

Analyses Des Sous-Systèmes D'Inondation Dans La Commune Urbaine d'Antananarivo, Partie Centrale Madagascar

RANAIVOSON Heriniaina Angelo¹, RATRIMO Voahangy², RAZAFIMBELO Marie Rachel³

¹Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution
Domaine Sciences et Technologie, Université d'Antananarivo
Antananarivo, Madagascar

²Docteur HDR de l'Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences
ESPA, Université d'Antananarivo
Antananarivo, Madagascar

³Professeur titulaire de l'Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution
Domaine Sciences et Technologie, Université d'Antananarivo
Antananarivo, Madagascar



Résumé— Les inondations dans la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA) résultent d'interactions complexes entre les précipitations, l'urbanisation croissante, les caractéristiques lithologiques ainsi que les infrastructures d'assainissement. Cette étude vise à analyser ces sous-systèmes. La méthodologie adoptée repose sur une approche multidimensionnelle et intégrée, combinant télédétection, analyses hydrologiques, géotechniques et modélisation hydraulique. L'indice d'imperméabilisation (ENDISI) et l'indice Normalisé de Différence de l'Eau Modifié (MNDWI) ont été utilisés pour quantifier et cartographier respectivement l'expansion des surfaces imperméables et les zones d'accumulation des eaux pluviales à partir des images Sentinel-2 et Landsat en utilisant l'algorithme de machine learning (Digital Earth Africa) sous python. L'étude géotechnique des échantillons obtenus par des sondages répartis dans différentes zones montre que les formations superficielles sont majoritairement argileuses et limoneuses, avec une épaisseur moyenne de 2 à 3 mètres, ce qui limite l'infiltration et accentue le ruissellement. Sur la base de l'indice d'imperméabilisation, le coefficient de ruissellement moyen est estimé à 0,442 ce qui sous-estime les écoulements réels. L'analyse hydraulique révèle des valeurs de ruissellement de 0,5 à 0,7 en raison de la saturation du réseau d'assainissement et de l'accumulation de déchets et de sédiments dans les collecteurs (canaux d'évacuation, bassin de rétention...); pourtant la capacité théorique des infrastructures principales devrait être suffisante pour évacuer les eaux pluviales modérées (30 m³/s pour le canal Andriantany, 20 m³/s pour le canal C3, et 15 m³/s pour le canal GR). Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une approche systémique intégrée pour comprendre et modéliser les interactions entre ces sous-systèmes.

Mots clés— inondation urbaine; ruissellement; réseau d'assainissement; urbanisation; lithologie; précipitations; système

Abstract— Flooding in the Urban Municipality of Antananarivo (CUA) results from complex interactions between precipitation, rapid urbanization, lithological characteristics, and drainage infrastructure. This study aims to analyze these sub-systems. The adopted methodology follows a multi-dimensional and integrated approach, combining remote sensing, hydrological analysis, geotechnical assessments, and hydraulic modeling. The Enhanced Normalized Difference Impervious Surface Index (ENDISI) and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) were used to quantify and map impervious surface expansion and stormwater accumulation areas, respectively, using Sentinel-2 and Landsat imagery processed with machine learning algorithms (Digital Earth Africa) under python. The geotechnical study of samples obtained from surveys distributed in different zones shows that the surface formations are mostly clayey and silty, with an average thickness of 2 to 3 meters, which limits infiltration and accentuates runoff. Based on the imperviousness index, the average runoff coefficient is estimated at 0.442, which underestimates the real flows. The hydraulic analysis reveals runoff values of 0.5 to 0.7 due to the saturation of the sewerage network and the accumulation of waste and sediments in the collectors (drainage channels, retention basin...); however, the theoretical capacity of the main infrastructure should be sufficient to evacuate moderate rainfall (30 m³/s for the Andriantany canal, 20 m³/s for the C3 canal, and 15 m³/s for the GR canal). These results highlight the need for an integrated systemic approach to understand and model the interactions between these sub-systems.

Africa) in Python. The geotechnical study of soil samples from boreholes distributed across different zones revealed that superficial formations are predominantly clayey and silty, with an average thickness of 2 to 3 meters, limiting infiltration and increasing surface runoff. Based on the imperviousness index, the average runoff coefficient was estimated at 0.442, which underestimates actual flow rates. Hydraulic analysis revealed runoff values between 0.5 and 0.7, mainly due to drainage network saturation and sediment accumulation in collectors (evacuation channels, retention basins, etc.). Despite this, theoretical drainage capacities of major infrastructures should be sufficient to handle moderate rainfall events (30 m³/s for the Andriantany Canal, 20 m³/s for the C3 Canal, and 15 m³/s for the GR Canal).

Keywords— urban flooding; runoff; drainage network; urbanization; lithology; precipitation; system.

I. INTRODUCTION

Les inondations représentent l'un des risques naturels les plus fréquents et dévastateurs au niveau mondial, touchant de nombreuses zones et causant des pertes humaines, économiques et environnementales considérables [1]. Les précipitations ne sont pas seules en cause, c'est une problématique de changements globaux [2]. En milieu urbain, Les phénomènes d'inondation se sont intensifiés au cours des dernières décennies sous l'effet de l'urbanisation croissante et des modifications de l'usage des sols [3]. La commune urbaine d'Antananarivo, capitale de Madagascar, constitue un cas emblématique de ces dynamiques complexes.

Antananarivo est une ville historiquement exposée aux inondations. Trois types d'inondations y sont recensés : l'inondation par débordement des rivières, l'inondation par ruissellement et l'inondation par remontée de la nappe [4]. Malgré les efforts des autorités locales pour améliorer et entretenir les infrastructures, ce risque demeure insuffisamment maîtrisé, laissant la ville vulnérable aux aléas hydrologiques. Il est donc essentiel d'explorer de nouvelles approches permettant de mieux comprendre la dynamique de ces inondations et d'optimiser leur gestion.

Cette étude se concentre sur les facteurs qui influencent et accentuent ces types d'inondations. Ces phénomènes ne se limitent pas à une simple interaction entre précipitations et écoulements de surface ; ils s'inscrivent dans un cadre plus large de dynamique urbaine et environnementale. En effet, les inondations urbaines résultent d'un système complexe d'interactions non linéaires entre plusieurs sous-systèmes, notamment les caractéristiques du milieu naturel, les infrastructures urbaines, les politiques de gestion et les comportements humains [5].

Adopter une approche systémique et multidimensionnelle est donc cruciale pour mieux comprendre ces phénomènes et proposer des solutions adaptées et durables à leur gestion [6]. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'évolution spatiale et temporelle de l'étendue d'eau dans la zone d'étude et d'analyser les différents sous-systèmes qui influencent la dynamique des inondations. Les résultats obtenus serviront de base pour la modélisation du système complexe des inondations urbaines et contribueront à l'élaboration d'outils d'aide à la décision pour une gestion plus efficace des risques hydrologiques.

II. MATERIELS ET METHODOLOGIES

A. Matériels utilisés

1) Zone d'étude

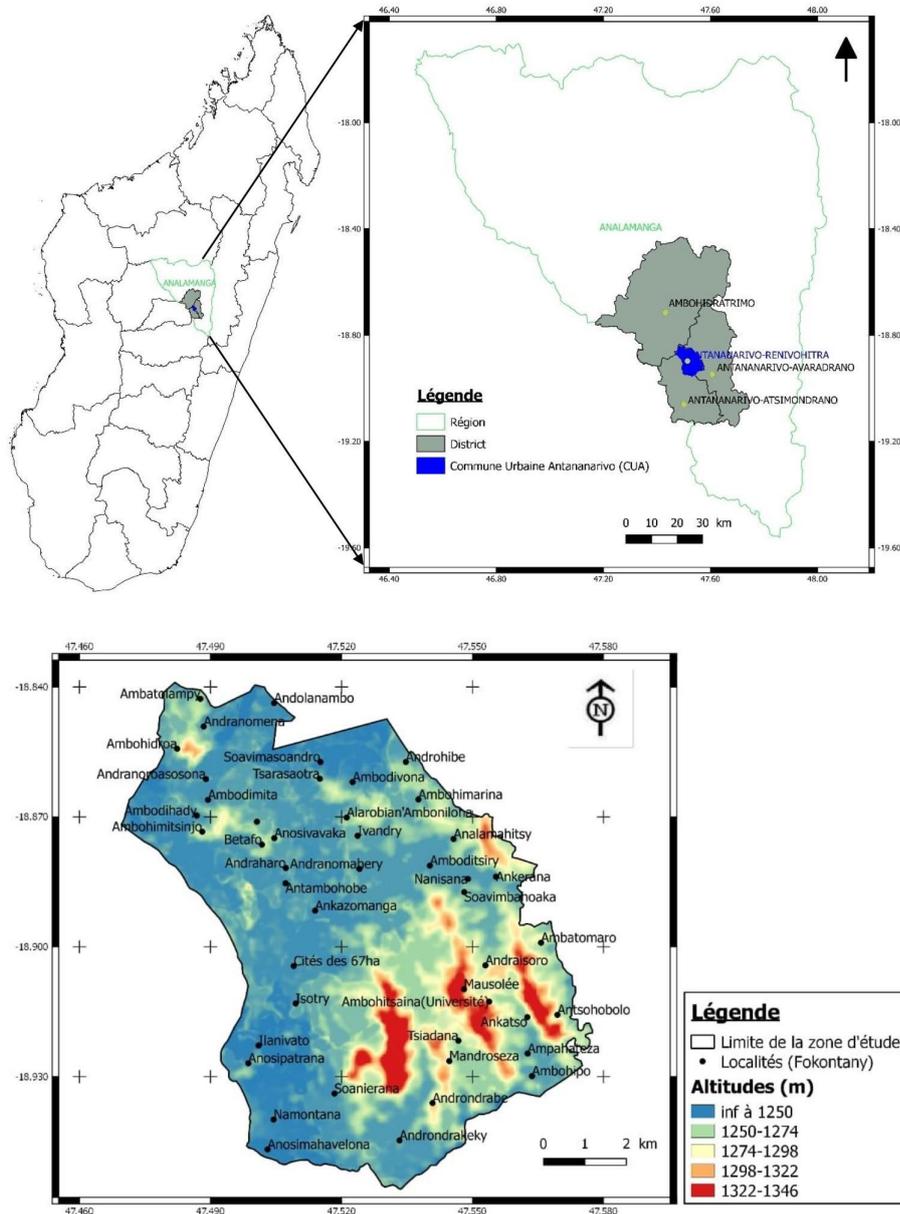


Fig. 1. Carte de localisation et altimétrique de la zone d'étude (Source : Image SRTM, BD 500 FTM ; SCR WGS 84)

La zone d'étude est la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA). Administrativement, dans le district Antananarivo, région Analamanga et province d'Antananarivo (Fig.1). C'est la capitale économique et politique de Madagascar.

2) Données thématiques

Plusieurs données spécifiques, relatives au thème, ont été utilisées pour la fiabilité de ce travail. Ce sont:

- ✚ des données de rapports techniques déjà existantes:
 - Plan d'Urbanisme Directeur de l'Agglomération d'Antananarivo [7]. Ce document offre une cartographie précise des zones urbanisées et des infrastructures existantes ou planifiées.
 - Mission de maîtrise d'œuvre pour le Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo ou PIAA [8]. Ce document fournit des données techniques sur les infrastructures d'assainissement et ses limites faces aux précipitations intenses.
 - Données de précipitations journalières et débits de la station hydrométrique d'Ambohimanambola qui couvrent la période 2001-2024 (collectées auprès de la Direction Générale de la Météorologie et de l'AIPA ou Autorité pour la Protection contre l'Inondation de la Plaine d'Antananarivo).
- ✚ des données des images satellites
 - images satellites de réflectance de surface Sentinel-2 de décembre 2016 à janvier 2025,
 - images satellites de landsat 5 à 9 de 1984 à 2023.
- ✚ des données collectées directement sur terrain
 - échantillons de sol issus des sondages mécaniques,
 - observations in situ, constatations et enquêtes auprès des résidents sur les facteurs et les impacts de l'inondation à l'échelle locale.

B. Méthodologies adoptées

Les méthodologies générales consistent à déterminer, tout d'abord, les caractéristiques des inondations dans la zone d'étude, puis analyser les sous-systèmes qui influencent ces inondations.

1) Caractérisation de l'inondation à partir de l'indice MNDWI

Pour détecter les surfaces d'eau, des traitements des images satellites (de 1984 à 2023 avec landsat et décembre 2016 à janvier 2025 avec sentinel-2) ont été effectués avec le langage de programmation python, sous la plateforme Digital Earth Africa ou DEA (Fig.2). Les bibliothèques mobilisées durant les analyses [9] sont *datacube* pour le chargement et la manipulation des données satellites multidimensionnelles, *numpy* pour les calculs numériques et les opérations matricielles, *xarray* pour le traitement des ensembles de données multidimensionnelles, et *geopandas* pour la gestion des données géospatiales vectorielles. La visualisation des résultats (graphes, cartes) a été assurée avec *matplotlib* [10]. Les analyses sont basées sur le calcul de l'indice MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) (1). Il est défini par la formule suivante:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR_1}{Green + SWIR_1} \quad (1)$$

où la bande *Green* (560 nm) maximise la réflectance de l'eau, et la bande *SWIR_1* (*Shortwave Infrared 1* ; 1610 nm) minimise celle des surfaces non aquatiques [11].

Un échantillonnage annuel et saisonnier médian a été utilisé pour la représentation temporelle. Pour une représentation spatiale, la classification binaire sur les valeurs de l'indice MNDWI est appliquée. Un seuil de classification 0 est utilisé, les valeurs positives correspondent à la présence d'eau [12]. L'eau permanente et l'eau temporaire sont classées, respectivement, par des seuils de fréquence de 90 % et de 10 % [13].

Ces traitements permettent une visualisation claire des tendances et des anomalies dans la dynamique des eaux dans la zone d'étude.

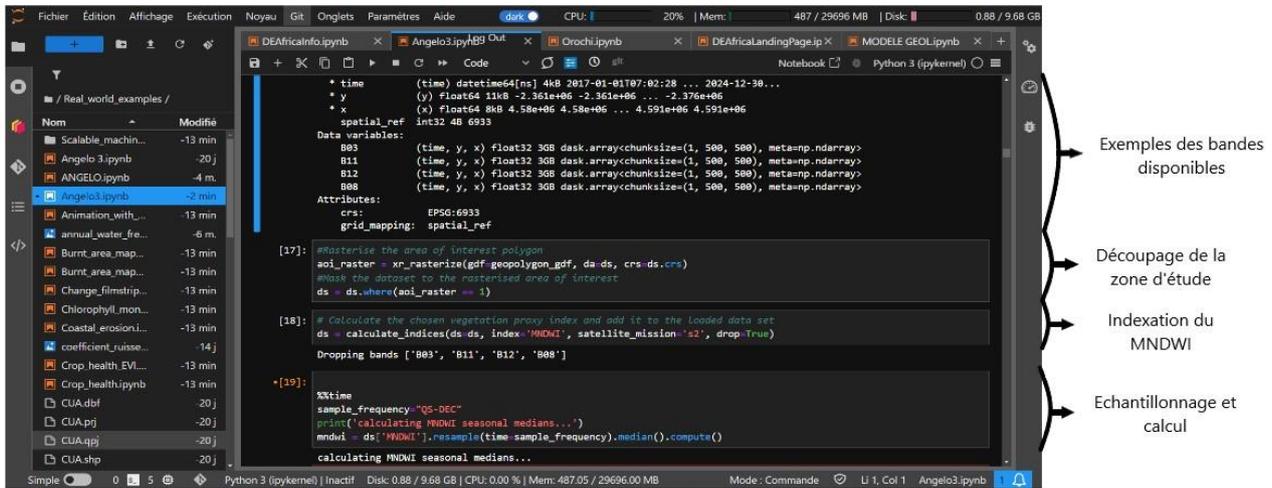


Fig. 2 Exemples des codes exécutés pour le choix des bandes spectrales à utiliser, l'échantillonnage et le calcul de MNDWI dans DEA

2) Analyses des sous-systèmes

Les sous-systèmes dont les interactions multi-échelles et multidimensionnelles à modéliser sont l'urbanisation, la lithologie, les réseaux d'assainissement et l'hydrométéorologie. Il est nécessaire de limiter le nombre des sous-systèmes afin de pouvoir les contrôler [14].

a) Urbanisation

L'objectif principal est d'analyser les zones urbanisées à partir des traitements des images satellites Sentinel-2. L'indice exploité est l'indice ENDISI (Enhanced Normalized Difference Impervious Surface Index) (2). Il est très efficace pour identifier les zones imperméables, même dans des environnements complexes [15]. Cet indice varie entre -1 et 1, où les valeurs positives indiquent une surface fortement imperméabilisée. L'ENDISI est calculé à partir des bandes spectrales SWIR 1, SWIR 2 (*Shortwave Infrared 2* ; 2190 nm), *Blue* (490 nm), *Green*, *Red* (665 nm) et NIR (*Near Infrared* ; 832,8 nm). Il inclut le MNDWI et le paramètre alpha. Ces données sont aussi téléchargées et traitées avec python dans la plateforme Digital Earth Africa (Fig.3). Cette méthode permet d'évaluer l'impact de l'imperméabilisation des surfaces, l'évolution de l'urbanisation, la structure urbaine et ses implications sur le ruissellement et la remontée de nappe.

$$\begin{aligned}
 \text{swir diff} &= \frac{\text{SWIR 1}}{\text{SWIR 2}} & \alpha &= \frac{2 * \text{mean (BLUE)}}{\text{mean (swir diff) + mean (MNDWI}^2)} \\
 \text{ENDISI} &= \frac{\text{BLUE} + \alpha * (\text{swir diff} + \text{MNDWI}^2)}{\text{BLUE} - \alpha * (\text{swir diff} + \text{MNDWI}^2)} & (2)
 \end{aligned}$$

```
dc = datacube.Datacube(app='Urbanisation')
zone_etude = gpd.read_file("CUA.shp")
zone_etude_geom = zone_etude.geometry[0]
query = {
    'time': (f'{2017}', f'{2024}'),
    'x': lon_range,
    'y': lat_range,
    'resolution': (-20, 20),
    'measurements': ['swir_1', 'swir_2', 'blue', 'green', 'red'],
    'group_by': 'solar_day',
    geomedians = dc.load(product='gm_s2_annual',
        output_crs='EPSG:4326',
        dask_chunks={'time': 1, 'x': 750, 'y': 750},
        **query
    )
    geomedians=geomedians.groupby('time.year').mean()
    geomedians = geomedians.sel(year=[2017, 2024])
    geomedians = calculate_indices(geomedians, index='ENDISI', satellite_mission='s2')
```

Indexation des bases de données de DEA

Indexation de l'échelle spatiale et temporelle, des bandes à utiliser et du système de coordonnées de référence

Echantillonnage et calcul de l'ENDISI

Fig. 3. Exemples des codes exécutés pour le choix des bandes spectrales à utiliser, l'échantillonnage et le calcul d'ENDISI dans DEA

b) Lithologie

Les analyses sont effectuées à partir de 20 échantillons de sondages mécaniques non destructifs. Les points de sondage ont été sélectionnés dans des environnements non remaniés, notamment des sites industriels désaffectés, des terrains municipaux non développés, des zones de construction vierges, des parcs urbains, et les marges des cours d'eau. Ces emplacements minimisent les biais liés aux activités anthropiques. Ces sondages ont des profondeurs de 16 à 35 m où le socle cristallin est atteint. Les données collectées in situ comprennent la coupe du sol, la compacité et résistance du sol (par des essais SPT ou *Standard Penetration Test* et du pénétromètre dynamique) et le niveau piézométrique (par l'installation de piézomètre). Les données après essais en laboratoire comprennent le pourcentage des fractions fines, les limites d'Atterberg et la teneur en matière organique.

Les objectifs consistent à déterminer les propriétés géotechniques et géologiques de la zone d'étude qui influencent les inondations. Ce sont la perméabilité des sols, l'épaisseur des couches, la teneur en argile, la capacité d'infiltration, la saturation en eaux et le niveau piézométrique.

c) Hydrométéorologie

Pour l'étude des débits, les analyses sont effectuées par des études statistiques des valeurs extrêmes en appliquant la loi de Gumbel, ou loi du maximum [16] sur les données de débits journalières couvrant la période 2001-2024 mesurés à la station hydrométrique d'Ambohimanambola. Cette loi est donnée par la formule suivante :

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{(x - \mu)}{\beta} \right] \right\} \quad (3)$$

où μ représente le paramètre de position et β le paramètre d'échelle à déterminer.

Pour faciliter cette estimation, une transformation logarithmique double (linéarisation) est utilisée (4), permettant d'ajuster une droite par régression linéaire aux données transformées.

$$F(x) = \exp(-\exp(-U)) \quad (4) \quad \text{avec} \quad U = \frac{(x - \mu)}{\beta} \quad (5)$$

L'estimation des paramètres est réalisée à l'aide de la méthode des moments. La probabilité de non dépassement $F(x_i)$ pour chaque valeur x_i est estimée en se basant sur la fréquence empirique des débits maximum. Le temps de retour T d'une catastrophe est l'inverse de répétition d'apparition de cette catastrophe de nouveau.

Pour l'étude des précipitations, les analyses sont effectuées en exploitant les données de la mission de maîtrise d'œuvre pour le programme intégré d'assainissement d'Antananarivo réalisée par l'Agence d'Exécution des Travaux d'intérêt Public et d'Aménagement AGETIPA. L'exploitation de ces données qui sont la distribution spatiale des précipitations, l'analyse statistique des précipitations et la construction des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) vise à déterminer les points clés de ce sous-système. Ce sont les variables : Intensité (mm/h), durée (h), fréquence des événements extrêmes (annuels) et les indicateurs de performance : Indice de variabilité climatique, volume total des précipitations (m³), intensité maximale enregistrée (mm/h).

d) Réseaux d'assainissement

La méthodologie d'analyse de ce sous-système suit les étapes suivantes :

- intégration des données relatives aux infrastructures d'assainissement dans le SIG permettant la cartographie et la caractérisation statique des réseaux, associées à leurs caractéristiques techniques,
- identification des zones critiques en superposant les zones sujettes à des blocages aux plans des réseaux existants,
- comparaison de la capacité théorique des collecteurs avec les besoins actuels en évacuation d'eau.

Les résultats obtenus sont complétés et validés par les observations et les données collectées directement sur le terrain (2022 à 2025). Ce sont des données des inventaires et de visites de sites, incluant l'identification des zones potentiellement sujettes à des blocages ou à des débordements en raison d'obstructions ou d'une surcharge des collecteurs.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Zones inondables de la Commune Urbaine d'Antananarivo

L'analyse des images satellitaires Sentinel-2 de décembre 2016 à janvier 2025, par l'extraction de l'indice MNDWI et la classification binaire, a permis d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des inondations dans la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA).

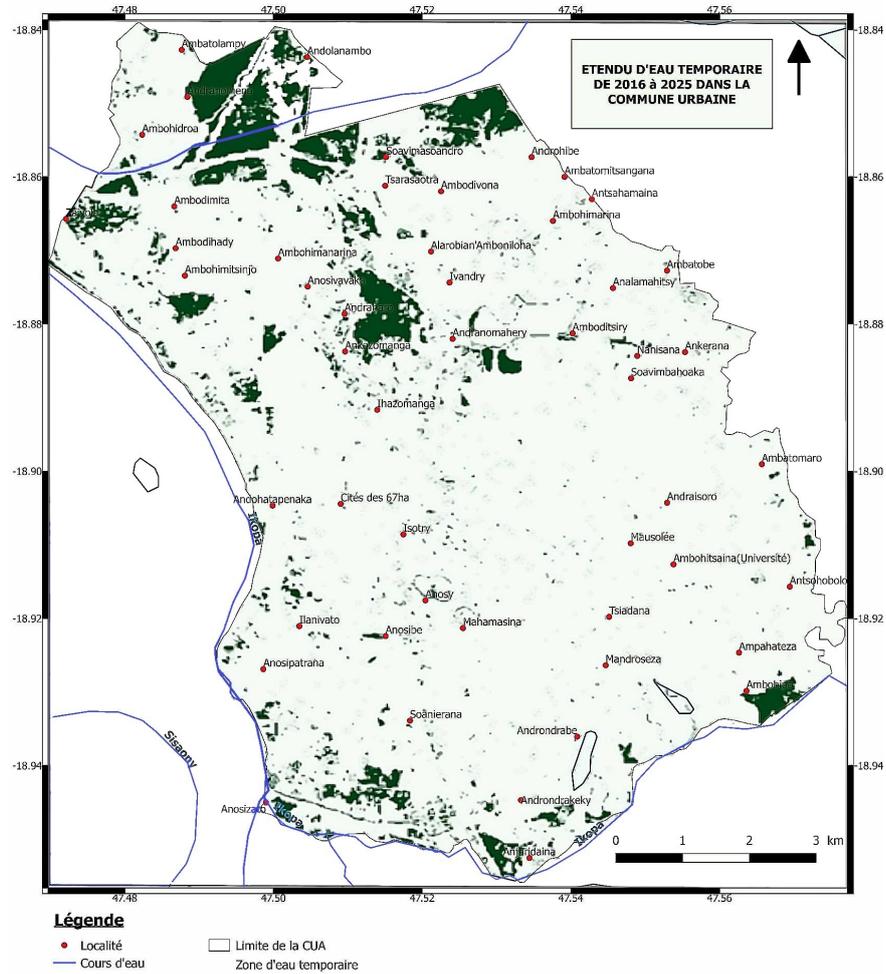


Fig. 4. Carte d'étendue d'eau temporaire dans la zone d'étude de 2016 à 2025 (Source: Image sentinel-2, BD 500 FTM ; SCR WGS 84)

une analyse plus fine (saisonnière) entre 2016 et 2025, ces courbes de tendances sont presque horizontales (Fig.7). Elles signifient que l'évolution de l'étendue d'eau temporaire ne présente pas de changement significatif et que la CUA fait face toujours à ce danger.

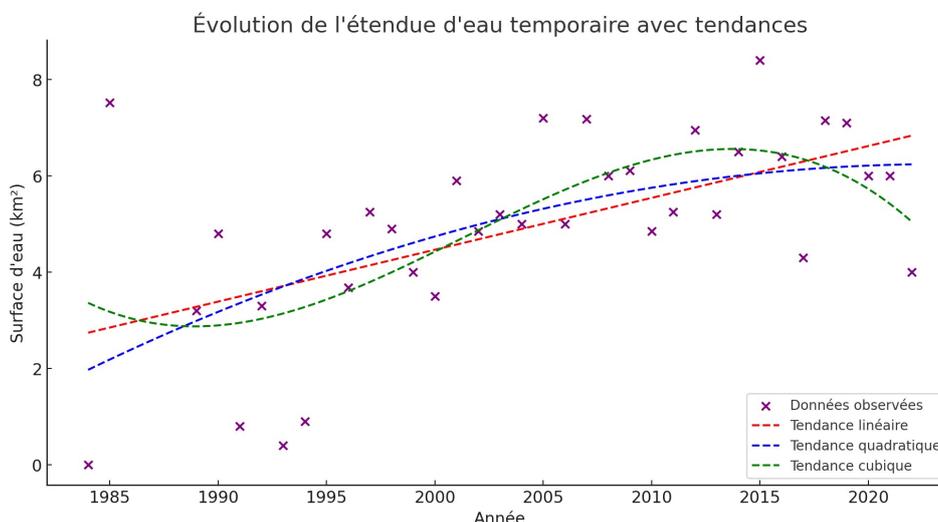


Fig. 6. Graphe montrant l'évolution et les tendances de l'étendue d'eau temporaire de 1984 à 2023

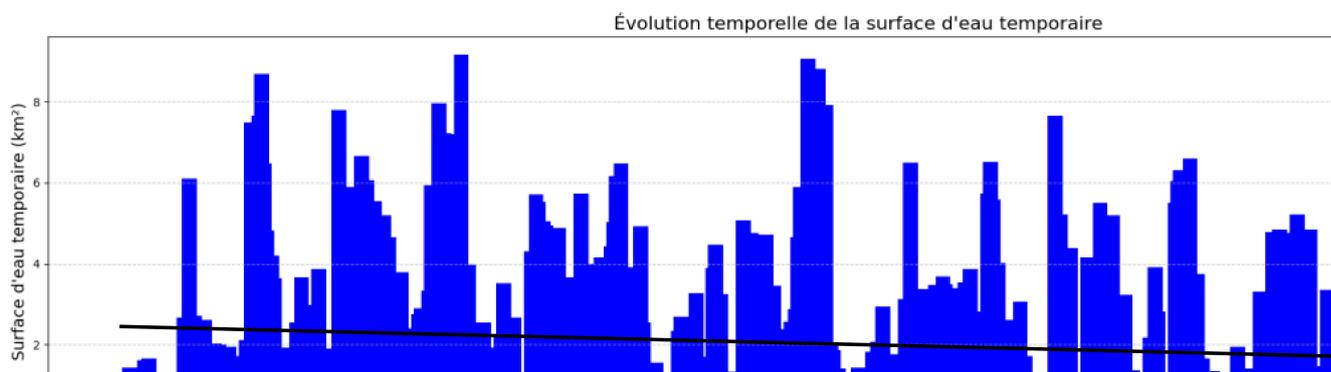


Fig. 7. Graphe montrant l'évolution de l'étendue d'eau temporaire de décembre 2016 à janvier 2025

La distribution annuelle de l'étendue d'eau temporaire à travers un diagramme en boîte (Fig.8) permettant d'évaluer la variabilité intersaisonnière des inondations. La variation des médianes suggère sa complexité, présence d'inondation même lors des pluies modérées. L'identification des valeurs aberrantes permet d'associer certaines inondations majeures à des événements climatiques exceptionnels, tels que des cyclones ou des précipitations extrêmes.

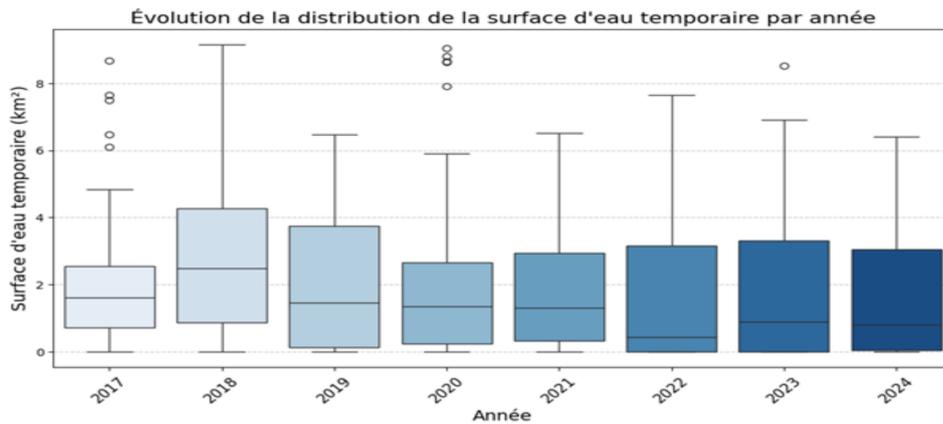


Fig. 8. Diagramme en boîte montrant l'évolution de la distribution de l'étendue d'eau temporaire par année

Ces observations mettent en évidence la nécessité d'une approche intégrée pour la gestion des inondations dans la CUA.

B. Sous-système Urbanisation

A partir de l'indice ENDISI, l'évolution de l'urbanisation dans la CUA révèle une progression constante des surfaces artificialisées depuis 2017. L'histogramme de cet indice montre une bimodalité, suggérant une nette séparation entre les zones naturelles (-0,6 à -0,3) et les zones artificialisées (0,1 à 0,6) (Fig.9). Le taux d'expansion annuelle de ces surfaces artificialisées est estimé à 2.221 km²/an (2017: 115 046 km², 2018: 117 759 km², 2019: 118 648 km², 2020: 123 940 km² et 2022 : 123 931 km²). Cette croissance rapide est particulièrement visible dans les quartiers périphériques où de nombreuses zones agricoles et espaces naturels ont été convertis en zones industrielles. La densité des infrastructures en béton et des réseaux routiers a également augmenté. L'indice ENDISI a permis de quantifier cette évolution.

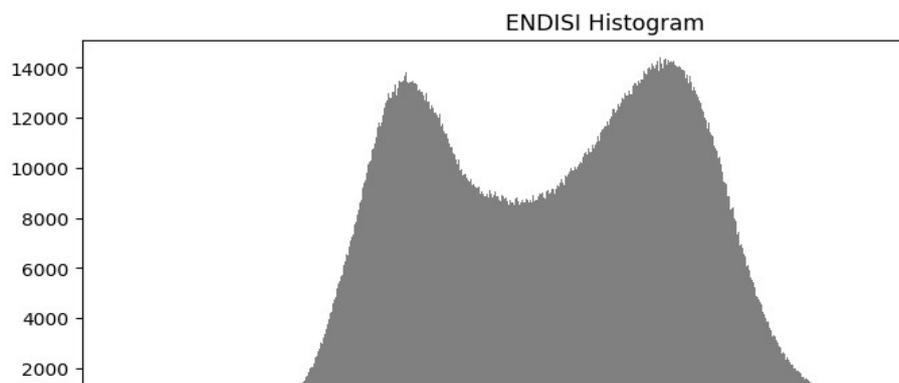


Fig. 9. Histogramme de l'indice ENDISI résultat du traitement des images sentinel-2 (nombre de pixel en fonction de l'indice)

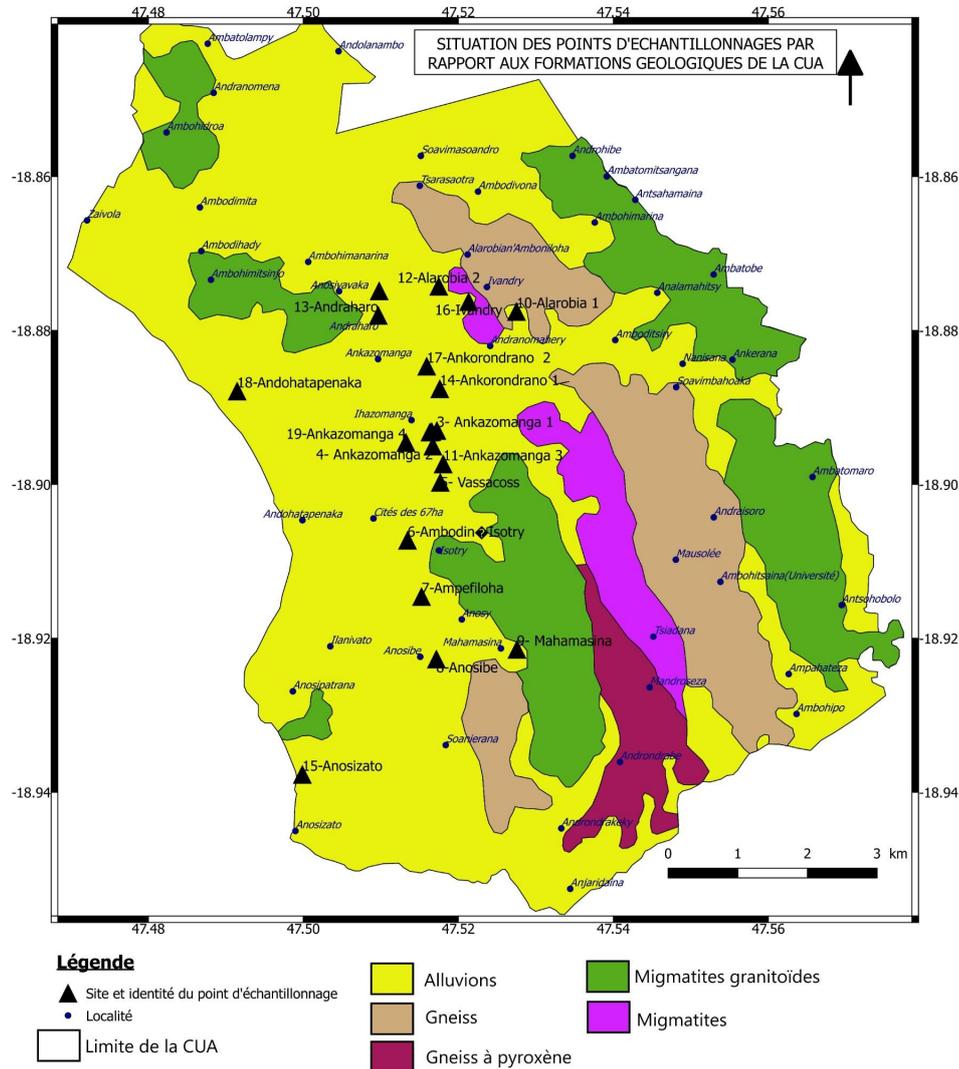


Fig. 11. Carte montrant la situation des points d'échantillonnages par rapport aux formations géologiques de la zone d'étude (Source : Système d'information géologique et minière à 1/500 000, BD 500 FTM, données de terrain ; SCR WGS 84)

TABLEAU I. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FORMATIONS ECHANTILLONNEES

Formation Lithologique	Épaisseur Moyenne (m)	Perméabilité estimée [17]
Sable limoneux	2,5 - 6,0	Moyenne à élevée
Argile	3,0 - 7,5	Très faible
Argile sableuse	2,5 - 5,5	faible
Sable argileux	3,0 - 8,0	moyenne
Socle cristallin	-	Imperméable

L'étude des coupes lithologiques montre que les formations superficielles sont majoritairement argileuses et limoneuses, avec une épaisseur moyenne de 2 à 3 mètres. Ces couches superficielles, à faible perméabilité, limitent l'infiltration des eaux pluviales et favorisent le ruissellement de surface. Les zones où de forte teneur en argile qui accentue la saturation rapide sont (Fig.12) :

- Boulevard de l'Europe : comporte plusieurs couches d'argile pure et d'argile sableuse, notamment entre 1,5 m et 16 m ;
- Mahamasina : prédominance d'argile et d'argile sableuse sur une large plage de profondeur (entre 0,6 m et 22,5 m) ;
- Ankazomanga : plusieurs horizons argileux et argilo-sableux sont enregistrés, notamment entre 2,6 m et 16 m.
- Ankorondrano : plusieurs niveaux riches en argile, en alternance avec des couches de sable argileux et sable limoneux.

Les coupes de Boulevard de l'Europe, Mahamasina et Ankazomanga présentent des épaisseurs d'argile importantes, avec une fraction fine estimée entre 40% et 60% selon la classification des sols [18].

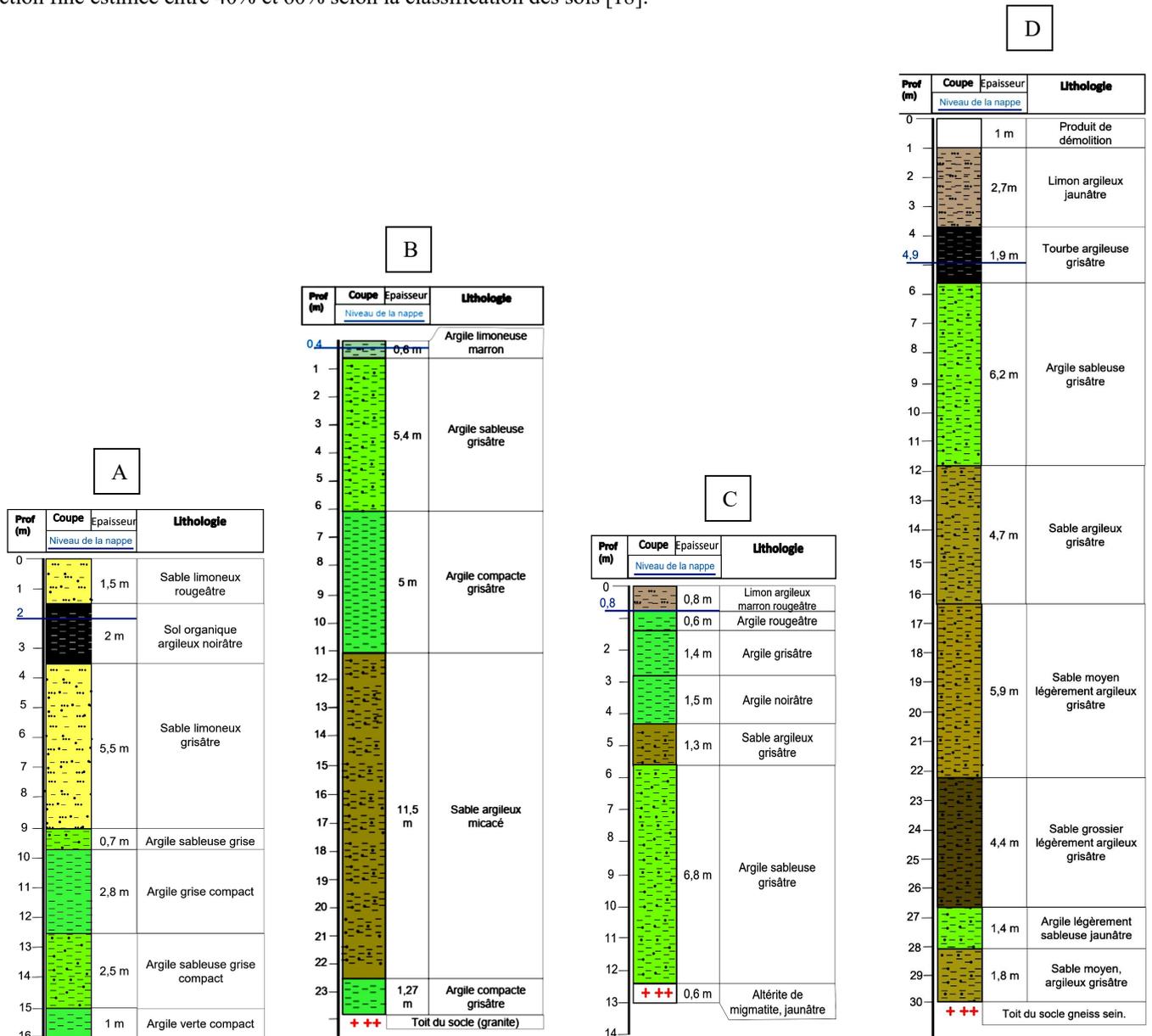


Fig. 12. Coupes lithologiques représentatives de 20 échantillons collectés sur terrain, A: Boulevard de l'Europe, B: Mahamasina, C: Ankazomanga, D: Ankorondrano.

A partir de ces coupes lithologiques, le niveau moyen des nappes phréatiques est de 1,97 m (TABLEAU II). En tenant compte que le forage a été effectué en période d'étiage (mois de mai à septembre) c'est-à-dire avec une faible recharge, les niveaux des nappes d'eau sont très superficiels. Ces profondeurs constituent des zones non-saturées (ZNS). Pour la majorité des stations d'échantillonnages, ces ZNS sont très minces. Ces caractéristiques peuvent induire les faits suivants :

- à la suite des pluies fortes, une recharge exceptionnelle survient, le niveau de la nappe peut atteindre la surface du sol. C'est l'inondation par remontée de nappe,
- apparition d'une croûte de battance qui est un colmatage d'une fine pellicule superficielle, diminuant ainsi très fortement l'infiltrabilité,
- dans les bas fond, il peut aussi arriver que le sol soit saturé jusqu'à la surface : la surface de la nappe phréatique affleure. La pluie ne peut plus s'infiltrer et alimente directement le ruissellement.

L'étude de la perméabilité réalisée sur les échantillons non perturbés des 08 sites d'échantillonnages permet de quantifier la capacité d'infiltration des différentes formations rencontrées (TABLEAU III). Les valeurs du coefficient varient de $8,927 \times 10^{-7}$ cm/s (faible perméabilité) à $8,012 \times 10^{-6}$ cm/s (perméabilité plus élevée). Cette variabilité est fortement influencée par la composition granulométrique des sols et la présence de matières organiques et la profondeur. Entre les sites, la perméabilité est relativement élevée à Ampefiloha, Ankazomanga et Vassacoss tandis qu'elle est très faible à Anosibe et Ambodin'Isotry.

Ces résultats confirment les tendances observées dans les coupes lithologiques, où les formations superficielles sableuses et limoneuses ont une meilleure infiltration que les couches profondes argileuses.

TABLEAU II. NIVEAU DE LA NAPPE MESURE DURANT L'ECHANTILLONNAGE PAR SONDRAGE

Sites	Niveaux de la nappe phréatique (m)
1- Boulevard de l'Europe	2
2-Ankorondrano	2,5
3- Ankazomanga 1	3,5
4- Ankazomanga 2	2
5- Vassacoss	3
6-Ambodin'Isotry	1,5
7-Ampefiloha	1
8-Anosibe	0,6
9-Mahamasina	0,4
10-Alarobia 1	0,9
11-Ankazomanga 2	0,8
12-Alarobia 3	1,7
13-Andraharo	1,7
14-Ankorondrano 1	1,2
15-Anosizato	1,5
16-Ivandry	6,2
17-Ankorondrano 2	4,9
18-Andohatapenaka	1,5
19-Ankazomanga 4	1,05
20-Alarobia 3	1,5

TABLEAU III. PERMEABILITES DES ECHANTILLONS NON PERTURBES DE 08 SITES D'ECHANTILLONNAGES

Sites	Profondeur de l'échantillon non perturbé (m)	Lithologie	Perméabilité K (cm/s)
1- Boulevard de l'Europe	6,00 à 7,00	Sable limoneux grisâtre à grain fin à moyen	5,548.10 ⁻⁶
	7,50 à 8,50		
2-Ankorondrano	4,00 à 5,00	sableuse noir riche en matière organique	4,253.10 ⁻⁶
3- Ankazomanga 1	4,00 à 4,30	Sable argileux grisâtre	7,321.10 ⁻⁶
4- Ankazomanga 2	4,00 à 5,00	Sable argileux grisâtre	8,927.10 ⁻⁷
	7,00 à 8,00		
5- Vassacoss	8,00 à 9,00	Limon à grain gris fin à moyen	7,527.10 ⁻⁶
	11,00 à 12,00	Argile sableuse multicolore à muscovite	6,410.10 ⁻⁶
6-Ambodin'Isotry	8,00 à 9,00	Sable limoneux grisâtre	7,232.10 ⁻⁶
	11,00 à 12,00	Sable argileux gris à grain moyen à grossier	1,335.10 ⁻⁶
7-Ampefiloha	5,00 à 5,30	Sable argileux gris à grain fin à grossier	8,012.10 ⁻⁶
8-Anosibe	4,00 à 5,00	Sol organique argileux noir	1,263.10 ⁻⁶
	7,00 à 8,00	Sable limoneux grisâtre	5,431.10 ⁻⁶

D. Sous-système hydrométéorologie

1) Débits à la station hydrométrique d'Ambohimanambola

Les analyses de débits de la station hydrométrique d'Ambomanambola donnent les résultats ci-dessous. Ces résultats sont issus de la détermination de série de débits maximaux ou Q_{pmax} (m³/s) annuels déjà existants, la fréquence empirique, la variable réduite de Gumbel et les taux de débits estimés. Ces analyses des crues maximales constituent un enjeu majeur pour la prévention des risques hydrologiques.

$$\text{Moyenne} = 54,74457734$$

$$\text{Ecart-type} = 15,29584886$$

$$b = 11,93217353$$

$$a = 24,71131947$$

$$\gamma = 0,5772$$

Période de retour T(ans)	100	50	20
probabilité de non dépassement de Q_p	0,99	0,98	0,95
Variable réduite de Gumbel	4,60	3,90	2,97
Q_p pour période de retour T (m ³ /s)	79,60	71,27	60,15

A partir de la relation entre les débits maximaux Q_{pmax} et de la variable réduite de Gumbel u , le diagramme de Gumbel est donné ci-dessous.

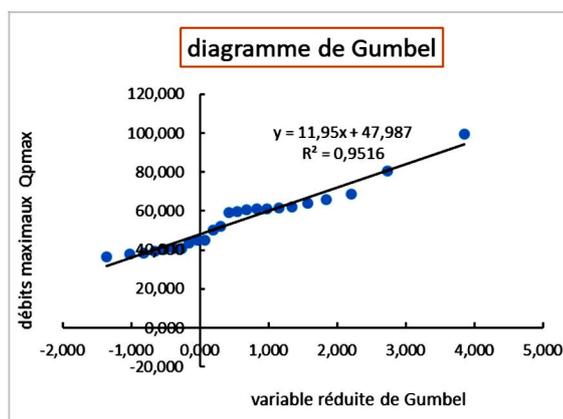


Fig. 13. Graphe du diagramme de Gumbel calculé à partir des débits de 2001 à 2024 mesurés à la station Ambohimanambola

Le diagramme de Gumbel obtenu montre une relation linéaire entre la variable réduite et le débit maximal, exprimée par l'équation $Q_{pmax} = 11,95x + 47,987$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9516$ (Fig.13). Cette forte corrélation indique une bonne adéquation des données observées à la loi de Gumbel, validant son utilisation pour la prévision des crues extrêmes.

Les résultats montrent une variabilité importante des crues maximales, avec des valeurs allant de 36,367 m³/s en 2016 à 99,413 m³/s en 2007. Cette dispersion traduit la réponse du bassin versant aux conditions hydrométéorologiques extrêmes et souligne la nécessité d'une estimation fiable des crues futures pour prévenir les inondations. La distribution ajustée permet ainsi de déterminer les débits correspondant à différentes périodes de retour avec la variable réduite et le débit estimé correspondants. L'estimation de ces débits de crue constitue une information essentielle pour la gestion des infrastructures hydrauliques et la planification de mesures d'atténuation des inondations.

2) Précipitation

La majeure partie des précipitations se concentrent au cours des mois de décembre, janvier et février. Certaines saisons se caractérisent toutefois par des précipitations importantes dès le mois de novembre, d'autres étant quant à elles marquées par un prolongement des fortes précipitations jusqu'à la fin du mois de mars. La répartition des précipitations au cours de la saison des pluies met en évidence une grande variabilité des intensités pluviales, qui oscillent entre 5 et 7 mm/h en moyenne. Pendant les événements de pluies exceptionnelles, les précipitations deviennent importantes selon leur type, pluie d'orage : 172 mm/h en 15 minutes ; Pluie cyclonique : 36 mm/h en 2 heures.

L'analyse des précipitations supra et infra-journalières révèle que les événements les plus intenses se produisent sur des périodes courtes, avec des cumuls dépassant 65 mm en moins de 2 heures (pour période de retour de 2 ans). Les précipitations supra-journalières sont plus représentatives des précipitations stratiformes et des phénomènes cycloniques, responsables d'inondations prolongées tandis que les précipitations infra-journalière représentent les événements plus localisés et plus violents, souvent responsables de ruissellements rapides et d'inondations éclairs [19].

L'étude des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) à partir de ces précipitations supra et infra-journalières permet d'estimer la probabilité de retour des événements extrêmes (TABLEAU IV). Les résultats montrent que les précipitations journalières de 116 mm correspondent à une période de retour de 5 ans, tandis que les événements supérieurs à 120 mm/jour ont une occurrence plus rare mais un impact majeur sur l'inondation.

TABLEAU IV. TABLEAU DE SYNTHÈSE DES COURBES IDF POUR LES DURÉES ALLANT DE 15 MINUTES A 150 JOURS

		durée																	
		15'	30'	1h	2h	3h	4h	6h	12h	1j	2j	5j	10j	20j	30j	60j	90j	120j	150j
période de retour	2 ans	28	37	49	65	75	78	82	91	100	121	193	275	393	483	689	848	983	1102
	5 ans	33	44	58	78	88	91	96	106	116	144	230	329	469	577	822	1012	1173	1315
	10 ans	37	50	66	87	97	101	107	117	129	162	259	369	526	647	923	1136	1316	1476
	20 ans	41	55	73	97	107	111	117	129	142	179	287	409	583	718	1024	1260	1460	1637
	50 ans	47	62	83	110	119	124	131	144	159	203	324	462	659	811	1157	1424	1650	1850
	100 ans	51	68	90	120	129	134	142	156	171	220	352	503	717	882	1258	1548	1794	2011

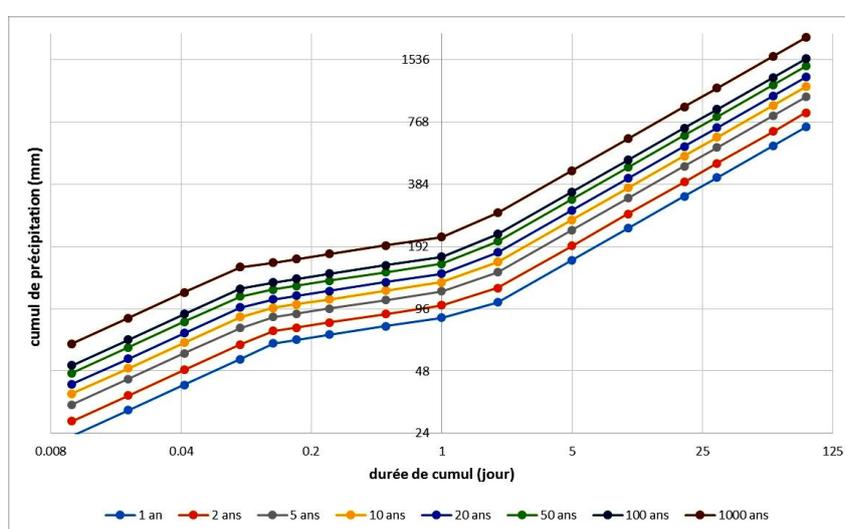


Fig. 14. Courbes intensité-durée-fréquence établies pour Antananarivo

Ces courbes représentent la durée de cumul des précipitations, allant de très courtes périodes (moins d'une journée) jusqu'à des périodes plus longues (125 jours) correspondant à différentes périodes de retour (1 an à 1000 ans). Deux points d'inflexion relativement différents sont présents selon les durées considérées (Fig.14) ; ceci est à mettre en relation avec l'existence de deux types d'événements. D'un côté, des précipitations intenses mais très courtes et à l'opposé des précipitations plus longues mais aussi plus homogènes. Sur le plan hydrologique, ces courbes permettent d'identifier les impacts différenciés des précipitations selon leur durée d'occurrence. Les précipitations de courte durée, particulièrement celles inférieures à une journée, sont fortement associées aux phénomènes de ruissellement intense et aux crues éclairées, qui sont souvent responsables d'inondations par débordement et par ruissellement [19]. À l'inverse, les précipitations cumulées sur des périodes plus longues, bien que moins intenses à l'échelle horaire, influencent les niveaux des nappes phréatiques et la saturation des sols, pouvant conduire à des inondations différées et prolongées [20].

E. Sous-système réseau d'assainissement et drainage

Le périmètre de la Commune Urbaine forme un polder. La CUA est entourée de digues qui la protègent des débordements des rivières Ikopa et Mamba en saison des pluies. Des ouvrages vannés sont aménagés dans ces digues pour le passage des canaux de drainage d'eaux pluviales. Quand les rivières sont en crue, les vannes sont fermées pour empêcher les eaux des rivières de refouler vers le polder. La superficie du bassin versant drainé par ce polder est de 85 km².

Le réseau d'assainissement est constitué de trois types principaux de collecteurs : les canaux de drainage pluvial, les collecteurs mixtes, et les collecteurs séparatifs. Les trois principaux axes de drainage, à savoir le canal Andriantany et le canal C3, assurent la collecte et l'évacuation des eaux pluviales et usées vers l'Ikopa et la Mamba. Ces canaux sont accompagnés par des stations de pompage qui jouent un rôle essentiel dans la régulation des flux en cas de saturation du réseau gravitaire (Fig.14).

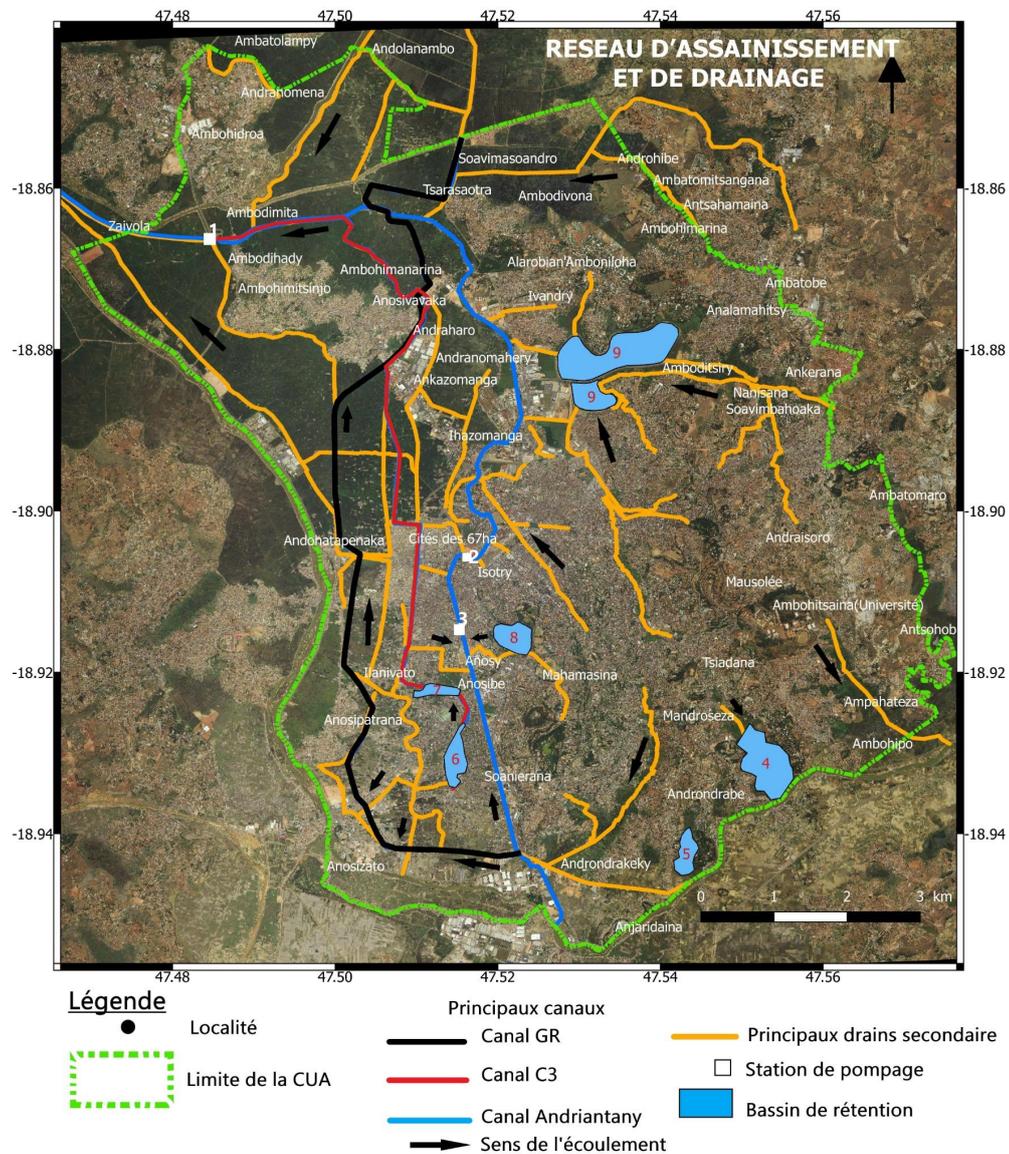


Fig. 15. Les principaux réseaux d'assainissement de la CUA (Source : Bases des données de l'APIPA, BD 500 FTM ; SCR WGS 84)

Les résultats de l'analyse hydraulique montrent que les capacités théoriques des collecteurs sont de 30 m³/s pour le canal Andriantany, 20 m³/s pour le canal C3 et de 15 m³/s pour le canal GR (TABLEAU V). Ces valeurs devraient être suffisantes pour les précipitations, même intenses. Les simulations effectuées sur la base de précipitations de périodes de retour de 2, 10 et 100 ans affirment que les collecteurs sont capables de gérer efficacement les événements courants, mais deviennent rapidement insuffisants pour des précipitations plus importantes. C'est au-delà d'un événement décennal (pluie de 45 mm en une journée), que les collecteurs atteignent leur capacité maximale, qui peut provoquer des débordements et des inondations.

TABLEAU V. CAPACITÉS THÉORIQUES DES COLLECTEURS

Ouvrage	Type de Collecteur	Capacité Théorique (m ³ /s)	Observations
Canal Andriantany	Drainage pluvial	30	Principal collecteur des eaux pluviales urbaines
Canal C3	Mixte	20	Drainage des zones mixtes urbaines et naturelles
Canal GR	Séparatif	15	Essentiellement utilisé pour l'irrigation mais participe au drainage
Station de pompage d'Ambodimita	Station de pompage	9	Capacité limitée par les conditions de la Mamba
Station de pompage d'Isotry	Station de pompage	7	Pompage vers le canal Andriantany
Station de pompage d'Anatihazo	Station de pompage	5	Pompage local des eaux usées
Exutoires principaux	Déversoir	Variable	Influence des niveaux d'eau sur la capacité de vidange

Lorsque des précipitations atteignent 85 mm en une journée (événement centennal), le volume d'eau généré est de 50 Mm³, alors que la capacité d'évacuation du réseau ne dépasse pas 25 Mm³, entraînant une stagnation prolongée des eaux dans les bassins urbains et aggravant les inondations. Ce phénomène est accentué par l'augmentation des surfaces imperméabilisées et le changement des régimes de précipitations, qui ont considérablement accru les volumes d'eau à gérer. L'analyse des précipitations réelles montre que, pour une pluie normale de 15 mm, le réseau fonctionne normalement en évacuant environ 10 Mm³. Toutefois, lors des événements décennaux (45 mm de pluie), 10 Mm³ d'eau restent non évacués, tandis que pour les événements extrêmes, ce déficit atteint 25 Mm³, ce qui explique les inondations prolongées observées dans plusieurs quartiers. De plus, les niveaux d'eau dans l'Ikopa et la Mamba influencent directement la capacité de vidange, limitant l'efficacité des exutoires et accentuant la saturation du réseau lors des crues (TABLEAU VI).

TABLEAU VI. COMPARAISON DES PRÉCIPITATIONS, CHARGES HYDRAULIQUES ET DÉFICITS D'ÉVACUATION

Scénario hydrologique	Précipitations moyennes (mm)	Débit simulé (m ³ /s)	Capacité Théorique Disponible (m ³ /s)	Volume d'eau généré (Mm ³)	Volume évacué (Mm ³)	Déficit d'évacuation (Mm ³)	Surcharge du Réseau (m ³ /s)
Pluie journalière normale	15	10	50	10	10	0	0
Événement décennal (10 ans)	45	55	50	30	20	10	5
Événement centennal (100 ans)	85	85	50	50	25	25	3

L'analyse des données d'entretien et des observations de terrain a permis d'identifier plusieurs zones critiques où des blocages et débordements sont fréquemment signalés (Fig.1-). Ces points critiques résultent principalement :

- d'une sous-capacité des collecteurs par rapport aux volumes d'eau générés lors des précipitations extrêmes,
- de l'accumulation de déchets solides et de sédiments, obstruant les canaux et réduisant leur efficacité,
- de l'urbanisation anarchique, qui a entraîné la réduction ou la disparition de certains canaux d'évacuation naturels.

Les points de congestion et de débordement ont été superposés à la cartographie du réseau existant, permettant d'identifier des secteurs particulièrement (Fig.17). Les résultats montrent que les quartiers les plus affectés sont principalement situés dans les zones basses et densément urbanisées, où les infrastructures d'assainissement sont saturées même en période de pluies modérées.



Fig. 16. Facteurs diminuant les capacités de fonctionnements des collecteurs d'eaux pluviales, A: construction illicite dans le bassin de rétention d'Anosibe, B: accumulation de déchets solides dans le drain secondaire côté Namontana, C: accumulation de déchets solides dans le canal C3 côté 67 ha.

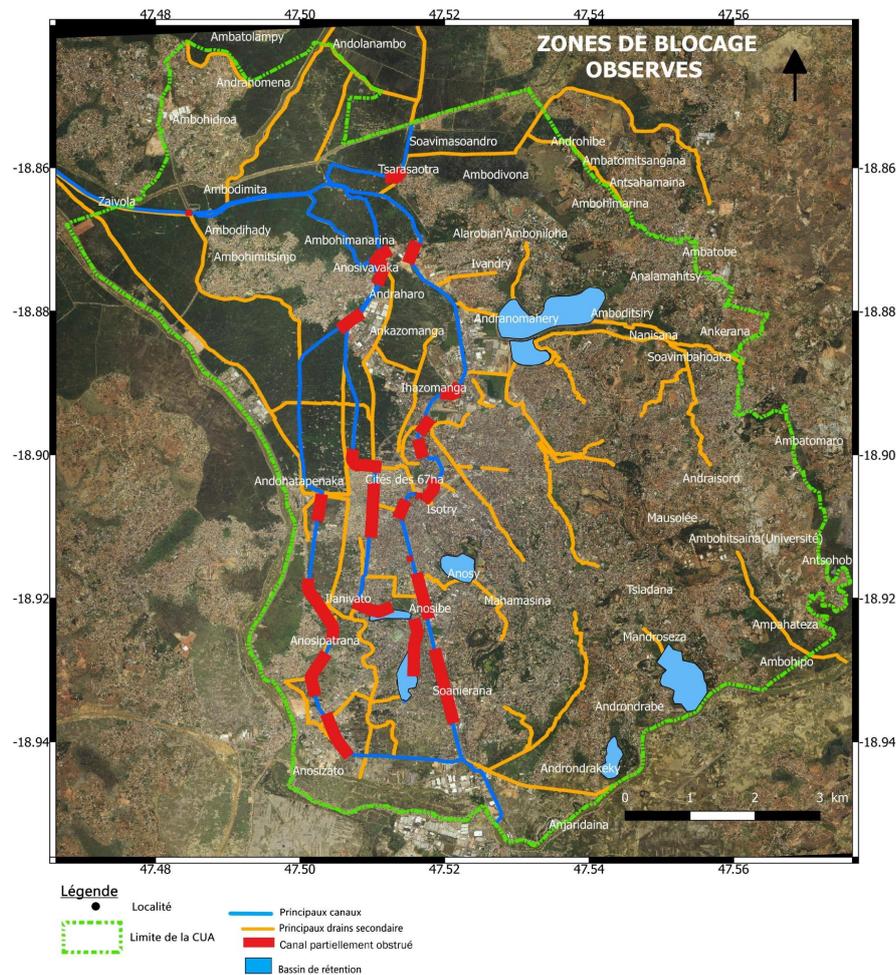


Fig. 17. Carte des zones de blocage et débordements observés (Source : Base de donnée de l'APIPA, BD 500 FTM, données de terrain ; SCR WGS 84)

IV. DISCUSSION

Les inondations à Antananarivo résultent principalement des mécanismes distincts mais interconnectés qui sont l'inondation par ruissellement, survient suite à des précipitations intenses dépassant la capacité d'infiltration du sol et du réseau d'évacuation, l'inondation par remontée de nappe, accentuée par l'augmentation du niveau piézométrique lors des périodes de saturation hydrique et l'inondation par débordement qui survient lorsque le débit d'Ikopa et Mamba dépasse la capacité de son lit mineur. L'analyse de ces dynamiques a permis d'identifier les principaux facteurs influençant la fréquence et l'intensité, en tenant compte des caractéristiques climatiques, lithologiques et anthropiques. Les résultats mettent en évidence que les inondations ne sont pas simplement la conséquence d'un excès de précipitations, mais bien le résultat d'un système interconnecté où se superposent les effets de l'urbanisation, des infrastructures, des caractéristiques lithologiques et des dynamiques climatiques. Ces systèmes interconnectés sont les sous-systèmes du système global inondation et ses analyses constituent les points clés qui sont les variables et les indicateurs de performances vers une modélisation systémique.

L'imperméabilisation croissante des surfaces, conséquence directe de l'urbanisation rapide et non planifiée, a considérablement augmenté le ruissellement, réduisant ainsi la capacité d'infiltration des précipitations et accentuant la charge sur un réseau d'assainissement déjà sous-dimensionné. L'évaluation du coefficient de ruissellement a permis d'identifier un écart significatif

entre l'estimation théorique basée sur l'indice d'imperméabilisation ($C = 0,442$) et les valeurs obtenues par l'analyse hydraulique ($C = 0,5$ à $0,7$) [8] révélant une sous-estimation des écoulements réels due aux déficiences du réseau d'assainissement. En effet, bien que les infrastructures de drainage soient conçues pour absorber un volume d'eau correspondant à ces paramètres, la saturation rapide des collecteurs observée lors des précipitations, combinée à l'accumulation récurrente de déchets et de sédiments, entraîne une réduction effective de leur capacité hydraulique. La simulation des écoulements a montré que les capacités théoriques des principaux collecteurs, $30 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le canal Andriantany, $20 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le canal C3 et $15 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le canal GR, devraient être suffisantes pour évacuer les eaux pluviales issues des précipitations modérées, mais les obstructions constatées limitent leur efficacité et conduisent à des débordements fréquents et localisés.

Par ailleurs, l'analyse des caractéristiques lithologiques a confirmé que la présence dominante de formations argileuses et limoneuses surtout à Mahamasina, Ankorondrano, Ankazomaga et à Anosibe, limite fortement l'infiltration, favorisant l'accumulation des eaux en surface et augmentant la fréquence des inondations par ruissellement et remontée de nappe, surtout dans les zones basses de la ville. Ces effets sont aggravés par une variabilité climatique croissante, marquée par une augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes, dépassant souvent les capacités d'absorption du sol et d'évacuation du réseau. L'ajustement statistique des précipitations maximales (loi de Gumbel) a permis d'établir les seuils critiques au-delà desquels les infrastructures ne parviennent plus à assurer l'évacuation des eaux pluviales, entraînant des inondations généralisées. Ces observations confirment que les inondations à Antananarivo ne peuvent être comprises de manière isolée en étudiant uniquement les précipitations, le réseau d'assainissement ou l'urbanisation, mais doivent être appréhendées comme un système complexe où chaque facteur influence directement ou indirectement les autres. Dès lors, une approche systémique s'impose afin d'intégrer ces multiples interactions et de simuler différents scénarios d'évolution des risques. Une modélisation et simulation par *System modeling* (Sys ML) permettra de structurer ces relations et d'anticiper l'impact des changements urbains et climatiques sur les inondations, en testant des stratégies d'adaptation et d'optimisation des infrastructures.

Cette approche offrira une base scientifique robuste pour la prise de décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion des risques hydrologiques, soulignant ainsi la nécessité d'une transition vers une gestion intégrée et prédictive des inondations urbaines. L'étape suivante consistera à développer un modèle SysML du système complexe d'inondation, structurant les relations entre les sous-systèmes identifiés et leurs variables clés afin de mieux comprendre leur interaction et d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation potentielles.

V. CONCLUSION

Cette étude a permis d'analyser en détail les facteurs influençant les inondations urbaines dans la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA) en intégrant les précipitations extrêmes, l'urbanisation, les caractéristiques lithologiques et la performance du réseau d'assainissement. Les résultats obtenus montrent que l'imperméabilisation croissante des sols, combinée à des infrastructures de drainage sous-dimensionnées et mal entretenues, amplifie les phénomènes de ruissellement et de saturation des collecteurs, aggravant ainsi la vulnérabilité hydrologique de la ville. L'analyse des précipitations extrêmes et de leur variabilité a révélé une tendance à l'augmentation de leur intensité, confirmant la nécessité d'une adaptation des infrastructures face aux changements climatiques. L'approche méthodologique adoptée a démontré que la simple analyse isolée des sous-systèmes ne suffit pas à expliquer les dynamiques d'inondation, et qu'il est essentiel d'intégrer leurs interactions au sein d'un modèle global. Les résultats confirment l'importance d'une modélisation systémique, qui permettrait de tester différents scénarios d'évolution urbaine, de changements climatiques et d'amélioration des infrastructures. Dans cette perspective, la prochaine phase de cette recherche consistera en une modélisation systémique afin de traduire les interactions entre les sous-systèmes en un modèle dynamique et paramétrable. Cette approche offrira une meilleure compréhension des flux hydrauliques urbains, facilitera l'évaluation des stratégies d'adaptation et permettra d'optimiser la gestion des risques d'inondation dans la CUA.

REFERENCES

- [1] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), "Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction," United Nations, Geneva, Switzerland, 2019.
- [2] T. Lebel, G. Panthou, and T. Vischel, « Inondations en Afrique : une nouvelle ère hydroclimatique » The Conversation, January 2020.
- [3] I. Douglas, K. Alam, M. Maghenda, Y. McDonnell, L. McLean, and J. Campbell, « Unjust waters: climate change, flooding and the urban poor in Africa, » environment and urbanization, vol. 20, no. 1, pp. 187-205, April 2008.
- [4] F. M. Rahajanaharimamojy, « Etude de la GIRE (cours d'eau) et sur l'inondation du bassin versant : cas de la rivière Ikopa », doctorat en physique et applications, université d'Antananarivo, 2019.
- [5] J. I. Barredo, « Major Flood Disasters in Europe: 1950–2005 », natural hazards, 42(1), p.125-148, 2007.
- [6] Z.W. Kundzewicz, S. Kanae, S.I. Seneviratne, J. Handmer, N. Nicholls, P. Peduzzi, R. Mechler, L.M. Bouwer, N.W. Arnell, K. Mach, R. Muir-Wood, G.R. Brakenridge, W. Kron, G. Benito, Y. Honda, K. Takahashi, and B. Sherstyukov, "Flood Risk and Climate Change: Global and Regional Perspectives," Hydrological Sciences Journal, vol. 59, no. 1, pp. 1-28, January 2014.
- [7] Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat et des Travaux Publics (MAHTP), « Plan d'urbanisme directeur de l'agglomération d'Antananarivo », projet d'élaboration du schéma directeur pour le développement de l'axe économique TaToM (Antananarivo-Toamasina, Madagasikara). 2019
- [8] Agence d'Exécution des Travaux d'intérêt Public et d'Aménagement (AGETIPA), « Mission de maîtrise d'œuvre pour le Programme Intégré d'Assainissement d'Antananarivo (PIAA) », tranche ferme – rapport final de l'activité 4, Ministère d'Etat en Charge des Projets Présidentiels, de l'Aménagement du Territoire et de l'Équipement (M2PATE). 2017.
- [9] C.R. Harris, K.J. Millman, S.J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N.J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M.H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J.F. del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, T.E. Oliphant, « Array programming with NumPy », nature, vol. 585, no 7825, p. 357-362, septembre 2020.
- [10] K. Jordahl, J. Van den Bossche, M. Fleischmann, J. Wasserman, J. McBride, J. Gerard, J. Tratner, M. Perry, A.G. Badaracco, C. Farmer, G.A. Hjelle, A.D. Snow, M. Cochran, S. Gillies, L. Culbertson, M. Bartos, N. Eubank, M. Albert, A. Bilogur, S. Rey, C. Ren, D. Arribas-Bel, L. Wasser, L.J. Wolf, M. Journois, J. Wilson, A. Greenhall, C. Holdgraf, F. Leblanc, « geopandas/geopandas: v0.8.1 », Zenodo, juillet 2020.
- [11] H. Xu, « Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery », international journal of remote sensing, vol. 27, no 14, p. 3025-3033, 2006.
- [12] Y. Deng, S. Wang, X. Bai, Y. Li, Y. Liu, Y. Zhang, Y. Zhang, « Monitoring surface water changes using remote sensing indices », remote sensing of environment, vol. 158, p. 530-544, 2015.
- [13] J.-F. Pekel, A. Cottam, N. Gorelick, M. Belward, « High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes », nature, vol. 540, p. 418-422, 2016.
- [14] F. Amblard et D. Phan, « Modélisation et simulation multi-agents : Applications pour les Sciences de l'Homme et à la Société », hermès science publications, 2006.
- [15] W. Cao, Y. Zhou, R. Li, X. Li, H. Zhang, « Monitoring long-term annual urban expansion (1986–2017) in the largest Archipelago of China », Sci. Total Environ. 2021,

-
- [16] M. Pawel, Rowinski, G. Witold, Strupczewski, P. Vijay, « Applicabilité des distributions de probabilité log-Gumbel et log-logistique dans les analyses hydrologiques », Hydrological Sciences Journal, vol. 47, p. 107-122, Dec 2001.
- [17] M. Rahrah, L.A. Lopez-Peña, F. Vermolen, B. Meulenbroek, « Network-inspired versus Kozeny-Carman based permeability-porosity relations applied to Biot's poroelasticity model. », arXiv preprint arXiv:2004.09373, avril 2020
- [18] ASTM International, « ASTM D1140-19, Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer than No. 200 (75- μ m) Sieve », ASTM International, 2019.
- [19] W. Brutsaert, « Hydrology: An Introduction », journal of environmental & engineering geoscience, vol.13, p. 93-104, 2005.
- [20] B. Allenby, J. Fink, « Toward inherently secure and resilient societies », science, vol. 309, no 5737, p. 1034-1036, 2005.