



Analyses et propositions de solutions durables pour la gestion des inondations dans la plaine ville d'Antananarivo

Rakotomamonjy Soa Edmond Mamy ¹, Rakoto David Rambintsoa ²

- (1) Doctorant à l'école doctoral ingénierie et géoscience (INGE), université d'Antananarivo, Madagascar.
(2) Professeur Titulaire, Enseignant chercheur, université d'Antananarivo, Madagascar
-

Résumé : Cette thèse propose une analyse approfondie des problèmes d'inondations récurrentes dans la plaine ville d'Antananarivo, la capitale de Madagascar. En s'appuyant concrètement sur des études de terrain, des données hydrologiques et analyses spatiales, l'ouvrage diagnostique les causes multiples de ces inondations, qu'elles soient naturelles (fortes précipitations, topographies, nature des sols) ou anthropiques (urbanisation non maîtrisée, imperméabilisation des sols, insuffisance des réseaux d'assainissement, occupation des zones inondables). L'étude évalue les limites des stratégies de gestion existantes et plaide pour une approche intégrée et durable. L'auteur développe et propose un ensemble de solutions techniques à court terme et à long terme, organisationnelles et politiques visant à réduire la vulnérabilité du territoire. Ces solutions peuvent inclure des aménagements hydrauliques adaptés, des techniques alternatives de drainage urbain, une meilleure planification urbaine, le renforcement des systèmes d'alerte, ainsi qu'une gouvernance plus efficace associant tous les acteurs concernés. L'objectif final est de se trouver des solutions pérennes face aux risques d'inondation pour le développement durable de la plaine ville d'Antananarivo.

Mots-clés : *Inondations, Antananarivo, Madagascar, solutions intégrées, HEC-RAS, Aménagement, Saint-Venant.*

Digital Object Identifier (DOI) : <https://doi.org/10.5281/zenodo.19290083>



1- Introduction

Les inondations comptent parmi les phénomènes naturels préoccupants qui affectent l'environnement et les êtres humains. Elles résultent du débordement de grandes quantités d'eau provenant de fortes pluies, provoquant le dépassement des limites naturelles des rivières et des cours d'eau. Elles sont répandues dans de nombreuses régions du monde, notamment au pied des montagnes où la pente abrupte accélère l'écoulement des eaux, et dans les plaines basses caractérisées par une capacité limitée à évacuer les excès d'eau (Dolchinkov, N. T, 2024).

Les inondations se distinguent par leur fréquence élevée et leur diversité, qu'elles soient soudaines en raison de fortes précipitations, ou saisonnières, liées à des cycles naturels (Kichigina, N. V, 2021).

Elles montrent une grande capacité à causer d'énormes pertes humaines et matérielles, affectant des millions de personnes chaque année par la destruction des maisons, des infrastructures, la contamination des sources d'eau, ainsi que les dommages économiques et sociaux (International Disaster Database). Comprendre les causes et les impacts des inondations est essentiel pour développer des stratégies efficaces de réduction des dégâts. Cela inclut l'amélioration des systèmes d'alerte précoce, la conception d'infrastructures capables de s'adapter aux changements climatiques, et la mise en œuvre de plans de gestion durable de l'utilisation des terres, en particulier dans les zones sujettes aux inondations (Azidane, H., Benmohammadi, A., Hakkou, M., Magrane, B., & Haddout, S, 2018).

Les grands accidents climatiques ont depuis longtemps retenu l'attention des historiens (Lachiver M, 1991). Toutes les sources attestent de même d'une recrudescence des inondations aux XVII^{-ème} et XVIII^{-ème} siècles, favorisées sans doute par le petit âge glaciaire, une modification des conditions d'abrasion dans les massifs montagneux et une augmentation du transport sédimentaire (Favier R, 2006). G. Quenet a également montré que les tremblements de terre avaient été plus fréquents qu'on ne le supposait, et que certains avaient été particulièrement destructeurs : dans le comté de Nice en 1618 et 1644 ; le 21 juin 1660 dans les Pyrénées, le plus important séisme de l'époque moderne ; dans les Vosges le 12 mai 1682 ; en haute Provence le 14 août 1708 (Quenet G, 2005).

En période de pluie, la ville d'Antananarivo et ses environs sont récurrentement victimes des inondations dues en général à la mauvaise évacuation des eaux pluviales et à l'encombrement des canaux d'évacuation des eaux usées. De la mauvaise gestion des écoulements à l'amoncellement de déchets solides, en passant par l'usage de latrines ne respectant aucune norme, la situation empire d'année en année, impactant sur le mode de vie et la santé des populations régulièrement affectées au sein des bas-quartiers qui sont les quartiers les plus vulnérables (PIAA, version final).

La population de la zone d'influence du projet a été estimée, avec certaines incertitudes dues à l'absence de recensement récent, à environ 1,7 millions d'habitants dont 666 000 dans la communauté urbaine d'Antananarivo (CUA) et environ un million d'individus dans les communes périphériques de l'agglomération. La taille des ménages est estimée à 4 en moyenne. La population est jeune (38% de moins de 5 ans), et majoritairement pauvre.

Le projet affectera principalement des zones urbaines pourvues de voirie le long desquelles seront posées les conduites. Dans une bien moindre mesure, les zones rurales ou peu équipées seront impactées par la construction des ouvrages de prélèvement et de certains réservoirs (CPRP Rapport final, octobre 2019).

Dans la plaine ville d'Antananarivo, la proportion d'individus sans niveau d'instruction est faible (2-3%). Environ 46 % de la population ont arrêté leur scolarité en primaire et 36 % en secondaire. Les différences garçon-filles de fréquentation scolaire sont très faibles en milieu urbain. Le secteur éducatif primaire et secondaire montre une nette domination des établissements privés sur les établissements publics, ces derniers offrant des conditions de scolarité beaucoup plus précaires en termes d'élèves par classe, notamment dans les zones périphériques (CPRP Rapport final, octobre 2019).

Vu ces situations et les circonstances observées pendant la période des pluies sur la plaine d'Antananarivo Ville, notre choix de thème s'est porté sur les « analyses et propositions de solutions durables pour la gestion des inondations dans la plaine ville d'Antananarivo » afin de résoudre toutes ces anomalies sur l'assainissement et l'évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et des eaux vannes.

2- Problématique sur l'inondation dans la plaine ville d'Antananarivo

En période de pluie, la ville d'Antananarivo et ses environs sont les victimes récurrentes des inondations dues en général à la mauvaise évacuation des eaux pluviales et à l'encombrement des canaux d'évacuation des eaux usées. De la mauvaise gestion des écoulements à l'amoncellement de déchets solides, en passant par l'usage de latrines ne respectant aucune norme, la situation empire d'année en année, impactant sur le mode de vie et la santé des populations régulièrement affectées au sein des bas-quartiers qui sont les quartiers les plus vulnérables.

Ces quartiers sont constitués d'habitations situées à l'ouest du centre-ville, des zones de remblai et de colmatage, souvent entourées de rizières.

Outre l'aggravation de l'insécurité due aux risques d'entraînement par les crues et aux noyades, les insalubrités qui découlent de cette situation génèrent également des problèmes de santé (diarrhée, infection respiratoire, maladies de peau, etc.) exacerbant les problèmes de précarité.

Le manque de connaissance de la population (hommes et femmes de tout âge) en matière d'hygiène d'une part, et son manque de motivation quant à ses rôles et responsabilités pour y faire face d'autre part, constituent un facteur de blocage pour l'amélioration de la situation.

A ceci s'ajoute la non durabilité des initiatives isolées comme les travaux d'assainissement effectués par les ménages et les vidanges des fosses souvent assurées par des petits opérateurs informels – bien qu'elles aient le mérite d'être entreprises - mais qui sont faiblement coordonnées et par conséquent, difficiles à mettre à l'échelle.

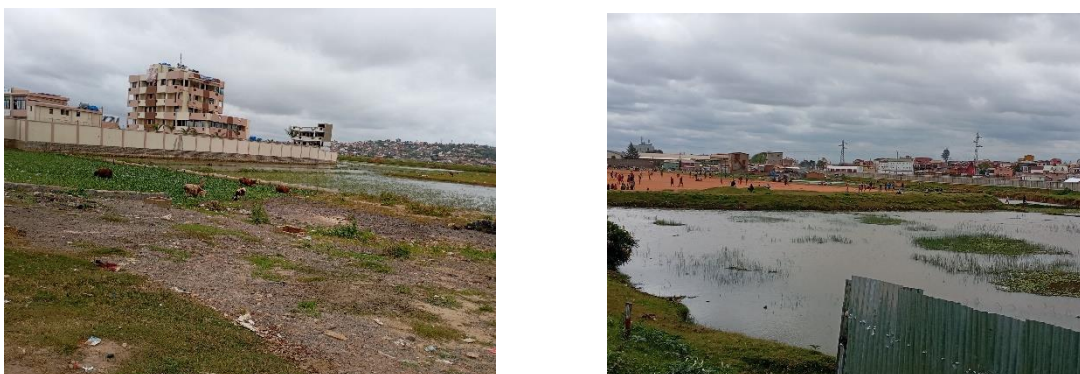


Figure 1: Construction illicite sur les remblais qui bloque l'évacuation

3- Etats du réseau d'assainissement à Antananarivo

Selon l'étude du projet PIAA, les données rassemblées auprès du SAMVA témoignent de niveaux de comblements annuels compris en moyenne entre 35 % pour ce qui concerne les réseaux enterrés et entre 20 % et 75 % pour les canaux à ciel ouvert (moyenne de 48 %).

Les linéaires traités (hors séparatifs) représentent un linéaire de plus de 32 km pour les canaux enterrés et plus de 12 km pour les canaux à ciel ouvert. Ces encombrements nécessitent des interventions importantes généralement réalisées sur une période de 3 mois avant la saison des pluies.

L'attention est attirée sur le fait que ces chiffres concernent l'ensemble des matières (excrétas compris) et non pas uniquement les sédiments.

Les reconnaissances effectuées dans le cadre de cette étude se sont efforcées d'apprécier les niveaux d'encombrement des réseaux du fait des dépôts de sédiments. L'exploitation de ces données montre que les niveaux d'encombrements fort et moyen, concernent respectivement 43,5 km de réseau (niveau fort) et 66,6 km (niveau moyen) pour un total de 431 km comprenant des canaux du réseau primaire et des caniveaux à ciel ouvert et enterré, (hors réseau séparatif qui n'est pas concerné par cette problématique).

Par conséquent, un peu plus de 25,5 % de la totalité du réseau est concerné par des encombrements de sédiments moyens et forts (UPDR, PRD, Région Analamanga, 2007)

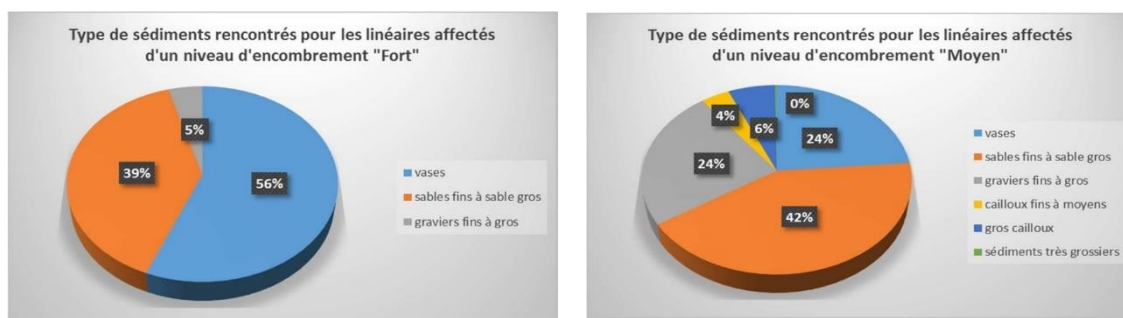


Figure 2: Types des sédiments rencontrés pour les linéaires affectés d'un niveau d'encombrement Fort et Moyen.

4- Méthodologies et outils de travail

L'étude hydraulique consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit et les conditions aux limites, dans le but de réaliser un modèle hydraulique.

D'une part, cela permet de calculer la hauteur de l'eau, la vitesse d'écoulement et d'autre part, de déterminer les zones de débordement.

Le comportement hydraulique des tronçons modélisés du canal d'Ikopa à Anosizato lors des différentes périodes de retour des crues est principalement déterminé par le début des crues des tronçons du cours d'eau et par la morphologie du lit de l'Ikopa dans la zone du projet. Les débits adoptés revêtent une importance capitale pour le dimensionnement des ouvrages projetés sur le canal de l'Ikopa. Cette étude comprend plusieurs étapes :

4.1 Etudes statistiques selon la loi

L'ajustement des pluies maximales journalières peut se faire par plusieurs lois d'ajustement. La loi de Gumbel est une loi très utilisée en hydrologie et en climatologie (MAKHLOUF Z., 1994).

On signale ici que la fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-a}{b} \right) \right]$$

$$u = \frac{x-a}{b}$$

$$u = -\ln[-\ln f(x)]$$

u : Étant la variable de Gumbel

Il s'agit donc principalement d'estimer la probabilité de non dépassement $F_i(x)$ qu'il convient d'attribuer à chaque valeur x . il existe plusieurs formules d'estimation de la fonction de répartition $F(x)$. Dans le travail actuel, on a utilisé la distribution empirique de Hazen définie par $F_i(x) = \frac{r-0.5}{n}$ où r est le rang et n la taille de l'échantillon.

Les données et les résultats de l'application de la loi de Gumbel pour les débits de l'Ikopa à Anosizato de l'année 2000-2022 sont présentés ci-après.

4.2 Modélisations mathématiques selon le modèle HEC-RAS

4.2.1 Modèle 1D

Les modèles 1D sont des outils de modélisation hydraulique qui simulent le mouvement de l'eau le long d'un seul axe, principalement dans des canaux ou des rivières. Ils reposent sur des équations mathématiques pour décrire l'écoulement en fonction du temps et de la distance le long de la rivière, prenant en compte des facteurs tels que la pente du terrain et la rugosité du lit de la rivière pour prédire des variables hydrauliques telles que le débit et la profondeur de l'eau [11]. Ces modèles sont largement utilisés dans la gestion des ressources en eau, la prévention

des inondations et la conception d'infrastructures hydrauliques (Brunner, G. W, 2016). Dans de nombreuses situations, l'écoulement peut être considéré comme unidimensionnel le long de la ligne centrale du chenal de la rivière, ce qui rend les modèles 1D appropriés (MIKE, D. W, 2012). Ils peuvent également être utilisés pour modéliser l'écoulement des plaines inondables à surface ouverte, supposant que l'écoulement se déroule dans une direction parallèle au chenal principal avec une vitesse moyenne en coupe transversale (DHI, 2003). Les équations de Saint-Venant unidimensionnelles, une simplification des équations bidimensionnelles des eaux peu profondes, sont utilisées pour résoudre ces modèles à l'aide des techniques numériques.

La conservation de la masse
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

La conservation de la quantité de mouvement
$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

Où : A représente la surface de la section d'écoulement, t est le temps, Q est le débit d'écoulement, et x est la coordonnée spatiale (distance mesurée dans la direction du canal), g est l'accélération gravitationnelle, S_f est la pente de frottement (pente énergétique) et S_0 est la pente du lit du canal

Les équations unidimensionnelles de Saint-Venant sont une simplification des équations bidimensionnelles des eaux peu profondes, qui sont également appelées les équations bidimensionnelles de Saint-Venant. Bien que les équations (1) et (2) ne disposent pas de solutions analytiques, elles peuvent être résolues en utilisant des méthodes numériques. La résolution de ces équations implique des estimations de Q (débit) et de h (hauteur d'eau) pour chaque section transversale à chaque pas de temps (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S., 2017).

4.2.2 Modèle 2D

Les modèles 2D sont des outils de modélisation hydraulique qui simulent le mouvement de l'eau dans deux dimensions sur un plan horizontal. Contrairement aux modèles 1D, qui se concentrent sur un axe d'écoulement, les modèles 2D intègrent à la fois la direction longitudinale et transversale (MIKE, D., 2012). Basés sur des équations mathématiques, ces modèles prennent en compte divers facteurs comme la topographie et la géométrie des cours d'eau pour représenter le comportement de l'eau en fonction du temps et de la position (MIKE, D., 2012). Ces modèles sont particulièrement utilisés pour la modélisation des inondations, la gestion des ressources en eau et la conception d'infrastructures hydrauliques, en raison de leur capacité à représenter des phénomènes complexes tels que la propagation des ondes de crue et les interactions entre les cours d'eau et les plaines inondables (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S., 2017). Bien que plus complexes et gourmands en ressources informatiques que les modèles 1D, ils offrent une meilleure précision pour la modélisation des systèmes hydrologiques complexes et la prévision d'événements extrêmes. Les modèles 2D résolvent les équations bidimensionnelles des eaux peu profondes, décrivant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement sur un plan [16]. Divers schémas numériques sont utilisés pour approximativement résoudre ces équations. Classés selon leur stratégie de discrétisation numérique, leur représentation spatiale et leur discrétisation temporelle, ces modèles cartographient l'étendue des inondations et estiment les risques d'inondation (Teng, J., Jakeman, A. J.,

Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017). Ces dernières décennies, les modèles 2D ont suscité un grand intérêt, avec de nombreux travaux dédiés à leur développement, notamment pour les écoulements peu profonds instationnaires (Sleigh, P., Gaskell, P., Berzins, M., & Wright, N,1998), (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017). Parmi les techniques de calcul explorées, les schémas de volumes finis se distinguent comme une méthode populaire, devenant la norme pour résoudre les équations en eaux peu profondes dans les modèles 2D (DHI, 2003), (MIKE, D. W,2012), (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017), (Neal, J. C., Shustikova, I., Domeneghetti, A., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Les caractéristiques techniques des modèles 2D selon (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017). Incluent plusieurs aspects clés : Premièrement, la résolution des équations d'eaux peu profondes est fondamentale pour simuler la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Pour ce faire, divers schémas numériques sont utilisés, tels que les schémas de différences finies, d'éléments finis et de volumes finis, ces derniers étant particulièrement populaires pour leur efficacité dans la capture de chocs hydrauliques et les discontinuités. La discrétisation du temps et de l'espace joue un rôle crucial, permettant de segmenter le modèle en intervalles appropriés pour une meilleure précision et stabilité des simulations. L'algorithme de capture de choc est essentiel pour traiter les phénomènes de forte variation comme les ondes de crue, assurant une modélisation réaliste des transitions rapides. Enfin, la capacité de parallélisation de ces modèles permet d'améliorer leur performance et leur efficacité, rendant possible la simulation de systèmes hydrologiques complexes en temps raisonnable (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017).

La conservation de la masse
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

La conservation de la quantité de mouvement
$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = 0 \quad (5)$$

Où x et y représentent les deux dimensions spatiales, et où le vecteur 2D (u, v) correspond à la vitesse horizontale moyenne sur la colonne verticale. La résolution de ces équations implique des estimations de u , v et h dans l'espace et dans le temps. Tout comme pour les équations unidimensionnelles de Saint-Venant, les équations bidimensionnelles des eaux peu profondes ne disposent pas de solutions analytiques. Par conséquent, de nombreux schémas numériques sont élaborés pour fournir une approximation algébrique (Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S.,2017).

5- Résultats et discussions

5.1 Résultats et discussion pour l'étude statistique

Après de l'Autorité pour la Protection contre les Inondations de la plaine d'Antananarivo (APIPA), nous avons reçu les données des débits de l'Ikopa à Anosizato, Ambohimambola et Bévomanga des années 2000-2022. Dans ces études, nous prenons le cas de l'Ikopa à Anosizato pour faire l'étude.

Ikopa à Anosizato :

Saison	Hauteur max à l'échelle	Débit	Date	Rang
2021-2022	3,28 m	204 m ³ /s	Le 25 janvier 2022	04
2020-2021	0,72 m	32 m ³ /s	Le 17 février 2021 à 17h	21
2019-2020	1,12 m	49 m ³ /s	Le 24 février 2020	20
2018-2019	1,30 m	58 m ³ /s	Le 25 février 2019 à 7 h	19
2017-2018	2,78 m	159 m ³ /s	Le 08 janvier 2018 à 1 h	07
2016-2017	3,12 m	189 m ³ /s	Le 10 mars 2017 à 5 h	06
2015-2016	1,64 m	77 m ³ /s	Le 26 mars 2016	17
2014-2015	3,21 m	198 m ³ /s	Le 27 février 2015	05
2013-2014	1,49 m	68 m ³ /s	Le 10 février 2014	18
2012-2013	2,77 m	158 m ³ /s	Le 30 janvier 2013	08
2011-2012	2,50 m	136 m ³ /s	Le 16 février 2012	09
2010-2011	2,04 m	102 m ³ /s	Le 21 décembre 2010	15
2009-2010	2,40 m	128 m ³ /s	Le 18 mars 2010	11
2008-2009	2,27 m	119 m ³ /s	Le 13 février 2009 à 20 h	12
2007-2008	3,73 m	251 m ³ /s	Le 19 février 2008 à 14 h	01
2006-2007	3,39 m	215 m ³ /s	Le 15 janvier 2007 à 4 h	02
2005-2006	1,74 m	82 m ³ /s	Le 30 décembre 2005 de 3 à 4 h	16
2004-2005	2,09 m	105 m ³ /s	Le 03 mars 2005 de 11 à 15 h	14
2003-2004	2,45 m	132 m ³ /s	Le 31 janvier 2004 de 10 à 16 h	10
2002-2003	2,90 m	169 m ³ /s	Le 22 janvier 2003 de 11 à 19 h	06
2001-2002	2,37 m	114 m ³ /s	Le 14 février 2002 à 09 h	13
2000-2001	3,47 m	211 m ³ /s	Le 28 janvier 2001 à 16 h	03

N.B. : Cote d'alerte de menace de danger : 3,00 m
Cote d'alerte de danger déclaré : 3,50 m

Source : APIPA

D'après l'utilisation de l'ajustement de la loi de Gumbel, nous avons les valeurs de la période de retour avec ces débits et les probabilités de dépassement que nous représentons dans les tableaux suivants :

Tableau 1: Périodes de retour et les débits de l'Ikopa Anosizato

Période retour T (ans)	Débits (m ³ /s)
3,0	151,72
5,0	183,49
10,0	223,42
20,0	261,72
50,0	311,29
100,0	348,44
200,0	385,45

Pour mieux comprendre les comportements hydrauliques de l'Ikopa, nous avons augmenté le débit d'écoulement à 400 m³/s afin d'insérer les données dans le modèle HEC-RAS.

Tableau 2: Probabilité de dépassement

Débits (m ³ /s)	P(x)
151,72	0,33
183,49	0,20
223,42	0,10
261,72	0,05
311,29	0,02
348,44	0,01
385,45	0,01

5.2 Résultats pour la modélisation mathématique selon HEC-RAS

5.2.1 Attribution des données géométriques

L'attribution des données géométriques dans HEC-RAS comprend la réalisation minutieuse des coupes transversales et l'assignation des lignes de berges. Pour chaque section du canal, une coupe transversale précise a été effectuée, suivie de l'attribution des coefficients de rugosité de Manning correspondant à la plage spécifiée par Chow, 1959 pour le canal et berge avec présence de végétation comme le Typha.

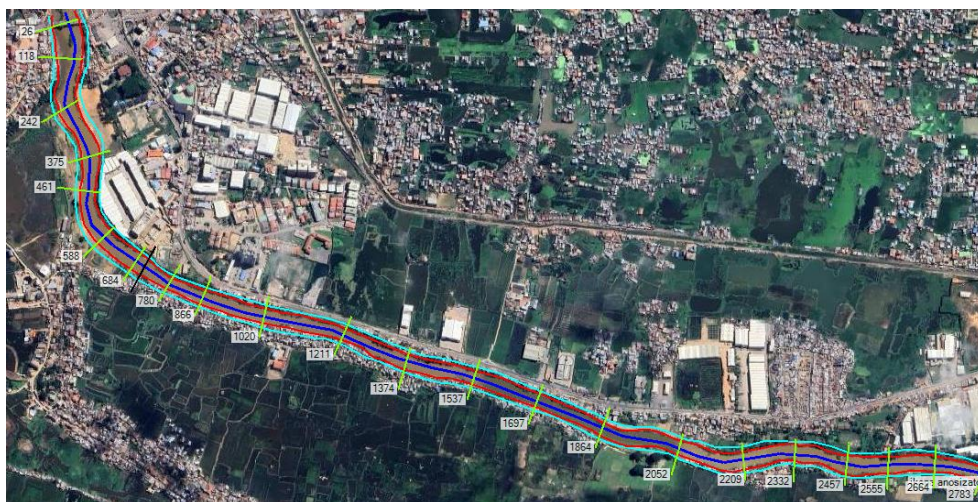


Figure 3: Attribution des données géométriques

5.2.2 Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité de Manning (n) représente la résistance du terrain à l'écoulement de l'eau, intégrant les forces de frottement externes dues à la rugosité du sol. Ce coefficient est déterminé en fonction de la nature du canal et des berges que nous avons considérés uniformes dans notre étude : (Alexis, 2016). Pour le tronçon allant de l'amont à l'aval du modèle, le canal (modèle 1D) présente un coefficient de rugosité variant entre 0,08 à 0,115 (lit majeur) et 0,05 à 0,070 (pour les berges).

5.3 Résultats avant l'aménagement du canal

Les courbes ci-dessous représentent les valeurs et les comportements de la vitesse d'écoulement de la rivière à son état naturel avant l'aménagement.

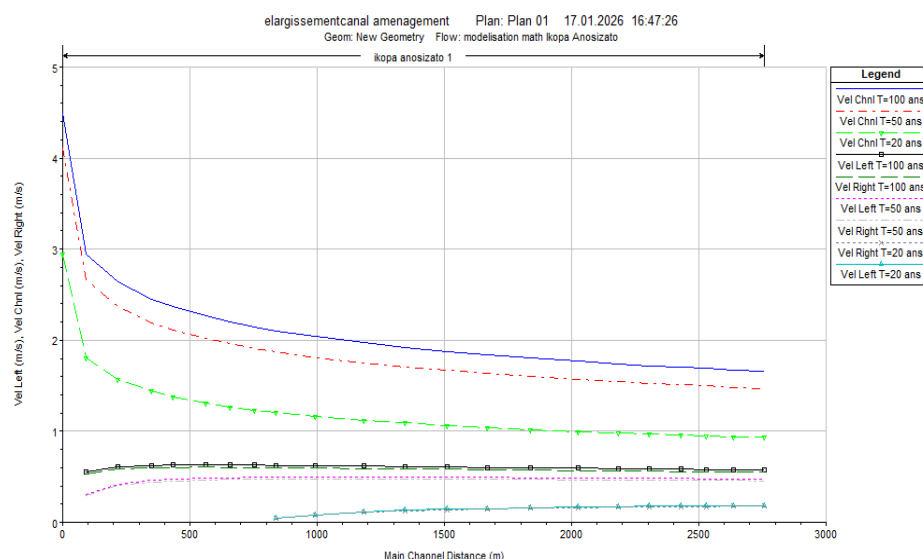


Figure 4: Vitesses d'écoulement avant l'aménagement du canal de l'Ikopa à Anosizato

On observe sur l'image 4 que les vitesses d'écoulement à chaque période de retour sont instables tout au long du tronçon. Les risques de débordements d'eau sont plus probables pour la plaine d'Antananarivo.

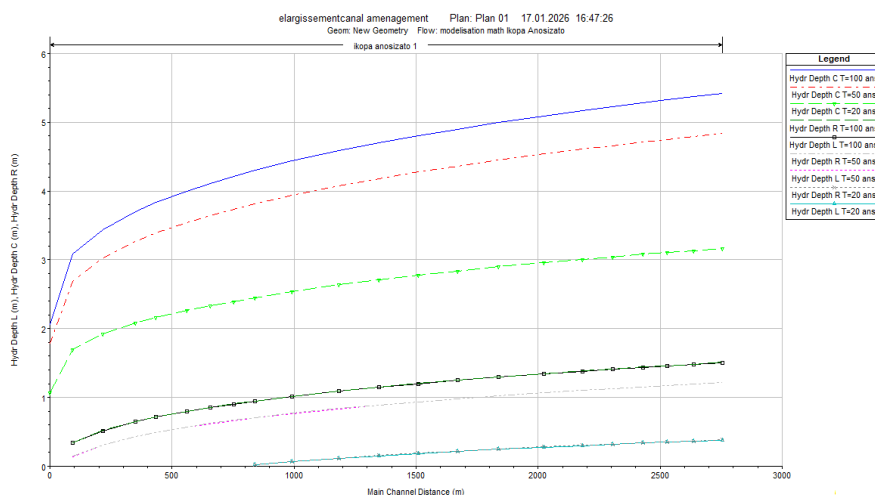


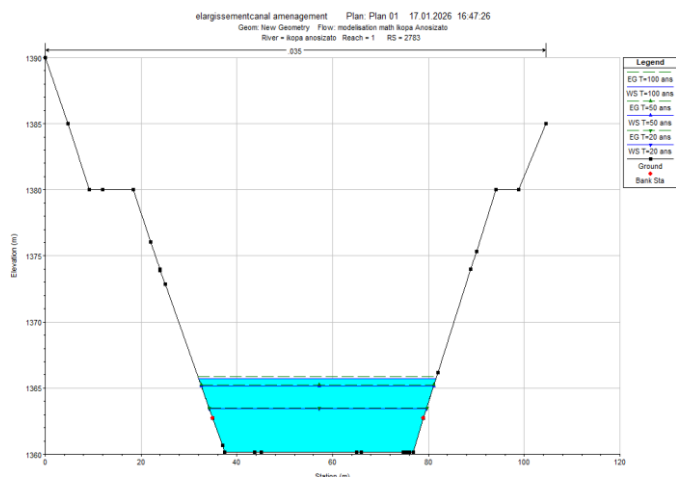
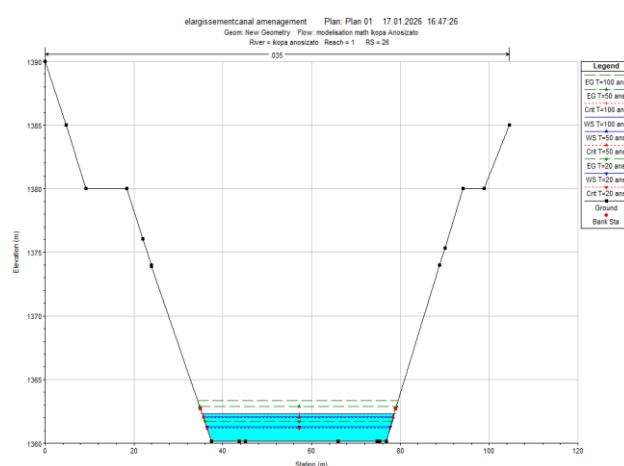
Figure 5: Profondeur d'eau avant l'aménagement du canal

Nous trouvons que les profondeurs d'eau sont plus élevées dans le canal principal selon les graphiques ci-dessus et sur le tableau suivant. C'est logique parce que le cas montre que l'écoulement est le plus concentré. Par contre les rives droites et gauches sont des plaines inondables parce que les profondeurs sont beaucoup plus faibles. Cela indique que lors des crues, l'eau déborde du canal mais reste peu profonde sur les terrains adjacents, du moins pour ce secteur modélisé.

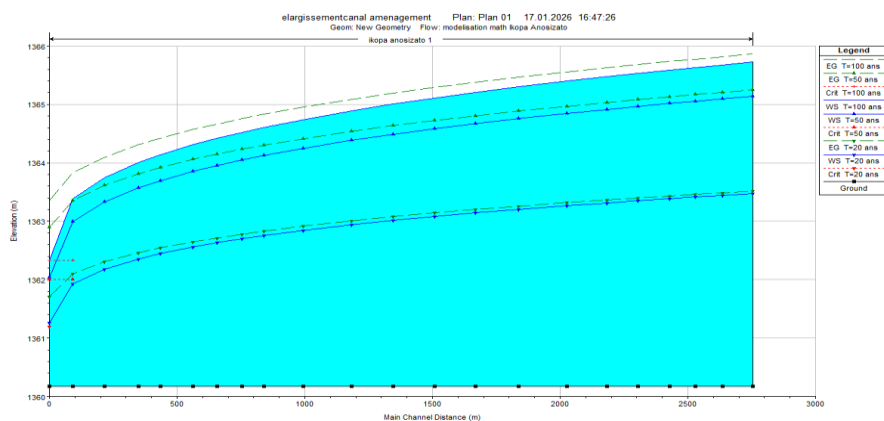
Tableau 3: Profondeurs d'eau avant l'aménagement pour la simulation à l'état naturel

River	Reach	RS	Ch Dist	T=100 ans-Hydr Depth L	T=100 ans-Hydr Depth C	T=100 ans-Hydr Depth R	T=50 ans-Hydr Depth L	T=50 ans-Hydr Depth C	T=50 ans-Hydr Depth R	T=20 ans-Hydr Depth L	T=20 ans-Hydr Depth C	T=20 ans-Hydr Depth R
1 Ikopa anozizato	1	2783	2755.80	1.51	5.42	1.51	1.21	4.83	1.22	0.38	3.17	0.38
2 Ikopa anozizato	1	2664	2637.30	1.48	5.37	1.49	1.19	4.79	1.20	0.36	3.14	0.37
3 Ikopa anozizato	1	2555	2528.50	1.46	5.32	1.46	1.17	4.75	1.17	0.35	3.11	0.35
4 Ikopa anozizato	1	2457	2430.10	1.44	5.28	1.44	1.15	4.71	1.16	0.34	3.08	0.34
5 Ikopa anozizato	1	2332	2304.80	1.41	5.23	1.41	1.13	4.66	1.13	0.32	3.05	0.32
6 Ikopa anozizato	1	2209	2182.40	1.38	5.17	1.38	1.10	4.61	1.10	0.30	3.01	0.30
7 Ikopa anozizato	1	2052	2025.30	1.34	5.09	1.35	1.07	4.54	1.07	0.28	2.96	0.28
8 Ikopa anozizato	1	1864	1836.90	1.29	4.99	1.30	1.02	4.45	1.02	0.25	2.90	0.25
9 Ikopa anozizato	1	1697	1670.00	1.25	4.90	1.25	0.98	4.36	0.98	0.22	2.84	0.22
10 Ikopa anozizato	1	1537	1510.10	1.20	4.81	1.20	0.93	4.28	0.94	0.19	2.78	0.19
11 Ikopa anozizato	1	1374	1347.00	1.15	4.70	1.15	0.89	4.18	0.89	0.15	2.71	0.16
12 Ikopa anozizato	1	1211	1184.00	1.09	4.59	1.09	0.83	4.08	0.84	0.11	2.64	0.12
13 Ikopa anozizato	1	1020	993.10	1.01	4.44	1.02	0.77	3.94	0.77	0.07	2.54	0.07
14 Ikopa anozizato	1	866	838.90	0.95	4.30	0.95	0.70	3.82	0.71	0.02	2.45	0.03
15 Ikopa anozizato	1	780	753.20	0.90	4.22	0.91	0.67	3.74	0.67		2.40	
16 Ikopa anozizato	1	684	657.30	0.85	4.11	0.86	0.62	3.65	0.62		2.34	
17 Ikopa anozizato	1	588	561.60	0.80	4.00	0.80	0.57	3.54	0.57		2.27	
18 Ikopa anozizato	1	461	435.00	0.71	3.83	0.72	0.49	3.39	0.49		2.17	
19 Ikopa anozizato	1	375	349.30	0.64	3.70	0.65	0.43	3.26	0.43		2.08	
20 Ikopa anozizato	1	242	216.30	0.51	3.44	0.52	0.31	3.02	0.31		1.92	
21 Ikopa anozizato	1	118	92.50	0.34	3.08	0.34	0.14	2.69	0.15		1.69	
22 Ikopa anozizato	1	26	0.00		2.06			1.79			1.07	

La figure 6 ci-dessous représente les profils en travers en amont et en aval. Ils vérifient les débordements d'eau vers la plaine.

Amont**Aval****Figure 6:** Profils en travers du canal en amont et en aval avant l'aménagement du canal

Ces profils en travers montrent que les plaines sont inondées sur les périodes de retour pour un débit maximal de $400\text{m}^3/\text{s}$. l'aménagement du canal de la rivière Ikopa est important.

**Figure 7:** Profils en long du tronçon avant l'aménagement

Plus la période de retour est élevée, plus le niveau d'eau est haut. On observe que les trois courbes sont proches, mais celle de $T=100$ ans est la plus haute. Cela signifie qu'en cas de crue centennale, le niveau d'eau sera le plus élevée, avec un risque de débordement plus important si le canal n'est pas suffisamment dimensionné.

Amont

Aval

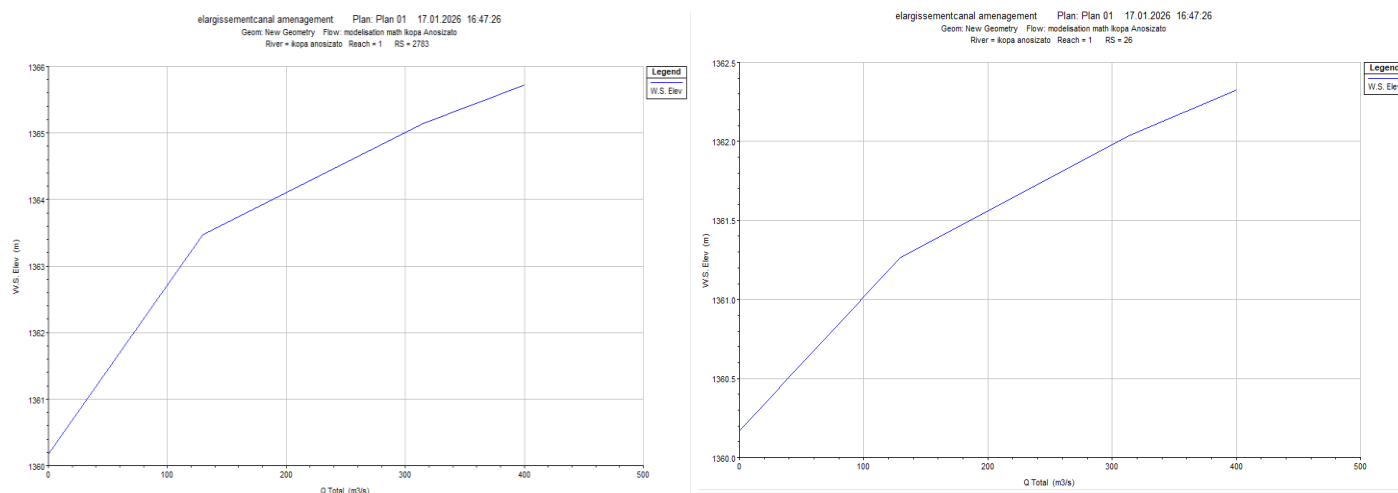


Figure 8: Courbes de tarage obtenu à partir du model HEC-RAS pour la rivière d'Ikopa Anosizato avant l'aménagement

5.1 Résultats après l'aménagement du canal

Les vitesses d'écoulement après l'aménagement sont représentées sur la figure ci-dessous.

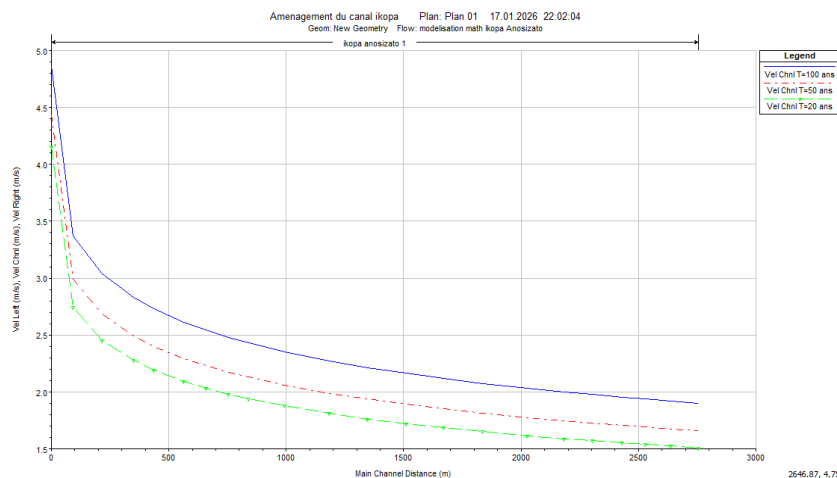


Figure 9: Vitesses d'écoulement après l'aménagement du canal

Nous observons que :

- Une seule des vitesses dans l'axe central est représentée pour $T=20, 50, 100$ ans,
- Les courbes sont très proches les unes des autres et suivent une tendance régulière,
- L'élargissement a permis de répartir uniformément l'écoulement.
- Il y a une réduction drastique du risque d'érosion localisée.

- Le comportement hydraulique est plus prévisible et stable

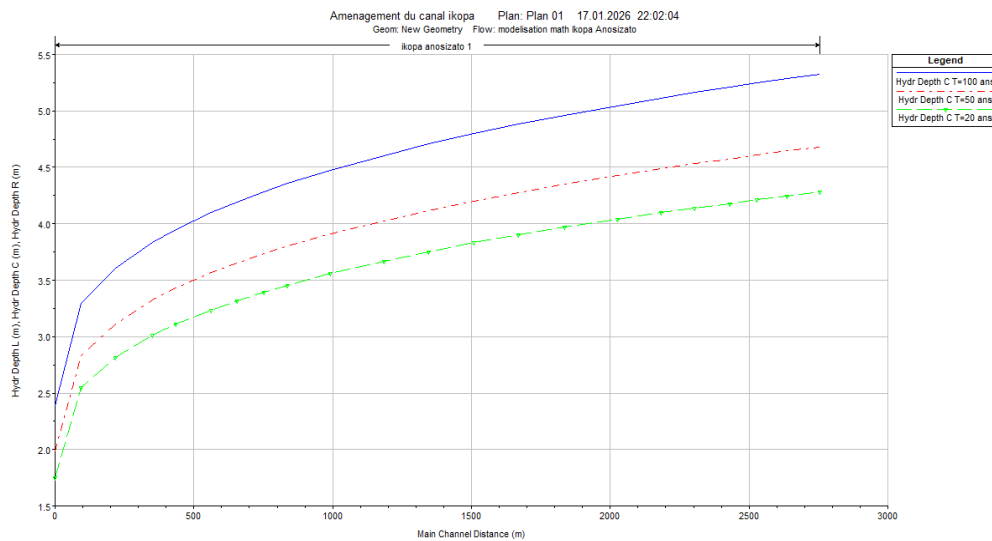
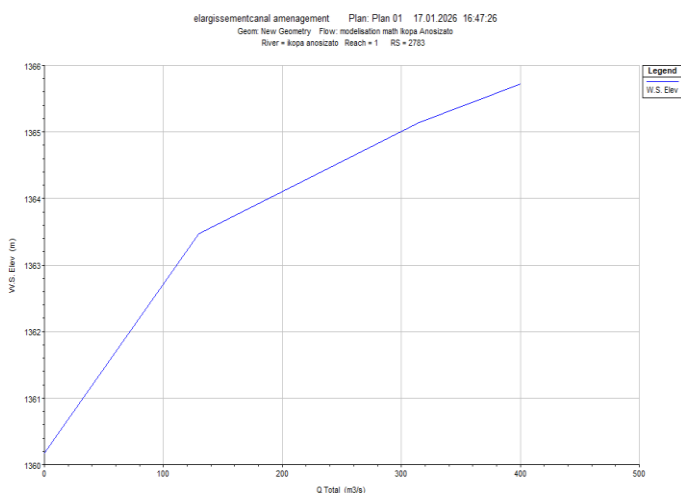


Figure 10: Profondeurs d'eau après l'aménagement du canal.

On constate que :

- L'élargissement du canal a permis de réduire les différences de profondeur entre la rive gauche et la rive droite.
- L'écoulement est désormais plus régulier et prévisible pour les trois périodes de retour.
- La modélisation après l'aménagement semble montrer que le comportement hydraulique est suffisamment uniforme pour ne nécessiter que la courbe centrale (C) pour la conception.
- L'aménagement a probablement réduit les risques locaux d'érosion et d'inondation asymétrique.

Amont avant aménagement



Amont après aménagement

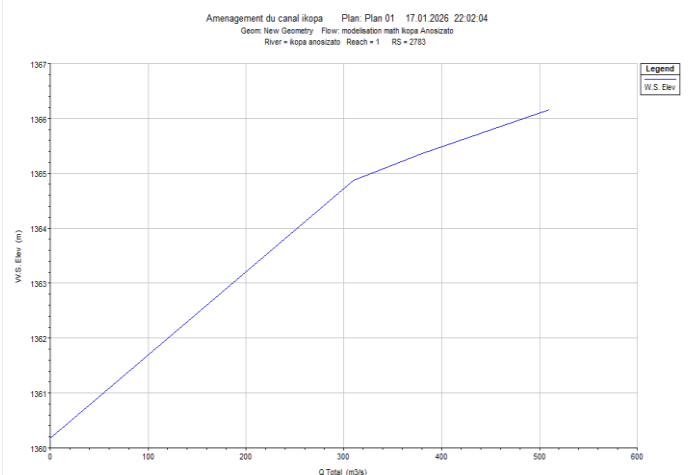
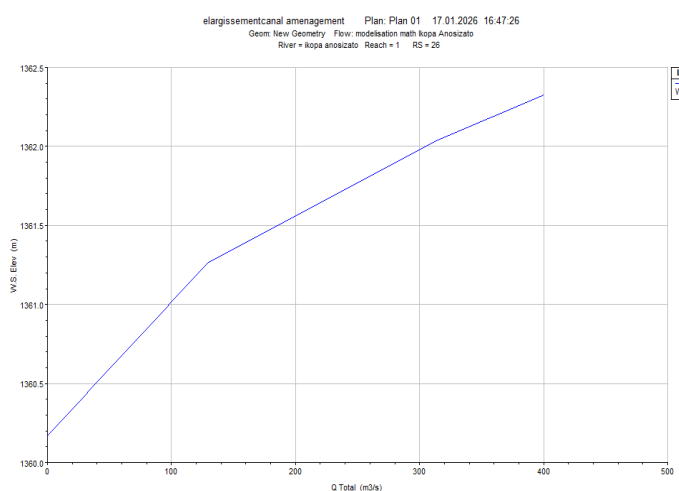


Figure 11: Courbes de tarage en Amont avant et après l'aménagement

L'image 11 représente la comparaison des courbes de tarage en amont avant et après l'aménagement du canal de l'Ikopa de la plaine d'Antananarivo. Nous observons qu'avant l'aménagement les courbes montrent un même débit et la cote de la surface libre est plus haute après l'aménagement.

Cela signifie que l'élargissement a augmenté la capacité d'écoulement, c'est-à-dire à une hauteur d'eau égale, le débit est plus grand, ou à débit égal, la hauteur d'eau est moindre. On conclut qu'il y a une réduction des risques d'inondation pour un débit donné.

Aval avant aménagement



Aval après aménagement

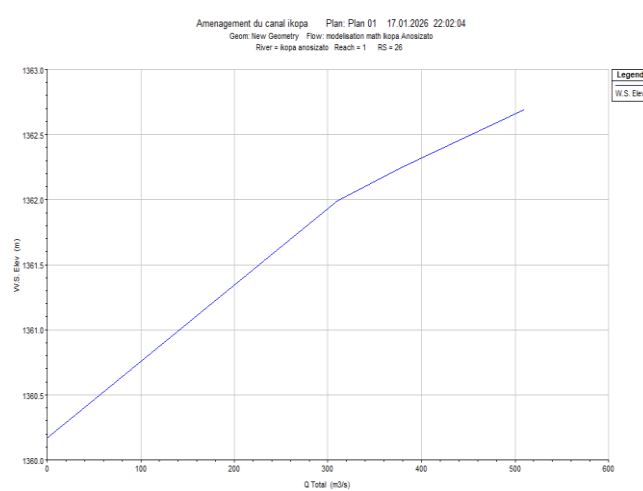


Figure 12: Courbes de tarage en Aval avant et après l'aménagement

On constate qu'il y a eu une réduction de la hauteur d'eau en aval, ce qui signifie que l'écoulement est plus rapide et la pente de la ligne d'eau est modifiée.

Cela peut réduire le risque d'inondation également en aval, mais parfois un élargissement en amont peut transférer plus vite le débit vers l'aval et augmenter le pic de crue en aval si la capacité n'est pas augmentée aussi localement.

6- Propositions de solutions

Les objectifs de cette recherche sont d'analyser et de proposer de solutions durables pour la gestion des inondations dans la plaine ville d'Antananarivo. Voici quelques propositions pour la résolution des inondations à Antananarivo :

- Pour la ville d'Antananarivo

Recalibrages, redimensionnements des réseaux d'assainissement pluvial existant

Vu la situation démographique actuelle en pleine croissance dans la plaine ville d'Antananarivo due à l'exode rural et à l'immigration des gens provenant d'autres régions de Madagascar, les normes et plans d'urbanisme préétablies ne sont plus respectés quant à la question de nouvelle construction.

Ainsi, on utilise le débit centennal pour procéder à l'élargissement et le reprofilage des réseaux hydrauliques dans la plaine ville d'Antananarivo, en tenant compte de la croissance démographique actuelle.

Alors, nous choisissons aussi le type d'assainissement séparatif pour les nouveaux canaux.

Programme d'éducation et de sensibilisation des populations

L'Etat Malagasy devrait élaborer et mettre en œuvre une campagne d'information/sensibilisation et de communication ciblée sur les bonnes pratiques en matière de gestion des déchets et de préservation des ouvrages de drainage.

Ces programmes seront à déployer dans les six provinces de Madagascar car les populations manquent souvent de connaissances et de compétences en gestion de déchets.

Renforcement des sanctions à l'encontre des infractions

L'Etat Malagasy devrait renforcer le contrôle et la surveillance des dépôts sauvages de déchets dans les canaux, de jour comme de nuit.

Une cellule de suivi pourrait être créée pour identifier les contrevenants. En cas d'infraction, des sanctions immédiates seraient appliquées, par exemple une amende de 5000 Ariary par déchet jeté illégalement.

Réactivation de l'engagement des polices des eaux

La réactivation de l'engagement des polices des eaux est essentielle dans les six arrondissements d'Antananarivo pour assurer la gestion des réseaux d'assainissement et le contrôle des dépôts de déchets.

- Pour la plaine d'Antananarivo

Régabaritage du canal de 1,50m sur chaque rive et approfondissement de 1,50m

Actuellement, le canal de l'Ikopa ne peut supporter un débit supérieur à 400 m³/s c'est pourquoi la plaine d'Antananarivo est souvent inondée pendant la saison cyclonique.

Cependant, grâce à ce modèle HEC-RAS et aux données hydraulique dont nous disposons, il est possible d'améliorer la capacité du canal.

Ainsi, après l'aménagement du canal et les traitements des données, le canal pourra supporter un débit de 510 m³/s, sans aucun risque de débordement.

Conclusion

Cette recherche a analysé les causes et les impacts des inondations récurrentes dans la plaine ville d'Antananarivo, en mettant en évidence les facteurs naturels et anthropiques à l'origine des débordements. A travers une approche hydraulique fondée sur la modélisation HEC-RAS et l'utilisation des données hydrologiques récentes, l'étude a permis d'évaluer la capacité actuelle du canal de l'Ikopa et d'identifier ses limites face aux crues importantes.

Les résultats démontrent qu'un élargissement et un reprofilage du canal, accompagnés du recalibrage des réseaux d'assainissement permettraient d'augmenter significativement la capacité d'écoulement de la rivière, réduisant ainsi les risques d'inondation. Ces propositions techniques doivent être complétées par des mesures organisationnelles et de gouvernance telles que la sensibilisation des populations, le renforcement des contrôles et une planification urbaine mieux intégrée.

En définitive, cette recherche plaide pour une gestion durable et globale des inondations, alliant interventions structurelles et actions de prévention, afin de renforcer la résilience de la plaine ville d'Antananarivo et d'assurer son développement dans un contexte climatique incertain.

Références bibliographiques

- [1] Dolchinkov, N. T. (2024). Natural Emergencies and Some Causes of Their Occurrence: a Review. Trends in Ecological and Indoor Environment Engineering, 2(1), 18-27, Revue-IRS, ISSN: 2958-8413, Vol. 3, No. 1, Janvier 2025, Analyse des facteurs responsables de l'apparition des inondations et leurs impacts dans le bassin versant de l'Oued Lahdar (Haut Inaouène, Maroc). <https://doi.org/10.62622/TEIEE.024.2.1.18-27>
- [2] Kichigina, N. V. (2021). Floods in Siberia: Geographical and Statistical Analysis for the Period of Climate Change. Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences, 66(1), 41–60, Revue-IRS, ISSN: 2958-8413, Vol. 3, No. 1, Janvier 2025, Analyse des facteurs responsables de l'apparition des inondations et leurs impacts dans le bassin versant de l'Oued Lahdar (Haut Inaouène, Maroc).
- [3] Azidane, H., Benmohammadi, A., Hakkou, M., Magrane, B., & Haddout, S. (2018). A Geospatial, approach for assessing the impacts of sea-level rise and flooding on the Kenitra coast (Morocco). Journal of Materials and Environmental Science, 9(5), 1480-1488, Revue-IRS, ISSN: 2958-8413, Vol. 3, No. 1, Janvier 2025, Analyse des facteurs responsables de l'apparition des inondations et leurs impacts dans le bassin versant de l'Oued Lahdar (Haut Inaouène, Maroc).
- [4] Lachiver M., Les années de misère. La famine au temps du Grand Roi, Paris, Fayard, 1991, 574 p, René Favier, L'histoire sociale des risques naturels en question. Sources et problématiques nouvelles
- [5] Favier R., « Sociétés urbaines et culture du risque. Les inondations dans la France d'Ancien Régime », in F. Walter, B. Fantini et P. Delvaux (dir.), Les cultures du risque (XVIe-XXIe siècle), Presse d'histoire suisse, Genève, 2006, p. 49-86.
- [6] Quenet G., Les tremblements de terre aux XVIIe et XVIIIe siècles. La naissance d'un risque, Seyssel, Champ Vallon, 2005, 590 p.
- [7] Volet Mission d'Actions de proximité via des ONGs, Programme intègre d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA), « rapport d'évaluation initial du projet », version final, p.3
- [8] Cadre Politique de Réinstallation des Populations (CPRP), Rapport final, octobre 2019, Accord-cadre pour le soutien des activités des services de conseil de la BEI à l'intérieur et à l'extérieur de l'UE des 28, étude préparatoire du projet AEP Antananarivo, TA2017151MGIF3, contrat CC10192, p.2-3

- [9] UPDR, Monographie de la région d'Antananarivo, 2003 ; PRD, Région Analamanga, 2007)
- [10] MAKHLOUF Z., (1994), compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris sud, laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique Orsay. 434p.
- [11] Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>.
- [12] Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic User's Manual. Version 5.0. Carré, C., Deroubaix, J.-F., Deutsch, J.-C., & Haghe, J.-P. (2015). Pratiques et DCE autour de l'Orge. <https://doi.org/10.26047/PIREN.rapp.ann.2009.vol31>.
- [13] MIKE, D. W. (2012). 21-2D Modelling of Coast and Sea. DHI Water & Environment Pty Ltd. : Hørsholm, Denmark.
- [14] DHI. (2003). Mike-11: a modelling system for rivers and channels, reference manual. *DHI–Water Development, Horsholm, Denmark*
- [15] MIKE, D. (2012). 21-2D Modelling of Coast and Sea. *DHI Water Environment Pty Ltd.: Hørsholm, Denmark*.
- [16] Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., Sexton, J., & Davies, G. (2015). ANUGA user manual. *Commonwealth of Australia the Australian National University, 127*.
- [17] Sleight, P., Gaskell, P., Berzins, M., & Wright, N. (1998). An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computers Fluids*, 27(4), 479-508.
- [18] Neal, J. C., Shustikova, I., Domeneghetti, A., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, 64(14), 1769-1782. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>