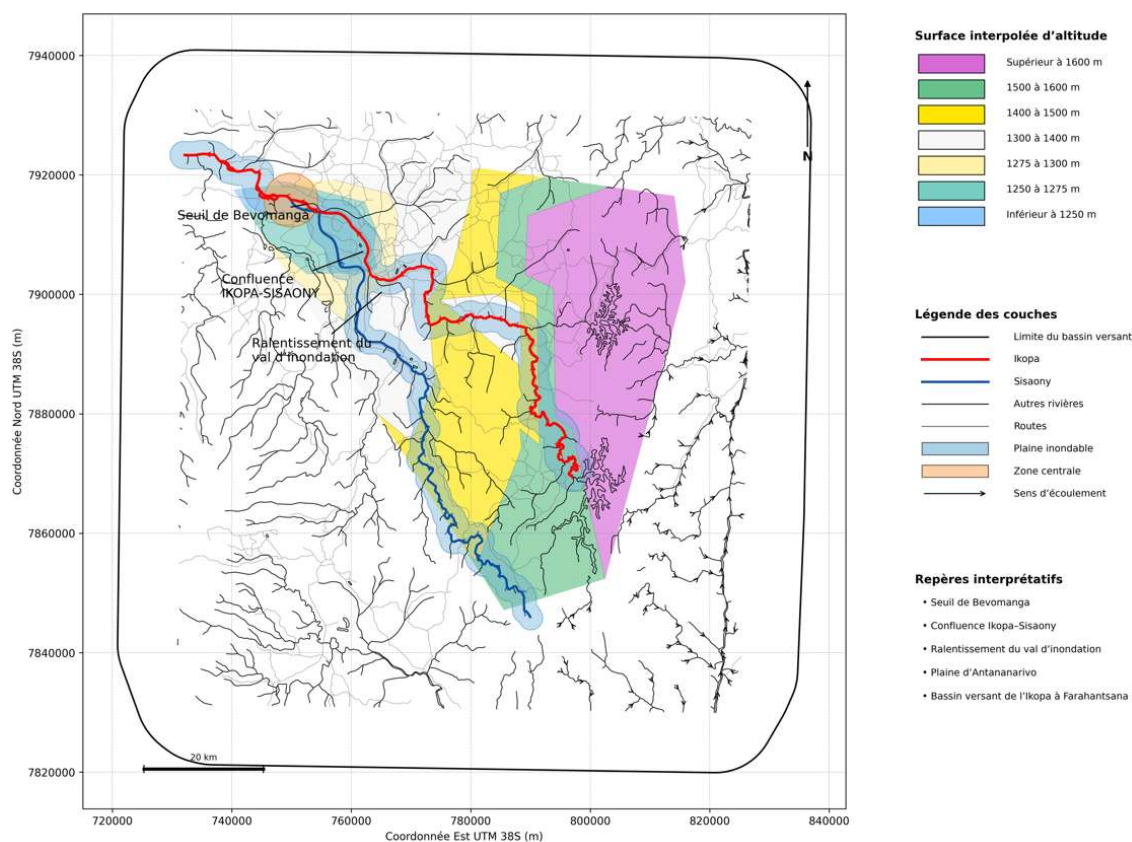


Figure 2: Structure hydrospatiale de la plaine d'Antananarivo dans le bassin versant de l'Ikopa à Farahantsana

Source : Auteur

Interprétation

La figure montre d'abord une forte opposition entre les zones basses de la plaine et les secteurs plus élevés situés vers l'est et le sud-est du bassin. Les classes d'altitude inférieures à 1250 m et comprises entre 1250 et 1275 m apparaissent principalement dans la partie occidentale et nord-occidentale, autour du couloir de l'Ikopa, de la Sisaony, de la confluence Ikopa-Sisaony et du secteur de Bevomanga. Ces altitudes basses correspondent aux espaces les plus favorables à l'accumulation des eaux, car elles se situent dans une zone de faible pente et de drainage ralenti. À l'inverse, les classes de 1500 à 1600 m et supérieures à 1600 m sont davantage représentées vers l'est et le sud-est, ce qui traduit la présence de reliefs périphériques alimentant progressivement le système hydrographique de la plaine. Le tracé de l'Ikopa, représenté en rouge, constitue l'axe principal de drainage du bassin. Il traverse la carte selon une direction générale amont-aval, depuis les secteurs orientaux et sud-orientaux vers la partie nord-ouest de la plaine. La Sisaony, représentée en bleu, rejoint l'Ikopa dans le secteur de confluence situé autour de la partie centrale occidentale de la carte. Cette zone de rencontre entre les deux cours d'eau est hydrologiquement importante, car elle concentre les apports venant de plusieurs directions et augmente la sensibilité locale aux débordements, surtout lorsque les niveaux d'eau sont élevés en saison des pluies. La plaine inondable, figurée en bleu clair, se développe principalement le long du couloir de l'Ikopa et de la Sisaony. Sa forme allongée montre que le risque d'inondation est directement lié à la proximité des cours d'eau et à la morphologie basse du terrain. La zone centrale, représentée en orange, se situe dans un secteur stratégique compris entre le seuil de Bevomanga,

la confluence Ikopa-Sisaony et le val d'inondation. Cette position indique un espace de ralentissement hydraulique, où l'évacuation des eaux peut être limitée par la faible pente, la convergence des écoulements et la configuration topographique de la plaine. La présence du seuil de Bevomanga constitue un élément majeur d'interprétation. Ce seuil marque une contrainte morphologique dans l'écoulement aval. Il peut contribuer au ralentissement du drainage lorsque les volumes d'eau augmentent dans la plaine. Ainsi, même si l'eau converge vers l'aval, son évacuation n'est pas toujours rapide, ce qui peut renforcer la stagnation dans les secteurs bas. Cette situation explique la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo, notamment dans les zones situées à proximité de la confluence Ikopa-Sisaony et dans les couloirs classés en altitude inférieure à 1275 m. Les surfaces interpolées d'altitude permettent aussi de comprendre la dynamique amont-aval du bassin. Les secteurs élevés, notamment ceux classés entre 1400 et 1500 m, 1500 et 1600 m, et au-dessus de 1600 m, jouent le rôle de zones de production des écoulements. Les eaux issues de ces reliefs rejoignent progressivement les secteurs plus bas de la plaine. La transition vers les altitudes de 1300 à 1400 m, puis vers les classes inférieures à 1275 m, correspond à une diminution progressive de l'énergie du relief. Cette baisse altimétrique favorise le passage d'un fonctionnement de ruissellement vers un fonctionnement d'accumulation et de débordement potentiel. Sur le plan scientifique, la figure confirme que la plaine d'Antananarivo est un espace hydrauliquement contraint. Les secteurs les plus sensibles ne sont pas uniquement déterminés par la présence de l'Ikopa, mais par la combinaison de plusieurs facteurs : altitude basse, faible pente, confluence hydrographique, ralentissement aval et présence d'un val d'inondation. Le couloir bleu de la plaine inondable montre que les zones proches de l'Ikopa et de la Sisaony sont les plus exposées, tandis que la zone centrale orange met en évidence un espace où les contraintes hydrauliques et topographiques se superposent. La carte met également en évidence l'importance de l'échelle spatiale. Avec une barre d'échelle de 20 km, on observe que la plaine inondable ne constitue pas un point isolé, mais un système allongé sur plusieurs dizaines de kilomètres. Cette continuité spatiale signifie que les problèmes d'inondation doivent être interprétés à l'échelle du bassin versant et non seulement à l'échelle d'un quartier ou d'un tronçon de rivière. Une perturbation en amont ou un ralentissement à l'aval peut avoir des effets sur l'ensemble du fonctionnement de la plaine.

3- Relation pluie-débit et réponse hydrologique journalière des stations du bassin de l'Ikopa

La figure ci-dessous présente la relation entre la pluie journalière, exprimée en millimètres, et le débit journalier, exprimé en m^3/s , pour cinq stations représentatives du bassin de la plaine d'Antananarivo : Ambohimambola, Andriantany, Anosizato, Mahitsy Kely et Tanjombato. Elle permet d'observer la manière dont les cours d'eau réagissent aux précipitations quotidiennes et de comparer la sensibilité hydrologique des stations selon leur position dans le bassin, leur rôle hydraulique et leur niveau d'exposition aux crues.

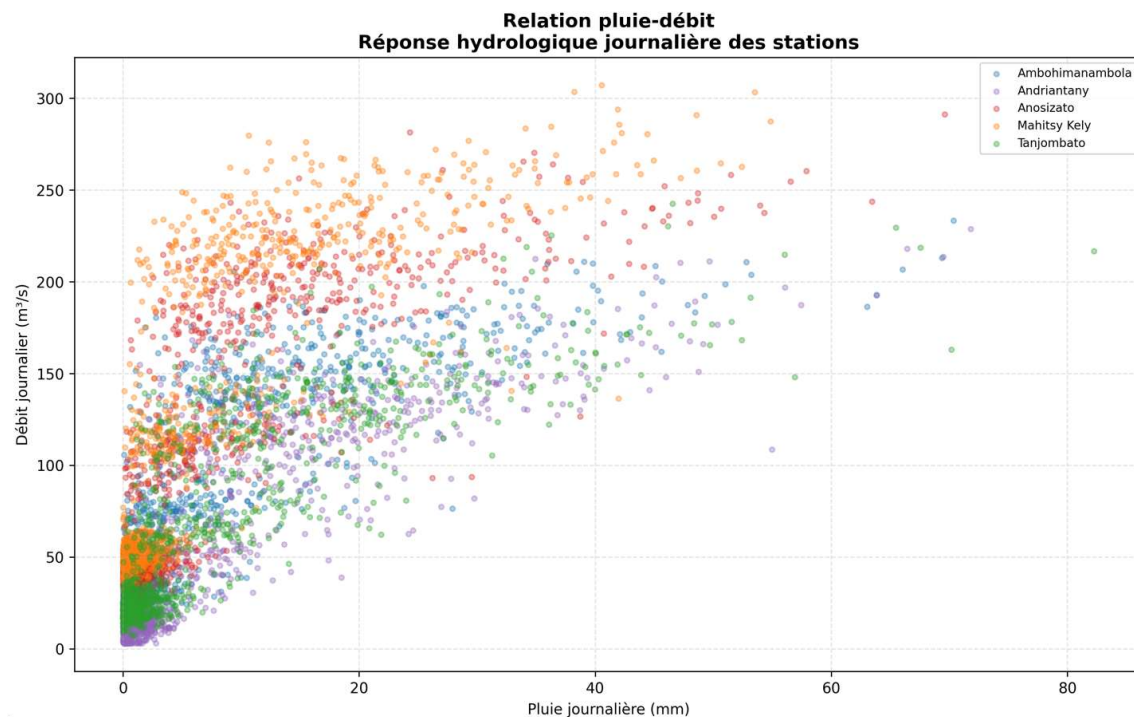


Figure 3: Relation pluie-débit et réponse hydrologique journalière des stations du bassin de l'Ikopa

Source : Auteur

Interprétation

Le nuage de points montre une relation globalement positive entre la pluie journalière et le débit journalier. Lorsque les pluies sont faibles, proches de 0 à 5 mm, les débits restent très variables, allant approximativement de moins de 10 m³/s à plus de 100 m³/s selon les stations. Cette dispersion indique que le débit ne dépend pas uniquement de la pluie du jour même, mais aussi de l'humidité antérieure du bassin, des apports amont, de la capacité de stockage temporaire et du temps de réponse hydrologique. Ainsi, une faible pluie locale peut correspondre à un débit élevé si le bassin est déjà saturé ou si une crue provenant de l'amont arrive avec retard. À partir d'environ 10 à 30 mm de pluie journalière, les débits augmentent nettement. Plusieurs points dépassent alors 150 m³/s, notamment pour Mahitsy Kely et Anosizato. Cette tendance traduit une réponse hydrologique plus marquée lorsque les précipitations deviennent suffisantes pour générer du ruissellement et alimenter directement les cours d'eau. La relation n'est cependant pas parfaitement linéaire, car pour une même quantité de pluie, les débits peuvent varier fortement. Par exemple, autour de 20 mm de pluie, certains débits restent proches de 80 à 120 m³/s, tandis que d'autres dépassent 200 m³/s. Cette variabilité montre l'influence des conditions locales et amont sur la transformation pluie-débit. La station de Mahitsy Kely apparaît comme l'une des plus réactives et des plus fortes en débit. Les points associés à cette station atteignent fréquemment des valeurs comprises entre 180 et 260 m³/s, avec des maximums dépassant environ 300 m³/s lorsque les pluies journalières atteignent 40 à 55 mm. Cette situation peut s'expliquer par sa position aval dans le système de l'Ikopa, où les apports provenant de l'amont s'accumulent progressivement. Mahitsy Kely ne reflète donc pas seulement la pluie locale, mais aussi l'intégration hydrologique d'une partie importante du bassin versant. Anosizato présente également des débits élevés, souvent compris entre 120 et 240 m³/s pour des pluies modérées à fortes. Cette station se distingue par une forte dispersion des valeurs, ce qui traduit une réponse hydraulique complexe dans la plaine urbaine d'Antananarivo. La présence de points dépassant 250 m³/s indique que le secteur peut connaître des situations de forte

charge hydraulique. Cette caractéristique renforce l'idée qu'Anosizato constitue un point sensible, car il combine la proximité de l'Ikopa, la faible altitude de la plaine et la pression urbaine. Ambohimambola présente des valeurs généralement intermédiaires. Les débits y sont souvent compris entre 50 et 180 m³/s, avec quelques valeurs dépassant 200 m³/s lorsque les pluies augmentent. Cette station peut être interprétée comme un secteur de transition entre l'amont et la plaine centrale. Sa réponse hydrologique montre que les apports y sont déjà significatifs, mais moins amplifiés que dans les secteurs aval comme Anosizato ou Mahitsy Kely. Tanjombato montre une réponse également importante, mais avec une amplitude généralement plus modérée que Mahitsy Kely. Les débits se situent fréquemment entre 20 et 160 m³/s, avec certains points dépassant 200 m³/s lorsque la pluie journalière est élevée. Cette distribution confirme le rôle sensible de la Sisaony et du secteur de Tanjombato dans la dynamique d'inondation de la plaine. La présence de pluies fortes, pouvant dépasser 70 à 80 mm dans certains cas, montre que ce secteur peut recevoir des épisodes pluvieux intenses, susceptibles d'alimenter rapidement le réseau hydrographique. La station d'Andriantany présente une réponse particulière. Pour des pluies faibles, les débits restent souvent bas, parfois inférieurs à 50 m³/s, mais ils peuvent augmenter fortement lorsque les précipitations deviennent plus importantes. Certains points atteignent environ 180 à 230 m³/s pour des pluies comprises entre 40 et 70 mm. Cette réaction traduit le caractère sensible du canal d'Andriantany, qui peut fonctionner comme un axe de drainage urbain fortement dépendant des épisodes pluvieux intenses et de la capacité d'évacuation du réseau. L'interprétation générale de la figure montre que le bassin de la plaine d'Antananarivo présente une réponse pluie-débit non linéaire. Les faibles pluies ne produisent pas toujours de faibles débits, et les fortes pluies ne se traduisent pas toujours par une augmentation proportionnelle identique dans toutes les stations. Cette situation révèle l'existence de facteurs de contrôle supplémentaires : saturation préalable des sols, stockage dans les zones basses, transfert amont-aval, capacité des canaux, influence des ouvrages hydrauliques et ralentissement des écoulements dans la plaine. Sur le plan scientifique, cette figure confirme que le risque d'inondation dans la plaine d'Antananarivo ne peut pas être expliqué uniquement par la pluie journalière. La pluie agit comme un facteur déclencheur, mais le débit observé dépend de l'état hydrologique global du bassin. Les stations aval, notamment Mahitsy Kely et Anosizato, montrent des débits plus élevés parce qu'elles intègrent les apports accumulés du réseau hydrographique. Les stations liées à la Sisaony et au canal d'Andriantany montrent quant à elles la sensibilité des sous-systèmes urbains et périurbains aux épisodes pluvieux.

4- Surface interpolée 2D du débit moyen dans le bassin de la plaine d'Antananarivo

La figure suivante illustre la distribution spatiale interpolée du débit moyen journalier dans le bassin de la plaine d'Antananarivo à partir des stations hydrologiques d'Ambohimambola, Anosizato, Andriantany, Tanjombato et Mahitsy Kely. Les valeurs sont exprimées en m³/s et représentées sous forme de surface continue, avec des courbes d'égal débit permettant de visualiser les gradients hydrauliques entre les différents secteurs du bassin. La carte est construite en projection UTM 38S, avec une emprise comprise approximativement entre 740 000 m et 800 000 m Est, et entre 7 890 000 m et 7 930 000 m Nord, ce qui permet d'analyser la répartition spatiale des débits moyens à l'échelle de la plaine.

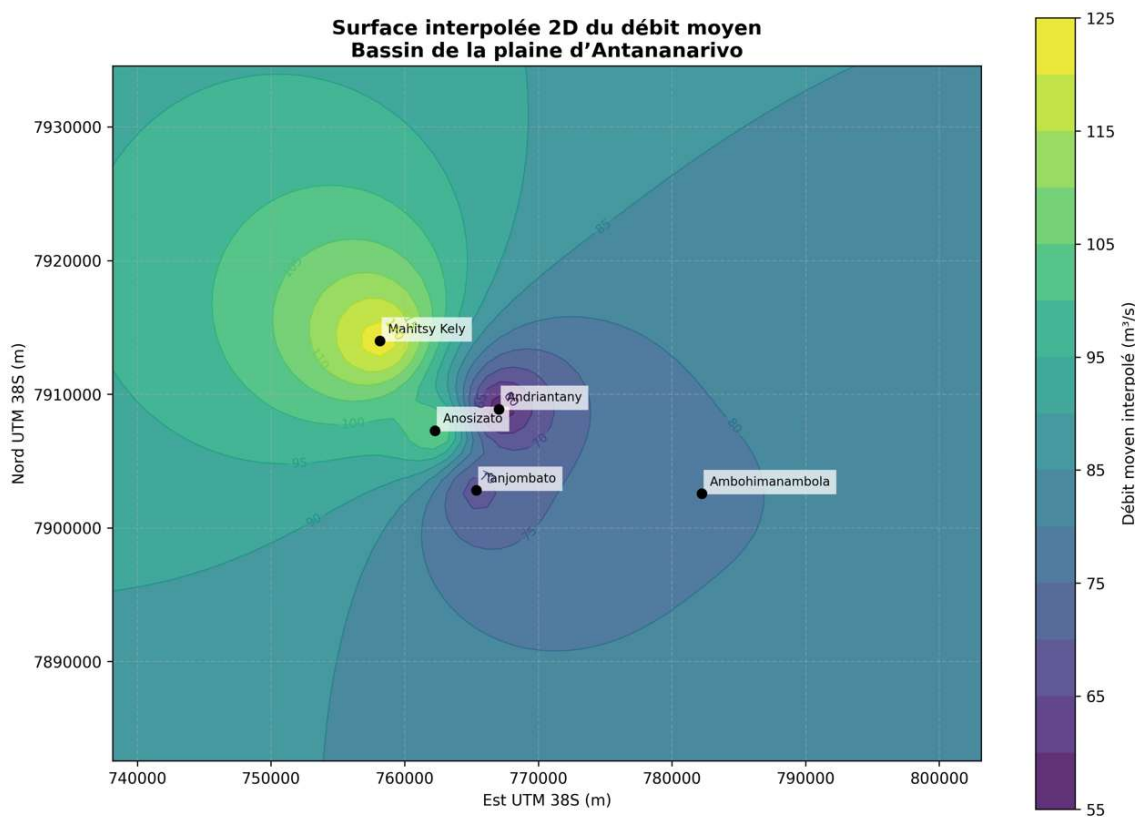


Figure 4: Surface interpolée 2D du débit moyen dans le bassin de la plaine d'Antananarivo

Source : Auteur

Interprétation

La surface interpolée met en évidence une forte différenciation spatiale des débits moyens. Les valeurs les plus élevées apparaissent dans le secteur de Mahitsy Kely, où les teintes jaune-vert indiquent des débits moyens proches de 110 à 125 m³/s. Cette valeur élevée traduit le rôle aval de cette station dans le système de l'Ikopa. Située dans une zone de réception des écoulements, Mahitsy Kely intègre les apports provenant des secteurs amont et centraux du bassin. Elle peut donc être interprétée comme une station de concentration hydrologique, où le débit moyen est renforcé par l'accumulation progressive des eaux drainées par le réseau hydrographique. À l'inverse, les valeurs les plus faibles se concentrent autour d'Andriantany et de Tanjombato, avec des débits interpolés proches de 55 à 75 m³/s. Cette zone apparaît en violet et bleu foncé, ce qui indique un secteur à débit moyen plus faible par rapport à Mahitsy Kely. Toutefois, cette faiblesse relative ne signifie pas nécessairement une absence de risque. Dans un contexte de plaine urbaine, un débit moyen plus faible peut tout de même provoquer des problèmes hydrauliques si la pente est faible, si les canaux sont saturés ou si les capacités d'évacuation sont limitées. Le secteur d'Andriantany est particulièrement important, car il correspond à un système de drainage urbain sensible, où la réponse aux pluies peut être rapide malgré un débit moyen inférieur. La station d'Anosizato occupe une position intermédiaire. Les valeurs autour de cette station se situent approximativement entre 85 et 100 m³/s. Cette situation confirme le rôle de transition d'Anosizato dans la plaine d'Antananarivo. Le secteur ne présente pas les valeurs maximales observées à Mahitsy Kely, mais il reste hydrologiquement actif. Sa proximité avec les zones basses urbanisées et avec les axes d'écoulement principaux renforce son importance dans l'analyse du risque d'inondation. Anosizato peut ainsi être

interprété comme un point de passage et de concentration partielle des eaux avant leur transfert vers l'aval. Ambohimambola présente des valeurs plus modérées, généralement autour de 75 à 85 m³/s. Sa position à l'est de la carte montre un secteur moins marqué par les fortes valeurs de débit moyen que Mahitsy Kely. Cette situation peut s'expliquer par son rôle plus amont dans le système de l'Ikopa, avant l'accumulation complète des apports provenant de la plaine et des sous-bassins associés. Le débit y est significatif, mais il n'atteint pas les niveaux observés plus en aval. Cette différence confirme une organisation hydraulique amont-aval, où les débits tendent à augmenter au fur et à mesure que les écoulements se regroupent. Les courbes d'égal débit montrent un gradient hydraulique net entre la zone de Mahitsy Kely et les secteurs d'Andriantany, Tanjombato et Ambohimambola. Les valeurs passent approximativement de 60 à 70 m³/s dans les zones les plus faibles à plus de 115 m³/s dans le secteur de Mahitsy Kely. Ce gradient révèle une structuration spatiale du bassin autour d'un pôle aval à débit élevé et de secteurs urbains ou périurbains à débit moyen plus modéré. La transition entre ces classes n'est pas brutale partout ; elle se fait progressivement, notamment entre Anosizato et Mahitsy Kely, ce qui montre une continuité hydraulique dans la plaine. Sur le plan scientifique, cette figure confirme que le fonctionnement hydrologique de la plaine d'Antananarivo ne peut pas être interprété de manière uniforme. Les stations ne présentent pas le même niveau de débit moyen, car elles occupent des positions différentes dans le bassin. Mahitsy Kely, avec des valeurs proches de 120 m³/s, traduit l'accumulation aval des écoulements. Anosizato, avec des valeurs proches de 90 à 100 m³/s, représente un secteur intermédiaire sensible. Tanjombato et Andriantany, avec des valeurs plus faibles autour de 60 à 75 m³/s, correspondent à des sous-systèmes hydrauliques où le risque peut être davantage lié à la saturation locale, à la faible pente et à l'urbanisation qu'au seul volume moyen du débit.

DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent que la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo ne peut pas être expliquée par un seul facteur hydrologique. Elle résulte plutôt de l'interaction entre la morphologie basse de la plaine, la concentration des écoulements, la variabilité des pluies, les aménagements hydrauliques et l'occupation humaine du territoire. La modélisation hydrospatiale permet ainsi de comprendre que le bassin de l'Ikopa fonctionne comme un système intégré, dans lequel les eaux produites par les secteurs amont sont progressivement transférées vers les zones basses de la plaine. L'analyse altimétrique met en évidence une opposition nette entre les reliefs orientaux et sud-orientaux, plus élevés, et la plaine centrale, caractérisée par des altitudes plus faibles. Cette configuration favorise un écoulement des eaux vers les secteurs bas, où la pente réduite ralentit l'évacuation. La plaine joue donc à la fois un rôle de zone de réception, de transit et parfois d'accumulation des eaux. Cette situation explique la sensibilité particulière des secteurs proches de l'Ikopa, de la Sisaony et du canal d'Andriantany. Les aménagements hydrauliques apparaissent comme des éléments structurants du fonctionnement du bassin. Les barrages, les prises d'eau, les stations hydrométriques et les ouvrages de régulation participent à la gestion des écoulements, mais ils ne suppriment pas totalement le risque. Leur efficacité dépend des volumes d'eau reçus, de l'état du réseau de drainage, de la saison hydrologique et de la capacité d'évacuation vers l'aval. La présence de ces infrastructures montre que la plaine d'Antananarivo est un espace fortement dépendant d'une gestion technique permanente de l'eau. La relation pluie-débit confirme que la réponse hydrologique du bassin est variable selon les stations. Les secteurs aval présentent généralement des débits plus élevés, car ils reçoivent les apports cumulés de plusieurs sous-systèmes hydrographiques. À l'inverse, certains secteurs urbains ou périurbains peuvent présenter des débits moyens plus faibles, tout en restant sensibles aux inondations en raison de la faible pente, de l'imperméabilisation des sols et de la saturation possible des canaux. Ainsi, le risque ne dépend pas seulement de l'intensité du débit, mais aussi de la capacité locale du territoire à absorber, ralentir ou évacuer l'eau. Les surfaces interpolées permettent de spatialiser les tendances observées à partir des stations. Elles montrent des gradients hydrauliques utiles pour identifier les zones de concentration, les secteurs de transition et les espaces plus vulnérables. Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car l'interpolation dépend du nombre de points disponibles, de leur répartition spatiale et de la qualité des données de départ. Elle constitue donc un outil d'aide à l'analyse, et non une représentation exacte de toutes les variations locales. Dans l'ensemble, cette étude montre que la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo est à la fois naturelle et anthropique. Elle est naturelle par sa position topographique basse et sa fonction de zone de convergence hydrographique. Elle est anthropique par l'urbanisation des zones exposées, la transformation des espaces de drainage et la pression exercée sur les infrastructures hydrauliques. La modélisation hydrospatiale apporte ainsi une lecture intégrée du bassin de l'Ikopa et permet de

mieux comprendre les conditions qui favorisent les inondations dans la plaine. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion coordonnée à l'échelle du bassin versant. La prévention des inondations ne peut pas se limiter à des interventions localisées dans la plaine ; elle doit aussi prendre en compte les apports amont, les zones de stockage naturel, l'entretien des canaux, la maîtrise de l'urbanisation et le suivi hydrologique continu. Une telle approche permettrait de renforcer la résilience de la plaine d'Antananarivo face aux risques hydrauliques.

CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer que la vulnérabilité de la plaine d'Antananarivo est étroitement liée au fonctionnement hydrospatial du bassin de l'Ikopa. L'analyse combinée de l'altitude interpolée, du réseau hydrographique, des aménagements hydrauliques et de la réponse pluie-débit met en évidence une organisation marquée par la convergence des écoulements vers les zones basses de la plaine. Les résultats montrent que les reliefs amont jouent un rôle important dans la production des écoulements, tandis que la plaine centrale fonctionne comme un espace de réception, de ralentissement et parfois d'accumulation des eaux. Cette situation est renforcée par la faible pente, la densité du réseau hydrographique, la présence d'ouvrages hydrauliques et l'occupation progressive des zones exposées. La modélisation hydrospatiale apparaît ainsi comme un outil pertinent pour comprendre les mécanismes qui favorisent les inondations dans la plaine d'Antananarivo. Elle permet de dépasser une simple lecture descriptive du territoire en mettant en relation les facteurs naturels, hydrologiques et anthropiques. Elle montre également que le risque hydraulique ne dépend pas uniquement de la quantité de pluie, mais aussi de la position des secteurs dans le bassin, des apports amont, de la capacité d'évacuation et de l'état des infrastructures. La plaine d'Antananarivo constitue un espace fortement contraint, où la gestion de l'eau doit être pensée à l'échelle du bassin versant de l'Ikopa. Une meilleure prévention des inondations suppose donc le renforcement du suivi hydrologique, l'entretien des canaux, la protection des zones de drainage naturel, la maîtrise de l'urbanisation en zones basses et une coordination durable entre les acteurs chargés de l'aménagement et de la gestion des risques.

Référence

- [1] IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.
- [2] Jha, A.K., Bloch, R. and Lamond, J., 2012. Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-0-8213-8866-2.
- [3] Beven, K.J., 2012. Rainfall–Runoff Modelling: The Primer. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781119951001.
- [4] Sivapalan, M., Savenije, H.H.G. and Blöschl, G., 2012. 'Socio-hydrology: A new science of people and water', Hydrological Processes, 26(8), pp. 1270–1276. doi:10.1002/hyp.8426.
- [5] Ramiamanana, F.N. and Teller, J., 2021. 'Urbanization and floods in Sub-Saharan Africa: spatiotemporal study and analysis of vulnerability factors—case of Antananarivo agglomeration, Madagascar', Water, 13(2), 149. doi:10.3390/w13020149.
- [6] Lema, M.Q., 2023. Étude du bilan hydrique et sédimentaire de l'Ikopa au niveau de la plaine d'Antananarivo : effet saisonnier. Mémoire de Master, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Université d'Antananarivo. doi:10.13140/RG.2.2.33908.26249.

-
- [7] Ramiaramananana, F.N., Munyi, J.M.M., Archambeau, P. and Teller, J., 2025. 'A comparative assessment of flood mapping methods for urban risk management in data-poor environments', *Natural Hazards*. doi:10.1007/s11069-025-07590-9 .
- [8] Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (FTM), 2023. Madagascar Report. Southern Africa and Islands Hydrographic Commission Meeting. Madagascar.
- [9] Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC), n.d. Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes. Antananarivo: BNGRC.
- [10] PRODUIR Madagascar, 2021. APIPA : Autorité pour la Protection contre les Inondations de la Plaine d'Antananarivo. Antananarivo: Projet de Développement Urbain Intégré et de Résilience.
- [11] Shepard, D., 1968. 'A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data', *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, pp. 517–524.
- [12] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J. and Leblanc, F., 2020. GeoPandas: Python tools for geographic data. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.3946761.
- [13] McKinney, W., 2010. 'Data structures for statistical computing in Python', *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 56–61. doi:10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- [14] Harris, C.R., Millman, K.J., Van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D. et al., 2020. 'Array programming with NumPy', *Nature*, 585, pp. 357–362. doi:10.1038/s41586-020-2649-2.
- [15] Hunter, J.D., 2007. 'Matplotlib: A 2D graphics environment', *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95. doi:10.1109/MCSE.2007.55.