



ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE ET MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DES CRUES DANS LE BASSIN SUPÉRIEUR DE L'IKOPA

¹RAVELOALISON Haja Nirina, ²RAHARINIERANA Hantaniana ¹ANDRIANANDRASANA Tolotra,

¹RANDRIANARISON Tsirihanitra E.P.

1- Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCES- UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

2- Ecole Doctorale en SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIERIE ET DE L'INNOVATION -UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

RESUME : Cette étude analyse la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa, à partir d'une approche combinant cartographie hydrographique, interpolation spatio-temporelle et modélisation hydraulique conceptuelle. Le secteur étudié s'étend de la station d'Antelomita à celle d'Anosizato, en passant par Ambohimambola, sur un tronçon d'environ 40,5 km, au sein d'un bassin supérieur estimé à 4 290 km². Les résultats issus de la période 2021-2030 montrent une forte variabilité des débits, compris approximativement entre 70 et 340 m³/s, avec des années critiques identifiées en 2025 et 2029. Le débit spécifique varie entre 0,056 et 0,248 m³/s/km², tandis que la vitesse hydraulique interpolée atteint environ 1,60 à 2,65 m/s. L'indice relatif de crue, compris entre 0,28 et 1,12, indique que certains épisodes dépassent la référence historique. Le modèle de convection-dégradation appliqué à l'année 2029 estime une vitesse moyenne de propagation de 8,78 km/h, avec un temps d'arrivée d'environ 3,0 h à Ambohimambola et 4,6 h à Anosizato. Ces résultats soulignent l'importance d'une surveillance hydrologique renforcée pour la gestion des risques de crue.

Mots-clés : Ikopa ; crue ; modélisation hydraulique ; interpolation spatio-temporelle ; risque hydrologique.

ABSTRACT: This study analyzes flood propagation in the upper Ikopa River basin using an approach that combines hydrographic mapping, spatio-temporal interpolation, and conceptual hydraulic modeling. The study area extends from the Antelomita station to the Anosizato station, passing through Ambohimambola, over a river reach of approximately 40.5 km within an upper basin estimated at 4,290 km². Results obtained for the 2021–2030 period reveal significant discharge variability, ranging approximately from 70 to 340 m³/s, with critical years identified in 2025 and 2029. The specific discharge varies between 0.056 and 0.248 m³/s/km², while the interpolated hydraulic velocity reaches approximately 1.60 to 2.65 m/s. The relative flood index, ranging from 0.28 to 1.12, indicates that some flood events exceed the historical reference level. The convection–degradation model applied to the year 2029 estimates an average flood propagation velocity of 8.78 km/h, with an estimated travel time of approximately 3.0 hours to Ambohimambola and 4.6 hours to Anosizato. These results highlight the importance of strengthening hydrological monitoring for effective flood risk management.

Keywords: Ikopa River; flood; hydraulic modeling; spatio-temporal interpolation; hydrological risk.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.21512112>

1 Introduction

Les crues fluviales constituent l'un des phénomènes hydrologiques les plus déterminants dans la dynamique des bassins versants, en raison de leurs effets sur les écoulements, les zones riveraines, les infrastructures et l'organisation territoriale. Leur analyse exige une compréhension conjointe des processus hydrologiques, qui contrôlent la formation des débits, et des processus hydrauliques, qui gouvernent la propagation de l'onde de crue le long du cours d'eau [1]. Dans les bassins tropicaux et urbains, cette problématique devient particulièrement importante, car la combinaison entre variabilité pluviométrique, occupation du sol, morphologie du lit et aménagements humains peut modifier les réponses hydrologiques et accentuer les risques d'inondation [2]. Le bassin supérieur de l'Ikopa représente un cas d'étude pertinent pour analyser la propagation des crues à l'échelle d'un tronçon fluvial structurant. Limité à la station de Bevomanga, ce bassin présente une superficie d'environ 4 290 km². La présente étude se concentre sur le tronçon compris entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato, sur une longueur totale d'environ 40,5 km. Cette portion permet d'étudier l'évolution amont-aval des débits, des vitesses hydrauliques et des indicateurs de crue, tout en tenant compte de la continuité spatiale du système fluvial. L'approche adoptée s'inscrit dans une logique de modélisation hydrologique et hydraulique, où les débits sont interprétés comme des variables dynamiques dépendant à la fois du temps, de la position longitudinale et des caractéristiques physiques du bassin [3]. La modélisation de la propagation des crues repose classiquement sur les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, qui constituent la base des équations de Saint-Venant utilisées en hydraulique fluviale [4]. Ces modèles permettent de représenter l'évolution des hauteurs d'eau, des débits et des vitesses dans les écoulements à surface libre. Toutefois, lorsque les données disponibles sont limitées, des modèles conceptuels simplifiés peuvent être mobilisés pour analyser les tendances générales de propagation, d'atténuation et de transfert de l'onde de crue [5]. Dans cette étude, le modèle de convection-dégradation est utilisé comme outil d'interprétation de la dynamique de propagation, en considérant que le signal de crue se déplace vers l'aval avec une vitesse moyenne tout en subissant une atténuation progressive. L'analyse s'appuie également sur des outils de cartographie hydrographique, d'interpolation spatio-temporelle et de visualisation scientifique. Les données BD100 et HOTOSM/OpenStreetMap sont mobilisées pour caractériser le réseau hydrographique, comparer les sources spatiales et situer les communes concernées par le corridor de l'Ikopa. Les résultats montrent notamment des débits interpolés variant approximativement entre 70 et 340 m³/s sur la période 2021-2030, des débits spécifiques compris entre 0,056 et 0,248 m³/s/km², des vitesses hydrauliques de l'ordre de 1,60 à 2,65 m/s, ainsi qu'un indice relatif de crue atteignant environ 1,12 lors des épisodes les plus marqués. Les années 2025 et 2029 apparaissent comme des périodes critiques, tandis que la modélisation de l'année 2029 indique une vitesse moyenne de propagation d'environ 8,78 km/h, avec un temps d'arrivée théorique de 3,0 h à Ambohimambola et 4,6 h à Anosizato. Ainsi, cette étude vise à proposer une lecture intégrée de la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa, en combinant analyse spatiale, indicateurs hydrologiques, interpolation 2D/3D et modélisation conceptuelle. Cette démarche permet non seulement d'identifier les années et secteurs hydrologiquement sensibles, mais aussi d'apporter des éléments utiles à la surveillance des crues, à la planification territoriale et à la gestion des risques hydrauliques dans la région d'Analamanga [6], [7].

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

La réalisation de cette étude repose sur l'exploitation conjointe de données hydrologiques, de données géographiques et d'outils de traitement scientifique sous environnement Python. Les données hydrologiques de base proviennent du fichier Excel relatif aux crues de l'Ikopa, comprenant les onglets consacrés aux séries historiques, aux projections de l'année 2021 et à la série estimée 2021–2030. Ces données ont permis d'extraire les débits, les débits spécifiques, les stations hydrologiques et les paramètres associés au tronçon Antelomita–Ambohimambola–Anosizato, long d'environ 40,5 km. Les traitements tabulaires, la restructuration des données en format long et la construction des tableaux analytiques ont été effectués à l'aide de la bibliothèque pandas, adaptée à la manipulation de données structurées et aux analyses statistiques en Python [8]. Les calculs numériques nécessaires à l'estimation des paramètres hydrauliques, à la construction des matrices, aux opérations vectorielles et à la génération des grilles de modélisation ont été réalisés avec NumPy. Cette bibliothèque a été mobilisée pour

calculer les vitesses hydrauliques, les indices relatifs de crue, les surfaces interpolées et les champs de concentration du modèle convection–dégradation [9]. Les données spatiales utilisées pour la contextualisation hydrographique, notamment les limites communales, le réseau BD100 et les données HOTOSM/OpenStreetMap, ont été traitées dans un environnement géospatial basé sur GeoPandas, permettant la lecture, la reprojection, la superposition et l’analyse des couches vectorielles [10]. L’interpolation spatio-temporelle des variables hydrologiques et hydrauliques a été réalisée avec SciPy, en particulier pour produire les champs continus de débit, de débit spécifique, de vitesse hydraulique et d’indice relatif de crue. Cette étape a permis de passer de valeurs ponctuelles associées aux stations à des surfaces analytiques en deux et trois dimensions, facilitant l’interprétation de la propagation des crues dans le bassin supérieur de l’Ikopa [11]. Enfin, les visualisations scientifiques, incluant les hydrogrammes, matrices de corrélation, heatmaps, surfaces 3D et graphiques du modèle convection–dégradation, ont été produites avec Matplotlib. Ce choix a permis d’obtenir des représentations graphiques lisibles, reproductibles et adaptées à une présentation académique des résultats [12]. Ainsi, l’ensemble du matériel mobilisé combine des données hydrologiques issues des stations de l’Ikopa, des couches géographiques de référence et des bibliothèques scientifiques Python. Cette combinaison assure la cohérence entre l’analyse statistique, la représentation spatiale et la modélisation conceptuelle de la propagation des crues. Elle permet également de garantir la reproductibilité du traitement, depuis l’importation des données jusqu’à la production des figures finales et des indicateurs utilisés pour l’interprétation hydrologique et hydraulique.

2.2 Méthodes

La méthodologie adoptée repose sur une démarche intégrée combinant traitement géospatial, analyse hydrologique, interpolation spatio-temporelle et modélisation conceptuelle de la propagation des crues. Dans un premier temps, les données hydrographiques issues de BD100 et de HOTOSM/OpenStreetMap ont été utilisées pour caractériser le réseau hydrographique du bassin supérieur de l’Ikopa. Les couches vectorielles ont été vérifiées, reprojctées dans un système métrique cohérent et superposées aux limites communales afin d’identifier le tracé principal de l’Ikopa, les écarts entre sources cartographiques, les communes traversées et les corridors d’influence du cours d’eau. Les zones tampons successives de 0 à 500 m, de 500 m à 1 km, de 1 à 3 km et de 3 à 5 km ont permis de spatialiser l’environnement immédiat et élargi de la rivière, conformément aux principes d’analyse spatiale appliqués aux systèmes d’information géographique [13]. Dans un second temps, les données hydrologiques des stations d’Antelomita, d’Ambohimanambola et d’Anosizato ont été structurées et analysées sur la période 2021–2030. Le tronçon étudié, long d’environ 40,5 km, a été considéré comme un axe longitudinal amont-aval permettant de suivre l’évolution des paramètres hydrologiques et hydrauliques. Les débits, les débits spécifiques, les vitesses hydrauliques et les indices relatifs de crue ont été calculés pour chaque station et chaque année. Le débit spécifique a été obtenu en rapportant le débit à la surface contributive du bassin versant, tandis que l’indice relatif de crue a été déterminé par comparaison avec une valeur de référence historique. Cette étape a permis d’identifier les années hydrologiquement sensibles, notamment 2025 et 2029, ainsi que les variations de comportement entre l’amont, la station intermédiaire et l’aval. L’interpolation spatio-temporelle a ensuite été mobilisée pour transformer les valeurs ponctuelles observées ou estimées aux stations en champs continus. Cette méthode a permis de représenter, sous forme de cartes 2D et de surfaces 3D, la distribution du débit, du débit spécifique, de la vitesse hydraulique et de l’indice relatif de crue selon le temps et la distance longitudinale. L’objectif était de mieux visualiser les gradients, les zones de concentration des valeurs élevées et les périodes critiques de propagation des crues. Cette approche s’appuie sur les principes de la statistique spatiale et de l’interpolation de données irrégulièrement distribuées, qui permettent d’estimer des valeurs intermédiaires à partir de points connus [14], [15]. Enfin, un modèle conceptuel de convection–dégradation a été appliqué pour simuler la propagation d’une onde de crue le long du tronçon Antelomita–Ambohimanambola–Anosizato. Le modèle repose sur l’équation de transport ($\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = -kc$), dans laquelle (c) représente l’intensité normalisée du signal de crue, (u) la vitesse moyenne de propagation et (k) le coefficient de dégradation. Cette formulation permet de distinguer deux mécanismes complémentaires : la convection, qui traduit le déplacement de l’onde vers l’aval, et la dégradation, qui exprime l’atténuation progressive du signal sous l’effet de la dispersion, de la dilution et de l’amortissement hydraulique. Pour l’année 2029, la vitesse moyenne de propagation a été estimée à environ 8,78 km/h, ce qui correspond à un temps d’arrivée théorique d’environ 3,0 h à Ambohimanambola et 4,6 h à Anosizato. Cette modélisation simplifiée s’inscrit dans le cadre général des modèles de propagation d’onde et des équations de transport utilisées en hydraulique fluviale [16], [17].

L'ensemble de la démarche permet ainsi de relier les observations cartographiques, les indicateurs hydrologiques et la dynamique de propagation des crues. Elle offre une base méthodologique reproductible pour analyser les crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa, identifier les années critiques, localiser les secteurs sensibles et contribuer à l'amélioration de la surveillance hydrologique et de la gestion des risques d'inondation.

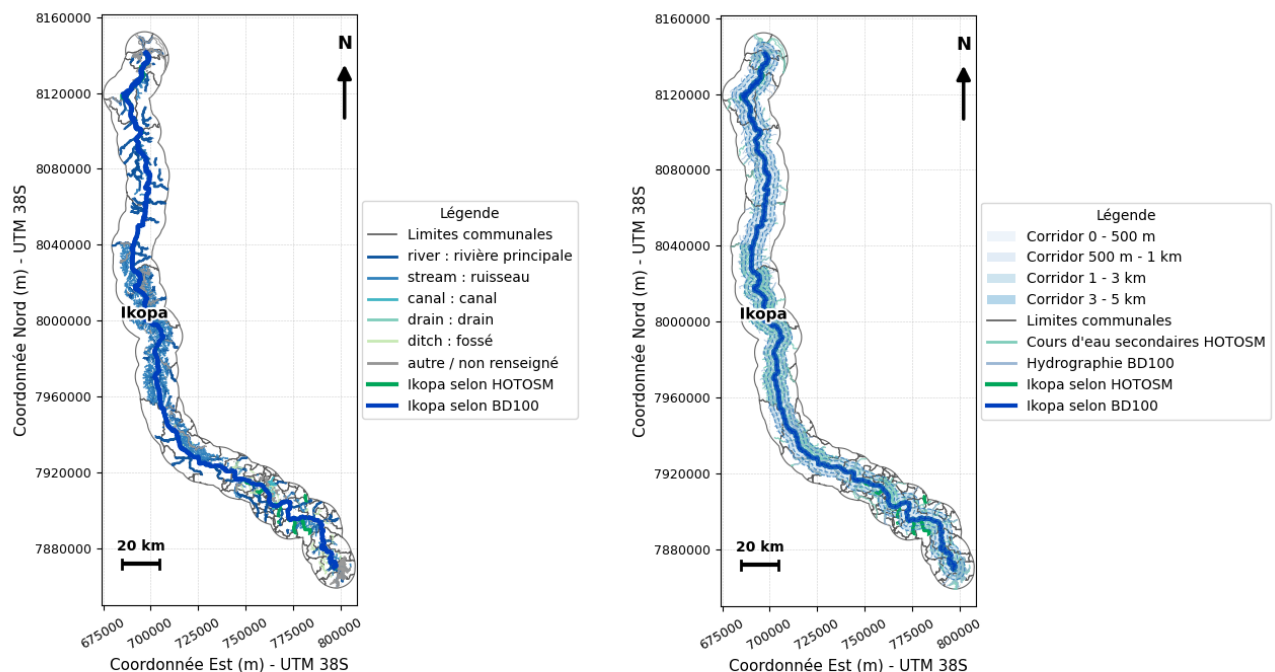
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Typologie du réseau hydrographique et corridor d'influence de la rivière Ikopa dans la région d'Analamanga

La figure ci-après présente une lecture croisée du réseau hydrographique de la rivière Ikopa à partir des données HOTOSM/OpenStreetMap et BD100, dans le système de coordonnées métriques UTM 38S. Elle met en relation deux dimensions complémentaires de l'analyse hydrologique : d'une part, la typologie des cours d'eau autour de l'Ikopa selon les classes disponibles dans HOTOSM, et d'autre part, l'organisation spatiale du corridor hydrographique autour du cours principal, défini par des zones tampons successives de 0–500 m, 500 m–1 km, 1–3 km et 3–5 km.

Figure 1: Typologie du réseau hydrographique et corridor d'influence de la rivière Ikopa dans la région d'Analamanga



Sources : BD100 hydrographie ; HOTOSM / OpenStreetMap waterways ; communes BD100. Traitement

Source : Auteur 2026

Interprétation

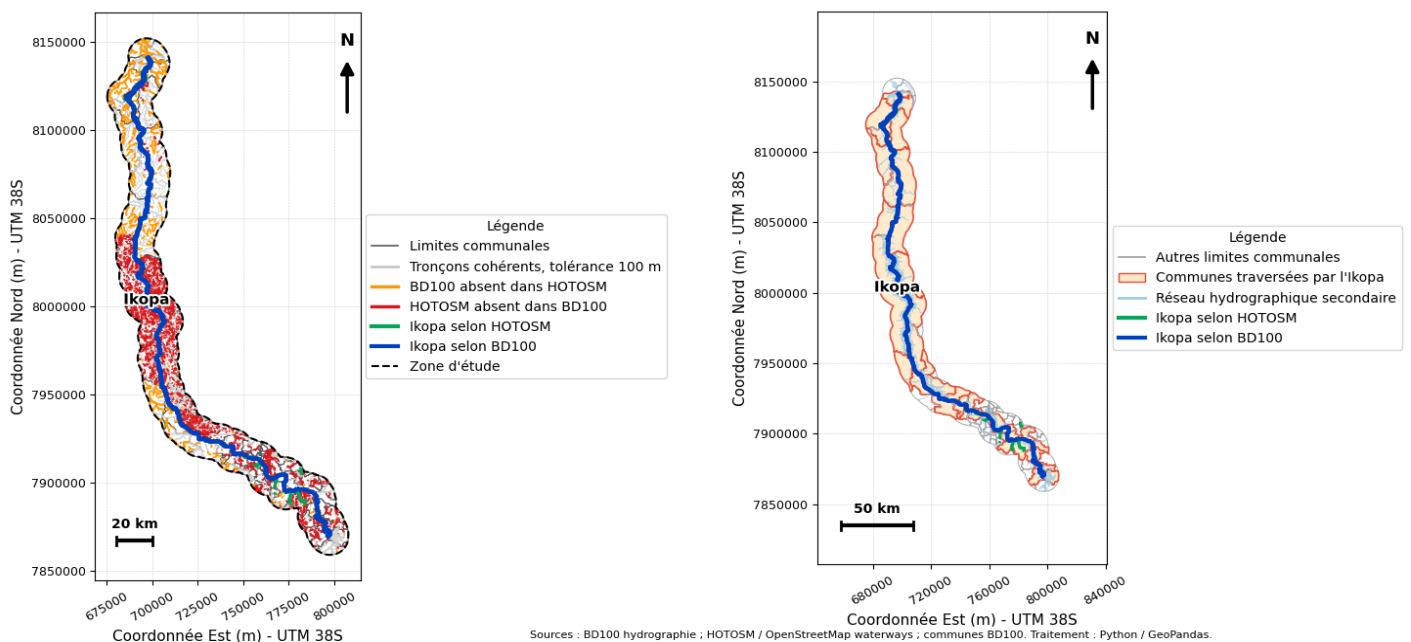
L'emprise cartographique couvre approximativement les coordonnées 675 000 m à 800 000 m Est et 7 860 000 m à 8 160 000 m Nord, soit un corridor d'analyse d'environ 125 km en largeur et 300 km en extension nord-sud. L'échelle graphique de 20 km permet une lecture détaillée de la structure hydrographique, tandis que la flèche nord confirme l'orientation générale du système fluvial. Le tracé principal de l'Ikopa est représenté à la fois selon BD100 en bleu foncé et selon HOTOSM en vert, ce qui permet d'apprécier la cohérence entre les deux sources de données. La carte de gauche montre que le réseau hydrographique autour de l'Ikopa est dominé par les classes associées aux rivières principales et aux ruisseaux, tandis que les éléments secondaires tels que les canaux, drains, fossés et objets non renseignés apparaissent de manière plus localisée. Cette distribution traduit une organisation hiérarchisée du réseau, dans laquelle l'Ikopa joue le rôle d'axe hydrographique principal, alimenté ou accompagné par un réseau secondaire plus dense dans certains secteurs. La superposition avec les limites communales montre également que le cours d'eau traverse un espace administrativement fragmenté, ce qui renforce l'intérêt d'une gestion intercommunale du réseau hydrographique. La carte de droite met en évidence le corridor d'influence

immédiat de l'Ikopa. Les zones les plus proches du cours principal, notamment les bandes de 0 à 500 m et de 500 m à 1 km, correspondent aux espaces les plus directement exposés aux interactions hydrauliques avec la rivière, qu'il s'agisse de débordement, de drainage, d'érosion de berges ou d'occupation riveraine. Les bandes plus larges, comprises entre 1 et 3 km puis entre 3 et 5 km, permettent d'élargir l'analyse vers les cours d'eau secondaires et les zones potentiellement influencées par la dynamique du bassin versant. Cette structuration en corridors successifs offre ainsi une lecture progressive de la zone d'influence hydrographique. La figure montre que l'Ikopa constitue un axe hydrographique majeur, organisé selon une direction dominante nord-sud avant de s'infléchir vers le sud-est dans la partie aval de l'emprise. La combinaison de la typologie HOTOSM et du corridor hydrographique permet d'identifier les secteurs où le réseau secondaire est le plus dense, mais aussi les espaces les plus proches du cours principal. Cette approche est particulièrement utile pour les études de gestion des crues, de planification territoriale, de suivi des zones riveraines et d'analyse des risques hydrauliques dans la région d'Analamanga.

3.1.2 Analyse comparative et spatiale du réseau hydrographique de la rivière Ikopa

La figure ci-après présente une analyse comparative et spatiale du réseau hydrographique de la rivière Ikopa à partir de deux sources de données : la base BD100 et les données collaboratives HOTOSM/OpenStreetMap. Elle met en évidence, d'une part, les écarts géométriques entre les deux référentiels hydrographiques et, d'autre part, les communes directement traversées par le cours principal de l'Ikopa. L'ensemble de la représentation est projeté dans le système UTM 38S, ce qui permet une lecture métrique des distances, des décalages spatiaux et de l'organisation amont-aval du réseau. Cette figure est composée de deux cartes complémentaires. La carte de gauche illustre les écarts entre BD100 et HOTOSM autour de la rivière Ikopa, avec une tolérance spatiale de 100 m utilisée pour distinguer les tronçons considérés comme cohérents ou divergents. Les tronçons en orange représentent les éléments présents dans BD100 mais absents ou non appariés dans HOTOSM, tandis que les tronçons en rouge indiquent les éléments présents dans HOTOSM mais absents ou non appariés dans BD100. La carte de droite présente les communes traversées par la rivière Ikopa, sans affichage nominatif des communes, afin de conserver une lecture cartographique claire.

Figure 2: Analyse comparative et spatiale du réseau hydrographique de la rivière Ikopa



Source : Auteur 2026

Interprétation

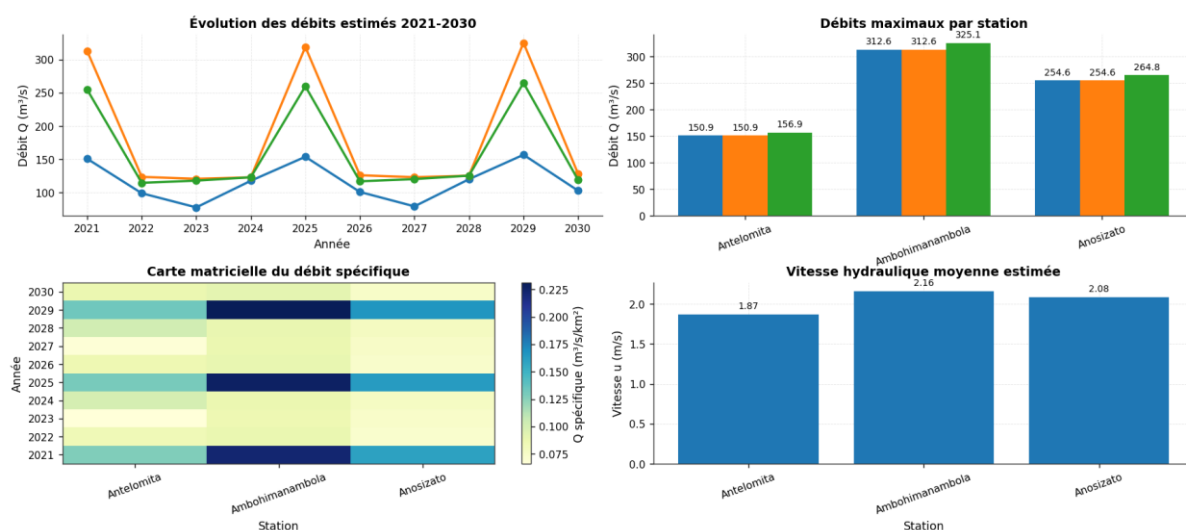
La carte montre une très forte dominance de la classe QUAL = 0 sur presque toute la région Analamanga. Cette La carte de gauche met en évidence une forte variabilité spatiale entre les deux bases de données hydrographiques. La rivière Ikopa, représentée en bleu foncé selon BD100 et en vert selon HOTOSM, suit globalement une trajectoire comparable, ce qui montre une cohérence générale entre les deux sources pour le tracé principal. Toutefois, plusieurs écarts apparaissent le long du corridor hydrographique, notamment sous forme de tronçons orange et rouges. La présence importante de tronçons orange indique que certains éléments hydrographiques

contenus dans la BD100 ne sont pas retrouvés dans HOTOSM dans la limite de la tolérance de 100 m. Cela peut traduire une différence de précision géométrique, une généralisation cartographique propre à la BD100, ou encore l'absence de certains petits cours d'eau dans les données OSM. À l'inverse, les tronçons rouges signalent des éléments présents dans HOTOSM mais non appariés avec BD100. Ces différences peuvent être liées à une mise à jour plus récente d'OpenStreetMap, à une numérisation plus détaillée du réseau secondaire, ou à des variations dans les critères de classification des objets hydrographiques. La distribution des écarts n'est pas homogène. On observe des zones où les divergences sont plus concentrées, en particulier dans les parties sinueuses et dans les secteurs où le réseau secondaire est dense. Ces secteurs sont généralement plus sensibles aux différences de méthode de numérisation, car les petits affluents, drains, canaux ou bras secondaires peuvent être interprétés différemment selon la source de données. La carte de droite permet de replacer la rivière Ikopa dans son contexte administratif. Les communes traversées sont représentées par une teinte claire orangée, tandis que les autres limites communales apparaissent en gris. Cette représentation met en évidence que l'Ikopa traverse un ensemble continu de communes selon un axe globalement nord-sud, puis oblique vers le sud-est dans la partie aval de la zone représentée. Le tracé principal de l'Ikopa apparaît bien structurant pour l'organisation spatiale des communes. La rivière constitue un élément territorial majeur, car elle traverse ou longe plusieurs entités administratives. Cette situation montre l'importance de l'Ikopa non seulement comme objet hydrographique, mais aussi comme élément de structuration territoriale, pouvant influencer les enjeux d'aménagement, de gestion des risques, de drainage et de planification communale. La carte de droite présente une emprise plus large que la carte des écarts, avec des coordonnées visibles allant approximativement de 680 000 m à 840 000 m Est, et de 7 850 000 m à 8 150 000 m Nord. L'échelle graphique de 50 km permet une lecture plus synthétique de la relation entre le cours d'eau et les communes traversées. Cette différence d'échelle confirme que la seconde carte vise davantage une interprétation territoriale qu'une analyse fine des écarts géométriques. Les deux cartes se complètent utilement. La première met l'accent sur la qualité et la cohérence des données hydrographiques, tandis que la seconde montre la portée territoriale de la rivière Ikopa. Ensemble, elles permettent de passer d'une analyse technique des données à une lecture géographique plus large.

3.1.3 Propagation spatio-temporelle des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato

La figure ci-après présente les champs interpolés en deux dimensions des principaux paramètres hydrologiques et hydrauliques associés à la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa. L'analyse couvre le tronçon compris entre l'Ikopa à Antelomita, l'Ikopa à Ambohimambola et l'Ikopa à Anosizato, sur une longueur totale d'environ 40,5 km. Elle s'inscrit dans le haut bassin de l'Ikopa, dont la superficie est estimée à 4 290 km² jusqu'à la station de Bevomanga. Les quatre cartes permettent de suivre, entre 2021 et 2030, l'évolution du débit interpolé, du débit spécifique, de la vitesse hydraulique et de l'indice relatif de crue selon une logique amont-aval.

Figure 3: Propagation spatio-temporelle des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato



Source : Auteur 2026

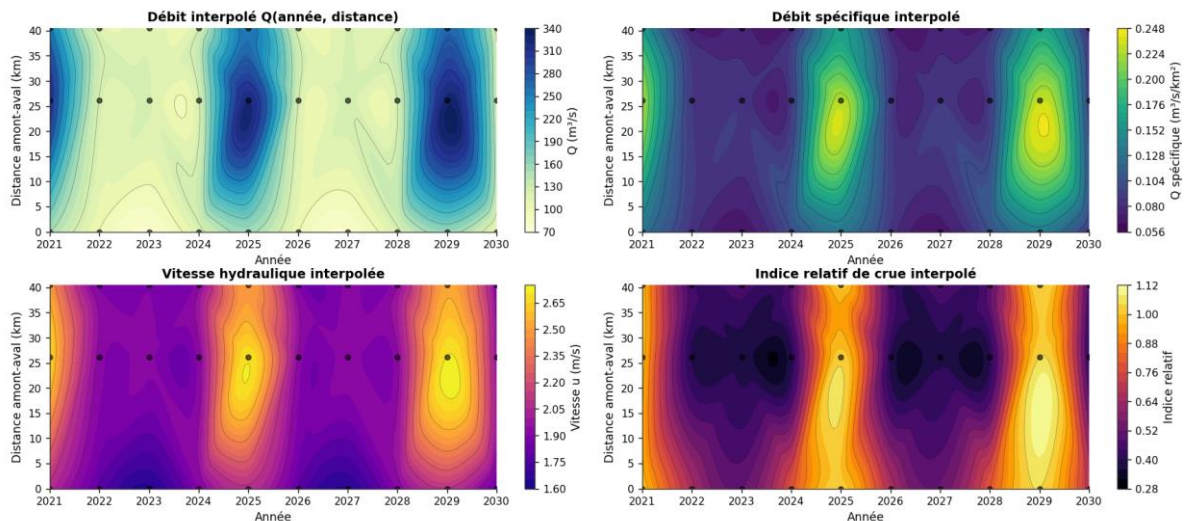
Interprétation

Les résultats montrent une organisation spatio-temporelle marquée des crues. Le débit interpolé varie approximativement entre 70 et 340 m³/s, avec des intensités plus élevées observées autour des années 2025 et 2029, notamment dans la partie médiane et aval du tronçon, entre environ 20 et 35 km de distance amont-aval. Cette distribution indique que certaines années présentent une amplification nette de la réponse hydrologique, traduisant des épisodes de crue plus importants. Le débit spécifique, compris entre environ 0,056 et 0,248 m³/s/km², montre également des maxima autour de 2025 et 2029, ce qui suggère que ces années ne correspondent pas seulement à une augmentation du débit brut, mais aussi à une réponse hydrologique plus forte par unité de surface drainée. La vitesse hydraulique interpolée varie globalement entre 1,60 et 2,65 m/s. Les vitesses les plus élevées apparaissent principalement autour des mêmes périodes critiques, en particulier vers 2025 et 2029, ce qui traduit une propagation plus rapide de l'onde de crue dans ces années. Cette accélération est cohérente avec l'augmentation des débits, car une crue plus importante tend à accroître la section mouillée et la vitesse d'écoulement. L'indice relatif de crue, compris entre environ 0,28 et 1,12, met en évidence des secteurs et des années où l'intensité des crues se rapproche ou dépasse la référence historique. Les valeurs supérieures à 1, visibles surtout autour de 2025 et 2029, indiquent des événements potentiellement critiques, dont l'intensité dépasse le niveau de référence retenu. La figure confirme que la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa n'est pas uniforme dans le temps ni dans l'espace. Les années 2025 et 2029 apparaissent comme des périodes hydrologiquement sensibles, caractérisées par des débits élevés, des débits spécifiques importants, des vitesses plus fortes et des indices relatifs de crue proches ou supérieurs à l'unité. Cette convergence des indicateurs suggère une intensification de la dynamique de crue sur le tronçon Antelomita–Ambohimambola–Anosizato. Elle met en évidence l'intérêt d'une surveillance renforcée de ce corridor hydrographique de 40,5 km, notamment pour l'anticipation des crues, la gestion des zones riveraines et l'évaluation des risques hydrauliques dans le haut bassin de l'Ikopa.

3.1.4 Analyse spatio-temporelle des paramètres hydrologiques et hydrauliques des crues

La figure ci-dessous illustre une synthèse interpolée des principaux champs hydrologiques et hydrauliques associés à la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa. Elle couvre la période 2021–2030 et représente l'évolution des variables selon l'axe longitudinal du cours d'eau, depuis l'amont vers l'aval, sur une distance d'environ 0 à 40 km, correspondant au tronçon étudié entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato. Les quatre cartes interpolées permettent d'analyser conjointement le débit, le débit spécifique, la vitesse hydraulique et l'indice relatif de crue, afin d'identifier les années et les secteurs les plus sensibles à la dynamique de crue.

Figure 4: Analyse spatio-temporelle des paramètres hydrologiques et hydrauliques des crues



Source : Auteur 2026

Interprétation

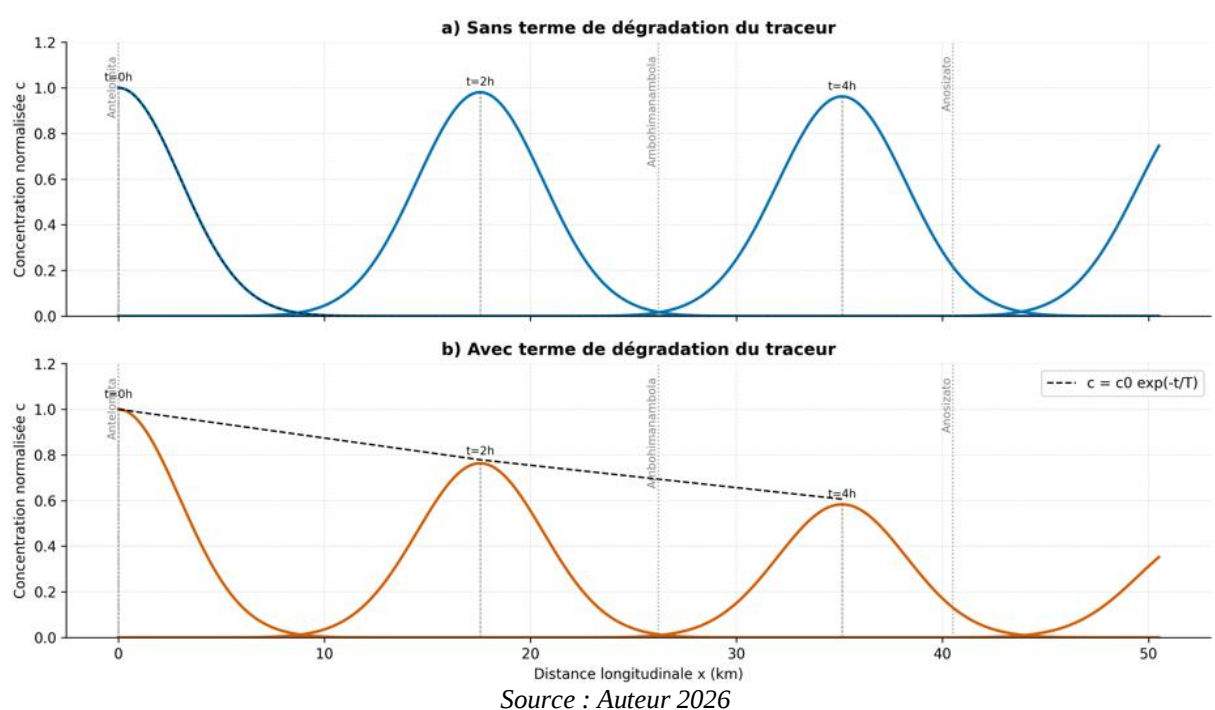
La distribution du NDVI montre une concentration importante des valeurs autour de 0,30 à 0,35, ce qui indique Les résultats montrent que les valeurs les plus élevées de débit se concentrent principalement autour des années 2025 et 2029, avec des débits interpolés atteignant environ 310 à 340 m³/s, contre des valeurs plus faibles proches de 70 à 130 m³/s durant les périodes moins intenses. Cette dynamique est cohérente avec le débit spécifique, dont les valeurs varient approximativement entre 0,056 et 0,248 m³/s/km². Les zones de plus forte intensité spécifique

apparaissent également autour de 2025 et 2029, notamment entre 15 et 30 km de distance amont-aval, ce qui indique que ces épisodes ne correspondent pas uniquement à une augmentation du débit total, mais aussi à une réponse hydrologique plus forte du bassin par unité de surface drainée. La vitesse hydraulique interpolée présente des valeurs comprises entre environ 1,60 et 2,65 m/s. Les vitesses les plus fortes se localisent autour des mêmes années critiques, en particulier 2025 et 2029, traduisant une accélération de la propagation de l'onde de crue dans le tronçon étudié. Cette observation est renforcée par l'indice relatif de crue, qui varie d'environ 0,28 à 1,12. Les valeurs proches ou supérieures à 1 indiquent que certaines crues projetées atteignent ou dépassent le niveau de référence historique retenu, notamment autour de 2025 et 2029. Ces années peuvent donc être considérées comme hydrologiquement critiques dans la série analysée.

3.1.5 Modélisation de la propagation d'une onde de crue avec et sans dégradation du signal dans le bassin supérieur de l'Ikopa

La figure ci-après illustre le comportement de la solution $c(x, t)$ de l'équation de convection appliquée à la propagation d'un traceur ou d'une onde de crue dans le tronçon supérieur de l'Ikopa. La simulation correspond à l'année 2029, identifiée comme une année hydrologiquement marquée dans les résultats précédents, avec une vitesse moyenne de propagation estimée à 8,78 km/h. L'axe longitudinal couvre environ 0 à 50 km, depuis Antelomita en amont jusqu'au-delà d'Anosizato, en passant par Ambohimambola, ce qui permet de représenter la progression du signal hydrologique le long du cours d'eau.

Figure 5: Modélisation de la propagation d'une onde de crue avec et sans dégradation du signal dans le bassin supérieur de l'Ikopa



Interprétation

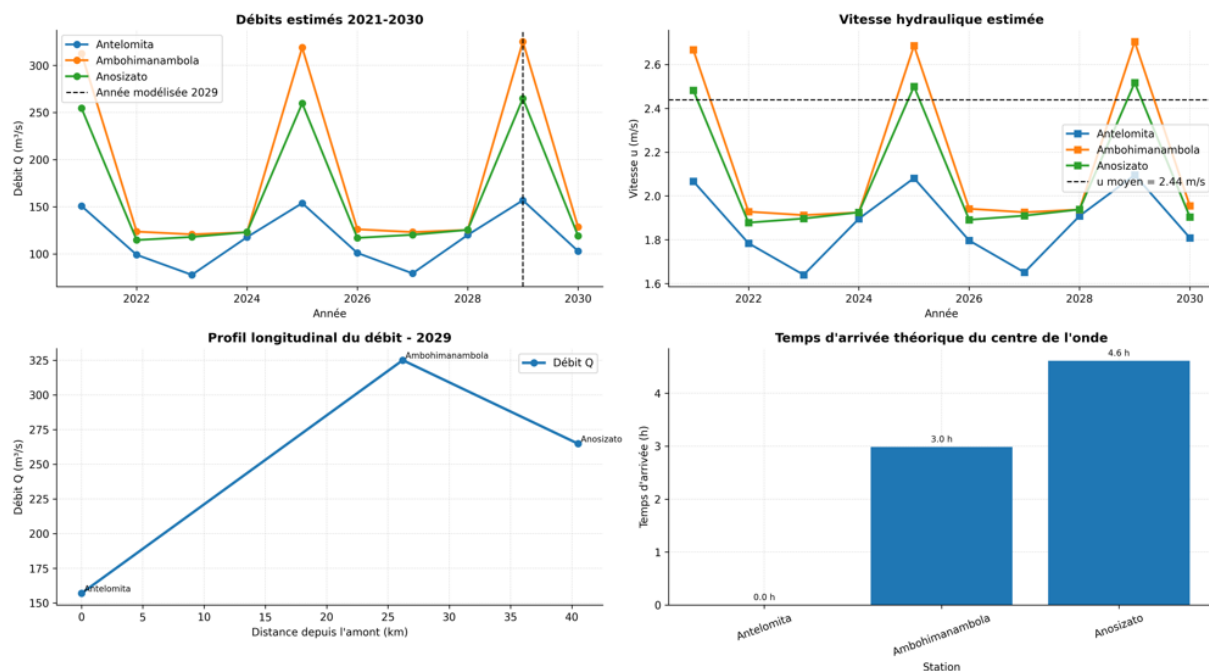
Dans le premier graphique, sans terme de dégradation, le pic de concentration normalisée conserve une amplitude proche de 1,0 au cours de sa propagation. Le signal se déplace selon la relation $x=ut$, ce qui signifie qu'après 2 h, le centre de l'onde atteint environ 17,6 km, et qu'après 4 h, il se situe autour de 35,1 km. À cette vitesse, l'onde atteint théoriquement la station d'Ambohimambola, située approximativement vers 26 km, en près de 3 h, puis la station d'Anosizato, située autour de 40 à 41 km, en environ 4,6 h. Ce comportement représente une propagation idéale, dans laquelle l'onde est transportée vers l'aval sans perte notable d'intensité. Le second graphique introduit un terme de dégradation du traceur, représenté par l'atténuation exponentielle $c = C_0 e^{-t/T}$. Dans ce cas, l'onde conserve la même vitesse de déplacement, mais son amplitude diminue progressivement avec le temps. Le pic passe d'une concentration normalisée initiale de 1,0 à environ 0,78 après 2 h, puis à près de 0,61 après 4 h. Au niveau d'Anosizato, atteint théoriquement vers 4,6 h, l'intensité du signal serait donc déjà nettement atténuée, autour de 0,55 à 0,60 selon le temps caractéristique de dégradation retenu. Cette diminution traduit l'effet combiné

de la dispersion, de la dilution et de l'amortissement hydraulique au cours de la propagation. La convection explique le déplacement rapide de l'onde de crue vers l'aval, tandis que la dégradation traduit la perte progressive d'intensité du signal. Appliquée au bassin supérieur de l'Ikopa, cette modélisation montre qu'une onde générée en amont peut atteindre rapidement les stations aval, en quelques heures seulement, mais avec une intensité réduite lorsque les phénomènes d'atténuation sont pris en compte. Cette approche est particulièrement utile pour interpréter la propagation des crues, estimer les temps de réponse entre stations et apprécier le rôle de l'amortissement hydraulique dans la gestion du risque de crue.

3.1.6 Cohérence hydrologique du modèle de propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa en 2029

La figure ci-dessous présente la cohérence entre les données de débits estimés sur la période 2021–2030 et le modèle conceptuel de propagation de l'onde de crue dans le tronçon supérieur de l'Ikopa, entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato. Elle met en relation l'évolution temporelle des débits, les vitesses hydrauliques estimées, le profil longitudinal de l'événement de référence et le temps d'arrivée théorique du centre de l'onde. L'année 2029 est retenue comme année modélisée, car elle correspond à l'un des épisodes les plus intenses de la série, avec des débits élevés sur l'ensemble des stations.

Figure 6: Cohérence hydrologique du modèle de propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa en 2029



Source : Auteur 2026

Interprétation

Les débits estimés montrent une forte variabilité interannuelle, avec trois années particulièrement marquées : 2021, 2025 et 2029. En 2029, le débit atteint environ 157 m³/s à Antelomita, 325 m³/s à Ambohimambola et 266 m³/s à Anosizato. Cette configuration indique une nette amplification du débit entre l'amont et la station intermédiaire, suivie d'une diminution relative vers l'aval. Le profil longitudinal de 2029 confirme cette dynamique : le débit augmente fortement entre 0 km et environ 26 km depuis l'amont, puis diminue vers 40,5 km, au niveau d'Anosizato. Cette baisse aval peut être interprétée comme un effet d'atténuation, de dispersion de l'onde de crue ou de modification hydraulique du tronçon. La vitesse hydraulique estimée présente une évolution cohérente avec les débits. La vitesse moyenne du modèle est d'environ 2,44 m/s, tandis qu'en 2029, les vitesses atteignent approximativement 2,08 m/s à Antelomita, 2,70 m/s à Ambohimambola et 2,52 m/s à Anosizato. Les pics de vitesse observés en 2021, 2025 et 2029 correspondent aux années de plus forts débits, ce qui confirme la relation physique entre l'augmentation du débit et l'accélération de l'écoulement. Cette cohérence renforce la validité du modèle utilisé pour représenter la propagation de l'onde de crue. Le temps d'arrivée théorique du centre de l'onde montre une propagation rapide le long du tronçon étudié. Le signal part d'Antelomita à 0 h, atteint

Ambohimambola après environ 3,0 h, puis Anosizato après environ 4,6 h. Ces résultats indiquent que, lors d'un événement intense comme celui de 2029, l'onde de crue peut se transmettre de l'amont vers l'aval en moins de 5 heures. Cette rapidité de propagation souligne l'importance d'un suivi hydrologique rapproché entre les stations, notamment pour l'alerte précoce, la gestion des risques d'inondation et la planification des interventions dans le bassin supérieur de l'Ikopa.

3.2 Discussions

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt d'une approche intégrée pour analyser la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa. La combinaison entre cartographie hydrographique, analyse spatio-temporelle et modélisation conceptuelle permet de dépasser une simple lecture ponctuelle des débits aux stations hydrologiques. Elle offre une vision plus complète du comportement du cours d'eau entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato, sur un tronçon d'environ 40,5 km. Cette approche montre que la dynamique de crue ne dépend pas uniquement de l'intensité du débit enregistré à une station donnée, mais également de sa variation dans le temps, de sa progression longitudinale et de son interaction avec les caractéristiques spatiales du réseau hydrographique. L'analyse cartographique a montré que l'Ikopa constitue un axe hydrographique structurant dans la zone étudiée. La comparaison entre les données BD100 et HOTOSM/OpenStreetMap révèle une cohérence globale du tracé principal, mais aussi des écarts localisés sur certains tronçons secondaires ou sinueux. Ces différences ne traduisent pas nécessairement des erreurs, mais plutôt des variations liées à la précision des bases de données, à leur niveau de détail, à leur actualisation et aux méthodes de numérisation. La tolérance de comparaison de 100 m a permis d'identifier les secteurs où les divergences sont les plus visibles. Ces résultats confirment que la qualité des données spatiales constitue un élément important dans toute analyse hydrologique, car la représentation du réseau influence directement la lecture des corridors, des communes traversées et des zones potentiellement exposées aux crues. Les résultats hydrologiques sur la période 2021–2030 montrent une variabilité interannuelle marquée. Les débits interpolés varient approximativement entre 70 et 340 m³/s, tandis que les débits spécifiques sont compris entre 0,056 et 0,248 m³/s/km². Ces valeurs indiquent que la réponse hydrologique du bassin n'est pas constante, mais qu'elle présente des épisodes d'intensification. Les années 2025 et 2029 ressortent comme les périodes les plus critiques, car elles concentrent les valeurs les plus élevées de débit, de débit spécifique, de vitesse hydraulique et d'indice relatif de crue. L'indice relatif atteignant environ 1,12 montre que certains épisodes dépassent la référence historique retenue, ce qui traduit une situation hydrologiquement sensible. La variation spatiale des paramètres entre les stations confirme également l'existence d'une dynamique amont-aval différenciée. En 2029, les débits atteignent environ 157 m³/s à Antelomita, 325 m³/s à Ambohimambola et 266 m³/s à Anosizato. Cette configuration montre une amplification importante entre l'amont et la station intermédiaire, suivie d'une diminution relative vers l'aval. Cette baisse peut être associée à des phénomènes d'atténuation, de dispersion, de stockage temporaire, de débordement local ou de modification morphologique du lit. Elle montre que la crue ne se propage pas comme un signal uniforme, mais comme une onde hydrologique influencée par les conditions locales du tronçon. La vitesse hydraulique constitue un indicateur essentiel pour comprendre la rapidité de transfert de l'onde de crue. Les valeurs interpolées, comprises approximativement entre 1,60 et 2,65 m/s, traduisent une propagation relativement rapide dans le bassin supérieur de l'Ikopa. Pour l'année 2029, la vitesse moyenne estimée de 8,78 km/h indique que l'onde de crue peut atteindre Ambohimambola en environ 3,0 h et Anosizato en environ 4,6 h depuis l'amont du tronçon étudié. Ces temps de propagation courts soulignent l'importance d'un dispositif de surveillance hydrologique rapproché, car le délai disponible pour anticiper les impacts en aval peut être limité lors des épisodes intenses. La modélisation convection-dégradation apporte une lecture complémentaire de cette dynamique. Le modèle sans dégradation montre que le signal de crue se déplace vers l'aval en conservant une amplitude élevée, tandis que le modèle avec dégradation montre une diminution progressive de l'intensité du signal. Cette atténuation traduit l'effet combiné de la dispersion, de la dilution et de l'amortissement hydraulique. Ainsi, même si une onde de crue peut se propager rapidement vers les stations aval, son intensité peut diminuer au cours du trajet. Cette distinction est importante, car elle permet de différencier la vitesse de transmission du risque et l'intensité réelle de l'événement observé à l'aval. Les cartes interpolées en deux dimensions et les surfaces tridimensionnelles ont permis de mieux visualiser les zones et les périodes critiques. Elles montrent que les années 2025 et 2029 ne se distinguent pas seulement par des valeurs ponctuelles élevées, mais par une cohérence entre plusieurs indicateurs hydrologiques et hydrauliques. Lorsque le débit augmente, le débit spécifique et la vitesse hydraulique augmentent également, tandis que l'indice relatif de crue se rapproche ou dépasse la valeur de référence. Cette convergence des indicateurs renforce la robustesse de l'interprétation et justifie l'identification de ces années comme périodes de vigilance renforcée. Sur le plan de la gestion des risques, les résultats montrent que le tronçon Antelomita–Ambohimambola–Anosizato constitue un secteur stratégique pour le suivi de la propagation des crues. La distance totale relativement courte, estimée à 40,5 km, combinée à une vitesse de propagation pouvant atteindre plusieurs kilomètres par heure, implique une transmission rapide des perturbations hydrologiques. Les communes situées dans le corridor de l'Ikopa,

notamment dans les bandes de proximité de 0 à 500 m et de 500 m à 1 km, peuvent être directement concernées par les débordements, l'érosion de berges, la saturation du drainage ou les effets de montée rapide des eaux. La prise en compte des corridors de 1 à 3 km et de 3 à 5 km permet également d'élargir l'analyse aux zones d'influence indirecte et aux réseaux secondaires. Toutefois, les résultats doivent être interprétés avec prudence. Les valeurs utilisées proviennent d'estimations et d'interpolations fondées sur un nombre limité de stations. Les champs continus produits ne remplacent donc pas des observations hydrométriques denses, mais constituent une représentation analytique permettant de mieux comprendre les tendances spatiales et temporelles. De même, le modèle convection-dégradation reste un modèle conceptuel simplifié. Il ne prend pas en compte toute la complexité des écoulements réels, notamment la géométrie détaillée du lit, les apports latéraux, les zones de stockage, les ouvrages hydrauliques, les débordements ou les effets de rugosité. Il reste néanmoins pertinent pour estimer les ordres de grandeur de propagation et pour interpréter la dynamique générale de l'onde de crue. Cette étude montre que la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa résulte d'une interaction entre l'intensité hydrologique des événements, la configuration spatiale du réseau hydrographique et la capacité du tronçon à transmettre ou atténuer l'onde de crue. Les résultats soulignent particulièrement le rôle des années 2025 et 2029 comme épisodes critiques dans la série 2021–2030. Ils confirment également l'intérêt d'une approche combinant données géospatiales, indicateurs hydrologiques et modélisation hydraulique simplifiée pour améliorer la compréhension des risques de crue. Cette démarche peut servir de base à la mise en place d'un système de suivi, d'alerte et d'aide à la décision pour les territoires riverains de l'Ikopa.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'analyser la propagation des crues dans le bassin supérieur de l'Ikopa à travers une approche combinant cartographie hydrographique, interpolation spatio-temporelle et modélisation hydraulique conceptuelle. Le tronçon étudié, compris entre Antelomita, Ambohimambola et Anosizato, s'étend sur environ 40,5 km et constitue un axe important pour comprendre la dynamique amont-aval des crues. Les résultats montrent une forte variabilité hydrologique sur la période 2021–2030, avec des débits compris entre environ 70 et 340 m³/s, des vitesses hydrauliques atteignant 1,60 à 2,65 m/s et un indice relatif de crue pouvant dépasser la valeur de référence, jusqu'à environ 1,12. Les années 2025 et 2029 apparaissent comme les périodes les plus critiques, en raison de la convergence des valeurs élevées de débit, de débit spécifique, de vitesse et d'intensité relative de crue. La modélisation appliquée à l'année 2029 indique une propagation rapide de l'onde de crue, avec un temps d'arrivée estimé à environ 3,0 h à Ambohimambola et 4,6 h à Anosizato. Ces résultats soulignent la nécessité d'un suivi hydrologique renforcé dans le bassin supérieur de l'Ikopa, notamment pour améliorer l'alerte précoce, la gestion des zones riveraines et la prévention des risques d'inondation.

REFERENCES

- [1] . Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- [2] Maidment, D.R. (ed.) (1993) *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Beven, K.J. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. 2nd edn. Chichester: Wiley-Blackwell.
- [4] Cunge, J.A., Holly, F.M. and Verwey, A. (1980) *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program.
- [5] Abbott, M.B. (1979) *Computational Hydraulics: Elements of the Theory of Free Surface Flows*. London: Pitman.
- [6] USACE Hydrologic Engineering Center (2025) *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.
- [7] Humanitarian OpenStreetMap Team (HOT) (2026) *Madagascar: Waterways (OpenStreetMap Export)*. Humanitarian Data Exchange. Source: OpenStreetMap contributors.
- [8] McKinney, W. (2010) 'Data structures for statistical computing in Python', in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, Austin, Texas, pp. 56–61.
- [9] 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.

- [10] Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J. et al. (2020) *geopandas/geopandas: v0.8.1*. Zenodo.
- [11] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D. et al. (2020) 'SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python', *Nature Methods*, 17, pp. 261–272.
- [12] Hunter, J.D. (2007) 'Matplotlib: A 2D graphics environment', *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95.
- [13] Burrough, P.A., McDonnell, R.A. and Lloyd, C.D. (2015) *Principles of Geographical Information Systems*. 3rd edn. Oxford: Oxford University Press.
- [14] Cressie, N.A.C. (1993) *Statistics for Spatial Data*. Revised edn. New York: John Wiley & Sons.
- [15] Shepard, D. (1968) 'A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data', in *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, New York: Association for Computing Machinery, pp. 517–524.
- [16] Singh, V.P. (1996) *Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface-Water Hydrology*. New York: John Wiley & Sons.
- [17] LeVeque, R.J. (2002) *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge: Cambridge University Press.