

Analyse Intégrée De La Dynamique Hydroclimatique Et Morpho-Hydrologique Du Bassin Versant De Mantasoa Et De Ses Réservoirs

Haja Nirina RAVELOALISON¹, Hantaniaina RAHARINIERANA², Laza ANDRIAMPANARIVO³,
Hanitrinivony ANDRIANOMENTSOA BEZANAHARY¹, Volana RAOELIJAONA MANANJO¹

¹Ecole Doctorale : Ingénierie et Géosciences (ED-INGE), Equipe d'Accueil Doctorale Hydraulique et Environnement,
|École Supérieure Polytechnique | Université d'Antananarivo| Madagascar.

²Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED-STII), Equipe d'Accueil Doctorale
Valorisation des Ressources Propres |École Supérieure Polytechnique | Université d'Antananarivo| Madagascar.

³Ecole Doctorale Physique et Applications, Equipe d'Accueil Doctorale Physique Nucléaire Appliquée et
Environnement |Sciences et Technologies | Université d'Antananarivo | Madagascar.

Auteur Correspondant : Haja Nirina RAVELOALISON, raveloalisonh@gmail.com



Résumé : Cette étude propose une analyse intégrée de la dynamique hydro climatique et morpho-hydrologique du bassin versant de Mantasoa et de ses réservoirs, en combinant des approches cartographiques, statistiques et de modélisation. L'analyse hypsométrique met en évidence une dominance des basses altitudes, avec environ 28,60 km² situés entre 1372 et 1392 m, tandis que les zones élevées (>1560 m) ne représentent que 0,76 km², traduisant une morphologie favorable à la concentration des écoulements. La relation hauteur–volume révèle une forte capacité de stockage du réservoir de Mantasoa, atteignant environ 122 × 10⁶ m³ à 18 m, contre moins de 0,5 × 10⁶ m³ pour Ampasimpotsy à hauteur comparable, avec un seuil critique autour de 8 m. L'analyse des crues montre une augmentation des débits de 26,36 m³/s (T=2 ans) à 88,92 m³/s (T=100 ans), tandis que les pluies extrêmes varient de 46,03 mm à 110,41 mm selon la loi de Gumbel. Ces résultats mettent en évidence une forte sensibilité du système aux variations hydroclimatiques, influençant directement les capacités de stockage et les risques hydrologiques.

Mots clés : bassin versant ; Mantasoa ; hypsométrie ; relation hauteur–volume ; crues extrêmes ; variabilité hydroclimatique.

Abstract: This study proposes an integrated analysis of the hydroclimatic and morpho-hydrological dynamics of the Mantasoa watershed and its reservoirs by combining cartographic, statistical, and modeling approaches. The hypsometric analysis reveals a dominance of low-altitude areas, with approximately 28.60 km² located between 1372 and 1392 m, whereas high-altitude zones (>1560 m) account for only 0.76 km², indicating a morphology that favors runoff concentration. The height–volume relationship highlights the high storage capacity of the Mantasoa reservoir, reaching approximately 122 × 10⁶ m³ at 18 m, compared to less than 0.5 × 10⁶ m³ for Ampasimpotsy at a comparable water level, with a critical threshold around 8 m. Flood analysis shows an increase in discharge from 26.36 m³/s (T = 2 years) to 88.92 m³/s (T = 100 years), while extreme rainfall varies from 46.03 mm to 110.41 mm according to the Gumbel distribution. These results highlight a strong sensitivity of the system to hydroclimatic variability, directly affecting storage capacity and hydrological risk.

Keywords: watershed; Mantasoa; hypsometry; height–volume relationship; extreme floods; hydroclimatic variability.

INTRODUCTION

Les bassins versants constituent des unités fondamentales pour l'analyse des interactions entre les composantes climatiques, hydrologiques et morphologiques, en particulier dans le contexte de la gestion des ressources en eau et de la production hydroélectrique. Dans les régions tropicales, la variabilité climatique se manifeste par des fluctuations marquées des précipitations

et des régimes hydrologiques, influençant directement la disponibilité en eau et le fonctionnement des systèmes hydroélectriques [1]. Cette variabilité est aujourd'hui accentuée par les changements climatiques, qui modifient la fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les pluies intenses et les crues [2]. Le bassin versant de Mantasoa, situé dans la région des Hautes Terres centrales de Madagascar, joue un rôle stratégique dans l'alimentation du système hydroélectrique de Mandraka. Caractérisé par une superficie d'environ 87,55 km² et une morphologie allongée, ce bassin présente des contrastes altimétriques importants, influençant les processus de ruissellement, d'infiltration et de concentration des écoulements. La dynamique hydrologique du bassin dépend étroitement de la distribution spatiale des altitudes, des caractéristiques géologiques et des conditions climatiques, notamment des précipitations annuelles et des événements extrêmes [3]. Par ailleurs, la relation entre la hauteur d'eau et le volume stocké dans les réservoirs constitue un élément clé dans la gestion des ressources hydriques et dans l'optimisation de la production hydroélectrique. Une variation relativement faible de la hauteur d'eau peut entraîner des changements significatifs du volume disponible, ce qui rend le système particulièrement sensible aux fluctuations hydrologiques [4]. De même, l'estimation des débits de crue et des hauteurs pluviométriques extrêmes à l'aide de méthodes statistiques, telles que les approches fréquentielles et la loi de Gumbel, permet de mieux appréhender les risques hydrologiques et de dimensionner les infrastructures hydrauliques [5]. Dans ce contexte, l'intégration des outils de modélisation spatiale et d'analyse statistique offre une approche pertinente pour caractériser la dynamique hydroclimatique et morpho-hydrologique des bassins versants [6]. L'utilisation combinée des analyses hypsométriques, des relations hauteur-volume et des modèles fréquentiels permet d'obtenir une vision globale du fonctionnement du système hydrologique et de ses réponses aux contraintes climatiques. Ainsi, cette étude vise à analyser de manière intégrée la dynamique hydroclimatique et morpho-hydrologique du bassin versant de Mantasoa et de ses réservoirs. L'objectif est de mieux comprendre les interactions entre les facteurs topographiques, hydrologiques et climatiques, afin d'évaluer les impacts potentiels sur la gestion des ressources en eau et la sécurité des ouvrages hydrauliques dans un contexte de variabilité climatique accrue [7].

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Cette étude repose sur une démarche intégrée combinant acquisition de données de terrain, traitement géospatial, analyse statistique et visualisation scientifique, appliquée au bassin versant de Mantasoa et à ses réservoirs associés afin de caractériser leur dynamique morpho-hydrologique et hydroclimatique. Les levés de terrain ont été réalisés à l'aide d'un système Leica GPS 1200 fonctionnant en mode GNSS différentiel. Le levé RTK, nécessitant au minimum deux récepteurs GNSS – une station de base fixe et un récepteur mobile – a permis d'obtenir des coordonnées planimétriques et altimétriques de précision centimétrique, adaptées aux analyses topographiques et aux interpolations spatiales (Hofmann-Wellenhof et al., 2008 [8] ; Căţeanu et Moroianu, 2024 [9]). Dans les zones lacustres difficilement accessibles, un petit bateau de pêche en bois a été utilisé afin d'assurer une couverture spatiale optimale des observations. Le traitement des données a été réalisé dans un environnement Python sous Jupyter Notebook intégré à la distribution Anaconda. Cet environnement a permis de garantir la reproductibilité des analyses en associant code, documentation et visualisation dans un même espace de travail (Kluyver et al., 2016 [10]). Les calculs numériques ont été effectués à l'aide de NumPy (Harris et al., 2020 [11]), tandis que pandas a été utilisé pour la structuration et le traitement des séries temporelles (McKinney, 2010 [12]). Les méthodes d'interpolation et d'analyse scientifique ont été implémentées via SciPy (Virtanen et al., 2020 [14]), et les visualisations graphiques ont été réalisées avec Matplotlib (Hunter, 2007 [13]). Les traitements géospatiaux ont été assurés par GeoPandas (Jordahl et al., 2020 [15]) pour les données vectorielles et Rasterio pour les données raster. La collecte des données a porté sur les coordonnées GNSS des points d'appui, les paramètres morphométriques du bassin versant (surface, périmètre, altitudes), ainsi que les données hydroclimatiques comprenant les précipitations, les débits et les volumes stockés. Les informations ont été organisées sous forme de bases de données structurées afin de faciliter leur exploitation. Le prétraitement des données a consisté à harmoniser les systèmes de coordonnées, standardiser les formats et convertir les unités. Les données ont été nettoyées par élimination des valeurs aberrantes, suppression des géométries invalides et vérification de la cohérence interne. Ce processus a permis d'assurer la qualité et la fiabilité des données utilisées pour les analyses ultérieures. Les traitements ont ensuite été réalisés par interpolation spatiale des données altimétriques à l'aide de fonctions de base radiale et de méthodes spline, permettant de générer des surfaces continues, des courbes de niveau et des modèles 3D. Les relations hauteur-volume ont été modélisées par des fonctions de puissance, complétées par des analyses en échelle logarithmique et des calculs de sensibilité dV/dh afin d'identifier les seuils critiques de fonctionnement. Les variables hydroclimatiques ont été analysées à travers des représentations

graphiques avancées, notamment des heatmaps normalisées, des diagrammes comparatifs et des surfaces analytiques 2D et 3D. Ces outils ont permis de mettre en évidence les tendances, les anomalies ainsi que les périodes déficitaires et excédentaires du système.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1-Analyse hypsométrique et modélisation spatiale de l'altitude du bassin versant de Mantsoa

La figure présentée ci-dessous montre la répartition altitudinale du bassin versant de Mantsoa à travers une double approche combinant histogramme hypsométrique et surface interpolée 2D.

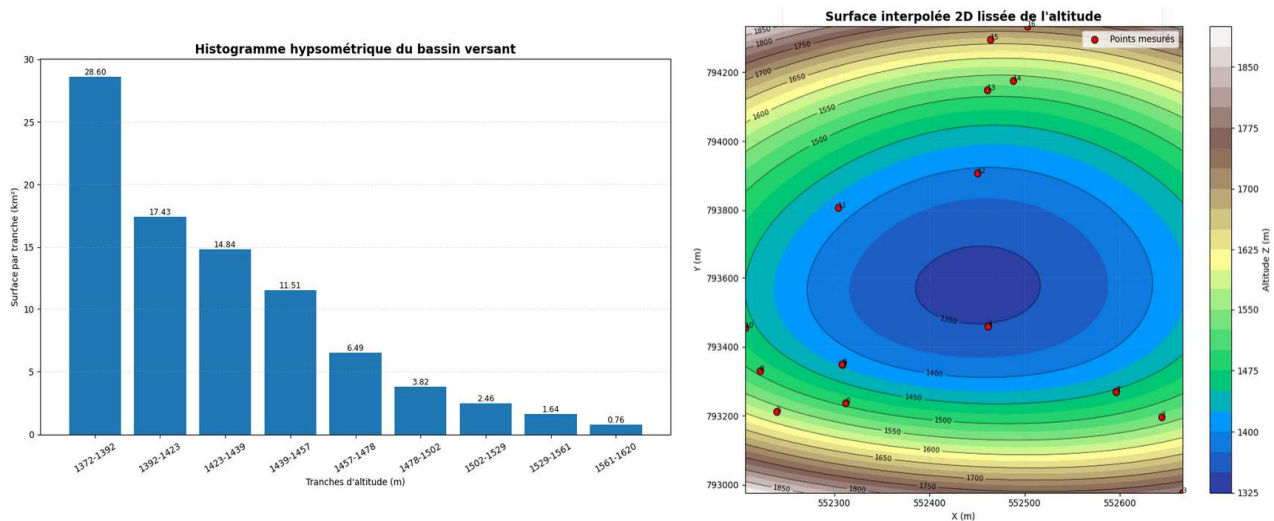


Figure n° 1 : Analyse hypsométrique et modélisation spatiale de l'altitude du bassin versant de Mantsoa

Source : Auteur

Interprétation

L'histogramme montre une distribution inégale des surfaces selon les tranches d'altitude, dominée par les basses altitudes comprises entre 1372 et 1392 m, représentant environ 28,60 km², soit la plus grande portion du bassin. Cette prédominance traduit une forte extension des zones basses, favorables à l'accumulation des écoulements et au développement des réseaux hydrographiques. À mesure que l'altitude augmente, la surface diminue progressivement, atteignant seulement 0,76 km² pour la tranche la plus élevée (1561–1620 m), ce qui indique un relief globalement dissymétrique. La surface interpolée 2D confirme cette organisation spatiale en mettant en évidence un gradient altitudinal concentrique, avec des altitudes minimales autour de 1350–1400 m localisées dans les zones centrales, et des altitudes maximales dépassant 1800 m en périphérie. Cette configuration suggère une morphologie en cuvette, favorisant la convergence des écoulements vers les zones centrales du bassin. Les points mesurés s'intègrent de manière cohérente dans cette structure, validant la qualité de l'interpolation. Ces résultats traduisent un bassin versant caractérisé par une forte hétérogénéité altimétrique, influençant directement les processus hydrologiques, notamment le ruissellement, l'infiltration et la vitesse d'écoulement. La dominance des basses altitudes et la présence de gradients marqués confirment le rôle déterminant du relief dans la dynamique hydrologique et dans la gestion des ressources en eau du système Mantsoa–Mandraka.

2- Relation hauteur–volume d'eau des réservoirs de Mantasoa et d'Ampasimpotsy et identification du seuil critique de fonctionnement

La figure ci-dessous illustre la relation entre la hauteur d'eau et le volume stocké dans les réservoirs de Mantasoa et d'Ampasimpotsy, mettant en évidence les différences de capacité de stockage et le rôle du seuil critique dans le fonctionnement hydraulique du système.

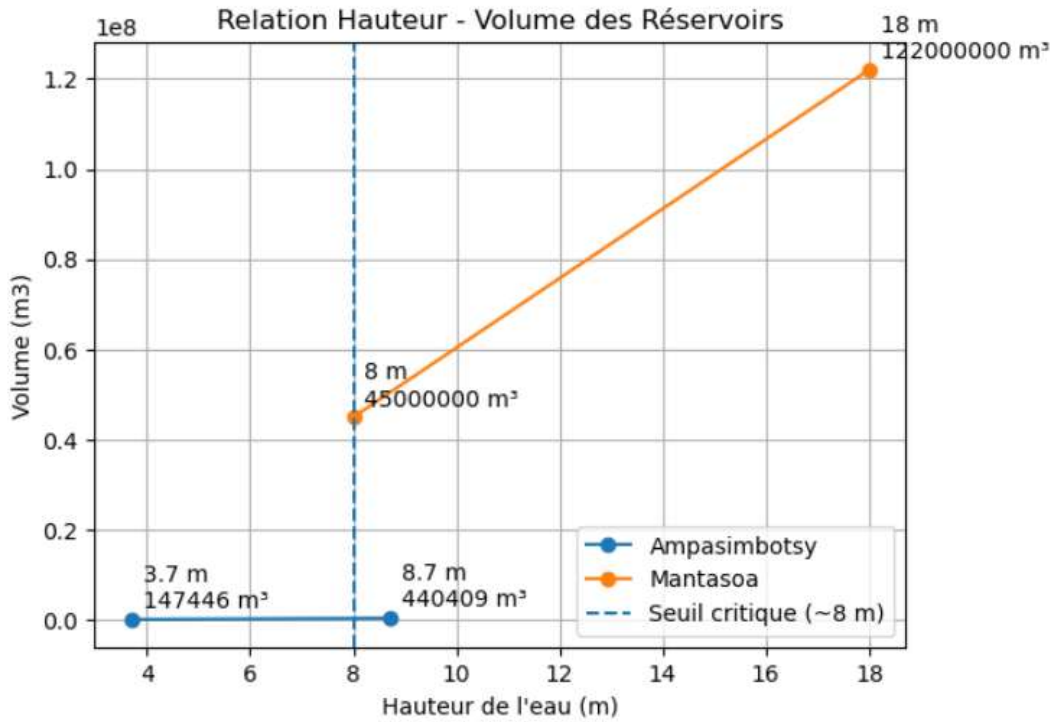


Figure n° 2 : Relation hauteur–volume d'eau des réservoirs de Mantasoa et d'Ampasimpotsy et identification du seuil critique de fonctionnement

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse montre que le réservoir de Mantasoa présente une capacité de stockage nettement supérieure, avec un volume atteignant environ 122 000 000 m³ pour une hauteur de 18 m, alors qu'à une hauteur intermédiaire de 8 m, le volume est déjà de l'ordre de 45 000 000 m³. Cette évolution traduit une augmentation rapide du volume en fonction de la hauteur, indiquant une morphologie favorable au stockage massif de l'eau. À l'inverse, le réservoir d'Ampasimpotsy présente des volumes nettement plus faibles, avec seulement 147 446 m³ pour une hauteur de 3,7 m et 440 409 m³ pour une hauteur de 8,7 m, ce qui souligne son rôle secondaire dans la régulation des apports. La présence d'un seuil critique situé autour de 8 m met en évidence une limite hydraulique importante, au-delà de laquelle la capacité de stockage devient significative pour le système. En dessous de ce seuil, les volumes disponibles restent faibles, ce qui peut engendrer des situations de déficit en période de faible alimentation. Ces résultats confirment que le lac de Mantasoa constitue l'élément principal de régulation du système hydroélectrique, tandis que le réservoir d'Ampasimpotsy joue un rôle complémentaire. La forte sensibilité du volume stocké à la variation de la hauteur d'eau met en évidence la vulnérabilité du système aux fluctuations hydrologiques, en particulier en contexte de variabilité climatique, où une baisse du niveau peut entraîner une diminution significative des ressources mobilisables pour la production énergétique.

3- Modélisation multi-analytique de la relation hauteur–volume et de la dynamique hydrologique des réservoirs de Mantasoa et d'Ampasimpotsy

La figure présentée suivante regroupe plusieurs approches analytiques permettant de caractériser la relation entre la hauteur d'eau et le volume stocké, ainsi que la sensibilité et la variabilité du système hydraulique. Le modèle de puissance $V = a \cdot h^b$ met en évidence une croissance non linéaire du volume en fonction de la hauteur, particulièrement marquée pour le réservoir de Mantasoa, où le volume atteint environ 122×10^6 m³ à 18 m contre seulement 45×10^6 m³ à 8 m, traduisant une augmentation exponentielle du stockage.

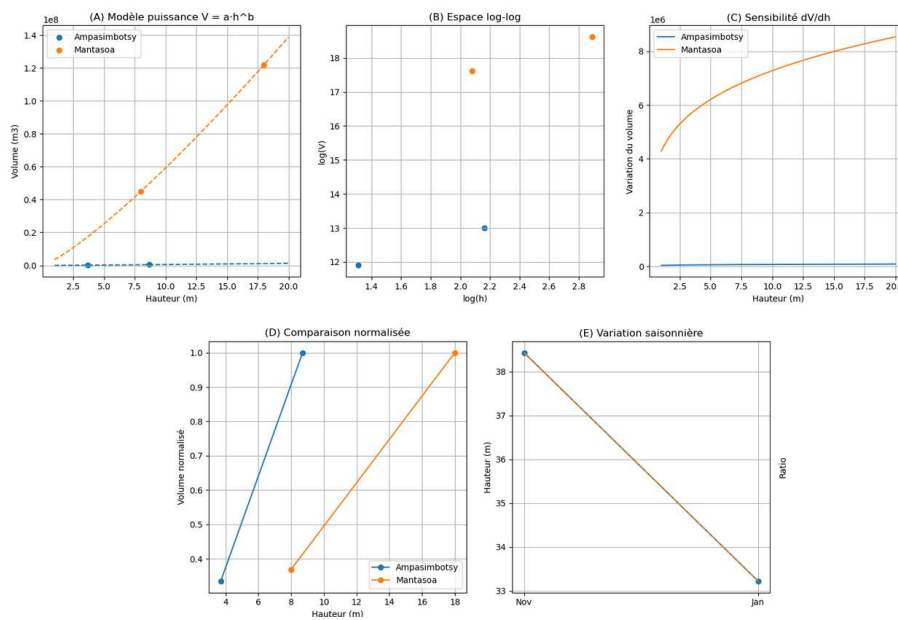


Figure n° 3 : Modélisation multi-analytique de la relation hauteur–volume et de la dynamique hydrologique des réservoirs de Mantasoa et d'Ampasimpotsy

Source : Auteur

Interprétation

L'analyse en espace log-log confirme cette relation de type puissance, indiquant une cohérence structurelle entre les variables hauteur et volume, tandis que la sensibilité dV/dt révèle une forte variation du volume pour de faibles variations de hauteur, notamment pour Mantasoa où la variation dépasse $8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{m}$ aux hauteurs élevées. En comparaison, le réservoir d'Ampasimpotsy présente une sensibilité nettement plus faible, avec des variations de volume quasi négligeables. La comparaison normalisée montre un décalage significatif entre les deux systèmes, Mantasoa atteignant des volumes maximaux pour des hauteurs plus élevées, confirmant son rôle dominant dans le stockage régional. Enfin, l'analyse saisonnière met en évidence une diminution du niveau d'eau d'environ 38,5 m en saison humide (novembre) à près de 33,2 m en saison sèche (Janvier), traduisant une perte significative de volume mobilisable. Ces résultats confirment que le système est fortement dépendant des variations de hauteur d'eau, et donc vulnérable aux fluctuations climatiques, avec un impact direct sur la disponibilité des ressources hydriques et la production hydroélectrique.

4- Estimation des débits de crue du bassin versant de Mantasoa selon la méthode de Louis Duret et analyse des paramètres hydrologiques

La figure ci-après présente une analyse intégrée de l'estimation des débits de crue du bassin versant de Mantasoa en fonction des périodes de retour, mettant en évidence le comportement hydrologique du bassin et son aptitude à transformer les précipitations en écoulements. La courbe fréquentielle obtenue par la méthode de Louis Duret montre une augmentation progressive des débits en fonction de la période de retour, passant d'environ $26,36 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une période de 2 ans à près de $88,92 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une période de 100 ans. Cette évolution traduit une croissance non linéaire des débits extrêmes, caractéristique des bassins versants soumis à des événements pluviométriques intenses.

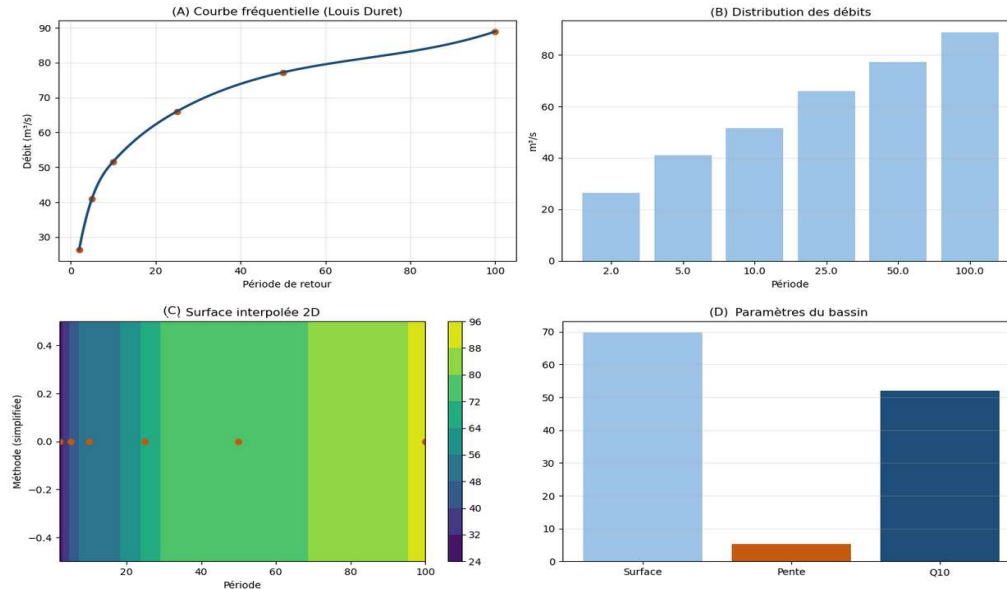


Figure n° 4 : Estimation des débits de crue du bassin versant de Mantasoa selon la méthode de Louis Duret et analyse des paramètres hydrologiques

Source : Auteur

Interprétation

La distribution des débits confirme cette tendance, avec une augmentation significative des valeurs entre les différentes périodes, notamment entre 10 ans ($\approx 51,61 \text{ m}^3/\text{s}$) et 50 ans ($\approx 77,23 \text{ m}^3/\text{s}$), illustrant le risque accru de crues majeures pour des fréquences plus faibles. La surface interpolée met en évidence une continuité dans l'évolution des débits, soulignant la cohérence des estimations et la transition progressive entre les différents régimes hydrologiques. Par ailleurs, l'analyse des paramètres du bassin montre que pour une surface d'environ $69,68 \text{ km}^2$ et une pente moyenne de $5,364 \text{ m}/\text{km}$, le débit décennal (Q10) est estimé à environ $52 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces caractéristiques traduisent un bassin de taille intermédiaire à pente modérée, capable de générer des débits importants en période de forte pluviométrie. Ces résultats confirment que le bassin versant de Mantasoa présente une sensibilité notable aux événements extrêmes, avec une capacité de réponse hydrologique significative. L'augmentation rapide des débits avec la période de retour souligne l'importance de prendre en compte ces valeurs dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, afin de limiter les risques de débordement et d'assurer la sécurité des infrastructures hydroélectriques.

5- Analyse fréquentielle des hauteurs pluviométriques extrêmes H (24, p) par la loi de Gumbel dans le bassin versant de Mantasoa

La figure suivante illustre l'estimation des hauteurs pluviométriques extrêmes sur 24 heures en fonction des périodes de retour, selon l'ajustement statistique de la loi de Gumbel, permettant d'appréhender le comportement des événements pluviométriques extrêmes dans le bassin versant étudié. La courbe lissée de H (24, p) met en évidence une augmentation progressive des hauteurs de pluie avec la période de retour, passant d'environ $46,03 \text{ mm}$ pour une période de 2 ans à près de $110,41 \text{ mm}$ pour une période de 100 ans. Cette évolution traduit une intensification significative des précipitations extrêmes à mesure que la fréquence des événements diminue.

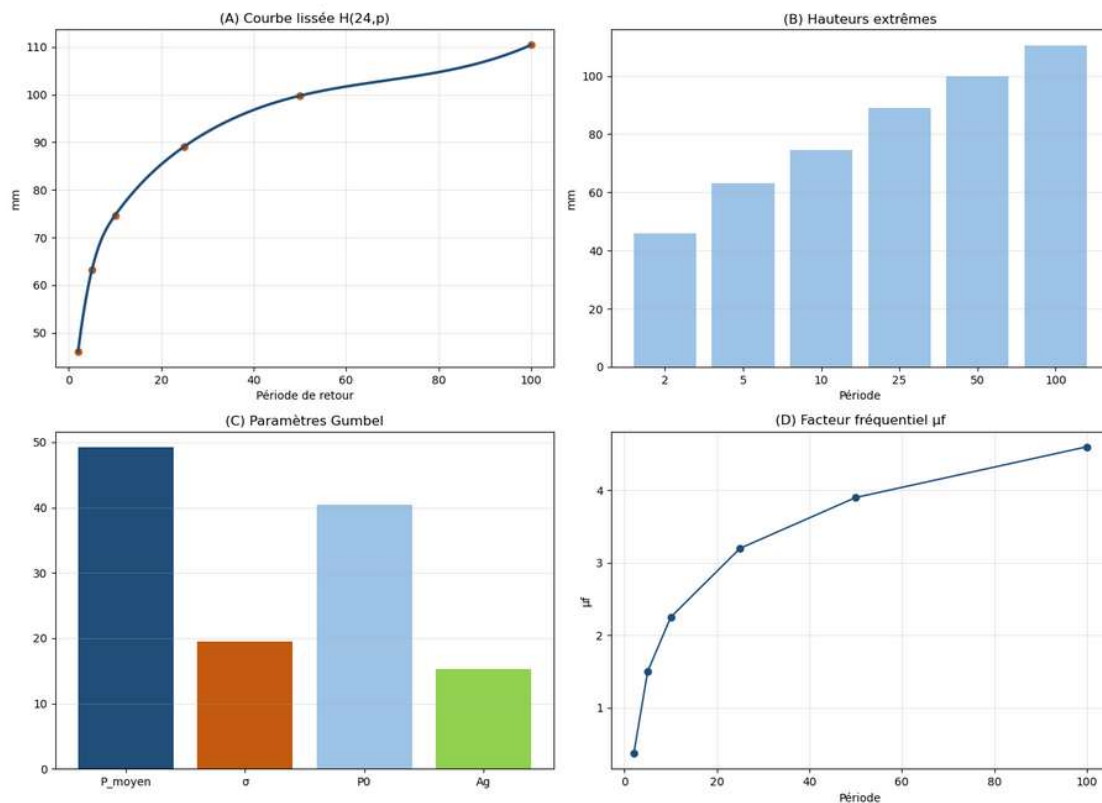


Figure n° 5 : Analyse fréquentielle des hauteurs pluviométriques extrêmes $H(24, p)$ par la loi de Gumbel dans le bassin versant de Mantasoa

Source : Auteur

Interprétation

La distribution des hauteurs extrêmes confirme cette tendance croissante, avec des valeurs intermédiaires de l'ordre de 63,23 mm pour 5 ans, 74,64 mm pour 10 ans et 99,75 mm pour 50 ans, illustrant une progression quasi logarithmique des hauteurs de pluie. L'analyse des paramètres statistiques montre une pluviométrie moyenne d'environ 49,18 mm et un écart-type de 19,51 mm, indiquant une variabilité importante des précipitations journalières maximales. Le paramètre de position P_0 estimé à 40,40 mm et le gradex Ag de 15,22 mm traduisent respectivement le niveau de base des précipitations extrêmes et leur taux d'augmentation. Par ailleurs, le facteur fréquentiel μ_f augmente de manière significative avec la période de retour, passant d'environ 0,37 pour 2 ans à 4,60 pour 100 ans, ce qui confirme l'amplification des événements extrêmes. Ces résultats mettent en évidence une forte sensibilité du bassin versant aux pluies intenses, susceptibles de générer des crues importantes, et soulignent l'importance de ces estimations dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et la gestion des risques hydrologiques.

DISCUSSION

Les résultats obtenus à travers l'approche intégrée adoptée mettent en évidence la complexité des interactions entre les paramètres morphologiques, hydrologiques et climatiques au sein du bassin versant de Mantasoa. L'analyse hypsométrique révèle

une distribution altitudinale fortement dissymétrique, caractérisée par une dominance des basses altitudes, notamment entre 1372 m et 1392 m, représentant environ 28,60 km². Cette configuration traduit une organisation du relief favorable à la concentration des écoulements vers les zones basses, renforçant le rôle de ces secteurs dans le fonctionnement hydrologique global. La modélisation des relations hauteur–volume des réservoirs met en évidence une réponse non linéaire du stockage en fonction de la hauteur d'eau. Le réservoir de Mantasoa présente une capacité de stockage particulièrement élevée, atteignant environ 122×10^6 m³ pour une hauteur de 18 m, alors qu'à des niveaux inférieurs, notamment autour de 8 m, le volume reste limité à environ 45×10^6 m³. Cette sensibilité du volume à la variation de hauteur traduit l'existence d'un seuil critique de fonctionnement, au-delà duquel la capacité de régulation hydrique devient significative. En comparaison, le réservoir d'Ampasimpotsy présente des volumes nettement plus faibles, confirmant son rôle secondaire dans le système. L'analyse des crues met en évidence une augmentation progressive des débits en fonction de la période de retour, passant de 26,36 m³/s pour une période de 2 ans à 88,92 m³/s pour une période de 100 ans. Cette évolution traduit une intensification des événements extrêmes, renforcée par la variabilité des hauteurs pluviométriques estimées entre 46,03 mm et 110,41 mm sur 24 heures. Ces résultats indiquent une forte capacité du bassin versant à transformer les précipitations en écoulements, en particulier lors d'événements intenses. Par ailleurs, les analyses hydroclimatiques mettent en évidence une variabilité interannuelle importante des précipitations et des débits, influençant directement le fonctionnement du système hydroélectrique. Les périodes de forte pluviométrie favorisent l'augmentation des débits et du stockage, tandis que les périodes sèches entraînent une diminution des ressources disponibles, accentuant les risques de déficit hydrique. Cette alternance souligne la dépendance du système aux conditions climatiques et la nécessité d'une gestion adaptée. Enfin, les outils de modélisation et de visualisation utilisés, notamment les surfaces interpolées et les représentations graphiques, ont permis de mettre en évidence les tendances générales et les anomalies du système. Ils offrent une lecture synthétique et cohérente des interactions entre les différentes variables, facilitant ainsi l'interprétation des résultats.

CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser de manière intégrée la dynamique hydroclimatique et morpho-hydrologique du bassin versant de Mantasoa et de ses réservoirs, en mettant en évidence les interactions entre le relief, les précipitations et les écoulements. L'analyse hypsométrique a montré une dominance des basses altitudes, favorisant la concentration des eaux et influençant la dynamique du ruissellement. La modélisation des relations hauteur–volume a révélé une forte capacité de stockage du réservoir de Mantasoa ainsi qu'un seuil critique de fonctionnement, déterminant pour la gestion des ressources hydriques. L'étude des crues et des pluies extrêmes a mis en évidence une augmentation significative des débits avec la période de retour, traduisant une vulnérabilité du bassin aux événements hydrologiques intenses. Par ailleurs, la variabilité interannuelle des précipitations et des débits souligne la sensibilité du système aux fluctuations climatiques, avec des impacts directs sur la disponibilité en eau et sur le fonctionnement du système hydroélectrique. Les méthodes utilisées, combinant acquisition de données de terrain, traitement SIG et modélisation numérique, ont permis d'obtenir une représentation cohérente et fiable du fonctionnement du bassin versant. Elles constituent un outil pertinent pour l'analyse et la gestion des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique.

RÉFÉRENCE

- [1] - IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University. Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] - Trenberth, K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), pp. 123–138.
<https://doi.org/10.3354/cr00953>
- [3] - Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
<https://doi.org/10.1036/0070108102>
- [4] - Morris, G.L. & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill.

<https://doi.org/10.1036/007043302X>

[5] - Gumbel, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press.

<https://doi.org/10.7312/gumb92988>

[6] - Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell.

<https://doi.org/10.1002/9781119951001>

[7] - Sivapalan, M., et al. (2003). IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), pp. 857–880.

<https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>

[8] - Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. (2008) *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Vienna: Springer.

<https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>

[9] - Căţeanu, M. and Moroianu, M.A. (2024) ‘Performance evaluation of real-time kinematic global navigation satellite system with survey-grade receivers and short observation times in forested areas’, *Sensors*, 24(19), 6404. <https://doi.org/10.3390/s24196404>

[10] - Kluiver, T., Ragan-Kelley, B., Pérez, F., Granger, B., Bussonnier, M., Frederic, J., Kelley, K., Hamrick, J., Grout, J., Corlay, S., Ivanov, P., Avila, D., Abdalla, S. and Willing, C. (2016) ‘Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows’, in Loizides, F. and Schmidt, B. (eds.) *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*. Amsterdam: IOS Press, pp. 87–90.

<https://doi.org/10.3233/978-1-61499-649-1-87>

[11] - Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N.J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M.H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J.F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C. and Oliphant, T.E. (2020) ‘Array programming with NumPy’, *Nature*, 585, pp. 357–362.

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

[12] - McKinney, W. (2010) ‘Data structures for statistical computing in Python’, in van der Walt, S. and Millman, J. (eds.) *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 56–61.

<https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>

[13] - Hunter, J.D. (2007) ‘Matplotlib: A 2D graphics environment’, *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95.

<https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

[14] - Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, İ., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A.M., Ribeiro, A.H., Pedregosa, F. and van Mulbregt, P. (2020) ‘SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python’, *Nature Methods*, 17, pp. 261–272.

<https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

- [15] - Jordahl, K., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J., Tratner, J., Perry, M., Snow, A., Cochran, M., Gillies, S., Culbertson, L., Bartos, M., Eubank, N., Albert, M., Bilogur, A., Rey, S., Ren, C., Arribas-Bel, D., Wasser, L., Wolf, L.J., Journois, M., Wilson, J., Greenhall, A. and Leblanc, F. (2020) geopandas/geopandas: v0.8.1. Zenodo.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>