

Titre:	Modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal : Développement d'un outil de simulation pour l'analyse des processus hydrodynamiques
Auteur:	Alseny Barry
Date:	2024
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence:	Barry, A. (2024). Modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal : Développement d'un outil de simulation pour l'analyse des processus hydrodynamiques [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/59217/
Citation:	Barry, A. (2024). Modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal : Développement d'un outil de simulation pour l'analyse des processus hydrodynamiques [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/59217/

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/59217/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal :
Développement d'un outil de simulation pour l'analyse des processus
hydrodynamiques**

ALSENY BARRY

Département des génies civil, géologie et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Août 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal :
Développement d'un outil de simulation pour l'analyse des processus
hydrodynamiques**

présenté par **Alseny BARRY**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Elmira HASSANZADEH, présidente

Musandji FUAMBA, membre et directeur de recherche

Mohamadou Abdoulaye NDIAYE, membre externe

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents : mon Père (paix à son âme amen !) et ma Mère :

Que je remercie infiniment pour leurs amours, leurs soutiens, leurs encouragements, etc.

Puisse Dieu, le très haut vous accorder santé et longévité et que l'âme de BABA qu'Allah l'accorde le paradis Firdaws.

A toute ma famille (ma femme et mes enfants, à ma famille qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

Chaque étape de cette aventure a été marquée par vos encouragements infaillibles, vos mots réconfortants et vos soutiens indéfectibles.

A tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours académique, je dédie ce mémoire de maîtrise. Votre encouragement, votre bienveillance et votre soutien ont été les piliers sur lesquels je me suis appuyé pour accomplir ce projet. Merci du fond du cœur pour votre précieuse contribution.

Ce mémoire, fruit de mes efforts et de vos précieuses contributions, vous est dédié avec reconnaissance et affection.

Avec toute ma gratitude.

Alseny BARRY

REMERCIEMENTS

Au terme de ce projet recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude, mes sincères et profonds remerciements à mon directeur de recherche Musandji FUAMBA PhD, Professeur titulaire à Polytechnique de Montréal, pour la qualité de son encadrement, son orientation objective, ses conseils pertinents et sa vision scientifique, qui m'ont permis de réaliser mon projet dans les meilleures conditions possibles et tout au long de mon parcours académique.

Un sincère remerciement mon co-directeur Andrew OGILVIE PhD, Chargé de recherche en hydrologie à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) dans l'Unité Mixte de Recherche G-EAU (Gestion de l'eau, Acteurs, Usages), pour ses conseils utiles, ses orientations et son expérience qui ont contribué à façonner ma compréhension du sujet de ma mémoire.

A ma femme pour son soutien précieux, son encouragements enthousiastes et sa généreuse disponibilité à tout moment.

Toute ma gratitude et toute ma reconnaissance envers l'ensemble du corps professoral qui ont su transmettre leur savoir, partager leur expertise et stimuler ma curiosité intellectuelle, pour n'avoir ménagé ni leur temps ni leurs efforts pour assurer cette formation et qu'ils y trouvent le merci spécial.

Je tiens à remercier les camarades, mes amis qui m'ont soutenu durant mes années d'études, que leur compagnie m'a été très adorable.

Je remercie tous les membres de ma famille, mes amis et mes collègues pour leur précieux soutien et curiosité pour mon travail. Enfin je remercie tous ceux qui de près et de loin ont contribué à l'élaboration de ce présent mémoire et qu'ils en soient vivement remerciés.

RESUME

Cette recherche visait à comprendre la dynamique de l'eau et le flux d'écoulement dans le canal Taouey et le lac de Guiers au Sénégal, une ressource vitale pour l'agriculture, l'élevage, l'industrie, et les communautés locales. Cependant, la gestion de ce bassin est complexe, influencée par le changement climatique, les interventions humaines, et la végétation invasive comme le typha.

Pour relever ce défi, un modèle hydrodynamique HEC-RAS a été appliqué pour simuler le mouvement de l'eau à travers le canal et le lac. Ce modèle s'appuie sur des données topographiques issues de TanDEM et d'autres sources, avec un coefficient de rugosité de Manning utilisé pour sa calibration.

L'analyse des résultats de la modélisation sur la période 2010-2015, avec un pas de temps journalier, a montré une corrélation satisfaisante entre les données observées et les simulations. Les indicateurs de performance, notamment $NSE = 0,89$, $R^2 = 0,91$, $KGE = 0,93$, $RMSE = 0,037$ et $RSR = 0,33$, attestent de la qualité du modèle, malgré des marges d'amélioration possibles pour affiner la calibration. Le débit, variant saisonnièrement entre -2 et 50 m^3/s , a été modélisé de manière évolutive pour refléter les conditions réelles. Cependant, l'accès à des données de haute qualité et une représentation précise des conditions initiales et limites sont essentiels pour améliorer la précision des simulations. L'intégration de données supplémentaires sur les prélèvements, les obstacles végétaux, et d'autres paramètres hydrauliques pourrait encore affiner ces résultats.

En conclusion, cette recherche a apporté une contribution significative à la compréhension du système hydrologique du canal Taouey et du lac de Guiers, offrant ainsi des outils précieux pour améliorer la gestion des ressources en eau dans la région.

Mots clés : Lac de Guiers, HEC-RAS, Canal, Taouey, Sénégal, Modélisation, Gestion des ressources en eau.

ABSTRACT

This research aimed to understand the water dynamics and flow within the Taouey Canal and Lake Guiers in Senegal, a vital resource for agriculture, livestock, industry, and local communities. However, the managing this basin is complex, challenging, influenced by climate change, human interventions, and invasive vegetation such as typha.

To address this challenge, a HEC-RAS hydrodynamic model was applied to simulate water movement through the canal and the lake. The model is based on topographic data from TanDEM and other sources, with a Manning roughness coefficient used for calibration.

The analysis of the modeling results over the period from 2010 to 2015, with a daily time step, showed a satisfactory correlation between observed data and simulations. Performance indicators, including a $NSE = 0,89$, $R^2 = 0,91$, $KGE = 0,93$, $RMSE = 0,037$ and $RSR = 0,33$, confirm the model's quality, although there is room for improvement to refine the calibration. The flow rate, varying seasonally between -2 and 50 m^3/s , was modeled in an evolving manner to reflect real conditions accurately. However, access to high-quality data and accurate representation of initial and boundary conditions are crucial for improving the precision of simulations. The integration of additional data on withdrawals, vegetation obstacles, and other hydraulic parameters could further refine these results.

In conclusion, this research has significantly contributed to understanding the hydrological system of the Taouey Canal and Lake Guiers, providing valuable tools to enhance water resource management in the region.

Keywords: Lake Guiers, HEC-RAS, Channel, Taouey, Senegal, Modeling, Water Resources Management.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	III
REMERCIEMENTS	IV
RESUME	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES ANNEXES	XV
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	XVI
LISTE DES SYMBOLES	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectif de l'étude	4
1.2.1 Objectif général	4
1.2.2 Objectifs spécifiques	5
1.3 Hypothèses de travail	5
1.4 Justification de la recherche	6
1.5 Méthodologie de la recherche	7
1.6 Importance et originalité de la recherche	12
1.7 Organisation générale du mémoire	13
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	14
2.1 État de l'art sur les études dans le lac de Guiers	14
2.1.1 Description du lac de Guiers	14

2.1.2	Historique du fonctionnement du lac de Guiers	16
2.2	Études antérieures sur la modélisation hydraulique des cours d'eau et lacs.....	22
2.2.1	Modélisation hydraulique des canaux	23
2.2.2	Modélisation hydraulique des lacs	23
2.2.3	La modélisation hydraulique du lac Guiers et du fleuve Sénégal	24
2.3	Classification des modèles hydrauliques.....	24
2.3.1	Modèles empiriques	25
2.3.2	Modèles hydrodynamiques	25
2.3.3	Modèles conceptuels ou simplifiés	31
2.3.4	Avantages et limitations	32
2.3.5	Avancées	34
2.3.6	Paramètres de modélisation : Coefficient de Manning	35
2.3.7	Paramètres de modélisation : Coefficient de Manning-Strickler	36
2.3.8	Critères d'évaluation.....	37
2.3.9	Incertitudes dans la modélisation hydraulique	40
CHAPITRE 3	PRÉSENTATION GÉNÉRAL DU SITE D'ÉTUDE	41
3.1	Identification de la zone d'étude.....	41
3.1.1	Caractéristiques physiques	42
3.1.2	Caractéristiques démographiques.....	59
3.1.3	Caractéristiques socio-économiques	60
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE	62
4.1	Modélisation hydraulique.....	62
4.1.1	Choix et description du Modèle Hydraulique	62
4.2	Données d'entrée du modèle.....	64

4.2.1	Données bathymétriques	64
4.2.2	Modèle numérique de terrain (MNT)	65
4.2.3	Les données d'observation	67
4.2.4	Les données d'occupation du sol	67
4.2.5	Les couches de données sur les sols	69
4.3	Collecte de données	70
4.4	Techniques de prétraitement des Données	70
4.4.1	Attribution des données géométriques	71
4.4.2	Choix et profils des sections	72
4.4.3	Coefficient de rugosité	73
4.4.4	Les conditions initiales et limites	73
4.5	Critères d'évaluation du modèle	77
4.6	Calibration et validation du Modèle	78
4.6.1	Simulation de Scénarios	79
CHAPITRE 5	RÉSULTATS	81
5.1	Profil en long et en travers	81
5.1.1	Profil en travers du canal	81
5.1.2	Profil en travers du lac	82
5.1.3	Profil en long	83
5.1.4	Profil de vitesses	84
5.1.5	Profil de la surface d'écoulement du lac	85
5.2	Simulation	86
5.2.1	Interaction entre le canal et le lac de Guiers	86
5.2.2	Cas de l'aménagement du canal	87

5.2.1	Simulation hauteur d'eau dans le lac de Guiers	88
5.2.2	Simulation du débit dans le canal.....	89
5.2.3	Simulation du volume dans le canal.....	90
CHAPITRE 6	DISCUSSION	91
6.1	Incertitudes	91
6.1.1	Dues à la modélisation	91
6.1.2	Dues aux intrants	91
6.2	Limites de l'étude	92
6.2.1	Paramètres du modèle	92
6.2.2	Effets des conditions limites et initiales	94
6.2.3	Effets de la rugosité de la surface.....	94
6.3	Difficulté d'estimation du ruissellement et du prélèvement	95
CHAPITRE 7	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	96
7.1	Principales conclusions de l'étude	96
7.2	Contributions de la recherche à la gestion des ressources en eau	97
7.3	Recommandations pour les recherches futures	98
7.4	Recommandations aux intervenants dans le lac de Guiers	98
BIBLIOGRAPHIE.....		100
ANNEXE		112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Caractéristiques techniques des modèles hydrodynamiques 2D (Teng, Jin et al., 2017).....	29
Tableau 2-2 : Forces et faiblesses des différentes approches de modélisation (Neal et al., 2019; Teng, Jin et al., 2017).....	33
Tableau 2-3 : Coefficients de Manning (n) pour différents types de cours d'eau (Chow, 1959) ...	36
Tableau 4-1 : Manning (n) utilisée dans le modèle HEC-RAS 1D/2D.....	68
Tableau 4-2 : Données initiales utilisées pour la modélisation	77
Tableau 4-3 : Données sur les critères d'évaluation du modèle	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Objectif de l'étude	5
Figure 1-2 Organigramme illustrant la méthodologie de la recherche.....	11
Figure 2-1 : Présentation du lac de Guiers	15
Figure 2-2 : Chronologie des aménagements : étape naturelle	17
Figure 2-3 : Chronologie des aménagements : étape intermédiaire (1948-1982)	18
Figure 2-4 : Chronologie des aménagements : étape actuelle (depuis 1982).....	20
Figure 2-5 : Chronologie des aménagements : projection future	21
Figure 3-1 : Aperçu du bassin versant du fleuve Sénégal	41
Figure 3-2 : Isohyètes moyennes annuelles sur le bassin versant du fleuve Sénégal pour la période 1971-2000 (Bader et al., 2015; OMVS/Tropis/DHI, 2007)	44
Figure 3-3 : Cumul des précipitations annuelles de 2002 à 2022, (<i>source : Station :X6 CSS X=15.776621 et Y=16.369494</i>).....	45
Figure 3-4 : Précipitation mensuelle de 1981 à 2024 (<i>source : GEEE, CHIRPS</i>)	45
Figure 3-5 : Série chronologique de l'indice standardisé des précipitation SPI, <i>Source (Données CHIRPS, GEEE)</i>	46
Figure 3-6 : Fleuve (quai de Richard Toll)	47
Figure 3-7 : Lac de Guiers (limnimètre CSS)	47
Figure 3-8 : Évolution du niveau d'eau RN Guiers et Quai.....	48
Figure 3-9 : Variation de la température dans la zone d'études	49
Figure 3-10 : Évaporation moyenne annuelle de trois stations 2008-2022.....	50
Figure 3-11 : Évaporation moyenne mensuelle de 2001 à 2023 (<i>source : MOD16A2.061</i>).....	51
Figure 3-12 : Débits mensuels estimés des prélèvements (<i>source (Alexis, 2016)</i>).....	52
Figure 3-13 : Bilan du lac de Guiers (Bader et al., 2015)	53

Figure 3-14 : Bilan hydrique moyen mensuel de 2001 à 2023 (<i>source : MOD16A2.061 et CHIRPS</i>)	54
Figure 3-15 : Aperçu de la présence végétation du NDVI (Sentinel-2)	56
Figure 3-16 : Variation mensuelle du NDVI de 2005 à 2020 (Modis)	57
Figure 3-17 : Histogramme de la variation du NDVI de 2015 à 2023 (Sentinel-2)	57
Figure 3-18 : Relief du lac de Guiers	58
Figure 4-1 : Profil en travers du canal (N°1= Amont et N°13= Aval) avec AutoCAD covadis	65
Figure 4-2 : Comparaison du profil en travers du canal amont et aval (TanDEM/SRTM)	66
Figure 4-3 : Profil en long de la zone d'études (<i>Source : SRTM, GEE</i>)	66
Figure 4-4 : Occupation du sol	68
Figure 4-5 : couches de sols	69
Figure 4-6 Démarche méthodologique	70
Figure 4-7 : Sections interpolées transversale du canal de Taoué	72
Figure 4-8 : Sections transversales du canal de Taoué	72
Figure 4-9 : Schéma du canal de Taouey (<i>source : (Alexis, 2016)</i>)	73
Figure 4-10 : Hauteur d'eau canal 2010-2015 (mm)	74
Figure 4-11 : Précipitation journalière de 2010-2015 (mm), station CS6	75
Figure 4-12 : Évapotranspiration de 2010-2015 (mm/h)	75
Figure 4-13 : Localisation des stations météos	76
Figure 4-14 : Calibration et validation du profil en travers de la section (2+10 m)	79
Figure 5-1 : Profil en travers pour les sections 1 et 12 (amont et aval)	81
Figure 5-2 : Perspective X, Y, Z du profil en travers du canal de Taouey (section 1-2 et 11-12)	82
Figure 5-3 : Profil en travers du lac (amont)	82
Figure 5-4 : Profil en travers du lac aval	83
Figure 5-5 : Profil en long du canal de Taoué (amont et aval)	84

Figure 5-6 : Profil en long de l'évolution de la vitesse	84
Figure 5-7 : Profil en travers de l'évolution de la vitesse	85
Figure 5-8 : Profil en long de la surface d'écoulement.....	86
Figure 5-9 : Interaction d'écoulement entre le lac de Guiers et le canal de Taoué	87
Figure 5-10 : Comparaison de volume entre cas de Typha et sans Typha.....	88
Figure 5-11 : Comparaison niveau d'eau du lac observée et stimulé (1D/2D)	89
Figure 5-12 : Série temporelle du débit (Q m^3/s) amont et aval dans le canal de Taoué	89
Figure 5-13 : Série temporelle du volume (V m^3) amont et aval dans le canal de Taoué.....	90

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Formules	112
Annexe B : Profils en travers du canal taouey (HEC-RAS)	113
Annexe C : Profils en travers du canal taouey (données brutes, Covadis).....	115
Annexe D : Détails de la sortie amont.....	117
Annexe E : Détails de la sortie aval	117
Annexe F : Tableau récapitulatif des sorties par profil	117
Annexe G : Logiciels de modélisation hydraulique (Teng, J. et al., 2017).....	118

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
BEI	Banque Européenne d'Investissement
BM	Banque Mondiale
CSS	Compagnie Sucrière Sénégalaise
DEM	Digital Elevation Model
DGPRE	Direction de la Gestion et la Planification des Ressources en Eau
DSS	Decision Support System
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GEE	Google Earth Engine
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GRE	Gestion des Ressources en Eau
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
IDH	Indice de Développement Humain
IGN	Institut Géographique National
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
KMS	Keur Momar Sarr
LIDAR	Light Detection and Ranging
MNT	Modèle Numérique de Terrain
ODD	Objectifs de Développement Durable
OLAC	Office des Lacs et des Cours d'Eau
OLAG	Office du Lac de Guiers
ODD	Objectifs de Développement Durable

OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
OMVS	Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PGE	Plan de Gestion des Eaux
PGIRE	Programme Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PIB	Produit intérieur brut
PGRESL	Projet de Gestion Rationnelle de l'Eau du Système du Lac de Guiers
PISEA	Projet Intégré Sécurité de l'Eau et de l'Assainissement au Sénégal
PREFELAG	Projet de Restauration des Fonctions Ecologiques et Economiques du Lac de Guiers
PREFERLO	Projet de Renforcement de la Résilience des Ecosystèmes du Ferlo
PSE	Plan Sénégal Émergent
SAED	Société d'Aménagement et d'Exploitation du Delta du Fleuve Sénégal
SDE	Sénégalaise des Eaux
SONES	Société Nationale des Eaux du Sénégal
SOGED	Société de Gestion de Diama
SOGEM	Société de Gestion de Manantali
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWOT	Surface Water and Ocean Topography

LISTE DES SYMBOLES

<i>1D</i>	Unidimensionnel
<i>2D</i>	Bidimensionnel
<i>3D</i>	Tridimensionnel
<i>A</i>	Aire de la section d'écoulement (m ²)
<i>g</i>	Accélération gravitationnelle (m/s ²)
<i>h</i>	Profondeur de l'eau (m)
<i>n</i>	Coefficient de Manning (s/m ^{1/3})
<i>N</i>	Nombre de simulation
<i>O_i</i>	Valeur observée
<i>O</i>	Moyenne des valeurs observées
<i>p</i>	Pression
<i>Q</i>	Débit (m ³ /s)
<i>S_i</i>	Valeur simulée
<i>S</i>	Pente (%)
<i>t</i>	Temps (s)
<i>u, v</i>	Vitesse moyenne transversale/horizontale (m/s)
<i>x, y</i>	Coordonnées spatiales
<i>ρ</i>	Densité du fluide (kg/m ³)
<i>μ</i>	Viscosité dynamique (Pa.s ou N. s/m ²)

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'agriculture est un secteur vital pour le développement économique et social des pays en développement, et l'irrigation est l'une des pratiques les plus fréquemment employées pour accroître la productivité des terres agricoles dans ces régions (Requier-Desjardins, 2010). Toutefois, l'irrigation peut également avoir des impacts importants sur l'environnement, tels que la détérioration des sols, la qualité des ressources en eau, etc. Cela peut entraîner la perte de biodiversité et la dégradation des écosystèmes (Nedjraoui & Bédrani, 2008).

Dans la plupart des régions du monde, l'agriculture consomme plus de 70 % des réserves nationales d'eau douce (Leenhardt, 2020), mais cette part de proportion demeure très significative dans les pays africain (84 %) (Daziano, 2014).

Selon les estimations de la FAO d'ici 2030, il est prévu que les terres irriguées devraient connaître une hausse de 34% dans les pays en développement. Parallèlement, la consommation d'eau dans le secteur agricole devrait enregistrer également une augmentation plus modérée de 14%, ce qui serait attribuable à des éléments tel que les améliorations dans la gestion et les techniques d'irrigation (FAO, 2017).

Au Sénégal, les eaux de surface sont la principale source d'eau pour l'agriculture, mais en périodes de faibles précipitations, elles ne suffisent pas, notamment pour l'irrigation dans le bassin du fleuve Sénégal (World Bank, 2022). Les eaux souterraines, fournissant 85% de l'eau potable et la plupart des besoins industriels, sont menacées par la surexploitation et la pollution. Les prélèvements actuels devraient augmenter de 30% à 60% d'ici 2035, accroissant le stress hydrique et mettant à l'épreuve la capacité à répondre à la demande d'une population en pleine urbanisation (World Bank, 2022).

La population dépassant les 15,8 millions, dont 52% réside en milieu rural¹, les besoins en eau potable sont évalués à 346 Mm³/an (Banque Mondiale, 2022). Les prélevements pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) proviennent principalement des eaux souterraines, représentant 84% (COWI, 2011).

Quasiment 88% des ressources en eau renouvelables du Sénégal sont transfrontalières (UNWATER, 2022), les exposant ainsi aux risques de prélevements excessifs et de pollution en amont par d'autres pays (Banque Mondiale, 2022).

Dans la région du Lac de Guiers, située au nord du Sénégal, l'augmentation des prélevements d'eau et l'adoption de pratiques agricoles irriguées ont significativement modifié la couverture végétale locale, posant d'importants défis pour la gestion des ressources en eau (Fall, 2006). Ces défis sont amplifiés par la croissance démographique, le développement économique et les effets du changement climatique (OLAC, 2020; Sambou et al., 2018). Néanmoins, ces pratiques agricoles irriguées ont permis de répondre aux besoins croissants de la population, d'augmenter les rendements des cultures et d'améliorer les conditions de vie des habitants (PREFELAG, 2019).

Le Lac de Guiers, situé à plus de 240 kilomètres de Dakar dans le Haut Delta du fleuve Sénégal est l'une des principales réserves d'eau douce du Sénégal qui s'étend sur 50 km de long et 7 km de large (Cogels, F.-X. et al., 1993), il fournit une capacité quotidienne d'eau potable pour la région du grand Dakar et environs de 375 000 m³ soit : Nginth = 45 m³/j, KMS 1+2 = 130 000 m³/j et KMS 3 = 200 000 m³/j (SEN'EAU, 2022). Le Grand Dakar, abrite 32% de la population et génère 55% de l'activité économique nationale. Depuis un certain temps, la demande en eau dans cette région dépasse l'approvisionnement local et augmente de manière soutenue (Banque Mondiale, 2022).

La région est également connue pour ses pratiques agricoles intensives, y compris l'irrigation des cultures vivrières, la canne à sucre, le riz, le maïs, les légumes, les fruits, etc. (BAD, 2013; OLAG, 2019). Surtout que ces pratiques ont également entraîné une réduction et ou une dégradation des

¹ <https://data.worldbank.org/indicator/SP.RUR.TOTL.ZS?locations=SN> (Pour les zones rurales : 35 l/p/j et les zones urbaines, 60 l/p/j).

écosystèmes locaux, en particulier en raison de la surexploitation de l'eau et de la contamination par les pesticides et les engrais chimiques (BELMIN, 2020; FAYE, 2005).

Les apports du bassin versant du fleuve Sénégal jusqu'à Richard Toll sont essentiels pour maintenir l'équilibre hydraulique du lac, fournissant le débit nécessaire pour la vie aquatique et les besoins humains dans cette région aride et semi-aride à faible pluviométrie (Bader et al., 2015). Malgré les défis climatiques, l'agriculture reste l'activité économique principale, avec la production de céréales, fruits et légumes (Gac, J.-Y. C., François-Xavier, 1994).

Le lac de Guiers est une étroite dépression lacustre avec une superficie estimée à plus de 240 km² pour un volume de 390 millions m³ à la cote 1 m IGN (Niang, Awa, 2011; Triplet et al., 2018) et de 300 km² pour un volume de 600 millions de m³ d'eau douce à la côte 1,5 m IGN (NIANG FALL, 2008).

Le canal de Taoué, relié au fleuve Sénégal, est essentiel pour maintenir le niveau d'eau du lac de Guiers, dont il est la principale source d'approvisionnement (Bader et al., 2015). Cependant, son fonctionnement est actuellement entravé par plusieurs facteurs : L'obstruction à la jonction du canal et du fleuve, causée par l'ensablement et les dépôts d'érosion, réduit considérablement le débit d'alimentation du lac. La prolifération de plantes aquatiques telles que le typha, le nénuphar et la jacinthe d'eau aggrave encore cette situation, en bloquant davantage le passage de l'eau (Cogels, F.-X. et al., 1993). Par ailleurs, la proximité du canal avec les habitations de Richard Toll expose celui-ci à des dépôts d'ordures et au ruissellement des eaux usées, augmentant ainsi les risques de pollution affectant la qualité de l'eau et le dépôt de sédiment.

Pour restaurer l'efficacité du canal de Taoué, des mesures de grande envergure sont nécessaires. Il est impératif de procéder à des opérations de curage ou de dragage à la jonction avec le fleuve pour éliminer les sédiments et autres débris, permettant ainsi un rétablissement du flux d'eau. Un recalibrage du canal s'avère également crucial pour améliorer la capacité hydraulique et optimiser l'écoulement. Parallèlement, la construction de murs en béton avec des clôtures grillagées et le rehaussement des endiguements dans certaines zones pourraient empêcher l'accumulation de déchets et limiter les risques d'érosion, assurant ainsi la durabilité et la fonctionnalité continue du canal.

Le développement d'un modèle hydraulique précis et fiable est un défi complexe, principalement en raison de la difficulté d'obtenir des données adéquates et des hypothèses qui peuvent influencer

la précision des prédictions (El Koujok, 2010) (Moghim et al., 2023). Pour que les résultats d'un modèle soient applicables à la gestion de l'eau, il est crucial de comprendre le contexte local, notamment les besoins des populations, les politiques gouvernementales et les contraintes économiques (Yuen et al., 2021). Les études antérieures, telles que le rapport sur la compréhension du système du lac de Guiers et la faisabilité de sa modélisation (Alexis, 2016), ont exploré ces aspects mais les défis persistent.

La modélisation du canal de Taouey et la gestion du lac de Guiers sont rendues complexes par divers facteurs, incluant l'alimentation en eau, les variations de débits, la topographie, la végétation et les structures hydrauliques. Une approche méthodique et multidisciplinaire est donc nécessaire, intégrant l'hydrologie, la climatologie, l'agriculture et la socio-économie, pour obtenir des résultats précis et significatifs. Les modèles hydrauliques actuels ont des limites, notamment en ce qui concerne la prédition du comportement des canaux et des lacs dans le contexte des variations climatiques (Ramírez, 2000).

Pour surmonter ces défis, des propositions de solutions peuvent être formulées pour améliorer la compréhension de la dynamique de l'eau autour du lac de Guiers, élaborer des stratégies de gestion efficaces et promouvoir une agriculture durable. Ces efforts permettront également de fournir des recommandations pour les décideurs politiques et les communautés locales, facilitant ainsi l'élaboration de politiques et de programmes plus durables. Les recherches futures pourront se concentrer sur le développement de modèles hydrauliques robustes, adaptés aux particularités du lac de Guiers et du canal de Taouey, pour soutenir une gestion durable des ressources en eau, tant dans cette région que dans d'autres zones confrontées à des défis similaires.

1.2 Objectif de l'étude

1.2.1 Objectif général

L'objectif principal de cette étude vise à acquérir une compréhension du fonctionnement du canal Taouey et de son influence sur le remplissage du niveau du lac de Guiers au Sénégal, permettant ainsi une meilleure compréhension de la dynamique hydraulique du canal et le suivi de l'évolution du remplissage. Cet objectif général est décomposé en trois (3) sous-objectifs tels que :

1.2.2 Objectifs spécifiques

- i.Développer un modèle hydraulique du canal Taouey qui représente le comportement hydraulique qui va contribuer à l'amélioration de la disponibilité des ressources en eau et simuler son comportement;
- ii.Évaluer l'efficacité et la performance de l'outil de modélisation, en comparant les résultats simulés avec des données observées ;
- iii.Simuler des scénarios pour voir le comportement du régime hydraulique au niveau du lac, ces simulations permettront de comprendre la réaction du canal à différentes conditions et les débits d'eau nécessaires pour répondre aux demandes futures.

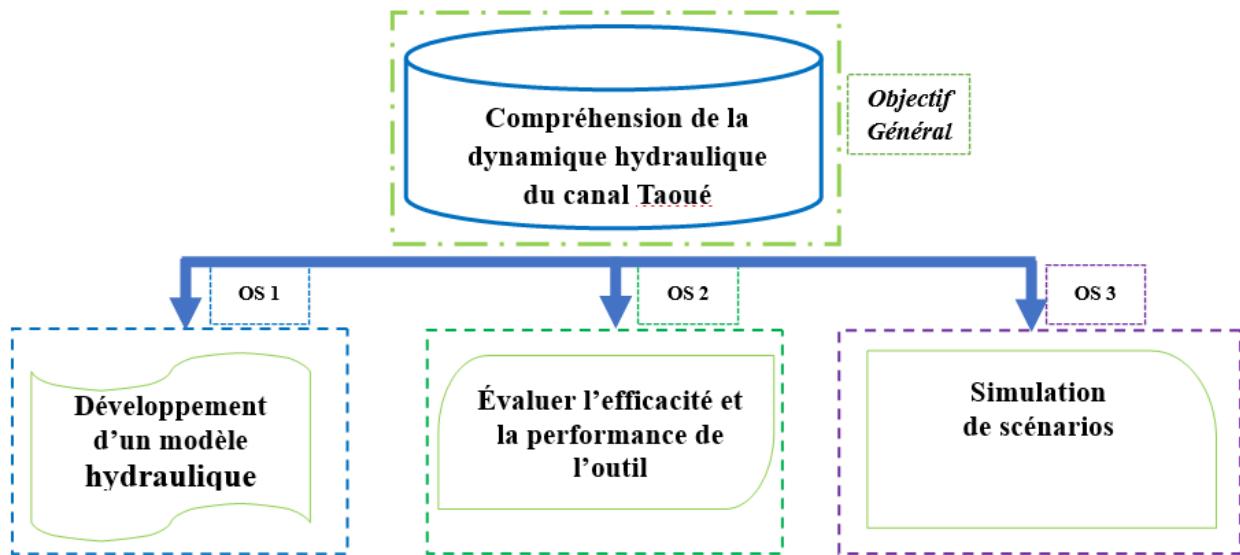


Figure 1-1 Objectif de l'étude

1.3 Hypothèses de travail

Pour effectuer cette recherche, il est important de poser des hypothèses qui peuvent être envisagées dans le cadre du présent travail :

- Les caractéristiques physiques et environnementales du canal Taouey ainsi que les variations climatiques (en particulier les variations saisonnières et les événements extrêmes) ont un impact significatif sur la disponibilité des ressources en eau dans le lac de Guiers et le comportement hydraulique.

- Le modèle hydraulique développé pourra fournir une représentation précise et fiable du processus complexe de l'hydrodynamique dans le lac et le canal Taouey sous différents scénarios d'usage de l'eau.
- L'utilisation de l'outil de simulation dans la gestion de l'eau du lac de Guiers contribuera à une utilisation plus efficace et durable des ressources en eau, et améliorer la précision des prévisions de gestion de l'eau dans la région du lac de Guiers.
- Les résultats du modèle peuvent être utilisés dans la gestion de l'eau, l'atténuation des impacts, la conservation des écosystèmes et la planification du développement de la région.

1.4 Justification de la recherche

La justification de cette recherche répond aux raisons suivantes :

- Le lac de Guiers est une source majeure d'eau potable vitale pour la population locale et celle du grand Dakar, qui représente 32% de la population nationale et 51% de la population urbaine (Banque Mondiale, 2022). Il est également crucial pour l'agriculture irriguée et les zones humides environnantes classées RAMSAR. Face aux défis du changement climatique, de la croissance démographique et du développement économique, le lac devient de plus en plus vulnérable. La modélisation peut aider à planifier l'utilisation future de l'eau en comprenant les interactions complexes. Cette recherche soutiendra les efforts de développement durable et de protection de l'environnement pour les générations futures dans la région du lac de Guiers.
- Le canal Taouey en tant que principale source d'alimentation du lac de Guiers joue un rôle clé dans la régulation du niveau d'eau, ainsi il est essentiel de développer un modèle hydraulique pour ledit canal qui revêt d'une importance stratégique et capitale pour la gestion des ressources en eau de la région.
- Le développement d'un outil de simulation, malgré le fait que le modèle ne soit pas encore directement exploitable par les gestionnaires, offrira un soutien précieux à la gestion des ressources hydriques. En fournissant une base pour affiner les prévisions et améliorer la précision des analyses, cet outil complétera les travaux antérieurs, il contribuera à renforcer la fiabilité des prévisions et à optimiser la gestion de l'eau.

- Bien que le lac soit vital pour la région, il existe des lacunes dans la compréhension actuelle de son fonctionnement, de ses interactions avec le climat et l'utilisation des terres, et de ses réponses aux pressions anthropique. Cette recherche peut combler ces lacunes et va aider les décideurs à prendre des décisions plus éclairées et à concevoir des politiques de gestion des ressources naturelles plus efficaces et durables.
- Les méthodes et les conclusions de ce projet de recherche peuvent avoir une applicabilité au-delà du Lac de Guiers, informant la gestion des ressources en eau dans d'autres régions arides et semi-arides avec les mêmes caractéristiques.

1.5 Méthodologie de la recherche

La méthodologie comprend une combinaison d'étapes :

1. Identification de la zone d'étude

La première étape de la démarche méthodologique consiste à identifier la zone d'étude, centrée sur le canal Taouey et le lac de Guiers. Elle débute par une évaluation initiale des caractéristiques générales de la région, incluant une analyse géographique, hydrologique et écologique pour obtenir une vue d'ensemble complète. Ensuite, la conceptualisation permet de définir clairement les objectifs de l'étude et de formuler les questions de recherche spécifiques, orientant ainsi les efforts vers les enjeux les plus pertinents. Enfin, la définition du problème vise à identifier les défis spécifiques liés à la gestion de l'eau, tels que les variations saisonnières des débits, la présence de végétation comme les Typhas, et les impacts du changement climatique.

2. Collecte de données:

La collecte de données joue un rôle important dans la construction d'un modèle hydraulique précis et fiable. Cette phase vise à rassembler des informations pertinentes sur les caractéristiques du canal et du lac, telles que la couverture végétale, les propriétés du sol, les conditions climatiques et les pratiques agricoles, tout en effectuant une analyse initiale pour comprendre le contexte hydrologique. Les données de base sont collectées à partir de diverses sources telles que les images satellites, les cartes topographiques, les données hydro-climatiques, les données sur l'usage des terres et de l'eau, etc. Pour réaliser cette étape, des outils tels que : les systèmes d'information géographique (SIG) comme : QGIS (RiverGIS), ArcGIS (HEC-GeoRAS), Global Mapper, etc. ainsi qu'un logiciel de gestion de bases et de traitement de données : PostgreSQL (PostGIS), seront

utilisés. Les méthodes de collecte de données impliquent l'acquisition de données sur la topographie, les caractéristiques du canal et du lac, les débits d'eau, les niveaux d'eau, la pluviométrie, la température, l'utilisation des terres, la qualité de l'eau et les mesures bathymétriques, entre autres. Les données seront examinées et utilisées pour alimenter le modèle. La préparation des données implique le filtrage, la transformation et l'organisation dans un format compatible avec le logiciel de modélisation hydraulique, en traitant les données manquantes, en normalisant et en mettant à l'échelle selon les besoins.

- Données hydrométriques : il existe des données de lectures de hauteur d'eau (niveau d'eau) disponibles depuis plus de 50 ans pour le fleuve, le lac et le canal, ainsi que les jaugeages effectués sur le canal.
- Données topographiques : il s'agit des profils en long et en travers, les pentes, les sections transversales, le fond des plans d'eau, etc. (obtenues à partir des données bathymétriques et SRTM (DEM)).
- Données sur les caractéristiques du canal : dimensions initiales (section, pentes, rugosités, etc.) du canal compte tenu de plusieurs contraintes : Typha, l'envasement, etc.
- Données sur les variations saisonnières : variations des débits, conditions météorologiques.
- Données sur les usages de l'eau : Elles incluent les prélèvements pour l'industrie, l'irrigation agricole, la consommation domestique, et autres usages locaux.

Pour les prélèvements industriels, elles sont souvent disponibles auprès des autorités locales ou des entreprises elles-mêmes et incluent les volumes d'eau extraits, les périodes de prélèvement, et les variations saisonnières.

Cependant, les données sur l'irrigation agricole et les usages domestiques locaux sont souvent moins accessibles. Pour combler cette lacune, des images satellites peuvent être utilisées pour suivre l'évolution des surfaces cultivées et des zones irriguées. Ces images, disponibles auprès de plateformes telles que Landsat, Sentinel, ou MODIS, permettent de détecter les changements dans l'utilisation des terres et d'estimer les volumes d'eau nécessaires pour l'irrigation à différentes périodes de l'année.

Des données fournies par l'OLAC, la CSS, la SONES, et d'autres institutions locales peuvent offrir des informations sur les usages domestiques de l'eau, les prélèvements pour l'alimentation en eau potable, et les politiques de gestion de l'eau en place. Elles comprennent souvent des statistiques sur la consommation d'eau, les infrastructures de distribution, et les programmes de gestion de la demande en eau.

Des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des agriculteurs locaux sont également essentiels pour obtenir des informations détaillées sur les pratiques d'irrigation et les volumes d'eau utilisés.

3. Le traitement des données :

L'étape consiste à préparer les informations recueillies pour les rendre utilisables dans le modèle hydraulique. Cela implique d'ajuster et de digitaliser les données relatives au canal, aux berges et au sens d'écoulement, ainsi que de définir les coupes transversales nécessaires pour représenter avec précision le réseau hydrographique.

4. Choix et développement du modèle hydraulique :

Le choix et le développement du modèle hydraulique approprié sont des étapes fondamentales pour simuler le comportement du canal Taouey. Il est essentiel d'identifier et de sélectionner le logiciel adapté en fonction des critères prédéfinis tels que les caractéristiques spécifiques du site, les objectifs de l'étude et les ressources disponibles. Parmi les options disponibles telles que : HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers-River Analysis System), MIKE développé par DHI (Danish Hydraulic Institute), SWMM (Storm Water Management Model), le choix sera fait en fonction de ces paramètres. Une fois le logiciel sélectionné (HEC-RAS), la construction du modèle implique l'intégration de toutes les données préparées, incluant la définition de la géométrie, des conditions aux limites, des paramètres de rugosité, ainsi que la spécification des débits d'entrée et de sortie, parmi d'autres éléments essentiels. Le but de cette étape est de créer un modèle numérique représentatif du canal Taouey pour simuler son comportement hydraulique. Les données géographiques, hydrologiques et hydrauliques seront incorporées dans le modèle, suivie d'une étape de calibration pour ajuster les paramètres et reproduire fidèlement les conditions réelles observées, suivie de la comparaison des résultats du modèle avec des données hydrométriques ou des mesures sur le terrain pour vérifier leur concordance et apporter les corrections nécessaires. Enfin, le modèle sera validé en comparant les résultats simulés avec des données observées, garantissant ainsi sa fiabilité et sa précision, et assurant ainsi sa pertinence pour les applications futures.

5. Simulation des scénarios :

Avant de procéder à la simulation, il est nécessaire de calibrer, valider et évaluer la capacité du modèle à reproduire fidèlement le comportement hydraulique du canal Taouey. Cette étape comprend la vérification de la stabilité du modèle et une analyse statistique à l'aide d'indicateurs de performance tels que le RMSE, le NSE et le KGE pour mesurer sa précision.

La simulation des scénarios est ensuite essentielle pour évaluer l'impact du canal Taouey sur le niveau du lac de Guiers, les vitesses d'écoulement et les variations des débits d'eau. Le modèle hydraulique développé servira à simuler divers scénarios, y compris les variations saisonnières des débits et les événements de crue potentiels.

6. Analyse des résultats et recommandations :

L'analyse des résultats et la formulation de recommandations constituent une étape cruciale visant à exploiter les données issues des simulations pour proposer des directives et des mesures pour la gestion efficace des ressources en eau. Elle permet d'examiner les données simulées et de dériver des conclusions qui orienteront les actions futures. Les méthodes appliquées consistent à analyser les données simulées afin d'identifier les tendances, les points critiques et les contraintes du système hydraulique. Sur la base de cette analyse, des recommandations sont formulées pour une gestion optimale du canal Taouey et du lac de Guiers.

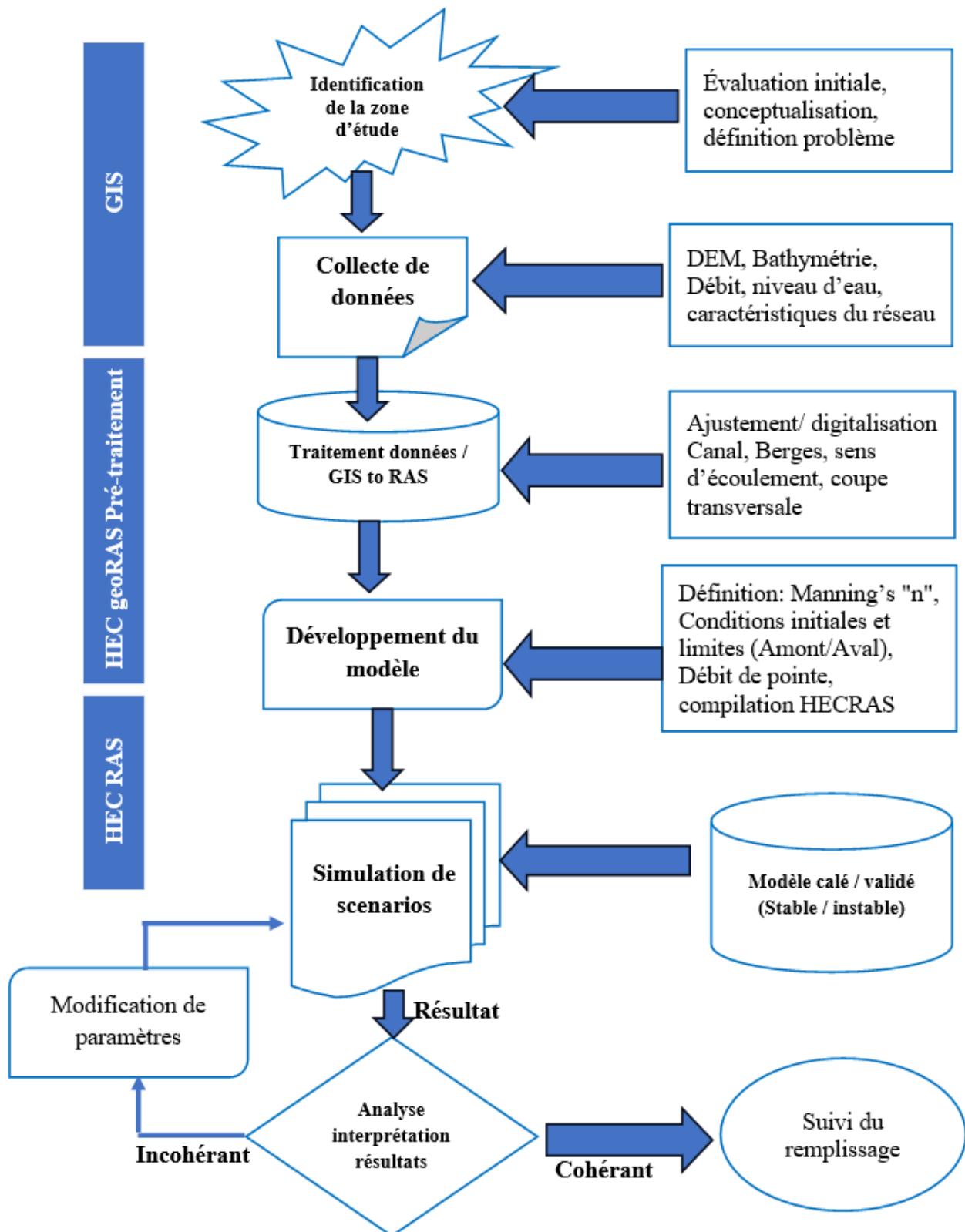


Figure 1-2 Organigramme illustrant la méthodologie de la recherche

1.6 Importance et originalité de la recherche

L'importance et l'originalité de cette recherche résident dans son approche intégrée et son adaptation aux défis spécifiques du canal de Taoué et du lac de Guiers. Le canal de Taoué joue un rôle crucial dans la régulation des niveaux d'eau du lac, directement influencés par les conditions climatiques locales et les prélèvements. Cette étude se distingue par son ambition de développer un modèle hydraulique précis du canal, permettant de simuler et de comprendre les dynamiques complexes de l'alimentation en eau dans un contexte caractérisé par une variabilité climatique et une pression anthropique croissante.

Les outils existants offrent déjà une compréhension de la dynamique de l'eau dans le canal, mais leur application spécifique au canal de Taoué et au lac de Guiers n'a pas été pleinement explorée. Cette recherche comble ce vide en ajustant ces outils pour qu'ils tiennent compte de la compréhension des dynamiques hydrauliques. L'originalité de ce travail réside dans l'intégration de données environnementales et socio-économiques locales dans le processus de modélisation, ce qui permet une analyse plus fine et des recommandations adaptées à la réalité du terrain.

Les avantages de ce travail sont multiples. Il améliore la précision des prédictions hydrologiques, facilite la compréhension de l'interaction entre le canal et le lac, etc. Toutefois, des défis persistent, notamment la collecte de données précises et à jour, ainsi que la modélisation des effets à long terme des variations climatiques et des activités humaines. Ce travail propose donc non seulement une amélioration des outils existants, mais aussi une compréhension des échanges pour mieux gérer les ressources en eau dans cette région stratégique du Sénégal.

En synthèse, cette recherche contribue à la fois à l'avancement des connaissances scientifiques et à l'amélioration des simulations, en adaptant les outils de modélisation aux conditions locales du canal de Taoué et du lac de Guiers. Elle ouvre la voie à une meilleure compréhension des dynamiques hydrauliques dans des contextes similaires, tout en offrant des perspectives concrètes pour l'amélioration de la sécurité hydrique et la durabilité agricole dans la région du lac de Guiers.

1.7 Organisation générale du mémoire

L'organisation de cette recherche repose sur une structure méthodique visant à explorer en profondeur le sujet du canal Taouey et son impact sur le lac de Guiers au Sénégal, tout en fournissant des recommandations pratiques pour la gestion des ressources en eau dans la région. Il est composé de sept (7) chapitres.

Le premier chapitre retrace l'introduction qui expose le contexte, l'objectif de la recherche et la justification sur la pertinence de l'étude. Le second chapitre aborde la revue de littérature et examine en profondeur les travaux antérieurs sur les lacs notamment celui de Guiers, en mettant en évidence les principaux résultats et en identifiant les domaines où des recherches supplémentaires sont nécessaires. Le troisième chapitre, la présentation de la zone d'étude offre un aperçu détaillé du canal Taouey et du lac de Guiers, fournissant ainsi un fondement essentiel pour la recherche. Le quatrième chapitre : la méthodologie décrit les approches, les outils et les techniques utilisés pour collecter et analyser les données, ainsi que les étapes spécifiques suivies pour atteindre les objectifs de l'étude. Le cinquième chapitre : les résultats présentent les découvertes du modèle hydraulique, en les interprétant et en les reliant aux objectifs initiaux, tout en proposant des recommandations pratiques pour les applications futures. Le sixième chapitre : la discussion : analyse et interprète les résultats, en les comparant avec les travaux antérieurs et en discutant de leurs implications théoriques et pratiques. Et le dernier chapitre, la conclusion et les perspectives : récapitule les principales conclusions de l'étude, en soulignant leurs implications et en proposant des orientations pour les recherches futures suggérant des pistes d'exploration pour améliorer la compréhension de la dynamique hydraulique du canal Taouey et du lac de Guiers. En outre, ce chapitre identifie les limitations inhérentes à l'étude, telles que les contraintes de données, les simplifications du modèle, ou d'autres facteurs qui ont pu influencer les résultats. Enfin les annexes qui contiennent des informations complémentaires telles que des données brutes, des graphiques supplémentaires.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 État de l'art sur les études dans le lac de Guiers

Le lac de Guiers est une priorité pour le gouvernement sénégalais en raison de son importance cruciale pour l'équilibre régional. Les nombreux projets d'aménagement, qu'ils soient en cours ou prévus, soulignent l'engagement du gouvernement à gérer et à préserver cette ressource vitale pour la région (Sambou et al., 2019).

2.1.1 Description du lac de Guiers

Le lac est une dépression allongée du nord vers le sud avec une profondeur comprise entre de 2 à 4 mètre, il est situé sur la rive gauche du fleuve Sénégal (Cogels, F. & Gac, 1983). Il est alimenté à partir du pont Richard-Toll via la Taoué ou Tahouey (précédemment affluent et défluent) avec une forme sinuuse à l'origine (Cogels, F. X. & Gac, 1985).

Le lac n'est pas trop profond (GAC, J. Y. et al., 1991), mais il constitue une réserve d'eau très importante pour le Sénégal, non seulement pour l'alimentation en eau potable de la métropole de Dakar, l'irrigation des champs de canne à sucre de Compagnie sucrière sénégalaise (CSS) à Richard-Toll et autres (Wade et al., 2005).

Entre 1968 et 1985, le Sénégal a connu la sécheresse ce qui conduit à l'assèchement du Ferlo (défluent du lac), l'État sénégalais prirent la décision de construire un barrage (digue) à Keur Momar Sarr afin de sauvé le lac et de satisfaire les besoins en eau de la région, cela conduit à beaucoup d'aménagements (Gac, J.-Y. & Kane, 1986).

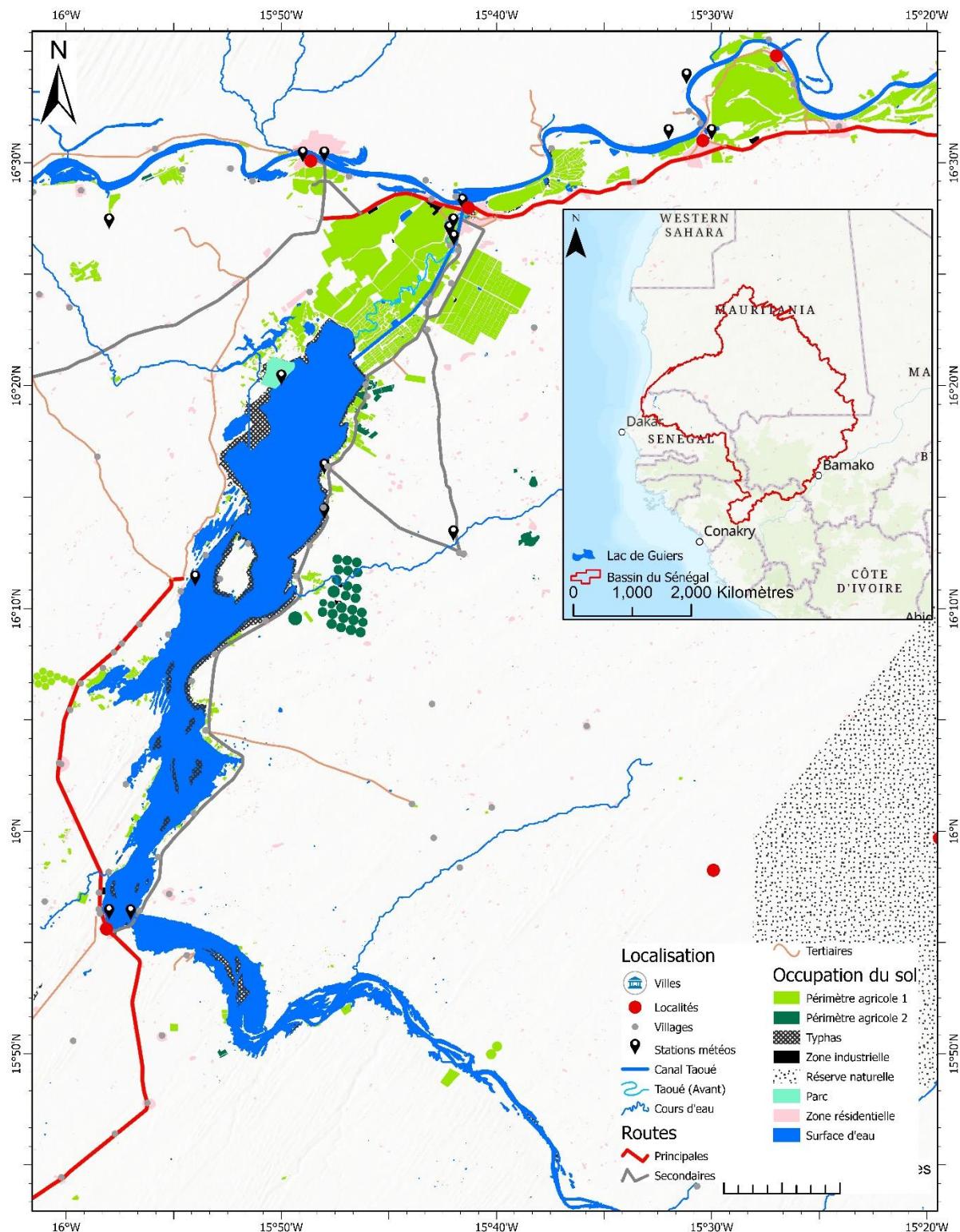


Figure 2-1 : Présentation du lac de Guiers

2.1.2 Historique du fonctionnement du lac de Guiers

L'histoire du fonctionnement du lac de Guiers est marquée par divers facteurs : hydrologiques et l'intervention humaine qui peuvent pour réguler le niveau de l'eau.

Le niveau d'eau du lac de Guiers est influencé par plusieurs facteurs, notamment les précipitations, l'évaporation, les débits d'eau de la rivière Sénégal et de ses affluents, et les pompes pour l'irrigation et la consommation humaine, en raison de sa faible profondeur, le lac est sensible aux variations du niveau d'eau (Diouf & Bousso, 1988).

En 2019, il a été observé une inversion du sens d'écoulement entre Podor et Richard Toll, avec un reflux du fleuve vers l'amont dans cette section, ce qui est dû à un niveau d'eau plus bas à Podor comparé à Richard Toll, couplé à des débits lâchés à Diama souvent nuls (Bader & Poussin, 2019). Pendant cette période, la pente de la ligne d'eau était négative entre Podor et Richard Toll, mais positive entre Richard Toll et Diama, indiquant que le fleuve recevait un apport du lac de Guiers par le canal de Taouey, ce qui a entraîné une remontée du fleuve en aval malgré les faibles débits à Podor (Bader & Poussin, 2019).

De son état naturel (avant 1916) à celui de nos jours modifié (artificiel), le lac de Guiers a connu plusieurs modifications de son système fluvio-lacustre due aux aménagements de plus en plus élaborés (Bader et al., 2015). D'après (Gac, J.-Y., 1987), on peut classer en quatre catégories :

2.1.2.1 Étape naturelle (avant 1916)

Avant 1916, le fonctionnement du lac de Guiers reposait essentiellement sur des processus naturels, sans intervention humaine significative. À cette époque, la connexion entre le lac et le fleuve Sénégal, le Ferlo était constante (voir fig. 2.5), permettant aux eaux de circuler librement et par gravité selon la côte d'eau entre les deux milieux en fonction de la crue et de la remontée saline (Gac, J.-Y., 1987). Ce système fonctionnait selon le principe des vases communicants, où le plan d'eau cherchait constamment un état d'équilibre modulé par les flux et reflux dans la Taoué (Cogels, F.-X. et al., 1993).

Les variations saisonnières des précipitations et des débits du fleuve influençaient directement le niveau d'eau du lac, créant un équilibre dynamique entre les apports d'eau et les évacuations naturelles par la Taoué. En somme, le lac de Guiers était un écosystème dynamique, étroitement lié aux cycles hydrologiques de la région.

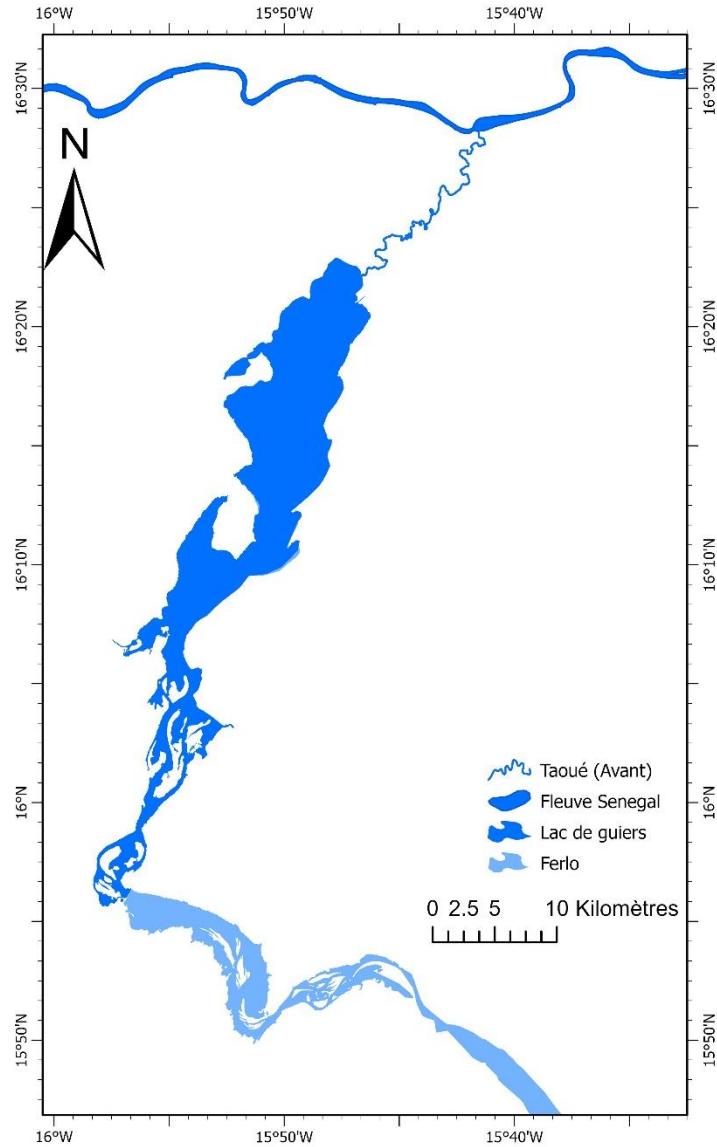


Figure 2-2 : Chronologie des aménagements : étape naturelle

2.1.2.2 Étape intermédiaire (de 1948 à 1983)

Durant la période intermédiaire, de 1948 à 1983, le fonctionnement du lac de Guiers a connu plusieurs évolutions significatives dans la gestion de ses ressources en eau. Avant 1980, le lac était isolé du fleuve Sénegal dès le début de la décrue, ce qui limitait son remplissage et le soumettait à des pertes par évaporation et infiltration, ainsi qu'à l'usage pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable (Cogels, F. & Gac, 1983). Cependant, l'approvisionnement continu des périmètres agricoles en eau du fleuve a favorisé l'intrusion précoce et rapide d'eau salée dans la vallée du Sénegal. En 1956, la construction de la digue de Keur Momar Sarr visait à isoler le lac de la vallée du Ferlo pour en faire un réservoir d'eau douce, tandis qu'en 1974, le canal rectiligne de la Tahouey

a été construit pour augmenter sa capacité de transfert (Bader, 1992). À partir de 1980, la construction d'une digue aval sur le canal rectifié de la Tahouey a permis de protéger le lac sur une période prolongée, préservant ainsi ses maigres réserves. En 1980, un second pont-barrage a été érigé sur la Tahouey pour contrôler les échanges de débit entre le fleuve et le lac (GAC, J. Y. et al., 1991). Le remplissage annuel du lac était conditionné par l'ouverture des vannes vers fin juillet-début août, dès que le niveau du fleuve à Richard Toll répondait à certaines conditions. Les vannes étaient maintenues ouvertes environ trois mois, permettant ainsi le remplissage maximal du lac, avant d'être fermées lors de la décrue du fleuve (Bader et al., 2015). Le niveau du lac diminuait ensuite sous l'effet des prélèvements et de l'évaporation, mais restait supérieur à celui du fleuve pendant une grande partie de l'année.

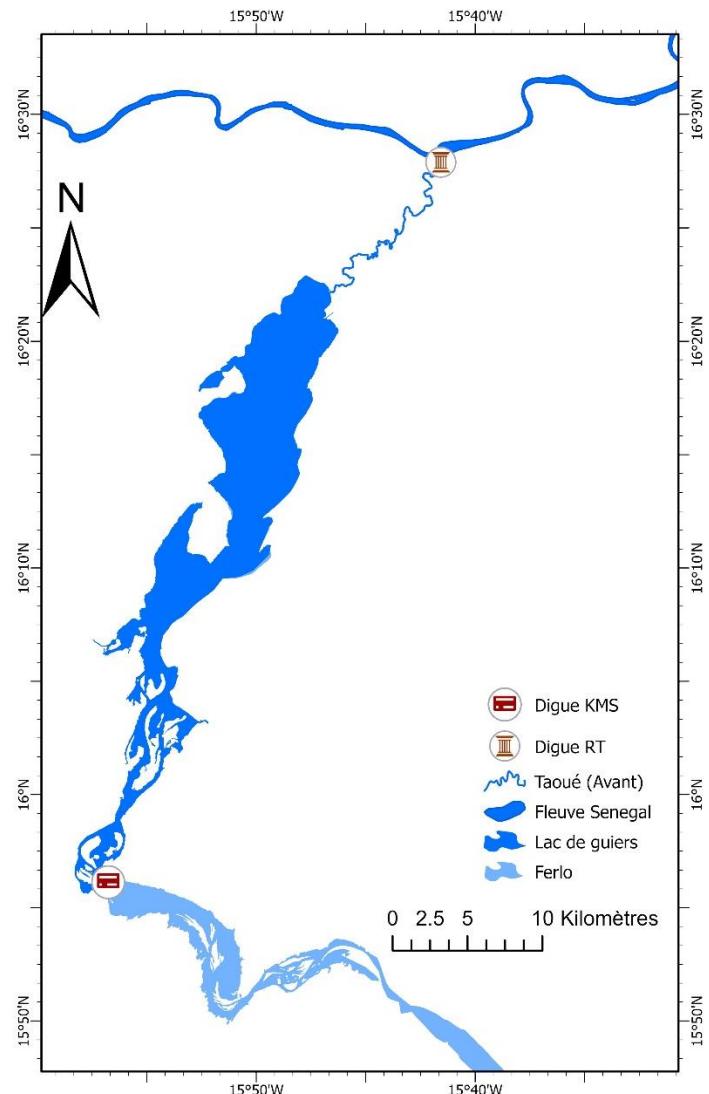


Figure 2-3 : Chronologie des aménagements : étape intermédiaire (1948-1982)

2.1.2.3 Étape actuelle (depuis 1983)

Jusqu'en octobre 1983, le remplissage du lac commençait généralement vers juillet-août, lorsque la crue du fleuve chassait l'eau salée de l'estuaire, élevant ainsi le plan d'eau par rapport au niveau du lac (Bader, 1997; Bader et al., 2015). Ce remplissage avait une durée d'environ trois mois, suivi d'une période où le lac était isolé (Bader et al., 2015). Pendant cette période, le niveau du lac diminuait progressivement sous l'effet des prélèvements et de l'évaporation, bien qu'il reste généralement plus élevé que celui du fleuve pendant une grande partie de l'année, avec un marnage annuel important de 133 à 262 cm (Bader et al., 2015).

Depuis la réalisation du barrage de Diama en 1985, le lac de Guiers a connu un changement significatif dans son fonctionnement hydraulique. Avant cette date, la langue salée remontait sur plus de 200 km en amont de l'embouchure, entravant le développement des cultures de contre-saison (Bader et al., 2015). Cependant, après la construction du barrage, cette contrainte majeure a été éliminée, permettant la création d'une réserve d'eau douce amont (Bader et al., 2015). Cette réserve, maintenant constamment douce, est utilisée pour l'irrigation des périmètres agricoles et pour l'approvisionnement en eau potable (Gac, J.-Y., 1987).

Le remplissage annuel du lac suit un schéma bien défini, où lors de l'arrivée de l'onde de crue, une communication est établie entre le fleuve et le lac (Gac, J.-Y., 1987). Les eaux de crue remplissent d'abord la dépression lacustre depuis l'amont, tandis que le barrage de retenue stocke les excédents en aval et une fois que le niveau du lac atteint une côte suffisante, la communication avec le fleuve est interrompue. Si nécessaire, des "lâchers" d'eau douce peuvent être effectués vers l'embouchure du fleuve par le canal de Taouey pour gérer l'excédent du lac (Alexis, 2016; Bader et al., 2015). En période de saison sèche, si le niveau du lac descend en dessous d'un seuil critique, une quantité supplémentaire d'eau peut être injectée dans le lac si les conditions le permettent (Bader et al., 2015).

Depuis mars 1992, l'eau douce dans le fleuve à Richard-Toll est disponible en permanence et à un niveau élevé (Bader et al., 2015). Dans ces conditions, l'isolement périodique du lac n'est plus nécessaire pour maintenir un stock d'eau douce important (Cogels, F.-X. et al., 1993). Les vannes sont donc souvent ouvertes, permettant une connexion continue entre le fleuve et le lac. Ce fonctionnement assure que le niveau du lac reste élevé en permanence, avec de faibles fluctuations annuelles, équilibrant les apports et les prélèvements d'eau. Parfois, lorsque le niveau du fleuve

baisse, les vannes sont fermées pour préserver le niveau du lac, ajustant ainsi la gestion hydrologique selon les conditions.

Le niveau du lac reste maintenant élevé en permanence et fluctue avec un faible marnage annuel, reflétant ainsi l'équilibre entre les apports et les prélevements d'eau (Gac, J.-Y., 1987).

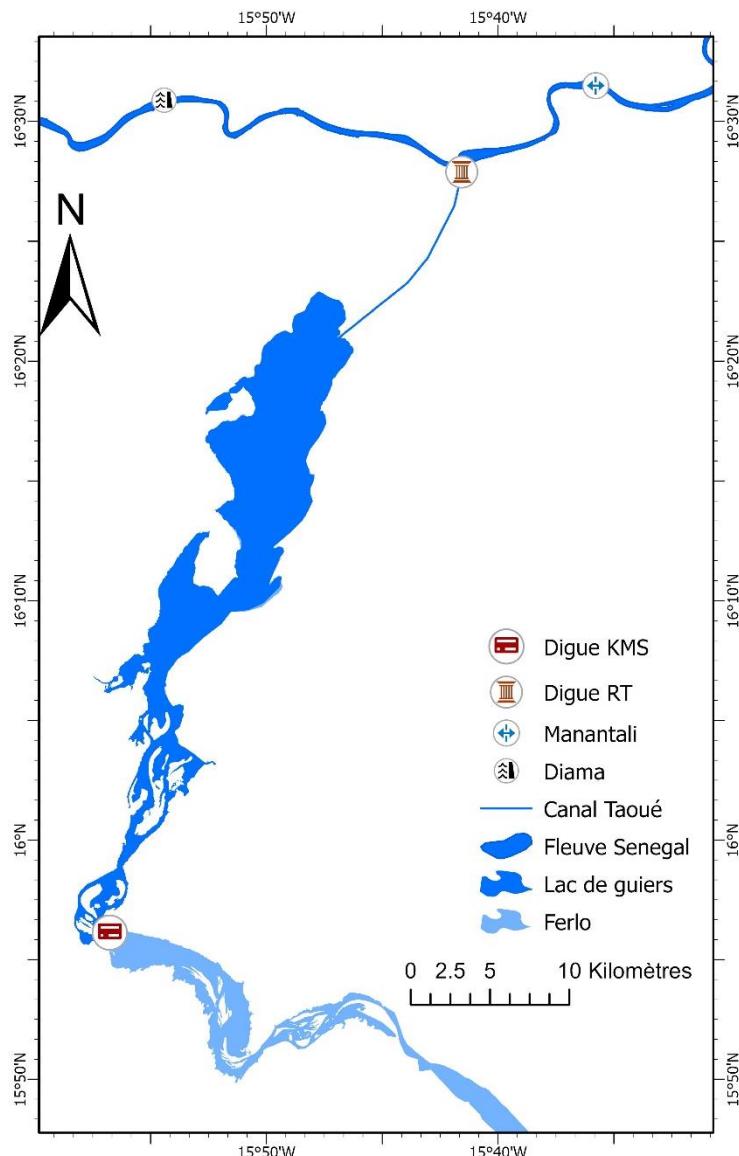


Figure 2-4 : Chronologie des aménagements : étape actuelle (depuis 1982)

2.1.2.4 Projection future

Le lac de Guiers fournit actuellement environ plus 40% de l'approvisionnement en eau du grand Dakar (Banque Mondiale, 2022), ce qui en fait une ressource stratégique pour le Sénégal. Cependant, sa qualité et sa sécurité d'accès sont menacées d'où la mise en place de mesures de

protection pour sécuriser le lac et réduire la pollution due à l'activité agricole et aux rejets d'eaux usées (Banque Mondiale, 2022).

Les stations de traitement de Ngnith (capacité de production de 64 000 m³/j), de Keur Momar Sarr 1 et 2 (130 000 m³/j) jouent un rôle dans l'approvisionnement en eau potable de la population locale et celle de Dakar (Bader et al., 2015). La mise en service de KMS3 augmentera la production dans un premier temps de 100 000 m³/jour actuellement à 200 000 m³/jour avec d'une conduite de refoulement et de transport d'environ 210 km entre le Lac de Guiers et la ville de Dakar (BEI, 2016).

Historiquement, le lac de Guiers était alimenté par le Ferlo. Actuellement, la digue de Keur Momar Sarr, équipée d'un système de vannes, permet de contrôler les échanges de débit entre le lac et la vallée fossile du Ferlo (Bader et al., 2015). Cette infrastructure offre ainsi une opportunité de réhabiliter le fonctionnement de ce bassin versant dans un futur proche.

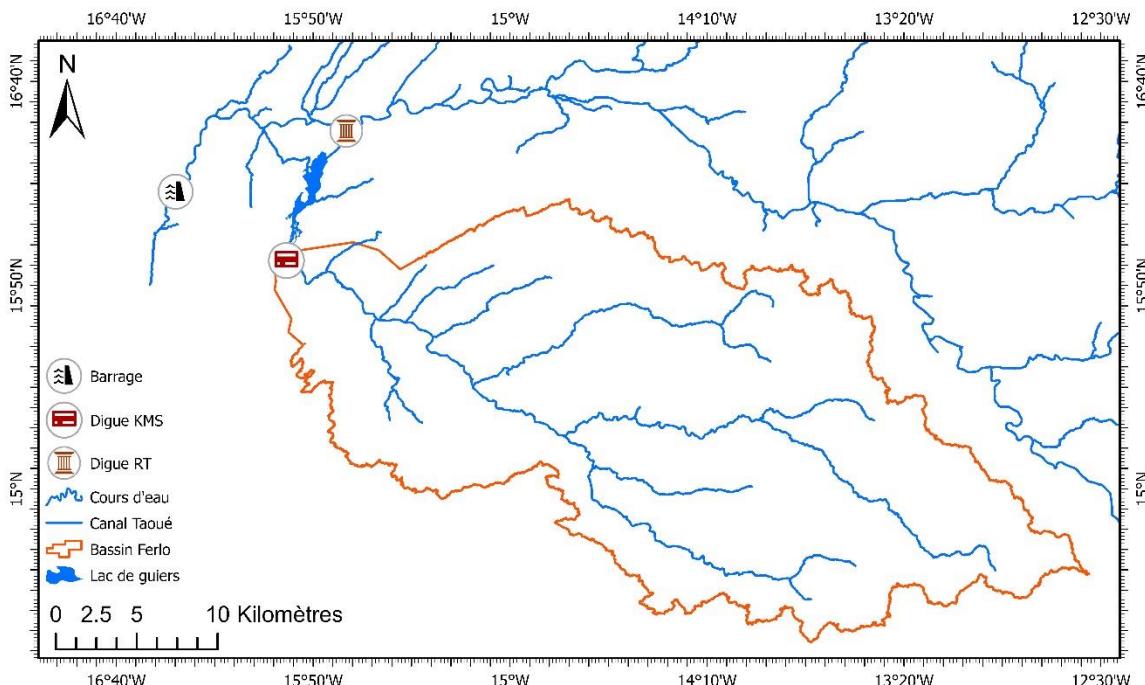


Figure 2-5 : Chronologie des aménagements : projection future

2.2 Études antérieures sur la modélisation hydraulique des cours d'eau et lacs

Les variations brusques des régimes et de l'intensité des précipitations engendrent des risques naturels associés à la gestion de l'eau, tels que les inondations et les sécheresses (Dasallas et al., 2019). Dans les grands systèmes fluviaux, les crues se propagent lentement sur de vastes distances, contrastant avec les crues éclairis qui surviennent rapidement en zones urbaines ou dans de petits bassins. Les inondations sont particulièrement considérées comme les phénomènes les plus fréquents et les plus dangereux parmi ces risques (Christensen et al., 2013). De ce fait, un effort global a été entrepris afin de concevoir des modèles hydrauliques efficaces et précis (Dasallas et al., 2019). Ces outils sont essentiels pour la prévention et l'atténuation des catastrophes liées aux inondations ainsi que pour la gestion globale des ressources en eau (Douben, 2006).

Au fil des années, une multitude de modèles hydrauliques ont été créés, faisant appel à diverses méthodologies. Ces modèles peuvent être classifiés en différentes catégories telles qu'empiriques (fondés sur des données), hydrodynamiques, ou basés sur des processus physiques (Dasallas et al., 2019).

Les modèles hydrodynamiques utilisent des équations mathématiques pour imiter le comportement des fluides et se divisent en modèles 1D, 2D et 3D (Teng, Jin et al., 2017). Les modèles 1D, efficaces en termes de calcul, simulent les écoulements longitudinaux dans les rivières et canaux, mais ne peuvent pas représenter la diffusion latérale des ondes de crue et présentent des limitations liées à la discrétisation de la topographie (Dasallas et al., 2019; Teng, Jin et al., 2017). Les modèles 2D, en revanche, sont utilisés pour les plaines inondables et les lacs, offrant une visualisation plus détaillée des étendues d'eau (An, Hyunuk & Yu, 2012; An, H. et al., 2015). Les modèles 3D permettent de représenter les caractéristiques verticales des écoulements, bien que leur utilisation soit moins répandue et plus complexe (Feng et al., 2015; Teng, J. et al., 2017). L'approche combinée 1D-2D, développée par le HEC-RAS, lie dynamiquement les modèles 1D et 2D, améliorant ainsi la représentation des interactions entre rivières et plaines inondables (Brunner, 2002; Noh et al., 2018). Cette méthode intégrée est prometteuse pour des analyses plus précises et réalistes des phénomènes hydrauliques, bien qu'elle demande des ressources informatiques plus importantes (Betsholtz & Nordlöf, 2017; Rubiu, 2018; Tazin, 2018). Le choix entre les modèles

dépend de la complexité de l'écoulement à simuler et des besoins de l'étude, les modèles 2D et 3D offrant plus de détails au prix d'une mise en œuvre plus coûteuse (Dasallas et al., 2019).

2.2.1 Modélisation hydraulique des canaux

La modélisation hydraulique des canaux implique l'application de principes et de techniques mathématiques pour simuler l'écoulement de l'eau à travers un canal (Sturm, 2001). Cela peut être utilisé pour des applications variées telles que la conception de canaux d'irrigation, la gestion des inondations, la génération d'énergie hydroélectrique, et plus encore (Roberson et al., 1998).

Elle est essentielle dans plusieurs domaines, y compris : la gestion de l'eau, l'ingénierie environnementale, la génération d'énergie et elle présente certains défis, tels que la nécessité de données précises, la compréhension des processus complexes impliqués, et les incertitudes inhérentes à tout modèle (Loucks & Van Beek, 2017).

La modélisation hydraulique des canaux est un domaine dynamique et vital qui continue d'évoluer avec le développement de nouvelles technologies et techniques. Elle joue un rôle crucial dans notre capacité à gérer et à utiliser efficacement nos ressources en eau et est un élément clé dans la planification et la prise de décision dans de nombreux secteurs liés à l'eau (Saravanan et al., 2009).

2.2.2 Modélisation hydraulique des lacs

La modélisation hydraulique des lacs consiste en l'application de modèles mathématiques et informatiques pour simuler et analyser les mouvements et les caractéristiques de l'eau dans les lacs (Zieminska-Stolarska et al., 2012). Cela englobe des aspects tels que la circulation de l'eau, les interactions avec les sédiments et la végétation, les réponses aux changements climatiques, et l'effet des activités humaines (Teeter et al., 2001).

La modélisation hydraulique des lacs se heurte à des défis inhérents à la complexité des systèmes lacustres eux-mêmes (Picouet et al., 2005). Les lacs sont souvent affectés par un large éventail de facteurs physiques, chimiques et biologiques qui interagissent de manière complexe (Adrian et al., 2009).

Les applications de la modélisation hydraulique des lacs sont vastes, allant de la gestion de la qualité de l'eau à la prévention des inondations et à la planification de structures hydrauliques (Loucks & Van Beek, 2017).

2.2.3 La modélisation hydraulique du lac Guiers et du fleuve Sénégal

La remise en eau du lac de Guiers par le fleuve Sénégal via le canal de Taouey a créé de nouvelles conditions pour l'environnement naturel et humain (Duvail, 2002). Ces changements rapides nécessitent des stratégies adaptatives dynamiques, rendant indispensable la modélisation hydraulique du lac, du canal et du fleuve pour une gestion concertée. Le principal défi est de choisir les scénarios appropriés pour le modèle hydraulique afin de décrire le fonctionnement du système et d'établir une relation entre l'hydraulique et la dynamique spatiale.

Ould Baba M. L (1998) utilise deux méthodes pour modéliser le fonctionnement hydraulique du bas-delta. La première consiste à calculer les bilans d'eau à l'échelle des bassins hydrologiques sur une base journalière et à transformer les volumes transités en hauteurs, comparés ensuite aux hauteurs d'eau observées. Cette méthode montre des limitations dans la restitution de la dynamique spatiale des inondations. La seconde méthode intègre les données hydrologiques dans un modèle hydraulique unidimensionnel (Mike 11, du Danish Hydraulic Institute) associé à un modèle numérique de terrain, générant des cartes d'inondations ((Duvail, 2002; Duvail S., 2001)).

Une modélisation hydraulique des écoulements du fleuve Sénégal, réalisée en 2002, implique une gestion couplée des deux barrages avec des préoccupations sécuritaires en aval de Diama (Michel Mietton, 2005; PNUE, 2002).

Pour la modélisation du lac, Alexis (2016) utilise plusieurs méthodes, incluant les modèles 1D et 2D, ainsi que la modélisation par évaporation, pour comprendre le système hydraulique du lac de Guiers, notamment son remplissage depuis le fleuve via le canal de Taouey. L'objectif est de mettre en place un modèle d'écoulement fiable pour évaluer les volumes d'eau disponibles et optimiser la gestion de ce réservoir vital pour le Sénégal (Alexis, 2016).

2.3 Classification des modèles hydrauliques

Les modèles hydrauliques sont classés en différentes catégories en fonction de leur complexité, de leur domaine d'application et de leur approche de modélisation (Teng, J. et al., 2017). Ils visent à comprendre les processus d'écoulement des canaux, des lacs, etc. ainsi qu'à prédire les variables associées telles que le volume, le niveau d'eau, l'étendue de l'inondation et la vitesse d'écoulement (Munawar et al., 2022). Ces prévisions sont cruciales pour la compréhension de la dynamique des cours d'eau et pour la gestion des risques liés aux inondations (Tazin, 2018; Teng, J. et al., 2017).

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de classification, les principales catégories sont décrites ci-dessous :

2.3.1 Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont des outils hydrauliques qui se fondent principalement sur des données observées pour établir des relations entre les variables hydrauliques. Contrairement aux modèles analytiques ou numériques, ils reposent sur des corrélations statistiques plutôt que sur des équations physiques. Bien qu'ils soient souvent simples à utiliser et utiles dans de nombreuses situations pratiques, ils peuvent être limités en termes de généralisation et de précision dans des conditions différentes de celles pour lesquelles ils ont été développés (Teng, J. et al., 2017).

Les avancées technologiques ont permis la collecte, le traitement et l'analyse de données liées aux inondations, notamment des mesures sur le terrain, des enquêtes et des images satellite. Ces données, bien qu'utiles, ne représentent qu'une partie de la réalité et sont soumises à des hypothèses et des incertitudes. Les modèles empiriques, bien que considérés comme robustes et précis, sont en constante évolution (O'Connor and Costa, 2004). Leurs résultats sont largement utilisés pour soutenir la prise de décision et servent de référence pour d'autres méthodes, telles que la surveillance des crues et la validation des modèles hydrodynamiques (Smith, 1997).

2.3.2 Modèles hydrodynamiques

Les modèles hydrodynamiques sont des outils mathématiques utilisés pour simuler le mouvement des fluides, en particulier dans les cours d'eau, les lacs et les zones inondables (Smith, 1997). Ils reposent sur des équations physiques fondamentales et nécessitent souvent des calculs informatiques pour résoudre les interactions complexes (Teng, Jin et al., 2017). Ces modèles prennent en compte divers facteurs, tels que la topographie, la météo et les interactions humaines, pour prédire des variables hydrauliques comme le niveau d'eau et la vitesse du courant. Ils peuvent être classés en modèles 1D, 2D et 3D en fonction de leur représentation spatiale. Les modèles hydrodynamiques sont utilisés pour comprendre et gérer les ressources en eau, ainsi que pour planifier des interventions d'urgence en cas d'inondation.

2.3.2.1 Modèles 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 (Teng, Jin et al., 2017). 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 de 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, Jin et al., 2017).

2.3.2.2 Modèles 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, Jin et al., 2017). Bien que plus complexes et gourmands en ressources informatiques que les modèles 1D, ils offrent une meilleure précision pour la modélisation de 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 (Roberts et al., 2015). Divers schémas numériques sont utilisés pour approximativement résoudre ces équations. Classés selon leur stratégie de discréétisation numérique, leur représentation spatiale et leur discréétisation temporelle, ces modèles cartographient l'étendue des inondations et estiment les risques d'inondation (Teng, Jin et al., 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 et al., 1998; Teng, Jin et al., 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; Neal et al., 2019; Teng, Jin et al., 2017).

Les caractéristiques techniques des modèles 2D selon Teng, Jin et al. (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, Jin et al., 2017). (voir Tab. 2.1).

Tableau 2-1 : Caractéristiques techniques des modèles hydrodynamiques 2D (Teng, Jin et al., 2017)

Nom du modèle	Résolution d'équation (eaux)	Schéma numérique	Discrétisation du temps	Discrétisation de l'espace	Algorithme capture de choc	Parallélisable	Note
ANUGA Hydro	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maille souple	Solveur de Riemann	Oui	
TUFLOW Classique 2D	Peu profondes	Différence finie	Implicite	Maillage structuré	Non	Non	
GPU TUFLOW	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maillage structuré	Non	Non	
TUFLOW FV	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maille souple	Oui	Oui	
DIVAST-TVD	Peu profondes	Différence finie	Explicite	Maillage structuré	TVD	Non	
Solveur TVD 2D Flood Modeler Pro	Peu profondes	Différence finie	Explicite	Maillage structuré	TVD	Non	DIVAST-TVD
Suite SOBEK	Peu profondes	Différence finie	Implicite	Maillage structuré	Oui	Non	
MIKE21	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maille souple	Oui	Oui	
TÉLÉMAC 2D	Peu profondes	Élément fini/Volume fini	Implicite /Explicite	Maillage non structuré	Oui	Oui	
InfoWorks 2D	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maille souple	Solveur de Riemann	Non	ISIS 2D
BreZo	Peu profondes	Volume fini	Explicite	Maillage non structuré	Solveur de Riemann	Oui	
FINEL 2D	Peu profondes	Élément fini	Explicite	Maille souple	Solveur de Riemann	Oui	
JFLOW	Vague diffusive	Volume fini	Explicite	Maille structurée	Solveur de Riemann	Oui	Pas de termes d'inertie
UIM	Vague diffusive	Différence finie	Explicite	Maillage structuré	Non	Non	

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

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

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

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, Jin et al., 2017).

2.3.2.3 Modèles 3D

Les modèles 3D sont des outils sophistiqués de modélisation hydraulique qui simulent le mouvement de l'eau en trois dimensions, intégrant les axes longitudinal, transversal et vertical de l'écoulement (Alcrudo, 2004). Contrairement aux modèles 1D et 2D, qui se concentrent respectivement sur un seul axe ou un plan horizontal, les modèles 3D fournissent une représentation plus détaillée et précise des phénomènes hydrauliques en incluant la variation de la profondeur de l'eau dans l'espace (Casulli & Stelling, 1998). Ils reposent sur des équations mathématiques complexes, comme les équations de Navier-Stokes, pour décrire le comportement tridimensionnel de l'eau en fonction du temps et de la position. Ces modèles prennent en compte la topographie, la géométrie des cours d'eau et les conditions aux limites pour prédire des variables hydrauliques telles que le niveau d'eau, la vitesse du courant et la turbulence (Ye & McCrorquodale, 1998). Utilisés pour la modélisation de rivières complexes, d'estuaires et de structures hydrauliques, les modèles 3D, bien que nécessitant des ressources informatiques importantes, sont essentiels pour des applications où la précision est cruciale (Teng, Jin et al., 2017). Ils permettent une représentation réaliste des tourbillons et des interactions verticales, rendant ces outils précieux pour la modélisation des systèmes hydrauliques tridimensionnels (Monaghan, 1994).

La conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u + \frac{1}{\rho} \nabla p = g + \mu \nabla \cdot \nabla u \quad (6)$$

La conservation de la masse

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Où \mathcal{U} représente la vitesse, ρ est la densité du fluide, P est la pression, g est l'accélération gravitationnelle et ν est la viscosité cinétique.

L'équation (6) est dérivée de l'application de l'équation de Newton $F=ma$ au mouvement du fluide. L'équation (7) repose sur l'hypothèse que la densité du matériau reste constante dans une parcelle fluide.

En fonction de la manière dont les processus sont représentés, ces modèles peuvent être classés en deux grandes catégories : eulériens (basés sur une grille) et lagrangiens (basés sur des particules).

2.3.3 Modèles conceptuels ou simplifiés

Il existe un type de modèle prédictif qui ne correspond pas à la description traditionnelle des modèles hydrodynamiques, mais qui est néanmoins utilisé pour estimer les inondations. Ces modèles ont été parfois appelés modèles 0D ou modèles à 0 terme, mais ils sont en réalité classés comme modèles 2D en raison de leur représentation dimensionnelle du flux (Pender, 2006). Ils se distinguent des modèles hydrodynamiques car ils ne simulent pas directement les processus physiques d'inondation, mais plutôt utilisent des concepts hydrauliques simplifiés pour estimer les étendues inondées (Teng, Jin et al., 2017).

Un exemple de tel modèle est la méthode de propagation rapide des crues (RFSM), qui divise la plaine inondable en zones élémentaires représentant les dépressions topographiques (Lhomme et al., 2008), puis distribue les volumes d'inondation en remplissant ces zones à l'aide d'un processus de remplissage/déversement (Néelz, 2009). Ces modèles peuvent produire des prédictions approximatives des étendues finales des inondations à un coût de calcul considérablement inférieur à celui des modèles hydrodynamiques (Néelz & Pender, 2010).

Une autre approche est la méthode de la « méthode planaire » ou « méthode de la baignoire », qui dérive l'étendue de l'inondation en croisant une série de plans avec un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution (Néelz & Pender, 2013). Un autre modèle conceptuel est le modèle HAND (Height Above the Nearest Drainage), qui normalise la topographie en fonction des hauteurs relatives locales trouvées le long du réseau de drainage pour déterminer l'étendue des inondations (Nobre et al., 2011).

Ces modèles simplifiés sont considérablement plus rapides à exécuter que les modèles hydrodynamiques traditionnels, ce qui les rend utiles pour les applications à grande échelle où

seules les étendues inondées maximales sont requises, sans nécessité de prendre en compte les effets dynamiques (Néelz & Pender, 2010; Nobre et al., 2011; Teng, Jin et al., 2017).

2.3.4 Avantages et limitations

Les différentes approches de modélisation présentent des avantages et des limites, en fonction de leurs applications spécifiques. Les méthodes empiriques sont souvent considérées comme intuitives et simples, permettant d'extraire des informations utiles à partir des observations. Elles peuvent offrir une précision accrue avec un coût et un traitement des données plus élevés. Cependant, elles sont limitées par leur nature rétrospective et ne peuvent pas prédire directement les réponses à des conditions futures ou modifiées (Teng, Jin et al., 2017).

Les modèles hydrodynamiques, quant à eux, sont largement utilisés pour simuler en détail la dynamique des crues. Ils peuvent être couplés à d'autres modèles pour fournir des cartographies des risques d'inondation et des prévisions de crues. Bien que les modèles 1D soient efficaces sur le plan informatique, ils présentent des limitations telles que l'incapacité à simuler la diffusion latérale des ondes de crue (Néelz & Pender, 2010). Les modèles 2D, bien qu'ils offrent une précision accrue, nécessitent plus de calculs et peuvent être prohibitifs pour de grandes zones ou des approches probabilistes nécessitant plusieurs simulations (Néelz & Pender, 2013).

Enfin, les modèles conceptuels simplifiés sont rapides et robustes, adaptés aux applications ne nécessitant pas de sorties de vitesse précises. Ils sont particulièrement utiles pour les grandes plaines inondables et les évaluations probabilistes des risques (Teng, Jin et al., 2017). Cependant, ils peuvent présenter des limitations dans des topographies complexes et ne sont pas adaptés à la modélisation des phénomènes tels que les tsunamis ou les crues soudaines, (voir Tab. 2.2).

Tableau 2-2 : Forces et faiblesses des différentes approches de modélisation (Neal et al., 2019; Teng, Jin et al., 2017)

Modèles	Forces	Limitations	Pertinences
Modèles empiriques	L'estimation des inondations, qui est relativement rapide et simple à réaliser, repose sur l'observation directe. Cette méthode est indépendante et bénéficie des avancées technologiques rapides.	Ils ne sont pas prédictifs, ont des liens indirects avec l'hydrologie, et présentent des résolutions spatiales et temporelles grossières malgré des améliorations. Les limites techniques, environnementales et de traitement telles que les capteurs, les conditions météorologiques et les erreurs algorithmiques sont également des défis majeurs.	Permet la surveillance des inondations pour évaluer les dommages et fournir des observations cruciales pour l'étalonnage et la validation des données dans d'autres méthodes.
Modèles hydrodynamiques	Établi un lien direct avec l'hydrologie, à la capacité : de cartographier précisément les risques d'inondation, de considérer les structures hydrauliques, et de quantifier avec précision la période et la durée des inondations.	Il y'a des contraintes notamment : les défis liés aux données, les calculs intensifs nécessaires, ainsi que le risque de propagation des erreurs de saisie au fil du temps.	Divers domaines d'application liés aux inondations, notamment l'évaluation des risques et des dommages, la prévision en temps réel, l'ingénierie, la planification des ressources en eau, l'érosion des berges, le transport de sédiments et de contaminants, l'écologie des plaines inondables, ainsi que l'hydrologie des systèmes fluviaux et des bassins versants.
Modèles conceptuels simplifiés	Efficacité informatique	Le modèle ne prend pas en compte les termes d'inertie, ce qui le rend inadapté aux débits variables rapides, et qu'il offre une représentation limitée voire absente de la dynamique du flux.	Permet : l'évaluation des risques d'inondation, la planification des ressources en eau, l'écologie des plaines inondables, l'hydrologie des systèmes fluviaux, l'hydrologie des bassins versants et la modélisation de scénarios.

2.3.5 Avancées

Les avancées récentes dans l'observation des crues ont vu un déclin des méthodes empiriques traditionnelles, telles que les niveaux d'eau ou le débit des stations de jaugeage, en raison de la fermeture des stations et du manque de main-d'œuvre pour les mesures au sol. Ce déclin est principalement dû à des contraintes opérationnelles et budgétaires, ainsi qu'aux coûts en termes de temps et d'argent. Bien que de nouvelles techniques de mesure aient été développées pour pallier ce déficit, les données au sol restent essentielles pour calibrer, valider ou convertir des cotes en débits (Teng, Jin et al., 2017).

L'observation des crues par télédétection radar est en pleine expansion, offrant une méthode efficace même en présence de nuages. Grâce à des avancées comme l'indice de différence d'eau normalisé, les algorithmes permettent d'extraire des informations précises sur l'étendue des crues. Toutefois, l'interprétation des images radar reste complexe, et l'incertitude persiste, notamment en cas de forte végétation, de nuages, ou lorsque la résolution spatiale est insuffisante pour des zones étroites. De plus, pour les crues rapides ou brefs événements, la résolution temporelle limitée des capteurs peut affecter la précision des données. Ainsi, malgré les progrès, des incertitudes demeurent quant à la détection exacte des crues.

En ce qui concerne les modèles hydrodynamiques, des améliorations significatives sont observées tant en termes de précision que d'efficacité de calcul. Les modèles 1D ont été développés pour être couplés avec des modèles 2D, offrant ainsi une représentation plus précise des processus hydrologiques. Les modèles 2D ont attiré une attention particulière, avec des avancées dans les schémas de volumes finis pour une résolution plus précise des discontinuités topographiques. De plus, la modélisation du mouillage et du séchage est un domaine de recherche actif, avec des efforts pour améliorer la stabilité des solutions.

Les modèles 3D, en particulier ceux basés sur des particules, représentent une perspective révolutionnaire pour la modélisation des inondations. Ces modèles offrent une précision accrue et une représentation simple des phénomènes complexes tels que les ruptures de barrages. Les avancées dans la simulation des fluides dans l'industrie du divertissement ont également contribué à la recherche sur les modèles 3D pour les inondations.

Enfin, les modèles conceptuels simplifiés ont été améliorés pour remédier à leur manque de conservation de masse et de représentation de la vitesse. L'assimilation de données de télédétection dans ces modèles ainsi que l'utilisation de schémas explicites et de calcul parallèle peuvent améliorer leur efficacité, en particulier pour la modélisation de grandes plaines inondables et l'évaluation des risques d'inondation.

2.3.6 Paramètres de modélisation : Coefficient de Manning

Le coefficient de Manning (noté n) revêt une importance primordiale dans la modélisation des écoulements, en particulier dans les domaines hydrologiques et hydrauliques (Hajjout, 2019). Il caractérise la rugosité du lit d'un cours d'eau ou d'une surface terrestre à travers laquelle l'eau se déplace. Cette valeur influence directement la résistance à l'écoulement : plus (n) est élevé, plus la rugosité est grande et plus la résistance est importante (Yen, 2002). La variabilité de ce coefficient dépend de plusieurs facteurs comme la présence de végétation, la texture du sol, ou encore la forme du canal (Bader et al., 2016). Dans la modélisation hydraulique, le coefficient de Manning est souvent ajusté afin de concorder avec les observations sur le terrain (Navratil, 2014).

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (8)$$

Où : v est la vitesse d'écoulement (m/s), n est le coefficient de Manning ($m^{-1/3}/s$), R est le rayon hydraulique (m) : qui est le rapport de la surface en contact avec l'eau à la longueur mouillée, S est la pente du canal ou de la surface (m/m). (8) Équation empirique pour le calcul de la vitesse d'un écoulement uniforme dans un canal à surface libre.

Dans les équations de Manning, (n) est généralement utilisé pour calculer la vitesse d'écoulement (v) d'un fluide dans un canal ou sur une surface. Cependant, la rugosité du lit, qui est un paramètre majeur dans la modélisation des cours d'eau, est souvent mal connue et sa détermination est sujette à subjectivité, en raison de sa dépendance au type d'écoulement considéré.

La valeur de n , exprimée en $m^{-1/3}s$, est influencée par la couverture du sol. Pour obtenir des estimations précises, plusieurs études empiriques ont été menées, notamment celles de : (Chow, 1959; Coon, 1998; Henderson, 1996; Te Chow, 1959). Ces recherches visent à répondre au besoin croissant de valeurs représentatives et précises pour ce paramètre fondamental dans la modélisation des écoulements.

Tableau 2-3 : Coefficients de Manning (n) pour différents types de cours d'eau (Chow, 1959)

Type de canal et description	Minimum	Normal	Maximum
Cours d'eau naturels – cours d'eau mineurs (largeur supérieure au niveau de la crue < 100 pi)			
Canaux principaux			
a. propre, droite, niveau complet, pas de failles ni de mares profondes	0,025	0,030	0,033
b. comme ci-dessus, mais plus de pierres et de mauvaises herbes	0,030	0,035	0,040
c. propre, sinueux, quelques mares profondes	0,033	0,040	0,045
d. comme ci-dessus, mais quelques mauvaises herbes et pierres	0,035	0,045	0,050
e. idem que ci-dessus, niveau plus bas, pentes et sections plus inefficaces	0,040	0,048	0,055
f. identique à "d." avec plus de pierres	0,045	0,050	0,060
g. tronçons lents, mares herbeuses et profondes	0,050	0,070	0,080
h. tronçons très envahis par les mauvaises herbes, mares profondes ou canaux de dérivation avec une forte densité de bois et de sous-bois	0,075	0,100	0,150

2.3.7 Paramètres de modélisation : Coefficient de Manning-Strickler

Le coefficient de Manning-Strickler est une variante du coefficient de Manning, utilisé pour estimer la rugosité et la résistance dans les cours d'eau, en particulier dans les rivières naturelles et les canaux présentant une rugosité homogène. Il fournit un ajustement pour les caractéristiques locales du lit et des matériaux du canal, offrant ainsi une meilleure précision dans ces contextes spécifiques (Strickler, 1923).

Cependant, malgré son utilité, l'équation de Strickler a montré certaines limitations. Elle peut sous-estimer la résistance à l'écoulement, avec des erreurs moyennes pouvant atteindre un facteur de deux, en raison des conditions de submersion relative élevée et d'une résistance de forme moins prise en compte (Powell, 2014). De plus, les équations de Manning-Strickler tendent à surestimer systématiquement les vitesses d'écoulement observées à grande et moyenne échelle (Rickenmann & Recking, 2011).

$$v = k_s R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (9)$$

Où : v est la vitesse d'écoulement (m/s), k_s est le coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$), R est le rayon hydraulique (m), S est la pente hydraulique (m/m).

Bien que le Manning-Strickler puisse offrir des estimations tolérables dans certains contextes, il est important de prendre en compte ces limitations pour éviter des erreurs significatives dans les calculs de résistance à l'écoulement.

2.3.8 Critères d'évaluation

Les critères d'évaluation des modèles hydrauliques sont cruciaux pour évaluer la qualité et la précision des simulations. Leur utilisation permet de mesurer à quel point les résultats du modèle reflètent la réalité observée sur le terrain (Song et al., 2015). Ces critères fournissent une base objective pour évaluer la performance et la fiabilité des modèles dans différentes situations (Refsgaard & Henriksen, 2004), ainsi que pour comparer les différents modèles et identifier leurs forces et leurs faiblesses respectives. De plus, l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle est souvent effectuée pour évaluer sa stabilité et sa robustesse face aux variations des entrées ou des paramètres (N. Moriasi, Daniel et al., 2015). En combinant ces critères, les utilisateurs peuvent obtenir une évaluation globale de la qualité des modèles hydrauliques, essentielle pour garantir leur utilisation fiable dans des domaines tels que l'ingénierie, la gestion des ressources en eau et la prévision des inondations (Loucks & Van Beek, 2017).

La disponibilité des critères d'évaluation dépend de la présence de données pertinentes et de la complexité de l'application. Les critères simples et largement utilisés sont généralement accessibles, tandis que ceux plus avancés peuvent nécessiter des ajustements ou des données supplémentaires pour être efficacement employés, tel que :

2.3.8.1 Coefficient d'efficacité du modèle (NSE - Nash-Sutcliffe Efficiency) :

Ce critère largement utilisé pour évaluer la performance relative du modèle par rapport à un modèle de référence simple. NSE (varie entre $-\infty$ et 1), il mesure la capacité d'un modèle à reproduire les variations temporelles des données observées. Un NSE de 1 indique une correspondance parfaite entre les données simulées et observées, tandis qu'un NSE de 0 ou moins signifie que le modèle est aussi performant ou ne prédit pas mieux qu'une simple moyenne des données observées. Par conséquent, une valeur de NSE positive supérieure à 0,5 en hydrologie indique que le modèle a une certaine utilité, avec des valeurs plus élevées indiquant de meilleures performances du modèle.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_{moy}^{obs})^2} \right] \quad (10)$$

Où O_i est la valeur observée, S_i est la valeur simulée, n est le nombre total d'observations et O_{moy} est la moyenne des valeurs observées.

2.3.8.2 L'indicateur KGE (Kling-Gupta Efficiency)

Il utilisée pour évaluer la performance des modèles hydrologiques, particulièrement ceux simulant les débits des cours d'eau. Proposé par Gupta et al. (2009), il offre une alternative à l'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) pour fournir une évaluation plus équilibrée. Comme pour le NSE, un KGE de 1 indique un accord parfait entre simulations et observations. Cependant, un KGE inférieur à 0 signifie que la moyenne des observations fournit de meilleures estimations que les simulations (Castaneda-Gonzalez, 2018).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (11)$$

où r est le coefficient de corrélation linéaire entre les débits observés et simulés, σ_{obs} est l'écart type dans les observations, σ_{sim} l'écart type dans les simulations, μ_{sim} la moyenne de simulation et μ_{obs} la moyenne d'observation

2.3.8.3 Coefficient de détermination (R2) :

Le coefficient de détermination, noté R^2 (varie entre 0 et 1), couramment utilisé pour évaluer la qualité des modèles. Il mesure la proportion de la variance des données observées qui est expliquée par le modèle. Une valeur de $R^2=1$, indique une correspondance parfaite entre les données observées et celles prédictes par le modèle, tandis que $R^2=0$, signifie que le modèle n'explique pas du tout la variance des données observées. Plus le R^2 est proche de 1, meilleure est la capacité du modèle à reproduire les données observées.

$$R^2 = 1 - \left\langle \frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_{moy}^{obs})^2} \right\rangle \quad (12)$$

Où O_i est la valeur observée, S_i est la valeur simulée, n est le nombre total d'observations et O_{moy} est la moyenne des valeurs observées.

2.3.8.4 Coefficient RSR

Le ratio de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne à l'écart type des données mesurées (RSR) permet de normaliser l'erreur quadratique moyenne (RMSE) en utilisant l'écart type des valeurs observées, il indique que plus le RSR est faible, plus le RMSE est faible, ce qui signifie une meilleure efficacité prédictive du modèle. Selon (N. Moriasi, D. et al., 2007), les performances

basées sur le RSR sont classées comme suit : très bonnes (0-0,50), bonnes (0,50-0,60), satisfaisantes (0,60-0,70) et insatisfaisantes ($> 0,70$). Les classifications du RSR selon (Khosravi et al., 2018) sont : très bonnes ($0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$), bonnes ($0,50 \leq \text{RSR} \leq 0,60$), acceptables ($0,60 \leq \text{RSR} \leq 0,70$) et inacceptables ($\text{RSR} > 0,70$).

$$\text{RSR} = \frac{\text{RMSE}}{\text{STDEV}_{\text{obs}}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i^{\text{obs}} - O_i^{\text{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i^{\text{obs}} - O_{\text{obs}}^{\text{moy}})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{\text{obs}} - O_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i^{\text{obs}} - O_{\text{obs}}^{\text{moy}})^2} \quad (13)$$

2.3.8.5 Biais de prédition (PBIAS) :

Il mesure la tendance globale du modèle à surestimer ou sous-estimer les valeurs observées. PBIAS = 0, indique que les prédictions du modèle sont parfaites, tandis qu'un PBIAS > 0 , indique une tendance à surestimer et un PBIAS < 0 , indique une tendance à sous-estimer. PBIAS proche de zéro indique une bonne concordance entre les prédictions du modèle et les observations.

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \times 100 \quad (14)$$

Où O_i représente la valeur observée pour la période i ; P_i représente la valeur prédictée par le modèle pour la période i , n nombre total de périodes.

2.3.8.6 Erreur quadratique moyenne (RMSE - Root Mean Square Error) :

C'est un critère d'évaluation largement utilisé pour mesurer l'écart moyen entre les valeurs prédictées par le modèle et les valeurs observées. La valeur de RMSE faible, indique une meilleure adéquation entre les valeurs prédictées et observées, ce qui signifie que le modèle produit des prédictions précises, alors avec une valeur de RMSE élevé, indique une plus grande dispersion des erreurs entre les prédictions du modèle et les observations réelles.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (15)$$

Où O_i représente la valeur observée à un instant donné i ; P_i représente la valeur simulée (prédictée) à une période i , n nombre total de périodes.

2.3.9 Incertitudes dans la modélisation hydraulique

L'analyse de l'incertitude est essentielle dans la prévision des modèles pour les systèmes environnementaux réels. Elle est devenue cruciale dans la modélisation hydraulique en raison de la législation et des exigences pratiques. Pour aborder systématiquement l'incertitude, il faut d'abord identifier ses sources, puis quantifier cette incertitude et enfin la représenter correctement. Il existe deux types d'incertitude : naturelle et épistémique, chacune nécessitant une approche différente pour la traiter (Freer et al., 2013). Les méthodes d'analyse de sensibilité sont utilisées pour quantifier l'incertitude provenant de différentes sources, tandis que des techniques d'émulation de modèle peuvent être utilisées pour fournir des sensibilités globales (Merz & Thielen, 2005). Pour représenter l'incertitude, il est crucial de communiquer efficacement les résultats d'intérêt prédictif et d'utiliser des approches telles que les approches bayésiennes ou la méthodologie GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven & Binley, 1992). Cependant, l'application de ces méthodes peut nécessiter des décisions subjectives et des limitations informatiques (Blazkova & Beven, 2009). En outre, il est important de saisir et de communiquer les incertitudes de manière qualitative, notamment en vérifiant les données et en réalisant des analyses pour révéler les incertitudes. Malgré les progrès, il reste des questions de recherche à explorer, notamment la quantification et la réduction continues de l'incertitude, ainsi que l'intégration des données de télédétection dans la modélisation des inondations (Teng, Jin et al., 2017).

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION GÉNÉRAL DU SITE D'ÉTUDE

3.1 Identification de la zone d'étude

Le bassin versant du fleuve Sénégal avec une superficie du bassin versant actif estimée à 304 252 km² (SIEREM) et une superficie totale, incluant le bassin inactif, estimée à 709 938 km² (données SRTM) alimente le lac de Guiers via le canal Tahoué. Ce bassin couvre une vaste étendue de territoires dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, notamment le Sénégal, le Mali, la Mauritanie et la Guinée (Wilson, 2018). Le relief y varie considérablement, avec des altitudes allant de près de 1 500 mètres dans les montagnes du Fouta Djallon à presque au niveau de la mer près de l'embouchure du fleuve (Bader et al., 2015). Le bassin actif, où les précipitations contribuent directement au ruissellement vers le fleuve, dépend des précipitations saisonnières et des affluents, y compris ceux alimentant le lac de Guiers.

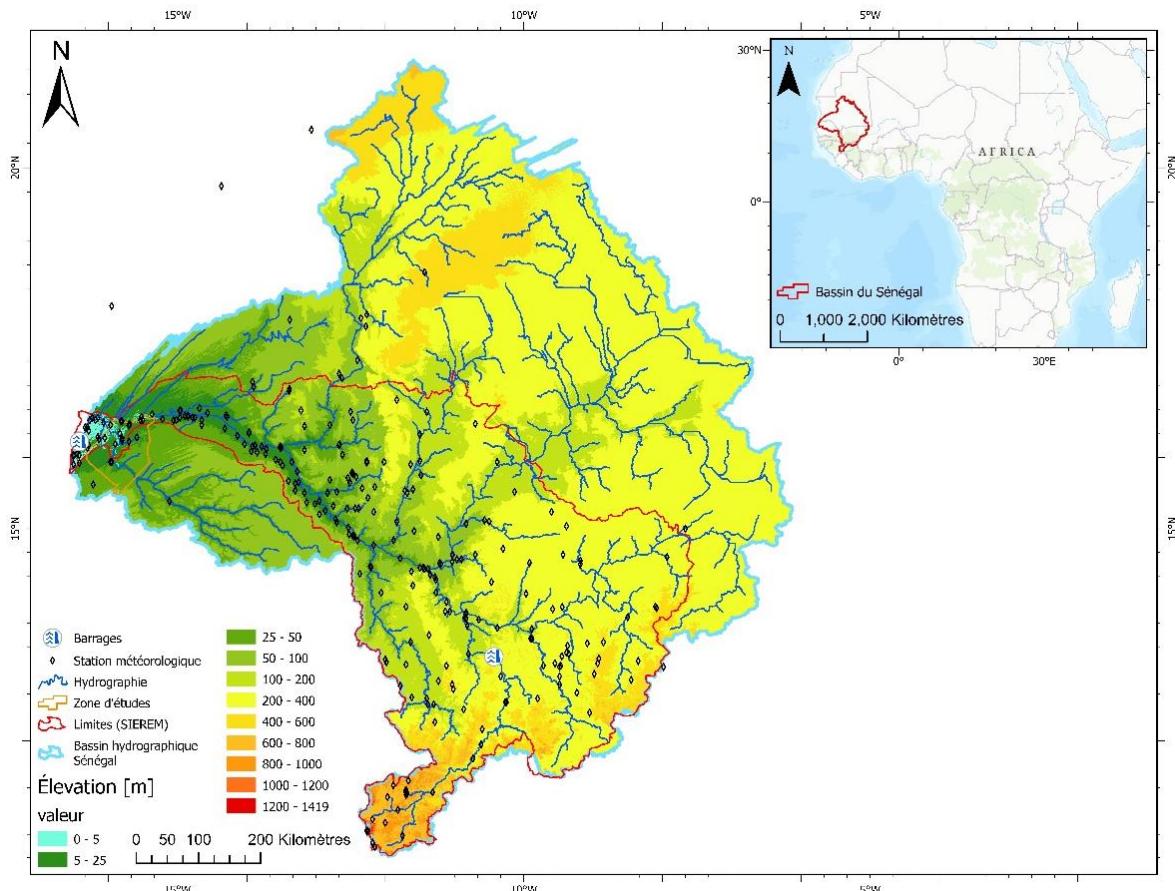


Figure 3-1 : Aperçu du bassin versant du fleuve Sénégal

3.1.1 Caractéristiques physiques

Le lac de Guiers possède plusieurs caractéristiques physiques distinctives qui influencent de manière complexe les dynamiques écologiques et socio-économiques.

3.1.1.1 Environnement

L'environnement autour du lac de Guiers est un écosystème diversifié et fragile, qui comprend des zones humides, des savanes, des forêts et des terres agricoles. La région environnante est principalement située dans la zone sahélienne, qui est caractérisée par des précipitations faibles et irrégulières, des températures élevées et des vents secs.

Les zones humides autour du lac de Guiers sont particulièrement importantes pour la biodiversité de la région. Les zones humides agissent comme des éponges naturelles qui absorbent les eaux de pluie et les eaux de ruissellement, permettant ainsi de prévenir les inondations et de recharger les nappes phréatiques (Olivry, 1995). Elles sont également des habitats vitaux pour de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs, de poissons et d'autres animaux aquatiques.

La région environnante est également importante pour les communautés locales, qui dépendent des ressources naturelles de la région pour leur subsistance (Abou THIAM, 2012). Les populations locales pratiquent principalement l'agriculture et l'élevage, utilisant souvent des techniques traditionnelles telles que l'irrigation et la transhumance (Dingkuhn et al., 1995).

3.1.1.2 Climat

Le climat du lac de Guiers est de type tropical sec avec une saison sèche et une saison des pluies (région semi-aride) (Ardoïn-Bardin et al., 2009). Les températures sont généralement élevées tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle d'environ 28°C (Sambou et al., 2019). Les mois les plus chauds sont de mars à juin, avec des températures max pouvant atteindre 35°C, tandis que les mois les plus frais sont de novembre à février, avec des températures nocturnes pouvant descendre jusqu'à 15°C.

La saison des pluies s'étend de juin à octobre, avec des précipitations moyennes de 50 à 220 millimètres par an (Bader et al., 2015; Dezetter & Servat, 1995). La plupart des précipitations tombent entre les mois de juillet et septembre mais même pendant cette période, il peut y avoir des

périodes prolongées de sécheresse. La saison sèche va de novembre à mai, avec des précipitations très limitées, voir nulles (Bader et al., 2010).

La région du lac de Guiers est également soumise à des vents chauds et secs appelés harmattan, qui soufflent du désert du Sahara de décembre à février et qui peuvent causer une baisse de la température et une baisse de la visibilité due à la poussière en suspension dans l'air (Sambou et al., 2019). En raison du climat chaud et sec de la région, l'évaporation est très élevée (Ndiaye, P. M. et al., 2020), ce qui a un impact important sur le niveau d'eau du lac de Guiers.

Le climat de la région du lac de Guiers pose des défis majeurs pour la gestion des ressources en eau et l'agriculture, vu que les activités agrosylvopastorales dans cette zone sont fortement influencées par le gradient de distribution de la pluviométrie, augmentant du nord au sud (Mbow, 2017).

3.1.1.3 Précipitation

La région du lac de Guiers, typique du climat semi-aride, qui connaît une alternance marquée entre une saison des pluies et une saison sèche. Les précipitations annuelles, oscillant généralement entre 200 et 600 mm, sont principalement concentrées de juillet à septembre.

La quantité annuelle de précipitations diminue de façon très marquée en fonction de la latitude sur au niveau de la zone du lac. Cela indique une variation climatique notable sur le territoire, avec des zones plus au nord qui reçoivent généralement moins de pluie que celles situées plus au sud (Bader & Poussin, 2019). Cette tendance peut avoir des implications importantes pour la gestion des ressources en eau, notamment en ce qui concerne la distribution de l'eau pour l'irrigation agricole et l'approvisionnement en eau potable. (Mahé & Olivry, 1995)

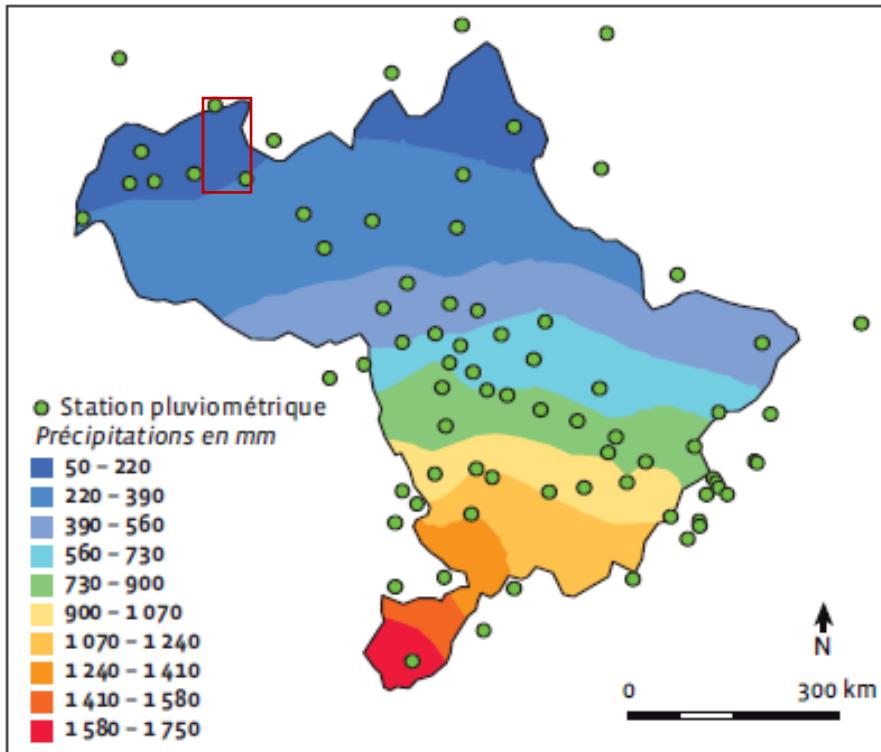


Figure 3-2 : Isohyètes moyennes annuelles sur le bassin versant du fleuve Sénégal pour la période 1971-2000 (Bader et al., 2015; OMVS/Tropis/DHI, 2007)

Dans le nord, les isohyètes indiquent moins de 200 mm de pluie par an, caractéristique d'un climat semi-aride. La figure 3.2 illustre clairement cette distribution spatiale de la pluviométrie.

Selon les données des postes pluviométriques et stations météorologiques de la CSS à Richard-Toll, une diminution des précipitations a été observée de 2002 à 2019(CSE, 2020), avec une tendance à la reprise depuis 2020, accompagnée d'une hausse progressive des températures (figure 3.3). Ces changements entraînent des répercussions majeures sur des secteurs clés comme l'agriculture, l'élevage, la pêche et les ressources en eau (Diop, S., 2008).

Les vingt dernières années ont été relativement humides, sauf pour quelques années comme 2004, 2011 et 2014.

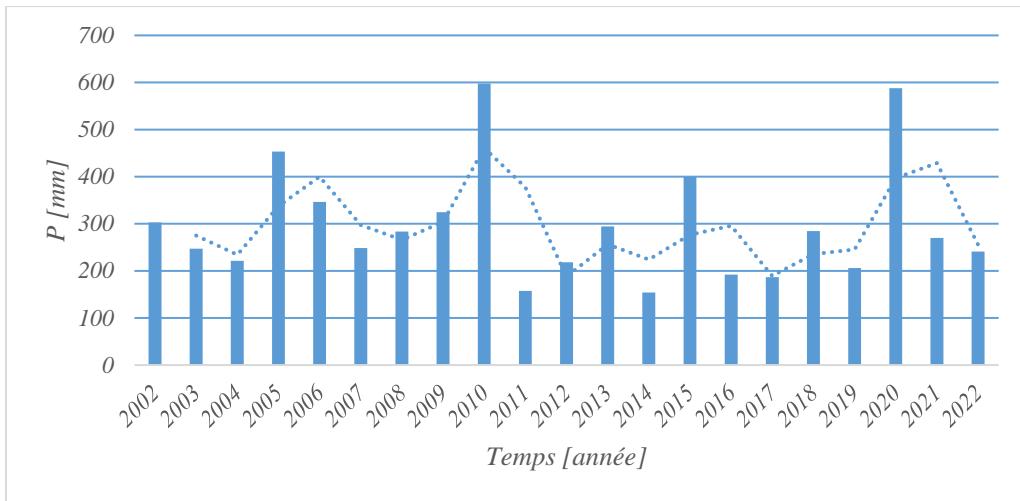


Figure 3-3 : Cumul des précipitations annuelles de 2002 à 2022, (source : Station :X6 CSS $X=-15.776621$ et $Y=16.369494$)

Les données CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), une source fiable pour les précipitations à haute résolution temporelle et spatiale, fournissent des informations détaillées sur les tendances pluviométriques de la région (Dinku et al., 2018). Selon CHIRPS, les précipitations annuelles dans la région du lac de Guiers varient généralement, avec une concentration majeure entre les mois de juillet et septembre. Ces données révèlent également une variabilité interannuelle significative, influencée par des phénomènes climatiques.

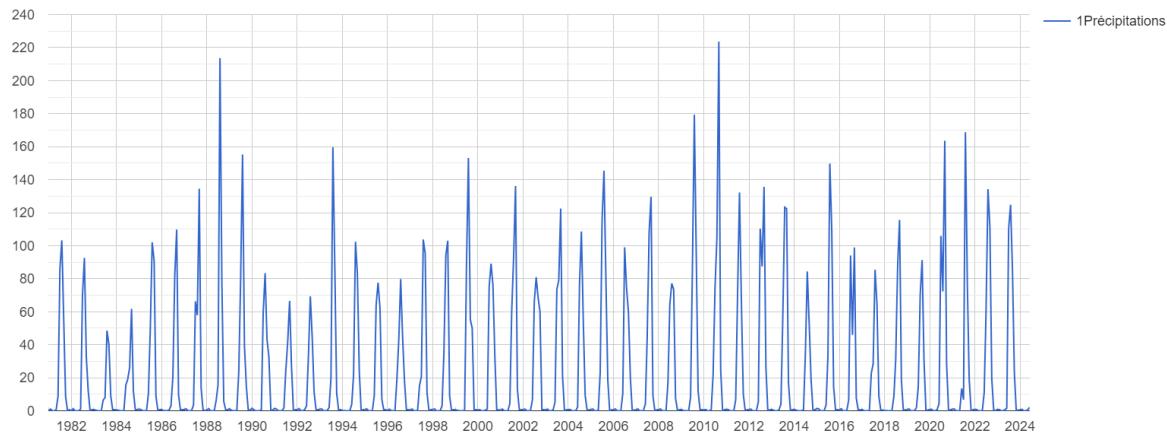


Figure 3-4 : Précipitation mensuelle de 1981 à 2024 (source : GEEE, CHIRPS²)

² CHIRPS Pentad: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)

L'analyse des indices de précipitation standardisés (SPI) est essentielle pour évaluer les variations climatiques et quantifier les anomalies de précipitation sur différentes échelles de temps (Funk, 2015).

Cette procédure vise à créer une chronologie du SPI à partir des données quotidiennes CHIRPS, en utilisant le SPI, introduit par (McKee et al., 1993) et reconnu par l'OMM en 2012, pour analyser les sécheresses en comparant les précipitations moyennes sur une période donnée. Le calcul du SPI est effectué sur Google Earth Engine (GEE) à partir des données CHIRPS, qui offrent une résolution de $0,05^\circ$, soit environ 5 550 mètres à l'équateur. En définissant les pas de temps pour plusieurs mois, cette méthode permet de suivre et d'analyser les variations des précipitations et leurs impacts, fournissant des informations essentielles pour la gestion des ressources en eau et les systèmes d'alerte précoce en cas de sécheresse.

Les valeurs négatives du SPI, indiquant des sécheresses, ont des impacts négatifs sur les ressources en eau, l'agriculture et les moyens de subsistance locaux. Cette variabilité souligne la nécessité d'une gestion proactive et adaptative des ressources en eau pour atténuer les effets des extrêmes climatiques et soutenir les communautés locales dans cette région sahélienne (OMM, 2012).

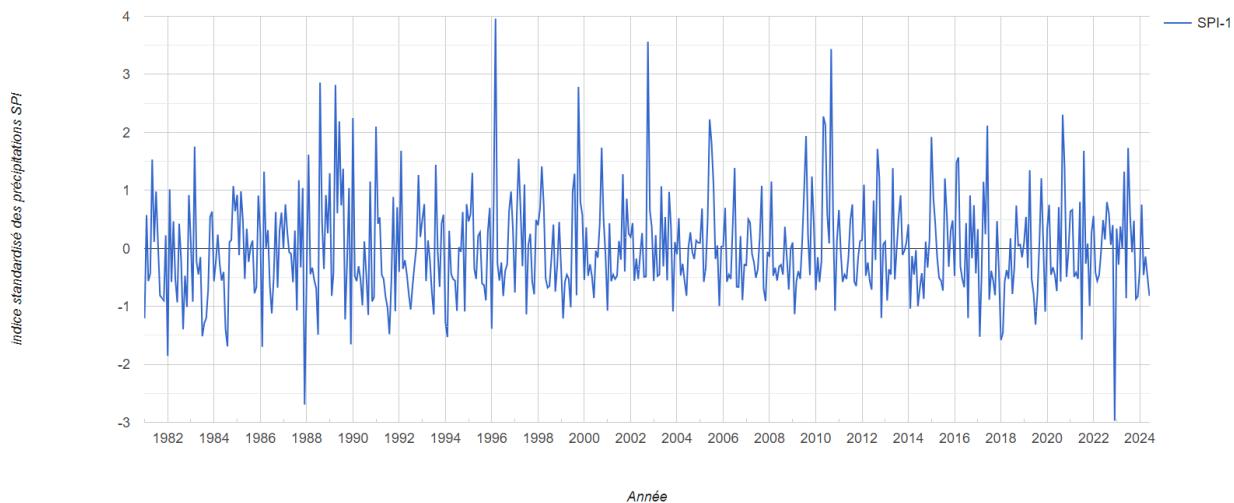


Figure 3-5 : Série chronologique de l'indice standardisé des précipitations SPI, *Source (Données CHIRPS, GEEE)*

Entre 1982 et 2024, les valeurs SPI dans la région du lac de Guiers ont varié de -3 à 4, indiquant des périodes de sécheresse extrême ($SPI < -2$) à des périodes de précipitations abondantes ($SPI > 2$). Un SPI de -3 suggère une sécheresse sévère, tandis qu'un SPI de 4 correspond à des épisodes de précipitations élevées, pouvant entraîner des inondations et une recharge significative des nappes phréatiques (Gandu et al., 2015).

3.1.1.4 Evolution des hauteurs d'eau

L'évolution des hauteurs d'eau du lac de Guiers, observée entre 2014 et 2022, révèle des fluctuations saisonnières marquées, mises en évidence par les données des stations de Quai à Richard Toll (située en amont du canal de Taoué) et de CSS (située dans le canal de Taoué). Les valeurs moyennes annuelles des hauteurs d'eau pour ces deux stations oscillent entre 200 et 300 mm, avec des valeurs significatives durant les mois d'août à novembre. Cette période correspond à la saison des pluies, caractérisée par une augmentation substantielle des précipitations qui entraîne une élévation des niveaux d'eau. Les données montrent une tendance récurrente de montée des eaux pendant la saison humide, suivie de baisses graduelles durant les périodes sèches (voir fig. 3.6 et 3.7).

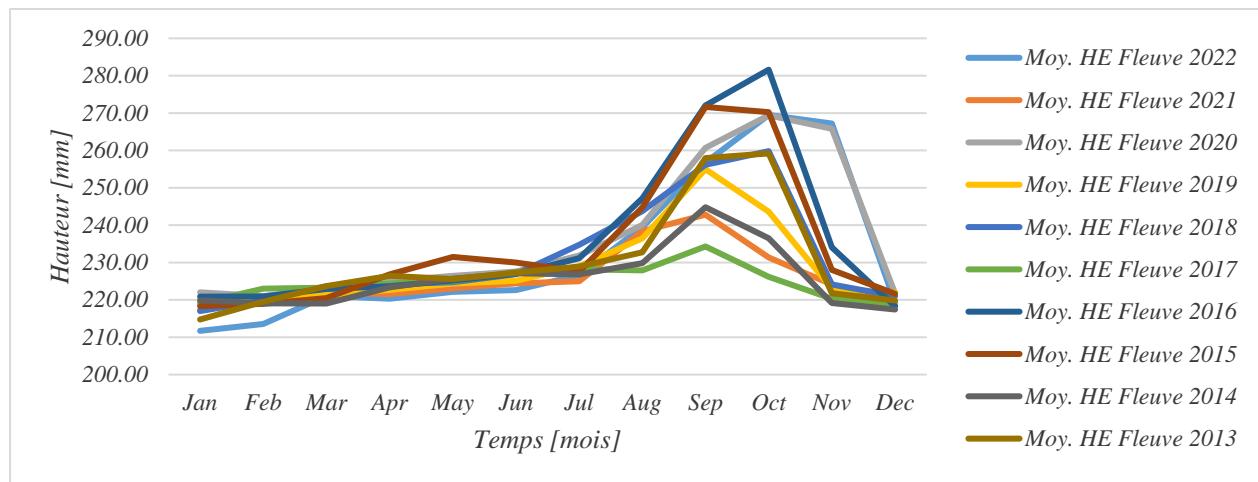


Figure 3-6 : Fleur (quai de Richard Toll)

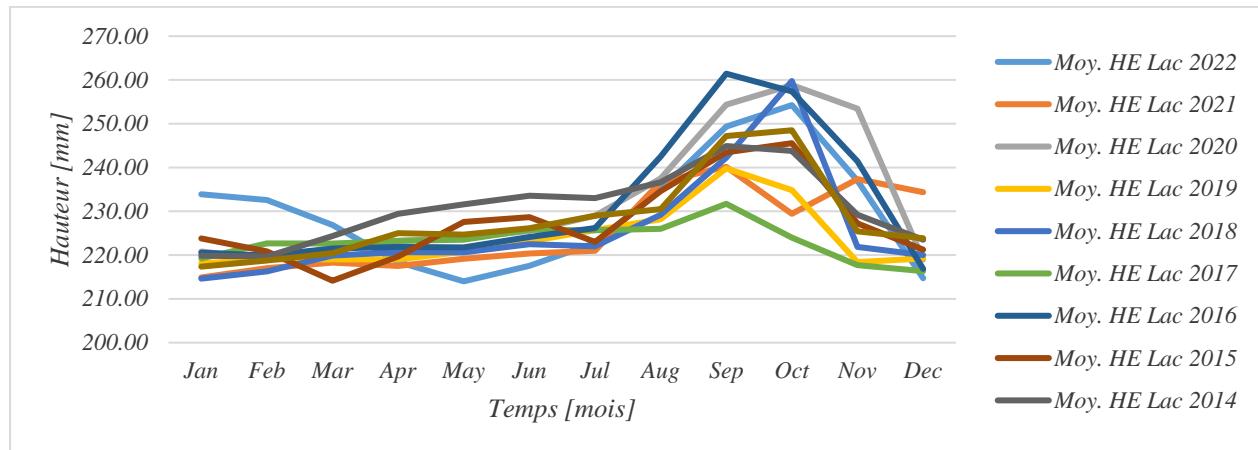


Figure 3-7 : Lac de Guiers (limnimètre CSS)

L'analyse des niveaux des d'eau de 2010 à 2023, basée sur les données des stations de Quai à Richard Toll (en amont du canal de Taoué) et de RN Guiers (en aval du fleuve Sénégal), révèle que les valeurs moyennes annuelles varient entre 220 et 325 mm, avec des valeurs élevées entre août et novembre (saison des pluies). Cette interconnexion hydraulique permet de comprendre la dynamique des niveaux d'eau du lac. Les données montrent une tendance récurrente de montée des eaux durant la saison humide, suivie de baisses graduelles pendant les périodes sèches (voir fig. 3.8).

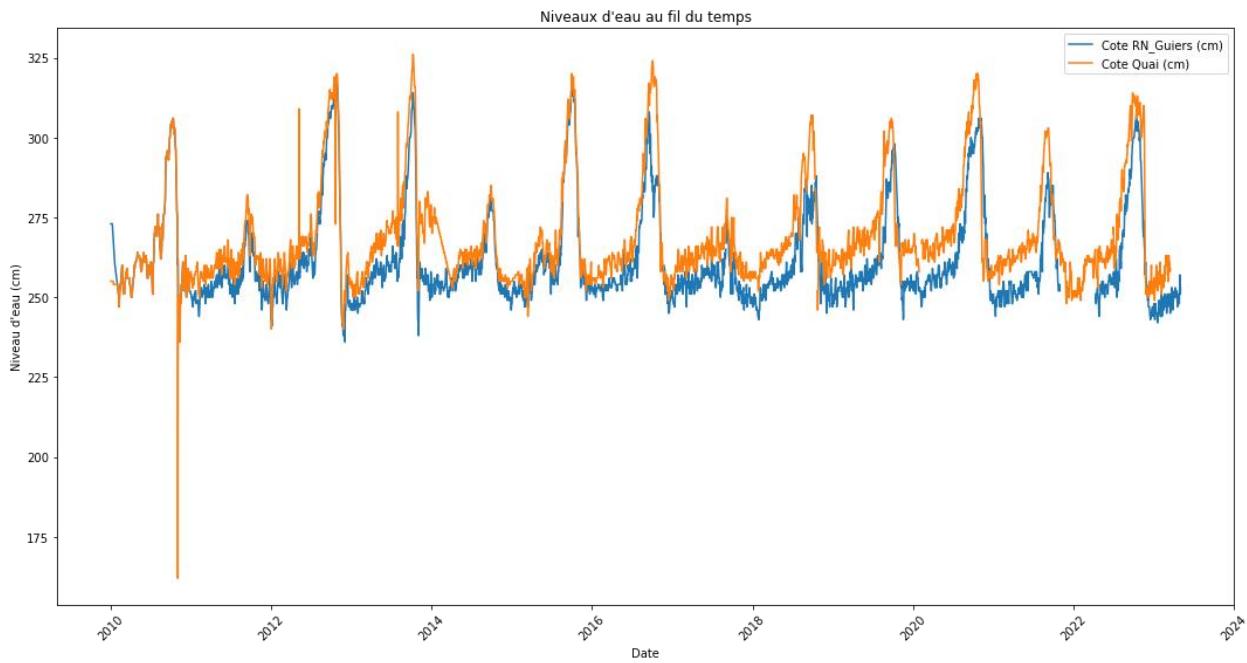


Figure 3-8 : Évolution du niveau d'eau RN Guiers et Quai
Station côte RN-Guiers (X=-15.693019 Y=16.464615) et station côte Quai (X= -15.706281 et Y=16.469833) (hauteur pas l'IGN)

3.1.1.5 Température

Les températures suivent le rythme des saisons et leur évolution et leur distribution résultent de la conjonction des facteurs cosmiques, météorologiques et géographiques (GIEC, 2014). Entre 1970 et 2018, le Sénégal a connu une augmentation de la température de 0,2 à 0,8°C, avec une hausse plus marquée des températures minimales que des maximales (DEEC, 2018).

De 2000 à 2023, les variations de température au lac de Guiers montrent des écarts significatifs, avec des maximales atteignant parfois 45°C et des minimales descendant en dessous de 10°C. La température moyenne annuelle oscille généralement entre 26°C et 29°C, caractéristique du climat

semi-aride avec de fortes amplitudes thermiques (voir fig. 3.9). Les périodes les plus chaudes se situent entre mars et juin, avant la saison des pluies, tandis que les températures les plus basses sont enregistrées en décembre et janvier. Ces fluctuations thermiques impactent directement l'agriculture, la disponibilité de l'eau et la santé des populations locales. Elles soulignent également la nécessité de stratégies d'adaptation pour faire face aux conditions climatiques extrêmes et maintenir la résilience des écosystèmes et des communautés autour du lac de Guiers.

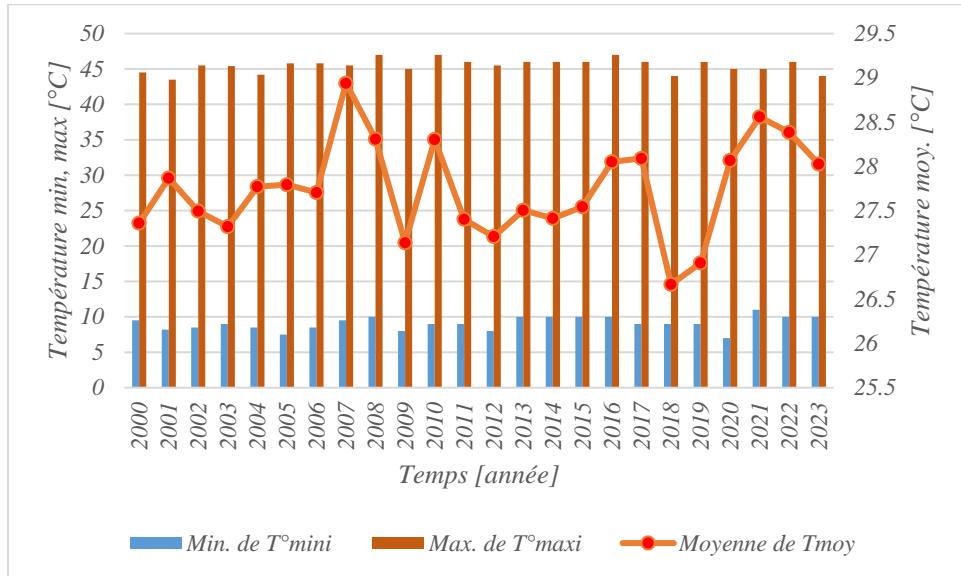


Figure 3-9 : Variation de la température dans la zone d'études

3.1.1.6 Evaporation (ETP)

L'estimation de l'évaporation dans les plans d'eau sahéliens, notamment le lac de Guiers, présente des défis considérables en raison des pertes importantes dues à l'intense évaporation (GAC, J. Y. et al., 1991). Bien que l'évaporation ne soit pas un prélèvement direct, elle constitue une part significative des pertes en eau du lac, influençant indirectement le taux de prélèvement en conditionnant la quantité d'eau disponible (Cogels, F. et al., 1991).

Les estimations des pertes annuelles d'eau du lac de Guiers montrent des divergences entre les sources. Selon Dia (1986), les pertes annuelles d'eau du lac sont estimées à environ 10 millions de mètres cubes, une valeur probablement sous-estimée. Jupon (1977) les évalue à 744 millions de mètres cubes en année normale et à 672 millions de mètres cubes en année sèche. Cogels, F. et Gac (1982) ont observé que l'évaporation du lac présente de faibles variations interannuelles, se stabilisant autour de 2,25 mètres. De plus, GAC, J. et al. (1991) ont estimé que les processus

d'évaporation représentent 81,3 % des pertes du lac, soit 55,012 millions de mètres cubes, correspondant à une évaporation moyenne de 5,22 mm/jour pour une superficie lacustre de 257 km².

En raison de la morphologie et de l'altitude du lac, l'évaporation demeure la principale perte en eau (Gac, J.-Y. et al., 1992), avec un taux de 6,5 mm par jour en 1992, ce qui équivaut à un débit moyen de 22 m³/s pour une surface lacustre de 300 km² (Cogels, F. et al., 1991; Diop, P., 2017). Cela représente une évaporation annuelle de 675 000 000 mètres cubes, soit plus de la moitié du volume total du lac (Cogels, F. & Gac, 1982).

Il convient de noter que, depuis les années 1990, les variations de la surface du lac ont été minimes, ce qui a réduit les fluctuations potentielles de l'évaporation. Les estimations historiques de pertes par évaporation doivent être interprétées avec prudence, en tenant compte de l'évolution de la superficie du lac et de ses conditions climatiques.

Les données recueillies entre 2008 et 2022 à partir des stations météo équipées de bacs à évaporation au sol de Bardial, C2 et km8 indiquent des taux d'évaporation annuels dépassant 2500 mm/an, calculés avec un coefficient de transposition de 0,8. (voir fig. 3.11).

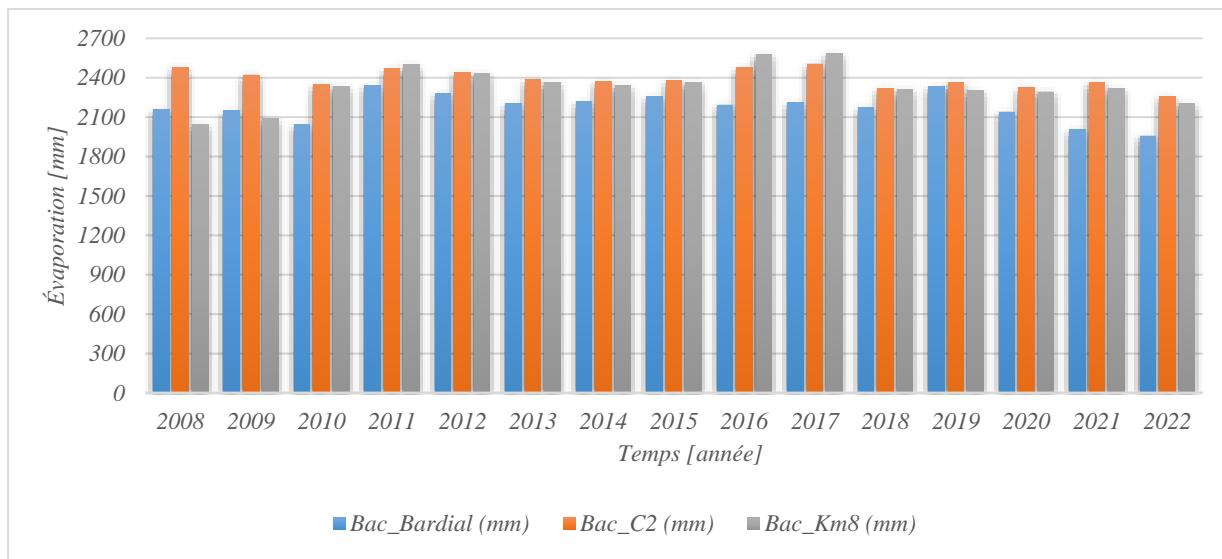


Figure 3-10 : Évaporation moyenne annuelle de trois stations 2008-2022

Bac Bardial (X= -15.66955 et Y= 16.39139), Bac C2 (X= -15.7522 et Y=16.42372), Bac km8 (X= -15.76477 et Y= 16.46244)

Les données de télédétection, notamment les produits Mod16A2 de Terra Net, fournissent une couverture spatio-temporelle étendue de la zone d'étude, permettant une évaluation précise et

continue de l'évaporation moyenne mensuelle de 2001 à 2023 sur le lac de Guiers. Cette évaporation significative affecte les niveaux d'eau du lac et, par conséquent, la disponibilité future de l'eau.

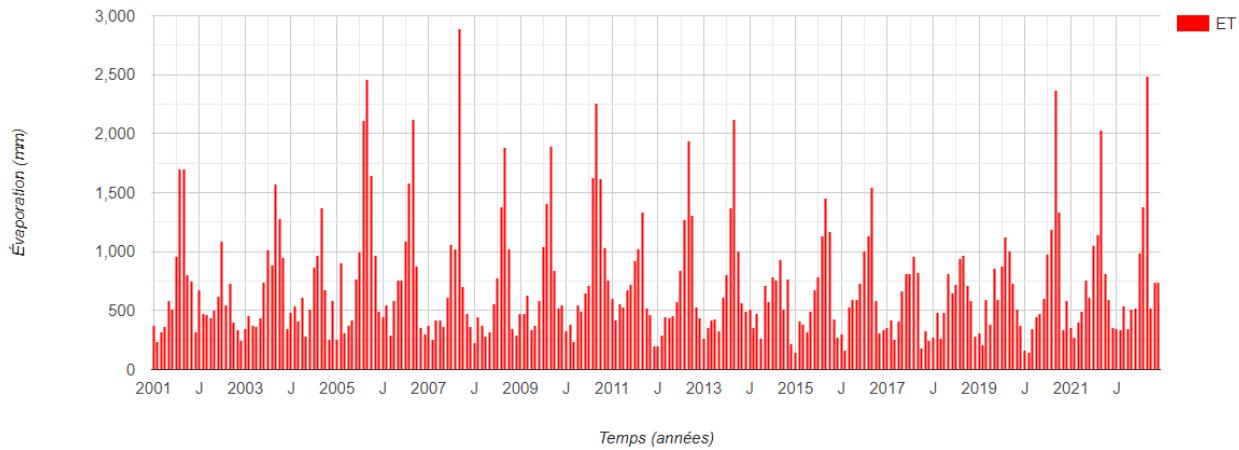


Figure 3-11 : Évaporation moyenne mensuelle de 2001 à 2023 (*source : MOD16A2.061*³)

En comparant les deux sources de données, on constate une disparité : les estimations d'évaporation fournies par les données satellites MODIS tendent à être surestimées, souvent proche 3000 mm/an. Cette différence peut être attribuée aux caractéristiques spécifiques de la télédétection, qui peuvent exagérer les pertes en eau en raison de facteurs comme la résolution spatiale et la modélisation des surfaces. Alors que les bacs à évaporation au sol fournissent des mesures plus localisées et possiblement plus précises, les valeurs MODIS offrent une vue d'ensemble plus large mais moins précise des taux d'évaporation.

3.1.1.7 Le bilan hydrologique

Le bilan hydrologique du lac de Guiers est essentiel pour comprendre la gestion des ressources en eau de la région, il est estimé en tenant compte de certaines données non connues (Bader et al., 2015).

Selon Alexis (2016), bien que les débits des prélèvements et des rejets des principales stations de pompage autour du lac de Guiers puissent sembler surévalués, ils fournissent néanmoins des indications précieuses sur les tendances mensuelles de prélèvement et de rejet. Ces estimations montrent que les prélèvements d'eau (y compris l'évaporation) augmentent de manière significative

³ MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m

pendant les périodes de forte demande agricole, notamment durant la saison sèche, lorsque l'irrigation devient essentielle. En revanche, les rejets varient en fonction des activités industrielles et des besoins domestiques des populations locales. Malgré les incertitudes, les tendances observées révèlent une pression croissante sur les ressources en eau (voir fig. 3.13).

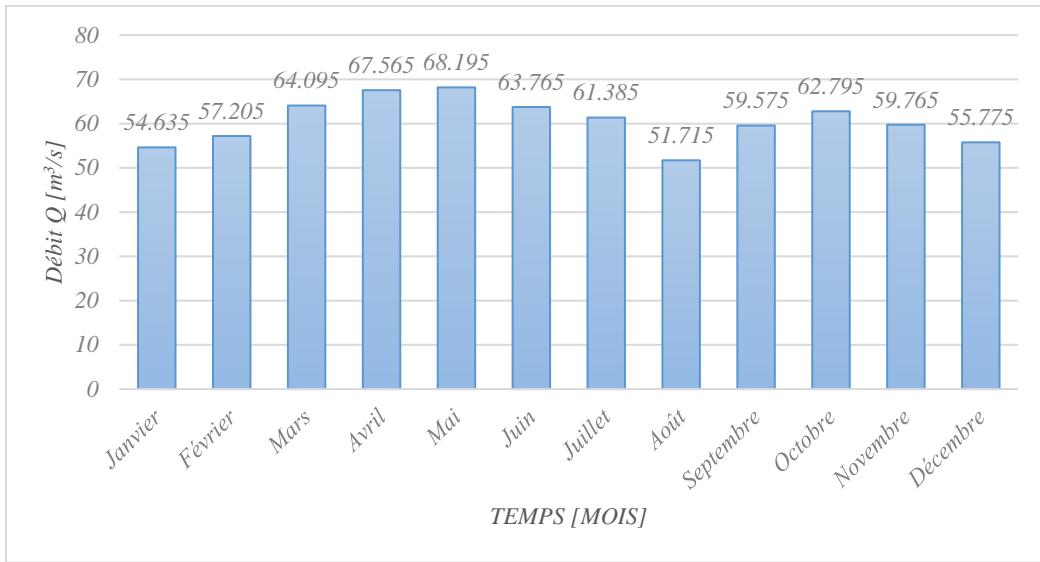


Figure 3-12 : Débits mensuels estimés des prélevements (source (Alexis, 2016))

D'après Bader et al. (2015), depuis mars 1992 l'eau douce du fleuve à Richard-Toll est constamment disponible à un niveau élevé, éliminant la nécessité d'isoler périodiquement le lac pour conserver un important stock d'eau douce. Les vannes du canal de Taoué restent ouvertes la plupart du temps, maintenant un niveau stable du lac avec des fluctuations annuelles limitées (32 à 95 cm) (Bader et al., 2015). Cette gestion permet de compenser la perte d'eau par évaporation et de favoriser le stockage pour un usage futur, tout en améliorant les zones humides (Bader et al., 2015).

Selon Bader et al. (2015), un modèle hydrologique simple a été développé pour le lac, intégrant divers paramètres tels que le débit journalier de la Taoué, le niveau du lac, les précipitations mensuelles à Dagana, le taux moyen d'évaporation et les rejets de drainage. Ce modèle, fonctionnant à une échelle journalière, permet d'estimer les débits prélevés, écoulés ou perdus par infiltration. Entre 1999 et 2005, les flux moyens sont : apports du fleuve ($33,7 \text{ m}^3/\text{s}$, 92 % des flux entrants), précipitations ($1,83 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 %), rejets de drainage ($0,98 \text{ m}^3/\text{s}$, 3 %), pertes par évaporation ($21,0 \text{ m}^3/\text{s}$, 58 % des flux sortants), prélevements pour AEP ($2 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 %), et autres débits sortants ($13,3 \text{ m}^3/\text{s}$, 37) (Bader et al., 2015) (voir fig. 3.14).

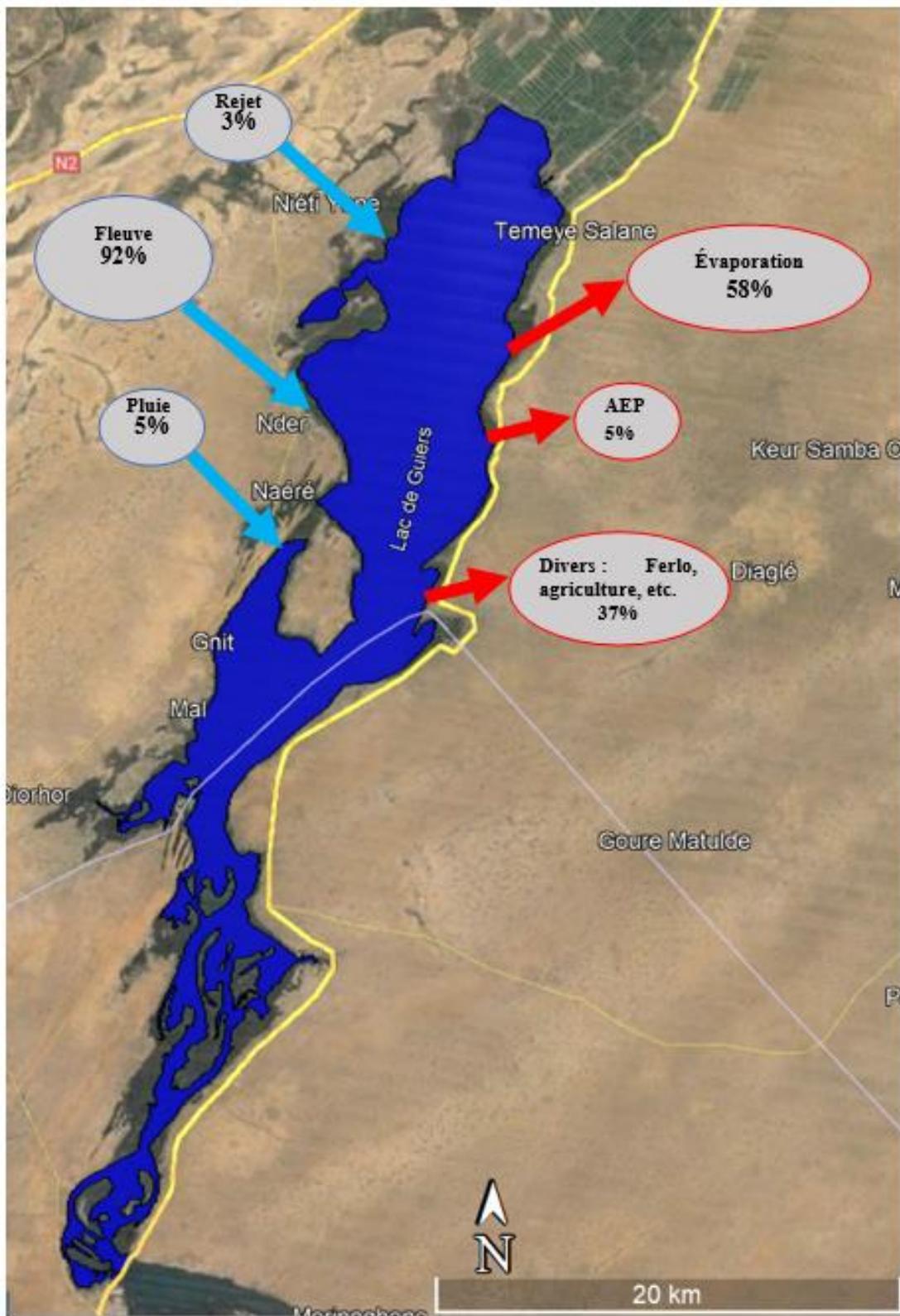


Figure 3-13 : Bilan du lac de Guiers (Bader et al., 2015)

L'analyse du bilan hydrologique mensuel de la région du lac de Guiers, basée sur les données satellitaires CHIRPS et MOD16A2.061, met en évidence des variations saisonnières importantes influencées par les précipitations et l'évapotranspiration.

L'analyse des séries chronologiques utilisant des produits dérivés de la télédétection liés aux précipitations et à l'évapotranspiration a permis de calculer le bilan hydrique via la plateforme Google Earth Engine (Ate Poortinga 2023). Les précipitations nettes mensuelles (P) ont été mesurées avec une résolution spatiale de 5 km sur 8 jours, tandis que l'évapotranspiration mensuelle (ET) a été évaluée avec une résolution spatiale de 500 m sur 5 jours. Bien que cette approche offre une vue d'ensemble utile et des résolutions temporelles et spatiales adaptées, elle présente des limites. Les différences de résolution entre les deux variables peuvent introduire des incohérences dans le bilan hydrique, et la fiabilité des estimations de télédétection dépend fortement de la précision des algorithmes et des modèles sous-jacents.

Les données CHIRPS révèlent des périodes de pluies concentrées principalement entre août et novembre, tandis que les données MOD16A2.061 indiquent des taux d'évaporation élevés pendant les mois chauds, ce qui accentue les pertes en eau du lac (voir fig. 3.15).

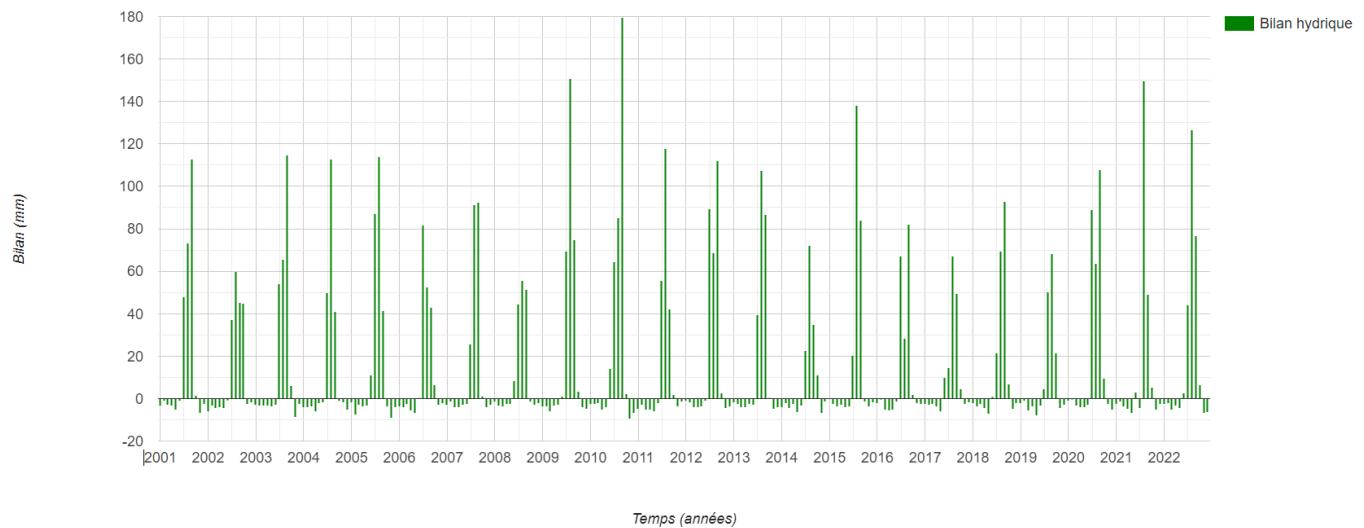


Figure 3-14 : Bilan hydrique moyen mensuel de 2001 à 2023 (source : MOD16A2.061⁴ et CHIRPS⁵)

⁴ MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m

⁵ CHIRPS Pentad: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data (Version 2.0 Final)

3.1.1.8 Végétation

La végétation autour du lac de Guiers est composée de plusieurs types de formations végétales. La zone autour du lac est une zone de savane arborée, caractérisée par la présence d'arbres tels que le baobab, le tamarinier et l'acacia (Coly, 1996).

En outre, la région est également caractérisée par la présence de plusieurs types de zones humides (RAMSAR), des zones écologiques (parc de Djoudj, parc de Diawling, Ndial, etc) (Kamara et al., 2012), les marais (telles que les 3 marigots), les zones inondables et les deltas, qui sont des habitats importants pour la faune et la flore locales (Fowler & Cavanagh, 2005). Ces zones humides sont souvent couvertes de graminées, de roseaux et d'autres plantes aquatiques (Abou THIAM, 2012).

La végétation autour du lac de Guiers est importante pour maintenir la qualité de l'eau et préserver la biodiversité dans la région. Les plantes jouent un rôle important dans le cycle de l'eau, en absorbant les nutriments et les contaminants présents dans l'eau, ce qui peut contribuer à améliorer la qualité de l'eau du lac.

En outre, la végétation fournit un habitat important pour la faune locale, y compris les oiseaux migrateurs qui visitent la région (Rochette, 1974). Les zones humides sont également des habitats importants pour les poissons et d'autres animaux aquatiques, qui sont une source de nourriture importante pour les communautés locales (Niang, Awa, 2011).

Cependant, la végétation autour du lac de Guiers est également menacée par des pratiques telles que la surexploitation des ressources naturelles (Cogels, F. X. & Gac, 1985), l'expansion des zones agricoles et l'érosion des sols.

L'approche de calcul de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) via la plateforme Google Earth Engine (GEE) utilise des opérations de bande simples pour effectuer des calculs mathématiques sur les bandes spectrales des images satellites.

Pour cette analyse, des images de Sentinel-2 et MODIS ont été utilisées. Le NDVI a été calculé à partir de la formule : $NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)$. Pour Sentinel-2, le proche infrarouge (NIR) correspond à la bande B8 (835.1 nm) et le rouge (RED) à la bande B4 (664.5 nm), avec une analyse réalisée pour la période du 1er au 30 septembre 2022. Pour les images MODIS, les bandes utilisées sont Band 1 pour le rouge (620-670 nm) et Band 2 pour le proche infrarouge (841-876 nm), analysées sur une période plus longue, du 1er janvier 2015 au 1er juillet 2024.

L'analyse a été effectuée sur une zone cultivée située aux coordonnées (X : -15.70 ; Y : 16.40). En calculant le NDVI à partir de ces sources d'images, nous pouvons observer les variations de l'indice de végétation et suivre l'évolution des cultures dans le temps. L'approche peut présenter des limites en termes de résolution spatiale et de différences dans les périodes de collecte de données entre les deux satellites d'où une validation des résultats avec des données au sol peut donner la précision et la fiabilité des estimations obtenues.

La visualisation de la couverture végétale dans la région montre une variation du NDVI allant de 0 à 0,7. Les valeurs proches de 0 indiquent des zones avec peu ou pas de végétation, souvent des sols nus ou des zones dégradées. En revanche, les valeurs élevées, proches de 0,7, correspondent à des zones de végétation dense et saine, telles que les terres agricoles (voir fig. 3.16).

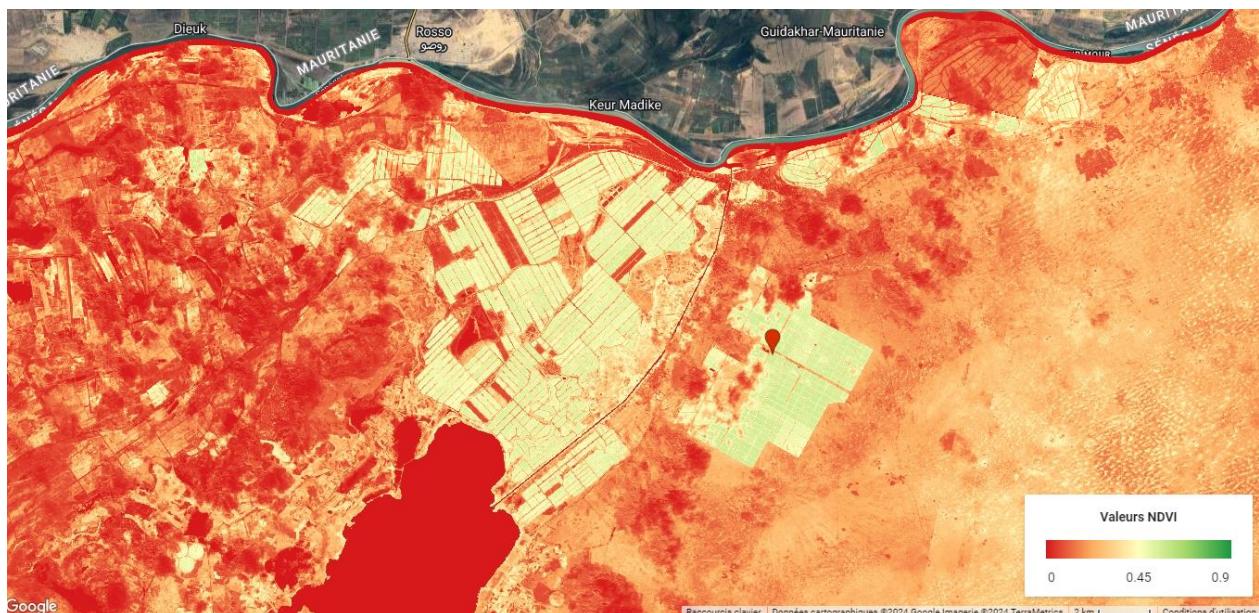


Figure 3-15 : Aperçu de la présence végétation du NDVI (Sentinel-2)

L'analyse des graphiques (fig. 3.17 et fig. 3.18) révèle des informations essentielles sur les variations de la couverture végétale au fil du temps. Le premier graphique montre la variation mensuelle du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de 2005 à 2020, avec des valeurs élevées de juillet à novembre. Ces périodes correspondent à la saison des pluies et à la période de culture, lorsque la végétation est plus dense et plus verdoyante, favorisée par l'augmentation des précipitations et l'arrosage.

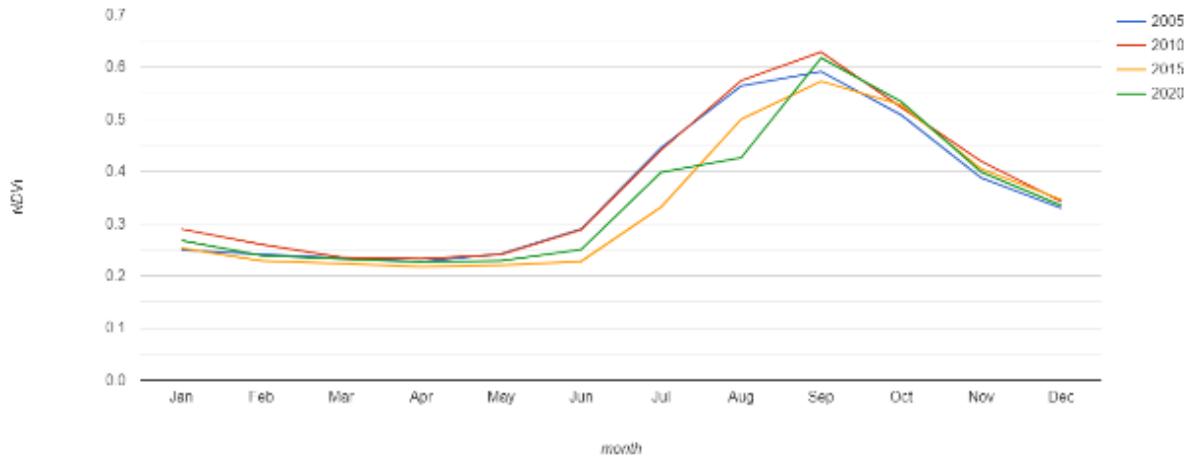


Figure 3-16 : Variation mensuelle du NDVI de 2005 à 2020 (Modis)

En revanche, le deuxième graphique présente un histogramme de la variation du NDVI de 2015 à 2023, cela montre une baisse des valeurs pendant les périodes sèches. Cette diminution indique une réduction de la couverture végétale due à un déficit en eau, ce qui peut affecter la santé et la croissance de la zone agricole. C'est le signal de la zone cultivée qui est récolté à certains moments (baisse), tandis que la végétation naturelle est alignée sur les pluies (hausse). Les deux graphiques illustrent ainsi l'impact des variations saisonnières et des conditions climatiques sur la dynamique de la végétation autour du lac de Guiers.

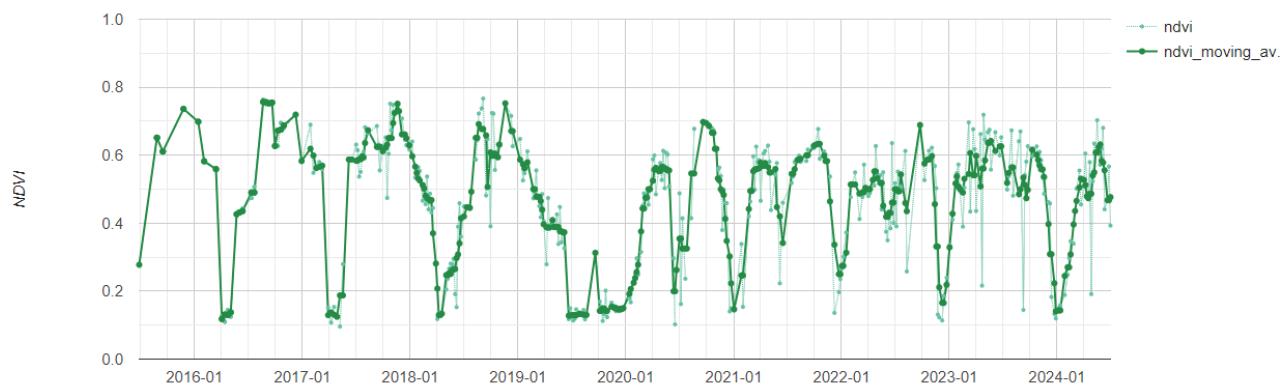


Figure 3-17 : Histogramme de la variation du NDVI de 2015 à 2023 (Sentinel-2)

3.1.1.9 Relief

La région autour du lac de Guiers et du bassin du fleuve Sénégal est caractérisée par un relief relativement plat et peu accidenté, à l'exception du massif du Fouta-Djalon (Bader et al., 2015), qui est la source du bassin. Les pentes y sont généralement faibles avec des altitudes modérées qui

variant légèrement sur de vastes superficies (Esteves, 1996). Le bassin du Sénégal, marqué par des collines douces et des plaines fertiles, présente un relief peu prononcé (voir fig. 3.22).

Les pentes douces autour du lac de Guiers favorisent un drainage lent des eaux vers le lac, entraînant une faible érosion du sol (Niang, A, 2011). Cette topographie contribue à la formation de vastes zones humides et de marécages (Cogels, F.-X. et al., 1994), qui offrent des habitats importants pour la biodiversité locale. Les caractéristiques du relief influencent la dynamique hydrologique de la région, avec une circulation des eaux relativement lente et une tendance à la stagnation dans les zones environnantes (Coly, 1996). Ces aspects topographiques ont des implications significatives la lenteur de l'écoulement et la stagnation des eaux nécessitent une attention particulière dans les stratégies de gestion hydrologique (Gac, J.-Y., 1987).

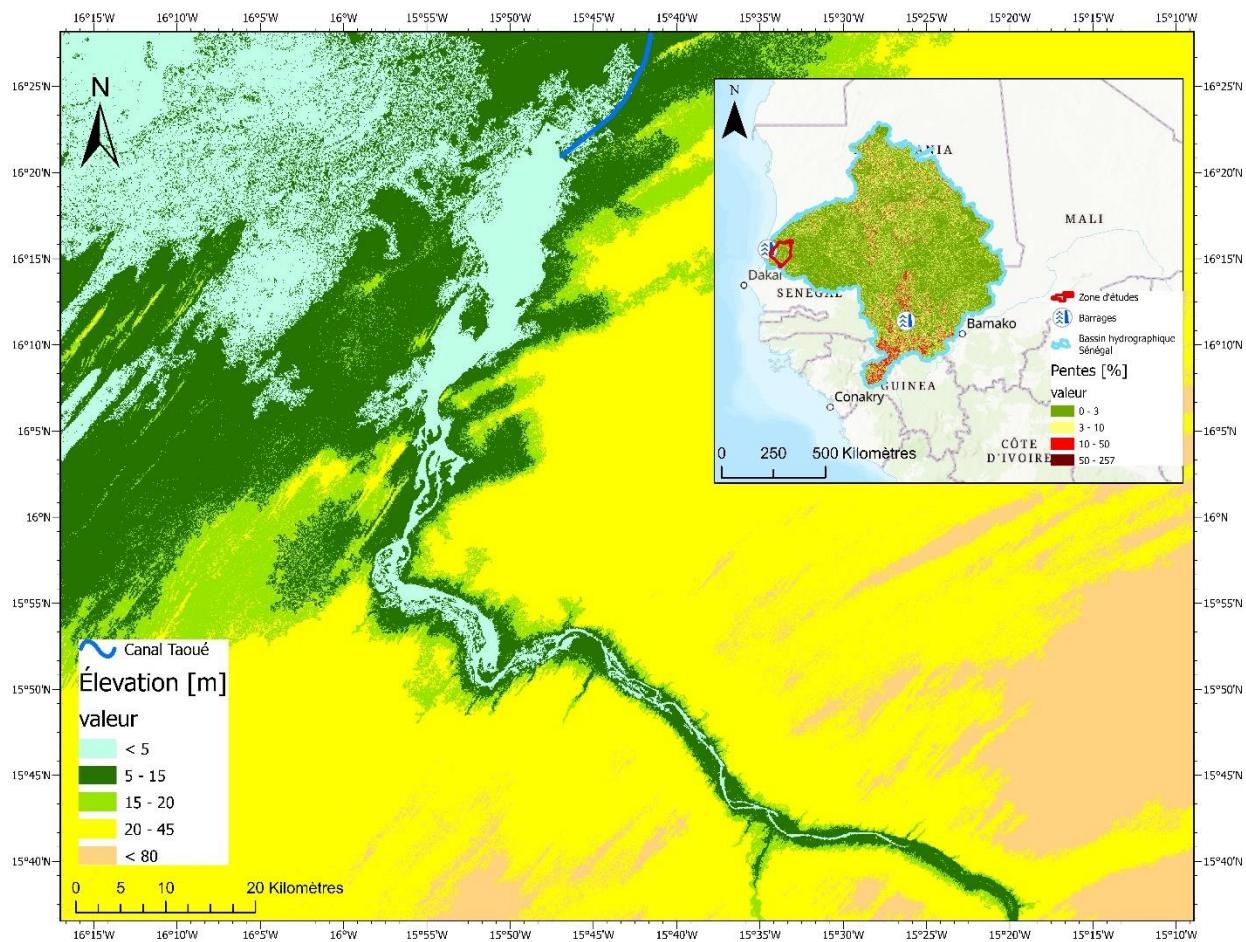


Figure 3-18 : Relief du lac de Guiers

3.1.10 Faune

La faune autour du lac de Guiers est riche et variée, jouant un rôle crucial dans l'équilibre écologique de la région. Le lac et ses environs offrent des habitats diversifiés qui soutiennent une abondante biodiversité. Parmi les espèces notables, on trouve une gamme d'oiseaux, des mammifères tels que les chats sauvages, chacals et les lapins, ainsi que des reptiles comme les serpents et les lézards (Ndiaye, A. C., 2005). Les oiseaux, en particulier, sont bien représentés, contribuant à la richesse ornithologique de la région. La grande faune est menacée par des activités telles que la chasse et le braconnage, ce qui souligne la nécessité de mettre en place des stratégies de conservation et de gestion durable pour protéger ces précieux écosystèmes (Bader et al., 2015).

3.1.2 Caractéristiques démographiques

3.1.2.1 Habitat humain

La région du lac de Guiers connaît une dynamique démographique importante, caractérisée par une croissance constante de la population au fil du temps (OLAC, 2020). Les facteurs tels que l'urbanisation, la recherche de moyens de subsistance et l'amélioration des services de base contribuent à cette augmentation continue (Auclair, 2013). La croissance démographique peut poser des défis, notamment une pression accrue sur les ressources naturelles et une demande croissante en services sociaux, d'où il est essentiel de comprendre les tendances pour orienter les politiques de développement et promouvoir un développement équilibré dans la région.

Partagée entre les régions de Saint-Louis et de Louga (Ndiaye, A. C., 2005), la région du lac de Guiers abrite une population de importante principalement concentrée dans la région de Saint-Louis (ANSD, 2020). La majeure partie de la population vit en milieu rural, mais il existe des disparités importantes dans la répartition spatiale, avec une concentration urbaine dans certaines zones (ANSD, 2020).

Au cours des dernières années, la région a connu une croissance démographique significative, en raison de l'afflux de populations en provenance de Mauritanie, stimulé par la mise en service du barrage de Diama (PDIDAS, 2016). Cela peut entraîner des changements dans les schémas d'habitat et des défis supplémentaires en matière de développement.

3.1.3 Caractéristiques socio-économiques

Le complexe hydrologique du lac de Guiers et ses terres alluviales joue un rôle crucial dans le paysage sahélien du Sénégal, attirant les populations locales pour diverses activités (Cogels, F.-X. et al., 1994). Les principaux acteurs sont les agriculteurs, éleveurs, et pêcheurs, qui exploitent les terres de décrue, les ressources halieutiques et les pâturages pluviaux. Les activités socio-économiques varient, allant de l'agriculture et de l'élevage à petite échelle dans les villages à des infrastructures plus développées dans les grandes localités (Ndiaye, A. C., 2005). L'économie locale, auparavant centrée sur l'agriculture classique, la pêche et l'élevage, s'est diversifiée avec l'introduction des cultures irriguées et le développement de l'artisanat. La pêche est une activité clé, avec des produits consommés localement ou vendus sur les marchés régionaux, et le commerce local soutient l'économie régionale. La région fait face à des défis comme la gestion durable des ressources en eau, les impacts du changement climatique, et les conflits d'usage entre les secteurs économiques (Hubert et al., 2007).

3.1.3.1 L'agriculture

Les activités agricoles dans la région du lac de Guiers ont évolué, passant d'une agriculture de décrue à une agriculture irriguée. Le manque d'eau disponible empêche la pratique de l'agriculture traditionnelle, les infrastructures rudimentaires limitent la rentabilité et la réduction des pâturages due à la diminution des cultures de décrue affecte aussi l'élevage, qui souffre de la concurrence avec d'autres activités et de l'accès réduit au lac en saison sèche (Mbow, 2017). Malgré ces défis, l'agriculture reste un pilier de l'économie locale, offrant des moyens de subsistance aux communautés et contribuant au développement socio-économique de la région (BAD, 2013). Les terres fertiles le long des rives du lac sont utilisées pour cultiver diverses cultures destinées à la consommation locale et à la vente sur les marchés régionaux (FAO, 2017).

3.1.3.2 L'élevage

L'élevage est la seconde activité économique la plus importante dans la région du lac, il est pratiqué de manière extensive et il implique une transhumance saisonnière du bétail entre les pâturages pluviaux et ceux de décrue (Mar & Magrin, 2006). Les méthodes d'élevage varient selon les groupes ethniques (OLAC, 2020), cette diversité d'approches reflète la complexité de l'élevage dans la région et son importance socio-économique pour les différentes communautés.

Les activités d'élevage jouent un rôle essentiel dans l'économie locale de la région du lac de Guiers (BAD, 2013), fournissant des moyens de subsistance à de nombreuses familles et contribuant à la sécurité alimentaire. Les éleveurs élèvent divers animaux tels que des bovins, des ovins et des caprins, en utilisant les pâturages disponibles le long des rives du lac et dans les zones avoisinantes. Cette pratique permet de produire de la viande, du lait et d'autres produits dérivés, soutenant ainsi l'économie régionale (Seck et al., 2005). Les éleveurs feront face à des défis tels que la rareté des pâturages, la compétition pour les ressources en eau et les maladies animales, nécessitant une gestion prudente et des pratiques durables pour garantir la viabilité à long terme de l'élevage dans la région du lac de Guiers (Mbow, 2017).

3.1.3.3 La pêche

Les activités de pêche au lac de Guiers sont principalement artisanales, utilisant des méthodes traditionnelles et des outils simples tels que filets, lignes et pièges. Les pêcheurs emploient souvent des pirogues en bois, parfois motorisées et les principales espèces pêchées incluent le tilapia, les silures, les perches du Nil et les poissons-chats, etc. (Mbow, 2017). La pêche est saisonnière, augmentant pendant la saison des pluies avec des niveaux d'eau plus élevés favorisant la reproduction des poissons.

Les produits halieutiques sont destinés à la consommation locale et à la vente sur les marchés régionaux, vendus frais ou transformés par séchage ou fumage pour une meilleure conservation (OLAG, 2019). La pêche est cruciale pour les revenus des communautés locales, offrant des emplois et soutenant l'économie locale. Les pêcheurs sont confrontés à des défis comme la surpêche, les impacts du changement climatique, les conflits d'usage de l'eau avec l'agriculture et autres difficultés (OLAC, 2020).

Les populations de pêcheurs signalent une raréfaction des ressources halieutiques, principalement attribuée aux barrages de Manantali et de Diama. Les techniciens confirment ce constat mais soulignent aussi la pollution de l'eau, les rejets d'eaux usées et d'engrais agricoles comme facteurs contribuant. Les difficultés d'accès au lac, dues à des techniques inadaptées et à l'envahissement de végétation, compliquent la situation. Malgré la baisse des prises, la valeur marchande des produits a augmenté, attirant encore des pêcheurs, y compris des étrangers de Guinée et de Mauritanie (PREFELAG, 2019).

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les étapes méthodologiques adoptées pour concevoir un modèle hydraulique solide. Ces étapes, synthétisées dans la figure ci-jointe, incluent : (i) l'étude préliminaire de la zone d'intérêt, (ii) la collecte et le traitement des données, (iii) le choix des paramètres pertinents, et (iv) la calibration et la validation du modèle. Chacune de ces étapes est essentielle pour assurer la précision et la fiabilité du modèle hydraulique.

4.1 Modélisation hydraulique

4.1.1 Choix et description du Modèle Hydraulique

Le choix d'utiliser HEC-RAS pour cette étude repose sur plusieurs facteurs clés. Tout d'abord, ce modèle hydrodynamique est largement accessible et gratuit, ce qui en fait un outil privilégié par de nombreuses institutions de recherche ainsi que par des organismes gouvernementaux et privés (Brunner, 2016). La version 6.4.1, disponible sur le site de l'US Army Corps of Engineers⁶, a été employée dans cette étude, en synergie avec River GIS via l'outil QGIS, afin de renforcer l'efficacité des simulations grâce à l'intégration de technologies modernes telles que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG).

HEC-RAS se distingue par sa capacité à modéliser avec précision les écoulements dans les systèmes de canaux et de cours d'eau, même dans des environnements complexes comme celui du canal de Taoué. Sa robustesse réside dans sa capacité à simuler des écoulements en régimes permanent, transitoire, ou critique, ce qui est crucial pour comprendre les dynamiques hydrauliques dans un contexte où les débits varient selon les saisons et les apports en eau. Ce modèle est largement validé et utilisé dans le domaine de l'ingénierie hydraulique, offrant ainsi des résultats fiables et comparables à d'autres études.

HEC-RAS permet également une modélisation en 1D, 2D, et 3D, ce qui est essentiel pour capturer les interactions complexes entre le canal et le lac, y compris l'impact de la végétation aquatique et

⁶ <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

des sédiments sur les écoulements. Sa compatibilité avec les données topographiques, hydrologiques, et environnementales, ainsi que son intégration facile avec les SIG, permettent une représentation précise de la géométrie du canal et du lac, facilitant l'analyse des scénarios futurs, tels que les effets du changement climatique ou les modifications des pratiques agricoles.

Enfin, en tant qu'outil open source, HEC-RAS est non seulement accessible, mais également personnalisable pour répondre aux besoins spécifiques de cette étude. Contrairement à d'autres modèles hydrodynamiques, souvent coûteux ou nécessitant une formation spécialisée, HEC-RAS offre une plateforme flexible et abordable, tout en maintenant un niveau élevé de performance et de précision. Grâce à son interface graphique SIG externe, appelée RAS Mapper, il est adaptable à diverses applications, telles que l'analyse des crues (Yamani K, 2016), le calcul des dépôts de sédiments (Mondal I, 2016), et l'évaluation de la qualité de l'eau (Mandal SP, 2016).

En résumé, HEC-RAS a été choisi pour cette étude en raison de sa précision, de sa robustesse, de sa capacité d'intégration des données locales, et de sa flexibilité, en faisant un outil idéal pour modéliser les écoulements du canal de Taoué et du lac de Guiers.

4.1.1.1 Modèle unidimensionnel (1D)

Pour le canal de Taoué, un modèle 1D sera créé avec HEC-RAS pour analyser les écoulements en tenant compte uniquement des variations longitudinales. Ce modèle permettra de calculer le profil de surface de l'eau, les débits d'écoulements (Ghimire et al., 2020). L'équation 1D de Saint-Venant, composée d'une continuité et d'une quantité de mouvement, sera utilisée pour le routage des écoulements instables. Une technique de différences finies implicites résoudra l'équation d'écoulement instable 1D (Brunner, 2016). Pour l'écoulement stationnaire 1D, l'équation d'énergie sera résolue par une méthode itérative standard entre les sections successives afin de calculer l'élévation de la surface de l'eau pour des profils d'eau à variation lente (Brunner, 2016).

4.1.1.2 Modèle bidimensionnel (2D)

Pour le lac de Guiers, un modèle 2D plus complexe est utilisé pour prendre en compte la variation des écoulements dans deux dimensions (longitudinales et latérales). HEC-RAS applique soit l'équation complète de Saint-Venant, soit l'équation d'onde de diffusion (Ghimire et al., 2020). L'équation de Saint-Venant 2D résout les problèmes avec une exigence d'efficacité de calcul plus élevée, tandis que l'équation d'onde de diffusion 2D offre une plus grande stabilité et rapidité

(Brunner, 2016). Le routage d'écoulement instable résout les équations de continuité et d'impulsion dans l'espace et le temps.

4.1.1.3 Modèle couplé 1D/2D

Pour comprendre les écoulements hydrauliques entre le canal Taoué et le lac de Guiers, un modèle couplé 1D/2D est utilisé. Ce modèle analyse les écoulements instables à travers plusieurs simulations. La modélisation 1D est appliquée au canal, où l'écoulement est principalement unidirectionnel, tandis que la modélisation 2D est utilisée pour le lac, nécessitant une plus grande précision hydrodynamique. La zone 2D du lac se connecte directement au modèle 1D du canal en tant qu'extrémité amont ou aval. Les deux modèles se connectent à des intervalles de temps définis, permettant des itérations bidirectionnelles pour calculer l'élévation de la surface de l'eau (Brunner, 2016).

4.2 Données d'entrée du modèle

4.2.1 Données bathymétriques

Les données bathymétriques recueillies auprès l'IRD ont permis d'inclure 12 des 13 sections transversales du canal. Ces sections illustrent les variations le long du canal, telles que les changements de pente et la présence de méandres. Pour les segments sans données, des interpolations à intervalles réguliers d'environ 100 mètres ont été réalisées pour combler les lacunes, assurant ainsi une couverture complète et précise du profil bathymétrique sur 16,8 km des 17 km du canal.

Pour simuler le lac en 2D, nous avons utilisé plusieurs sections transversales bathymétriques (OLAC) réparties le long du lac pour reconstituer sa morphologie (DEM). En suivant un gradient amont-aval, ces données montrent une grande diversité de formes, des zones peu profondes et larges en amont aux dépressions plus marquées en aval. Les quelques lacunes ont été comblées par interpolation, garantissant ainsi une couverture continue sur presque toute la longueur du lac.

Un prétraitement des données bathymétriques a été effectué dans AutoCAD Covadis pour observer le nombre de points relevés par profil en travers (voir fig. 4.2). Le MNT a été utilisé pour générer les sections transversales interpolées. La bathymétrie a été intégrée au MNT à l'aide du logiciel SIG QGIS (RiverGIS), permettant de modifier manuellement chaque section avec les données

disponibles. Les sections transversales sont généralement tracées en fonction des relevés bathymétriques pour exploiter l'information.

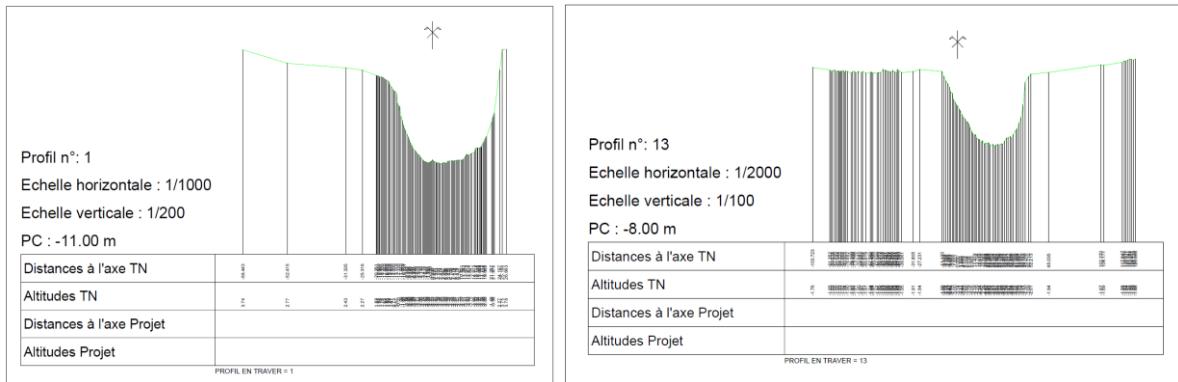


Figure 4-1 : Profil en travers du canal (N°1= Amont et N°13= Aval) avec AutoCAD covadis

4.2.2 Modèle numérique de terrain (MNT)

Pour évaluer le comportement du modèle à grande échelle sur le lac de Guiers, le MNT du TanDEM-X⁷ a été choisi par rapport au SRTM⁸ en raison de sa résolution de 30x30 mètres, des informations sur la profondeur au niveau de l'eau, fournissant des données d'élévation précises et détaillées pour des applications scientifiques. Les données TanDEM-X ont été utilisées pour les simulations. Les sections transversales pour le modèle 1D ont été générées à partir de RiverGIS en utilisant ces données, tandis que la surface 2D du lac a également été définie à partir du MNT. Ce dernier est intégré dans HEC-RAS via le module RAS Mapper.

La figure 4.2 illustre une différence notable d'altitude entre les données d'élévation TanDEM-X et SRTM surtout au niveau de l'aval (gauche) du canal Taoué que l'amont (droite). Les données TanDEM-X montrent des valeurs inférieures à 0 mètre (en vert), suggérant des zones dépressionnaires (altitudes négatives), tandis que les données SRTM (en orange) affichent des altitudes supérieures.

⁷ https://download.geoservice.dlr.de/TDM30_EDEM/

⁸ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

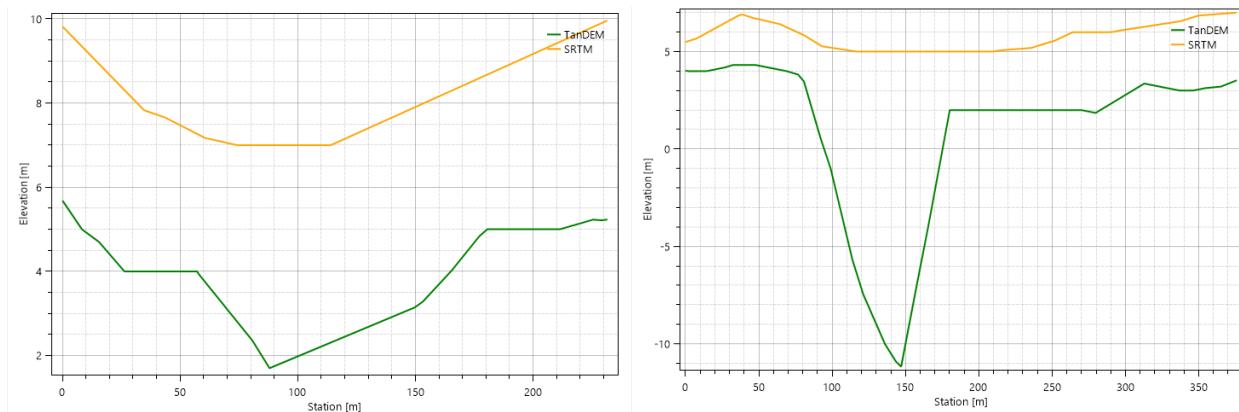


Figure 4-2 : Comparaison du profil en travers du canal amont et aval (TanDEM/SRTM)

Les données topographiques issues des MNT ont permis de produire un profil en long, révélant les tendances des altitudes depuis l'amont, au niveau du fleuve Sénégale, jusqu'à l'aval du lac de Guiers (KMS). Ce profil montre des hauteurs variantes entre 2 et 9 mètres (voir fig. 4.3).

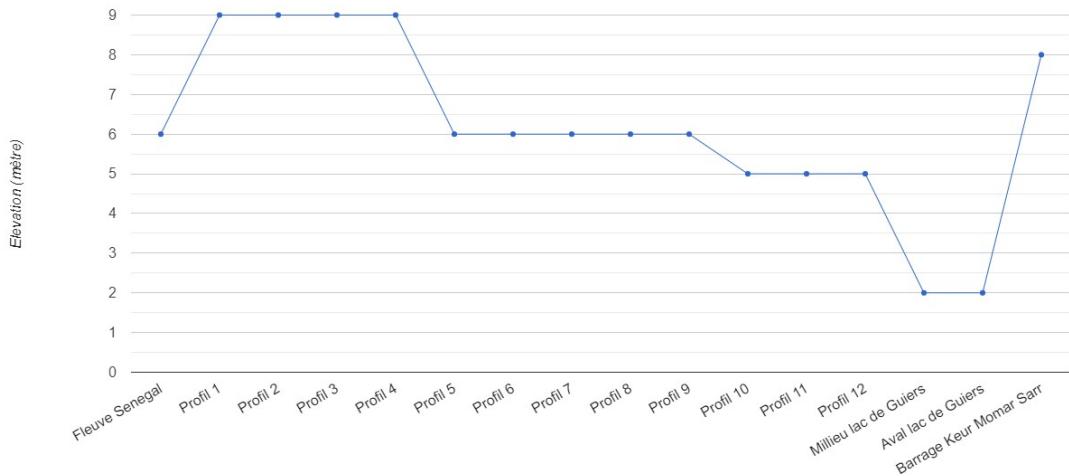


Figure 4-3 : Profil en long de la zone d'études (Source : SRTM, GEE)⁹

L'un des défis de la modélisation hydraulique est que les données MNT n'incluent pas le terrain sous la surface de l'eau dans la zone du canal et du lac. Pour surmonter ce problème, RAS Mapper a été utilisé pour créer un modèle de terrain de la région du canal et du lac à partir des sections transversales bathymétriques et de la surface d'interpolation de la couche de sections transversales. Ce modèle de terrain, intégrant le canal et le lac, peut ensuite être combiné avec le MNT (tanDEM)

⁹ SRTM Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Data

pour créer un modèle de terrain amélioré, essentiel pour la modélisation et la cartographie hydrauliques (Brunner, G. W., 2016).

4.2.3 Les données d'observation

Les données historiques, collectées à la station RT/RN Fleuve située au pont (coordonnées Y=16.46485, X=-15.692895) du 11 novembre 1998 au 2 avril 2001, sont essentielles pour ajuster les paramètres des modèles hydrologiques du canal Taoué. Elles fournissent des mesures précises de hauteur d'eau et de débits, utilisées pour la calibration et la validation des modèles. Cette étape est cruciale pour améliorer la précision des simulations d'écoulements en alignant les prévisions avec les conditions réelles observées.

En complément, les relevés hydrométriques journaliers du niveau d'eau, couvrant la période du 1er janvier 2010 au 30 avril 2023, offrent des données actualisées sur les variations de hauteur d'eau dans le canal Taoué. Ces informations sont importantes pour suivre les tendances à long terme et détecter les évolutions dans les caractéristiques hydrologiques du canal au fil des années, permettant ainsi d'adapter les stratégies de gestion des ressources en fonction des changements observés.

4.2.4 Les données d'occupation du sol

Les données d'occupation des sols (LULC) sont des paramètres clés pour la modélisation 1D/2D. Issues des images Sentinel-2¹⁰, elles couvrent la zone d'étude avec les proportions suivantes : 1,15 % d'arbres, 8,53 % de surfaces d'eau, 21,34 % de terres cultivées, 0,91 % de surfaces construites, 62,53 % de pâturages, 0,92 % de végétation inondée et 4,62 % de sol nu. La valeur de rugosité de Manning est attribuée à chaque type d'utilisation du sol pour le modèle 1D/2D, permettant une cartographie précise des différentes catégories d'occupation du sol avec une résolution de 10 mètres.

Dans cette étude, nous avons utilisé une classification de l'occupation du sol en 9 classes, chacune associée à une valeur de rugosité de Manning (n) spécifique : eau ($n=0,038$), arbres ($n=0,137$),

¹⁰ <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2>

végétation inondée ($n=0,068$), cultures ($n=0,035$), zones bâties ($n=0,103$), sol nu ($n=0,027$), et pâtures ($n=0,038$), no data ($n=néant$).

Tableau 4-1 : Manning (n) utilisée dans le modèle HEC-RAS 1D/2D

Code	Type de sols	Manning (n)
0	No Data	0
1	Eau	0.038
2	Arbres	0.137
4	Végétation inondée	0.068
5	Cultures	0.035
7	Zones bâties	0.103
8	Sol nu	0.027
11	Pâtures	0,038

Les valeurs de n pour chaque classe d'occupation du sol ont été estimées à partir des travaux de Chow (1959) sur l'hydraulique des canaux ouverts, de la base de données nationale sur la couverture terrestre (NLCD) (Janssen, 2016) et des données fournies par USGS Roughness characteristics of natural channels (Barnes, 1967) voir Tableau 4.1.

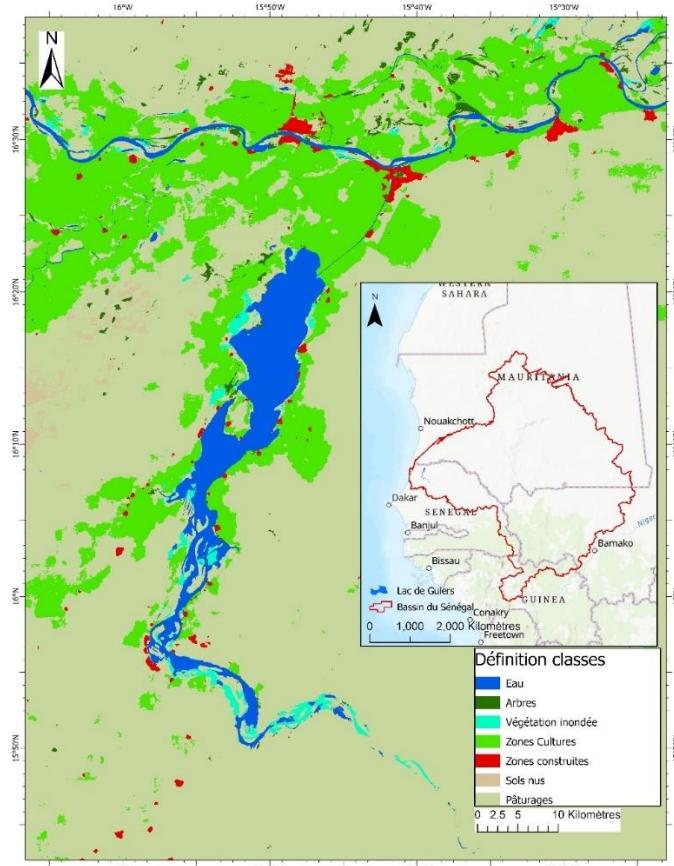


Figure 4-4 : Occupation du sol

Les pâturages, situés le long des rives du lac et dans les zones inondables périodiques, comprennent des arbres, arbustes, herbes et cultures agricoles. Les zones urbaines, identifiables par leur densité et leurs infrastructures, sont concentrées autour des villages et petites villes. Les surfaces d'eau, dominées par le lac et le canal, sont distinctement visibles. Les zones humides, se trouvent principalement autour des bords du lac et dans les dépressions inondables. Enfin, les sols nus sont présents dans les zones arides ou dénudées par des activités humaines ou naturelles.

4.2.5 Les couches de données sur les sols

Les informations sur les types de sols peuvent être complexes. Elles sont disponibles sous forme de données vectorielles issues de la base de données de la FAO, fournies en fichier shapefile avec des noms de sols abrégés et une clé unique. Ces informations sont accessibles sur le site de la FAO. Les types de sols, tels que sableux, limoneux sableux et argilo-sableux limoneux, peuvent être utilisés pour définir les paramètres d'infiltration dans la modélisation du ruissellement des précipitations avec HEC-RAS. En fonction de la méthode d'infiltration choisie, des valeurs comme le numéro de courbe (CN), le taux d'infiltration minimum et le taux d'abstraction doivent être initialement estimées, puis calibrées et validées (voir détail fig.4.5). le fond du lac est en grande partie argileux, ce qui rend l'infiltration très faible voir négligeable pour le lac.

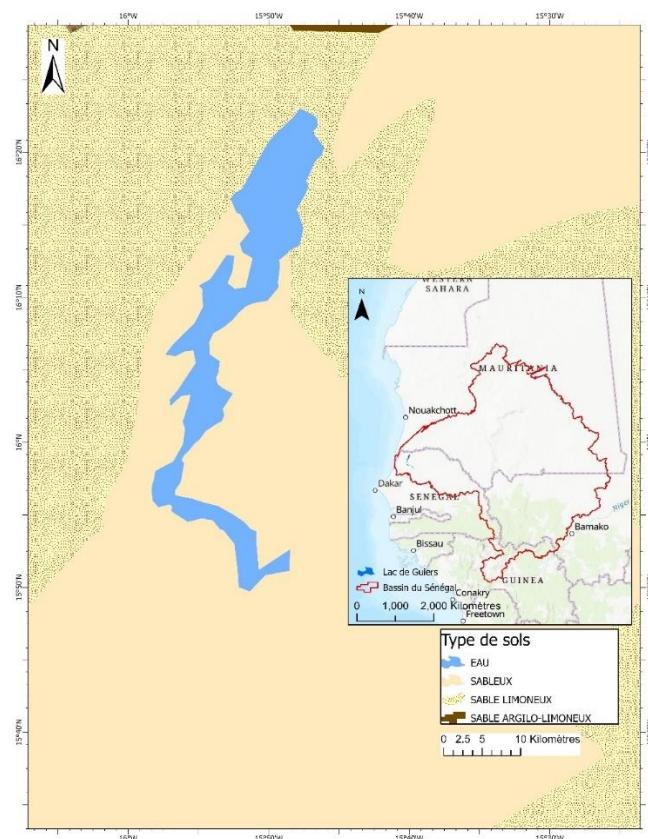


Figure 4-5 : couches de sols

4.3 Collecte de données

Avant de procéder à la modélisation du canal et du lac, une visite de terrain a été effectuée en août 2023 pour examiner les caractéristiques physiques de la zone d'étude. Cette enquête a permis d'identifier divers éléments importants tels que les repères géographiques, les dispositifs d'enregistrement, les structures entourant le canal et leurs modes de fonctionnement, ainsi que la végétation présente, la proximité entre le canal et les habitats, la morphologie du canal.

L'enquête a été assistée par une équipe de l'OLAC, fournissant des données essentielles pour l'étude. La zone s'étend depuis l'amont, près du fleuve Sénégal/Taoué, jusqu'à l'aval, au niveau du lac de Guiers.

Des données supplémentaires collectées incluent des données pluviométriques, des hauteurs d'eau, des températures et d'évaporations (3 bacs), qui ont été intégrées au modèle pour affiner les calculs du modèle.

4.4 Techniques de prétraitement des Données

La première étape consiste au traitement des données dans QGIS et RiverGIS, impliquant le traitement des données bathymétriques pour créer un modèle précis du fond du canal et du lac. Une fois les données préparées, elles sont importées dans HEC-RAS pour l'édition et l'analyse. Cette étape consiste à configurer le modèle hydraulique en définissant les sections transversales, les pentes. Les conditions sont appliquées pour simuler les interactions entre le canal et le lac, intégrant des données telles que les débits observés, les niveaux d'eau et les paramètres de rugosité de Manning. La dernière étape inclue la calibration et la validation du modèle, suivies de la simulation et du suivi du remplissage.

La figure 4.5, permet d'explorer l'approche méthodologique utilisée pour le développement du modèle hydraulique.

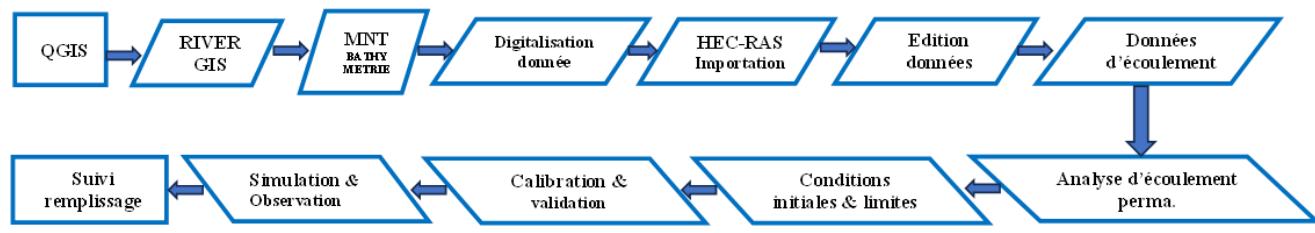


Figure 4-6 Démarche méthodologique

4.4.1 Attribution des données géométriques

L'attribution des données géométriques dans River GIS 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.

La procédure d'attribution des données géométriques débute par la numérisation de la ligne médiane du canal (Centerline), depuis l'amont vers l'aval, à l'aide de l'outil Éditeur avec suffisamment de points pour bien représenter les méandres.

Les lignes centrales sont divisées en segments, représentant le canal et ses berges respectives. Les lignes de berges (Bank Lines) sont ensuite numérisées, d'abord pour la rive gauche puis pour la rive droite, en suivant les chemins d'écoulement. Ces lignes doivent être numérisées de manière à éviter tout croisement dans la section transversale du bassin fluvial, avec les chemins d'écoulement délimitant les zones de plaine inondable.

La création des lignes d'écoulement (Flow paths) suit la direction des écoulements afin de tracer le centre de gravité, utilisé dans le calcul entre deux sections (Martel & Arsenault, 2020)

Les coupes transversales (cross section) sont indiquées par des numéros de station fluviale (RS), marquant la distance depuis le point le plus en aval. Les distances jusqu'à la prochaine section transversale en aval sont spécifiées pour les rives gauche (LOB) et droite (ROB), ainsi que pour le canal principal. La saisie des données géométriques est systématiquement réalisée de l'amont vers l'aval, et de la rive gauche vers la rive droite du canal. La figure 4.6 illustre les détails des données géométriques attribuées, incluant les coupes transversales, les lignes de bordure et le réseau de drainage. Les détails complets des sections transversales initiales et finales pour chaque tronçon du canal simulé sont fournis dans le tableau en annexe.



Figure 4-7 : Sections interpolées transversale du canal de Taoué

4.4.2 Choix et profils des sections

Douze sections ont été choisies en fonction de la topographie du terrain pour le canal ainsi que pour le lac. Le profil pour chaque section a été établi à l'aide d'un échosondeur, tandis que le profil des berges a été déterminé à l'aide d'une station totale d'arpentage. Pour les sections nécessitant une extension des berges, un modèle numérique de terrain avec une résolution de 30 mètres a été utilisé.

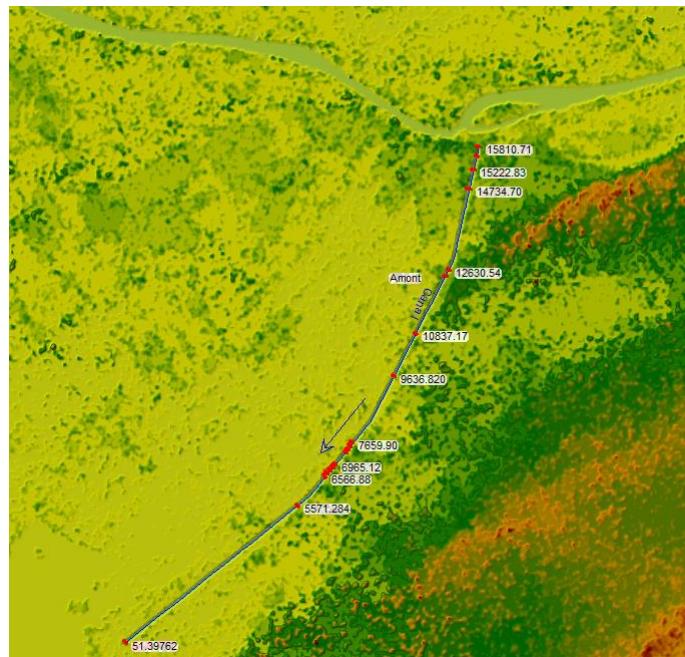


Figure 4-8 : Sections transversales du canal de Taoué

4.4.3 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 considérées uniformes dans notre étude : (Alexis, 2016). Pour le tronçon allant de l'amont à l'aval du modèle, le canal de Taoué (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), en raison de la présence de typha.

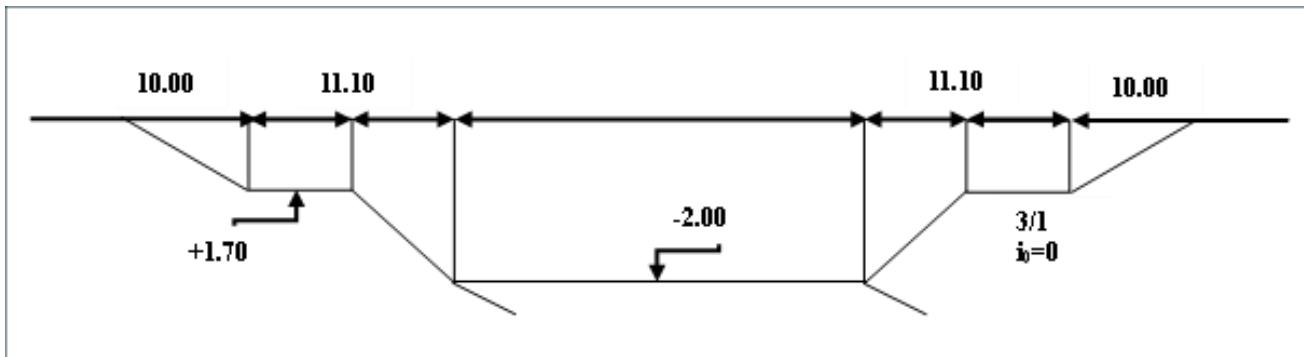


Figure 4-9 : Schéma du canal de Taouey (source : (Alexis, 2016))

4.4.4 Les conditions initiales et limites

Dans HEC-RAS, une variété de conditions initiales et limites peuvent être appliquées à un modèle. Les conditions limites incluent des limites externes, internes, ainsi que des conditions limites globales, offrant une flexibilité pour modéliser les différents scénarios hydrauliques en fonction du type de modèle (Brunner, 2016).

4.4.4.1 Les conditions aux limites externes

Dans cette modélisation, un hydrogramme de hauteur d'eau est considéré comme la condition au limite amont couvrant la période du 1er janvier 2010 au 31 décembre 2015 a été utilisé, montrant des hauteurs d'eau variant entre 2 et 2,8 mètres. Les plus faibles hauteurs correspondent à la période sèche, reflétant les variations saisonnières typiques de la région (voir fig. 4.10)

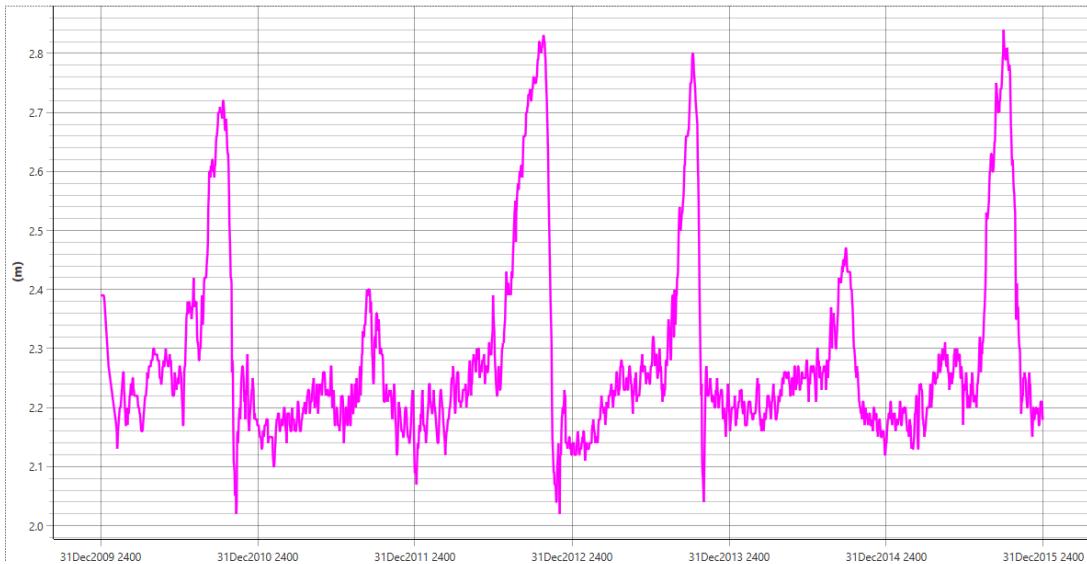


Figure 4-10 : Hauteur d'eau canal 2010-2015 (mm)

La condition limite de profondeur normale est utilisée pour estimer l'élévation de la surface de l'eau, on une pente de frottement de 0,0008 appliquée à l'aval de la zone d'étude. La pente est basée sur celle du terrain est intégrée à l'équation de Manning pour calculer la profondeur normale pour chaque écoulement.

4.4.4.2 Conditions aux limites globales

Les données de précipitations journalières enregistrées à la station CS6 pour la même période ont été saisies sous un format ponctuel. Les valeurs sont globalement faibles ne dépassant les 60 mm/jour, reflétant une pluviométrie de la région (voir fig. 4.11).

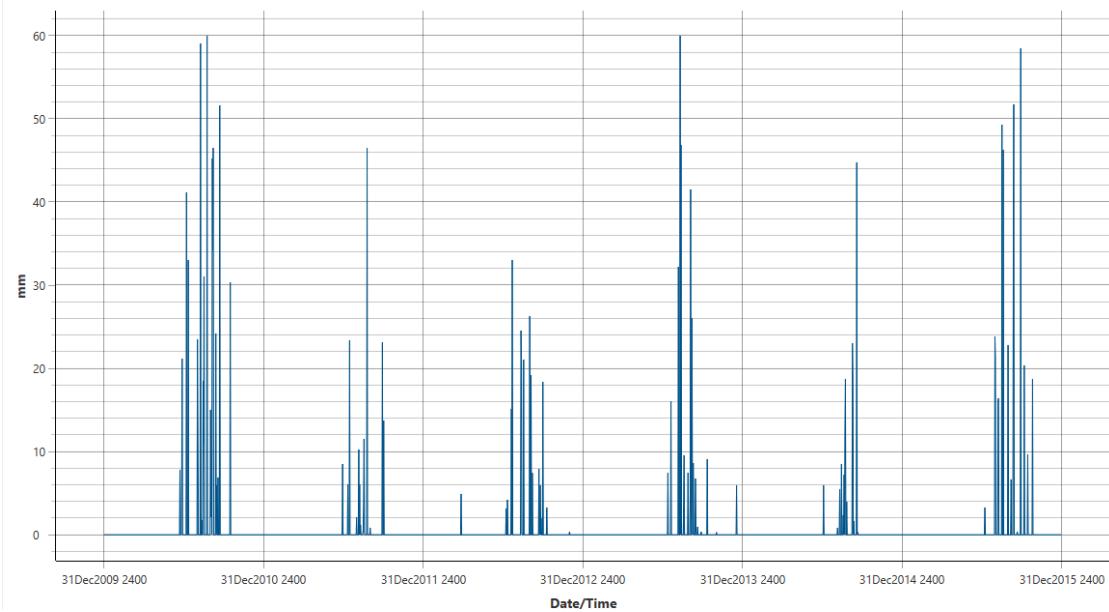


Figure 4-11 : Précipitation journalière de 2010-2015 (mm), station CS6

Les données d'évapotranspiration ont été obtenues à partir des mesures d'évaporation des trois bacs situés à l'amont du lac. Les valeurs ont été calculées en utilisant la formule $ET_0 = K \times E$, puis validées par la méthode de Thornthwaite en se basant sur les données de température (voir fig. 4.12).

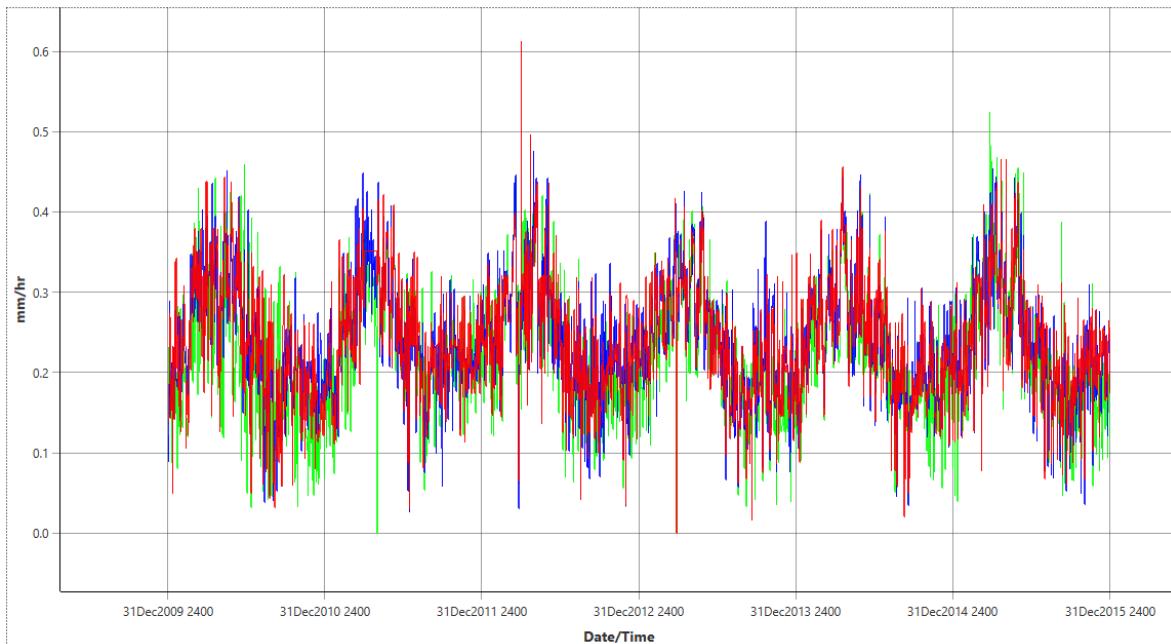


Figure 4-12 : Évapotranspiration de 2010-2015 (mm/h)

Les autres paramètres, tels que la pression atmosphérique et la vitesse du vent, ont été laissés par défaut. Toutes les stations météorologiques se trouvent en amont et à proximité du lac, avec la

station CS6 particulièrement proche du lac, tandis que les bacs d'évaporation sont situés autour des champs agricoles (voir fig. 4.13).

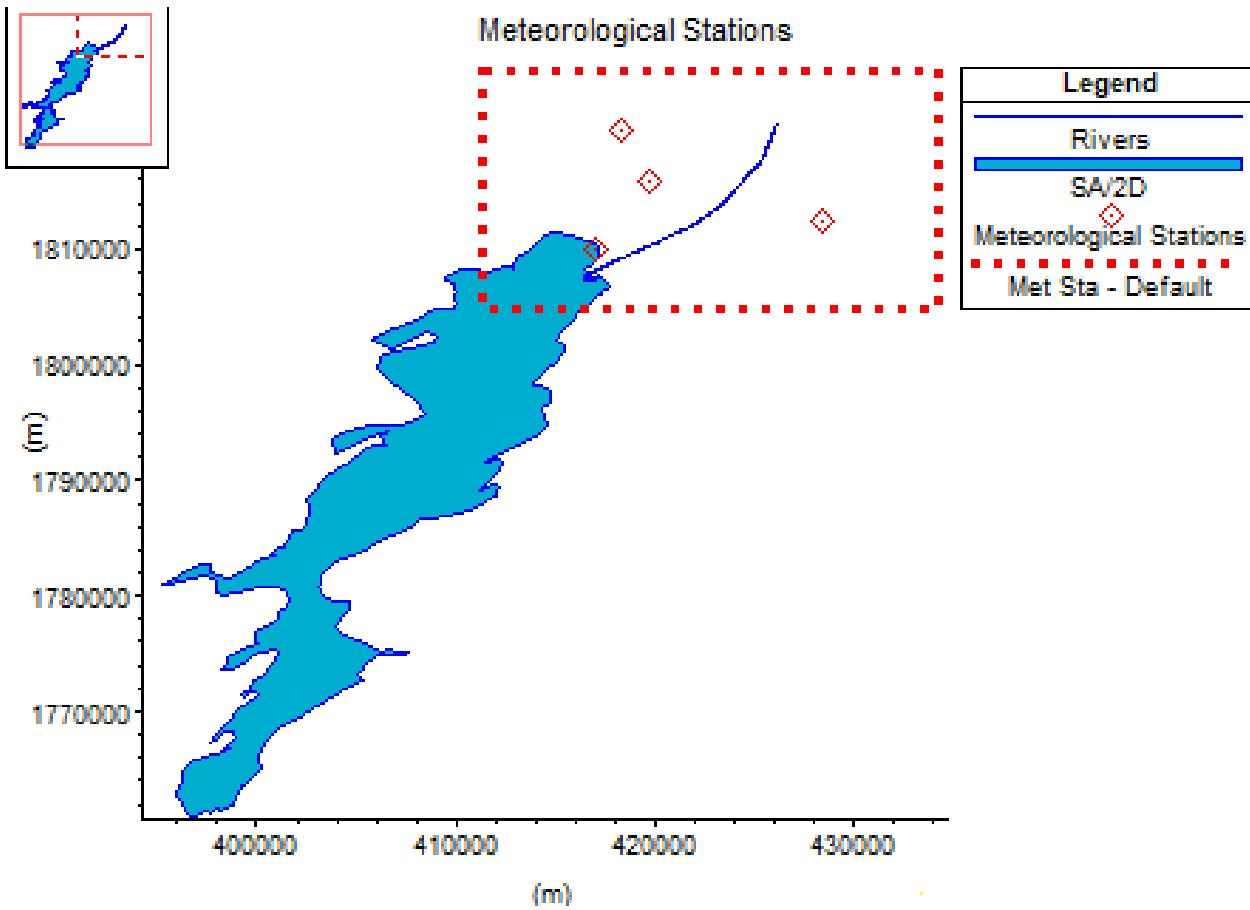


Figure 4-13 : Localisation des stations météos

4.4.4.3 Conditions initiales

Pour la simulation du modèle, les conditions initiales sont définies comme suit : pour le canal, la hauteur d'eau au 1er janvier 2010 est utilisée, tandis que pour le lac, la hauteur d'eau à la même date, mesurée à la station de pompage de Ngnith, est de 1,39 mètre.

Les détails concernant les différents paramètres, y compris les pentes et les valeurs de Manning, sont présentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4-2 : Données initiales utilisées pour la modélisation

Paramètres d'entrées	Canal	Rive gauche	Rive droite
Coefficient de Manning	0,09280	0,1021	0,1021
Pentes	Pente totale = 0,00017	Pente amont = 0,00235	Pente aval = 0,00018

4.5 Critères d'évaluation du modèle

Les indices de performance permettent d'évaluer la précision et la fiabilité des simulations du modèle par rapport aux observations réelles. Pendant la phase de calibration, les paramètres du modèle sont ajustés pour réduire l'écart entre les valeurs simulées et les données observées. En général, les indices de performance sont plus élevés lors de la calibration, ce qui reflète une meilleure précision. Cela signifie que le modèle est optimisé pour correspondre étroitement aux données de calibration, avec des valeurs de KGE, R² et NSE plus proches de 1 et des valeurs de RMSE plus faibles.

En revanche, la validation du modèle consiste à tester sa performance avec des données de 3 ans qui n'ont pas été utilisées lors de la calibration. Les indices de performance pendant la validation tendent à être légèrement moins précis que ceux obtenus lors de la calibration, car le modèle est appliqué à des conditions qu'il n'a pas été "entraîné" à reproduire. Un léger déclin des valeurs de KGE, R² et NSE, ainsi qu'une augmentation modérée du RMSE, est un résultat typique. Cela indique que bien que le modèle soit performant, il peut rencontrer des difficultés pour prédire certaines variations ou anomalies absentes des données de calibration.

La différence de précision entre la calibration et la validation est attendue et ne signale pas nécessairement une faiblesse du modèle. Elle démontre plutôt son ajustement spécifique aux données de calibration. Cependant, une trop grande disparité entre ces indices pourrait indiquer un surajustement, ce qui rendrait le modèle moins fiable pour des prévisions futures. Dans cette étude, la répartition égale des données pour la calibration et la validation (50%/50%) a permis de réduire ce risque de surajustement, assurant ainsi que le modèle reste suffisamment flexible pour s'adapter à des conditions nouvelles, tout en maintenant un niveau de précision acceptable.

Plusieurs indicateurs statistiques ont été utilisés pour assurer la concordance entre les valeurs modélisées et observées : l'efficacité Nash-Sutcliffe (NSE), le coefficient de détermination (R²),

l'indicateur KGE et l'indicateur RSR. Ces critères ont été utilisés afin de minimiser l'erreur lors de la comparaison des résultats simulés avec les données observées voir détail tableau 4.3.

Tableau 4-3 : Données sur les critères d'évaluation du modèle

Types	NSE	R2	KGE	RMSE	RSR
Toute les données	0.8901	0.9148	0.9358	0.0378	0.3315
Calibration 50% données	0.8947	0.9249	0.9310	0.0327	0.3245
Validation 50% données	0.87	0.9083	0.8691	0.0423	0.3606

Le NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) mesure le degré d'ajustement des valeurs simulées par rapport à une ligne 1:1 (Moriasi et al., 2015), avec la valeur de NSE = 0,89, cela indiquant une performance acceptable. Le NSE varie de $-\infty$ à 1, où 1 représente un ajustement parfait, et des valeurs comprises entre 0,5 et 1 indiquent un niveau de performance acceptable (Moriasi et al., 2015).

Le coefficient de détermination (R^2) exprime la relation colinéaire entre les valeurs simulées et observées, avec un $R^2 = 0,91$. Un R^2 supérieur à 0,5 est jugé acceptable, tandis qu'une valeur proche de 1 indique un modèle presque parfait (Moriasi et al., 2015).

Le RSR, ratio du (RMSE=0,037) à l'écart-type des observations, indique l'erreur résiduelle du modèle. Une valeur de RSR = 0,33, proche de zéro, suggère une faible erreur résiduelle, ce qui témoigne d'une meilleure performance du modèle.

Le KGE = 0,9358, hors KGE proche de 1 indique un accord parfait entre les données de simulations et d'observations.

4.6 Calibration et validation du Modèle

La calibration du modèle repose sur des données d'observation recueillies durant les périodes de crue et d'étiage, incluant les niveaux d'eau et les débits. Les paramètres de Manning pour le modèle 1D, ainsi que ceux dérivés de la classification de l'utilisation des sols (LULC), ont été ajustés en fonction des valeurs spécifiques à la période hivernale, caractérisée par des hauteurs d'eau importantes et des débits variables. En période sèche, les débits peuvent être très faibles, voire nuls. Les données de juin 1999, avec un débit mesuré de $48,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et une hauteur de 2,13 m dans le canal de Taoué, ont servi de référence pour ajuster le modèle aux conditions réelles.

La validation du modèle est cruciale pour garantir sa précision. Elle consiste à comparer les résultats simulés avec les observations réelles de niveaux d'eau et de débits à la section 2 +10m. Les tests ont été réalisés en utilisant les paramètres de Manning spécifiques pour le canal (1D) et le lac (1D/2D). Les résultats ont montré une bonne concordance entre les données observées et les simulations, confirmant que le modèle reproduit fidèlement les conditions réelles et prédit les comportements hydrauliques avec précision (voir fig. 4.3).

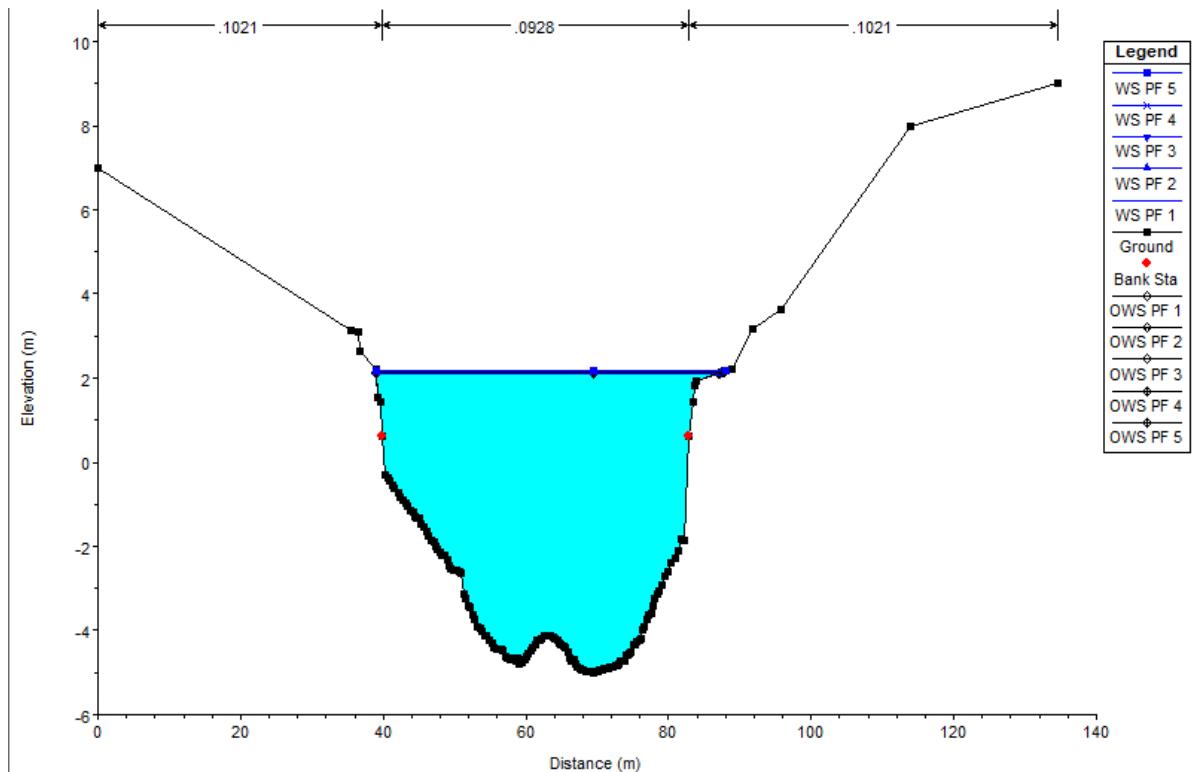


Figure 4-14 : Calibration et validation du profil en travers de la section (2+10 m)

4.6.1 Simulation de Scénarios

La définition des scénarios pour la modélisation hydraulique s'appuie sur l'analyse des périodes d'étiage et des crues. Afin d'évaluer de manière complète les comportements du canal et du lac, la taille des mailles est fixée à 30x30 m.

La simulation du modèle 1D, en régime d'écoulement stable, est autonome, tandis que le modèle couplé (1D/2D) du canal et du lac, en régime d'écoulement transitoire, utilise des itérations pour les connexions entre éléments 1D et 2D. Cette approche permet une rétroaction directe entre les éléments 1D et 2D à chaque pas de temps, assurant une précision élevée, notamment pour le transfert d'eau du lac vers le canal pendant les périodes de basses eaux.

Les scénarios d'étiage, représentant les périodes de faible débit qui sont essentiels pour analyser les conditions du canal lors des niveaux d'eau bas et comprendre les dynamiques de retour. Les scénarios de crues, simulant des débits élevés, permettent d'évaluer les risques d'inondation et la capacité du canal à gérer de grands volumes d'eau.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

5.1 Profil en long et en travers

5.1.1 Profil en travers du canal

Les résultats obtenus de la modélisation hydraulique offrent des perspectives précises et détaillées sur le comportement du canal sous différentes conditions hydrologiques. En utilisant les données recueillies et les techniques de modélisation, il a été possible de simuler les niveaux d'eau et les débits lors des événements d'étiage et de crues.

Il ressort que pendant les périodes d'étiage, les niveaux d'eau diminuent considérablement, les scénarios de crues ont montré la capacité du canal à gérer des volumes d'eau élevés, tout en identifiant les zones à risque d'inondation. Les résultats indiquent également que le coefficient de rugosité, déterminé par des essais et erreurs, influence significativement la précision des simulations voir fig. 5.1.

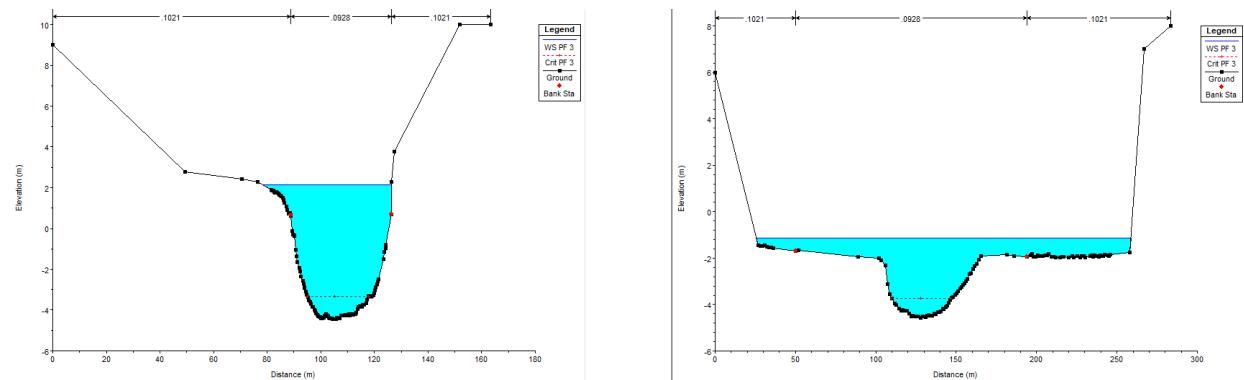


Figure 5-1 : Profil en travers pour les sections 1 et 12 (amont et aval)

La comparaison des simulations des niveaux d'eau en amont et en aval du canal de Taoué révèle des variations significatives. En amont, la hauteur d'eau atteint 2,13 m, tandis qu'en aval, elle descend en dessous de 1 m. Les résultats indiquent que, pendant les périodes de crue, le niveau d'eau augmente de manière significative, démontrant la capacité du canal à gérer des volumes d'eau accrus sans déborder. En revanche, durant les périodes d'étiage, le niveau d'eau diminue, mais reste suffisamment élevé pour assurer le bon fonctionnement du canal.

Les profils en travers du canal de Taoué révèlent des variations significatives entre les sections, influencées par la topographie. En amont, le canal est plus étroit et profond, tandis qu'un

élargissement progressif apparaît dans les sections médianes. En aval, le canal s'élargit encore davantage en raison de sa confluence avec le lac, marquant le point de sortie.

La figure 5.2 montre une perspective 3D du volume d'eau entre les sections amont (1-2) et aval (11-12) du canal de Taoué. Une diminution du niveau d'eau en aval est observée durant la période sèche.

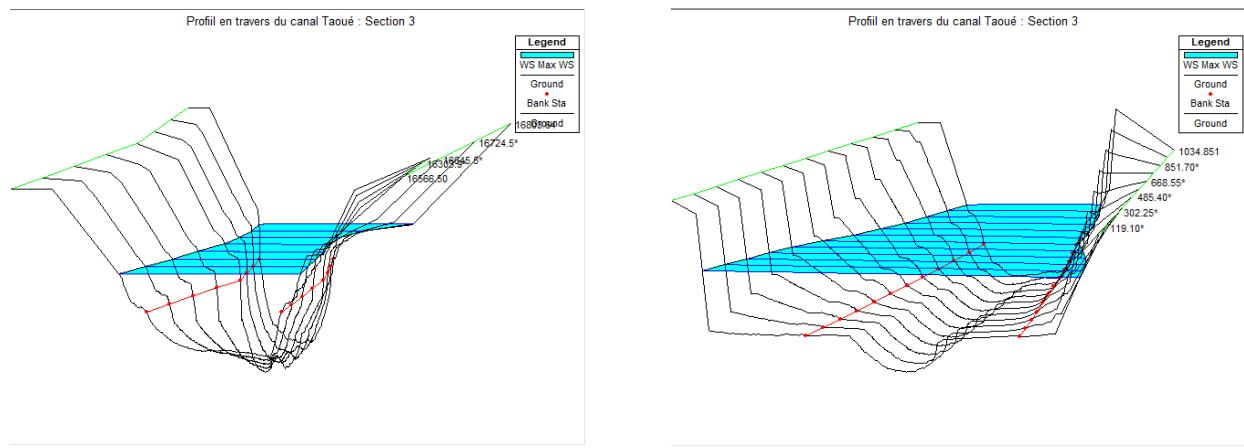


Figure 5-2 : Perspective X, Y, Z du profil en travers du canal de Taouey (section 1-2 et 11-12)

5.1.2 Profil en travers du lac

À l'intersection entre le canal et le lac, la profondeur atteint des valeurs plus importantes, dépassant les -3 mètres. Cette jonction, marquée par une augmentation notable de la profondeur, est influencée par la confluence entre le canal et le lac, ce qui crée une zone de transition où la profondeur est particulièrement variable.

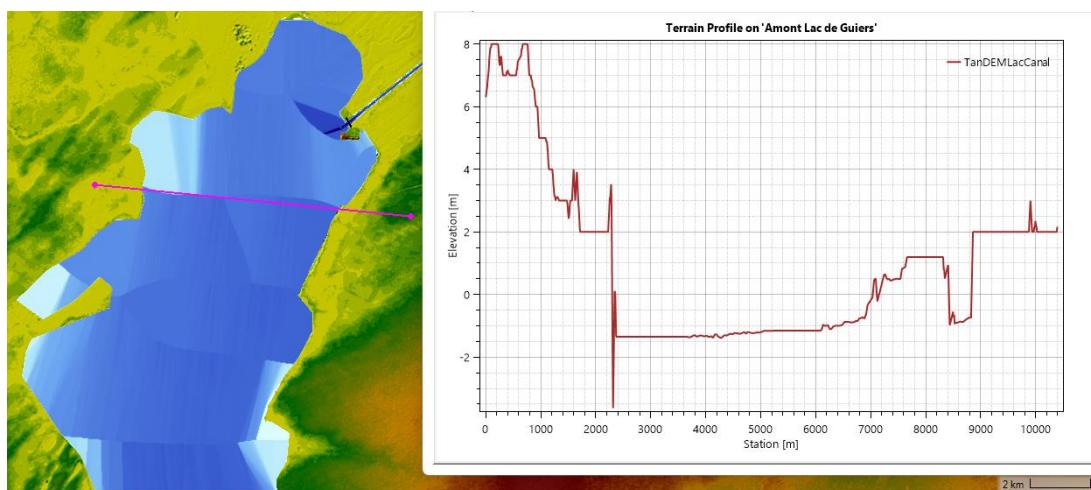


Figure 5-3 : Profil en travers du lac (amont)

La profondeur du lac de Guiers varie considérablement selon sa position. À l'amont, la cote du fond du lac est de -1,70 m IGN, tandis qu'à l'aval, elle diminue pour atteindre -0,5 m IGN. Cette variation de profondeur reflète les différences topographiques au sein du lac, avec une pente graduelle du fond qui influence le profil hydrologique du plan d'eau.

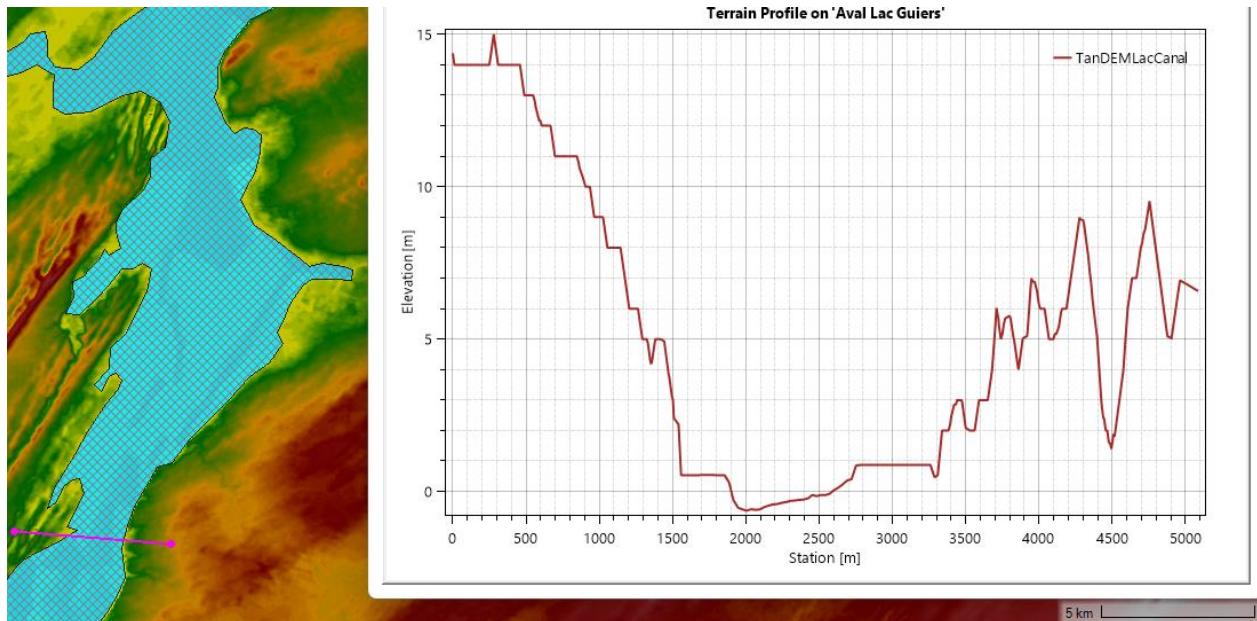


Figure 5-4 : Profil en travers du lac aval

5.1.3 Profil en long

Le profil en long du canal de Taouey révèle une pente très faible de 0,00018 sur la majorité de son parcours, ce qui influence significativement son écoulement hydraulique. Cette pente très faible ralentit le débit de l'eau, favorisant l'accumulation de sédiments non seulement dans le canal mais aussi dans ses environs, ce qui peut compromettre sa capacité à transporter les débits efficacement, en particulier pendant les périodes de faible écoulement. Cette stagnation des eaux peut engendrer des zones d'eau stagnante, augmentant le risque de développement de végétation aquatique, telle que le typha, qui peut encore réduire la capacité de drainage du canal (voir fig.5.5).

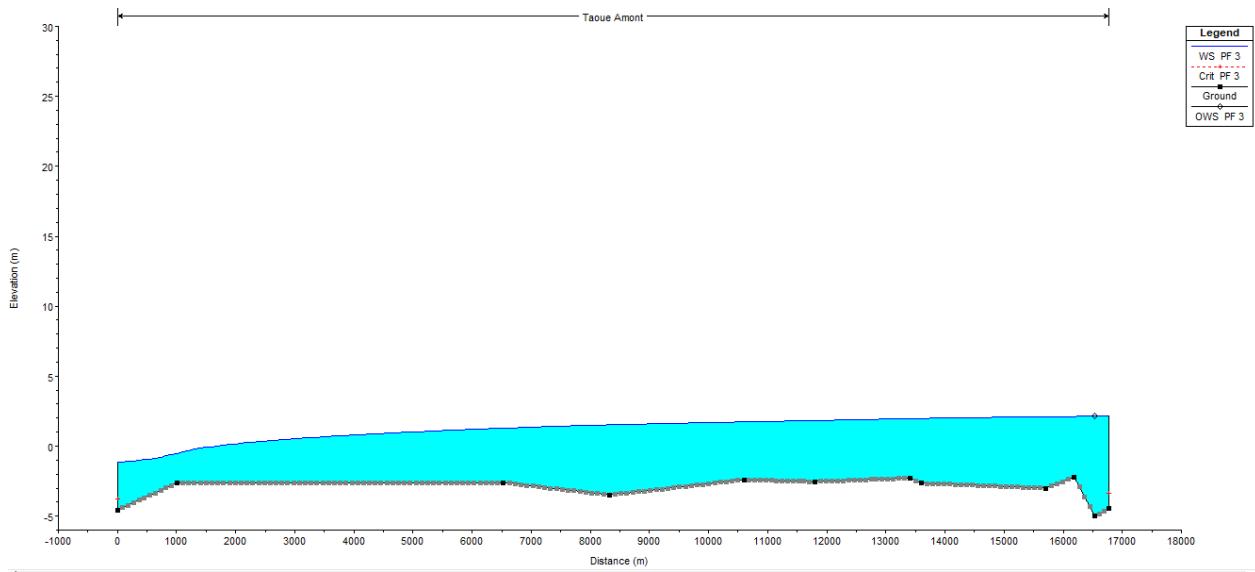


Figure 5-5 : Profil en long du canal de Taoué (amont et aval)

5.1.4 Profil de vitesses

La vitesse le long du canal de Taouey présente des variations notables selon les différentes zones du canal. Dans le lit majeur, la vitesse de l'eau fluctue entre 0,2 et 0,6 m/s, où elle est significativement plus élevée par rapport aux berges.

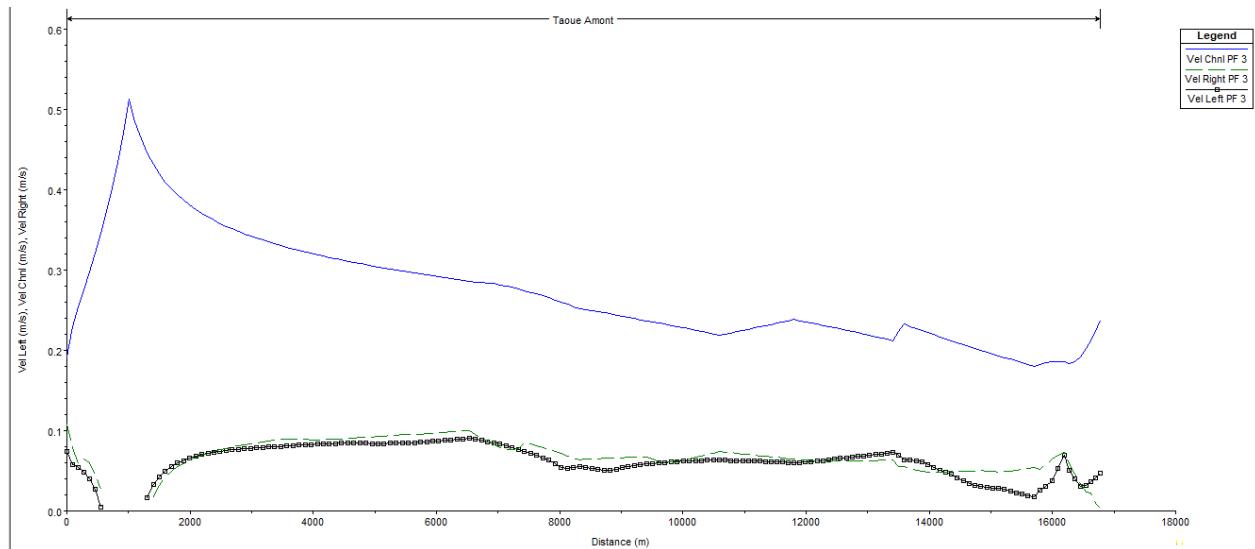


Figure 5-6 : Profil en long de l'évolution de la vitesse

Dans le lit mineur (rives gauche et droite), la vitesse de l'eau est beaucoup plus faible, oscillant entre 0,1 et 0,15 m/s. La vitesse faible est due à la pente faible du terrain dans ces zones, qui limite la force gravitationnelle nécessaire pour maintenir des débits rapides.

Le profil en travers du canal de Taouey confirme les variations de vitesse observées le long du canal. Les sections du lit majeur, plus larges et profondes, affichent des vitesses d'eau plus élevées et les sections du lit mineur, situées sur les rives gauche et droite, présentent des vitesses nettement plus faibles.

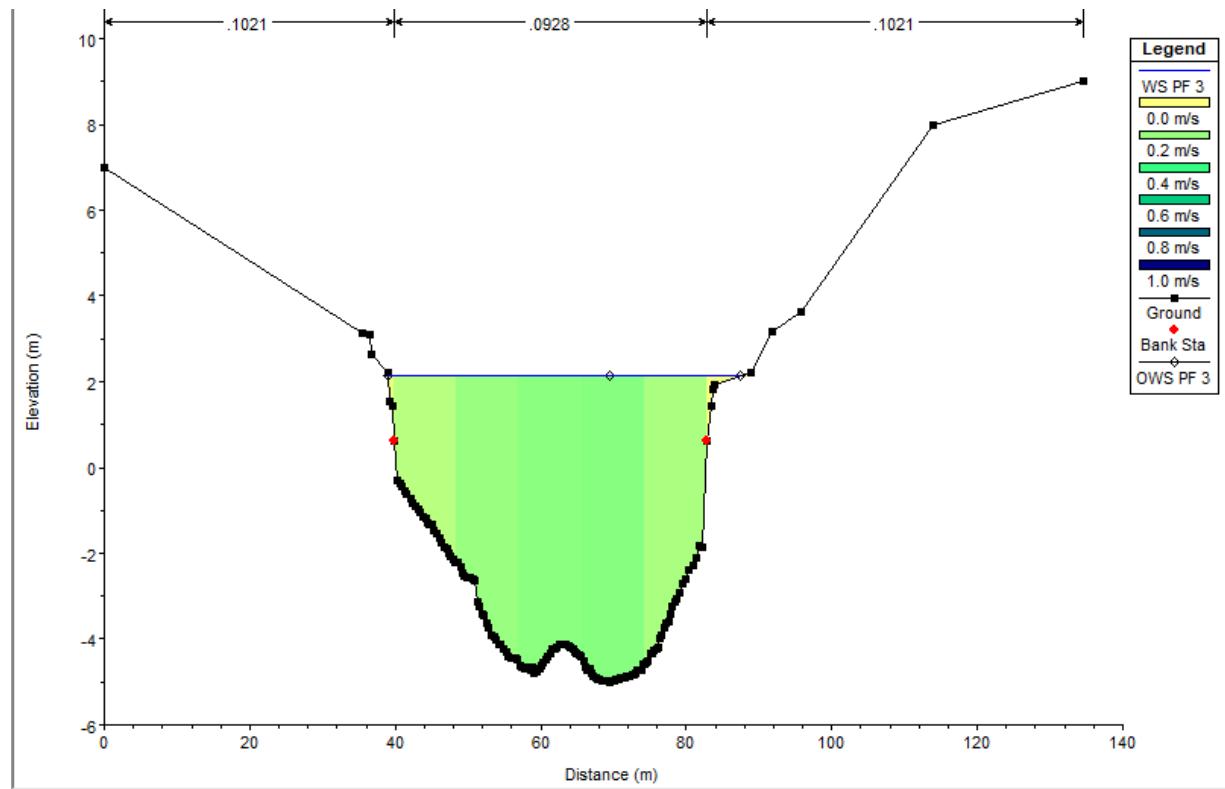


Figure 5-7 : Profil en travers de l'évolution de la vitesse

5.1.5 Profil de la surface d'écoulement du lac

La surface d'écoulement du canal de Taoué oscille entre 100 et 250 m² et les fluctuations reflètent les différences de largeur et de profondeur du canal à différentes sections. Dans les portions plus étroites et moins profondes on constate que l'écoulement est réduit, alors que dans les sections plus larges, l'écoulement atteint son maximum, atteignant 250 m².

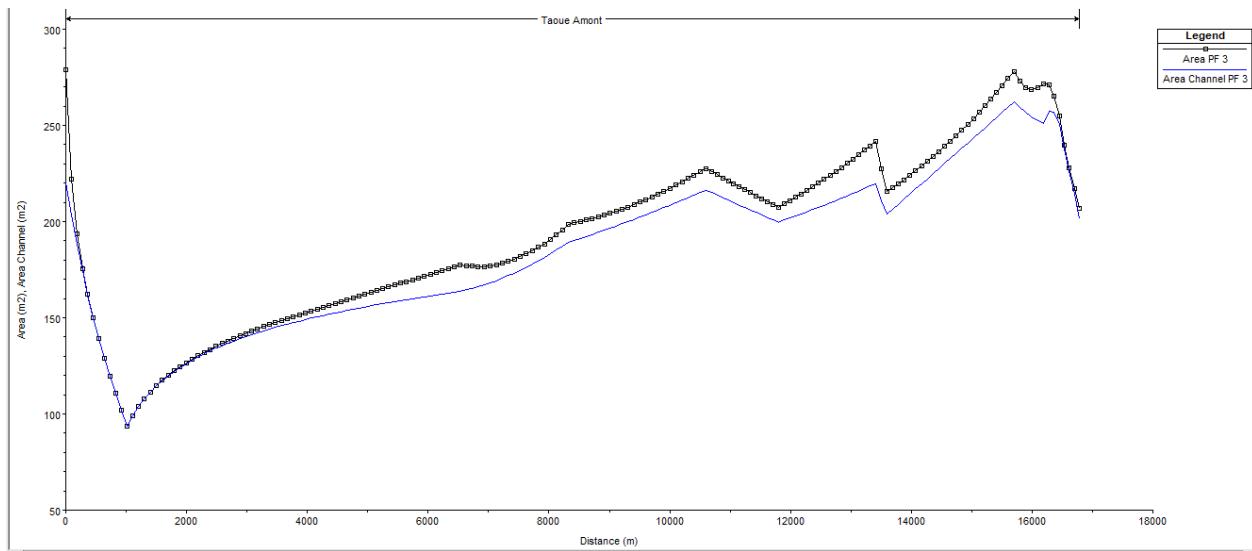


Figure 5-8 : Profil en long de la surface d'écoulement

5.2 Simulation

5.2.1 Interaction entre le canal et le lac de Guiers

Après validation du modèle hydraulique, il est pertinent de réaliser une simulation en modélisation 1D/2D pour analyser l'interaction entre le lac de Guiers et le canal de Taoué. En examinant la situation spécifique du 13 novembre 2010, on observe que lorsque le niveau du lac de Guiers est élevé, cela influence significativement le débit dans le canal de Taoué. Cela s'explique par un niveau d'eau plus élevé dans le lac entraînant une augmentation du gradient hydraulique entre le lac et le canal, à une réduction du débit dans le canal en raison de l'effet de contre-pression généré par le niveau d'eau plus élevé dans le lac. L'eau s'écoule lentement et le sens d'écoulement est affecté (inversé).

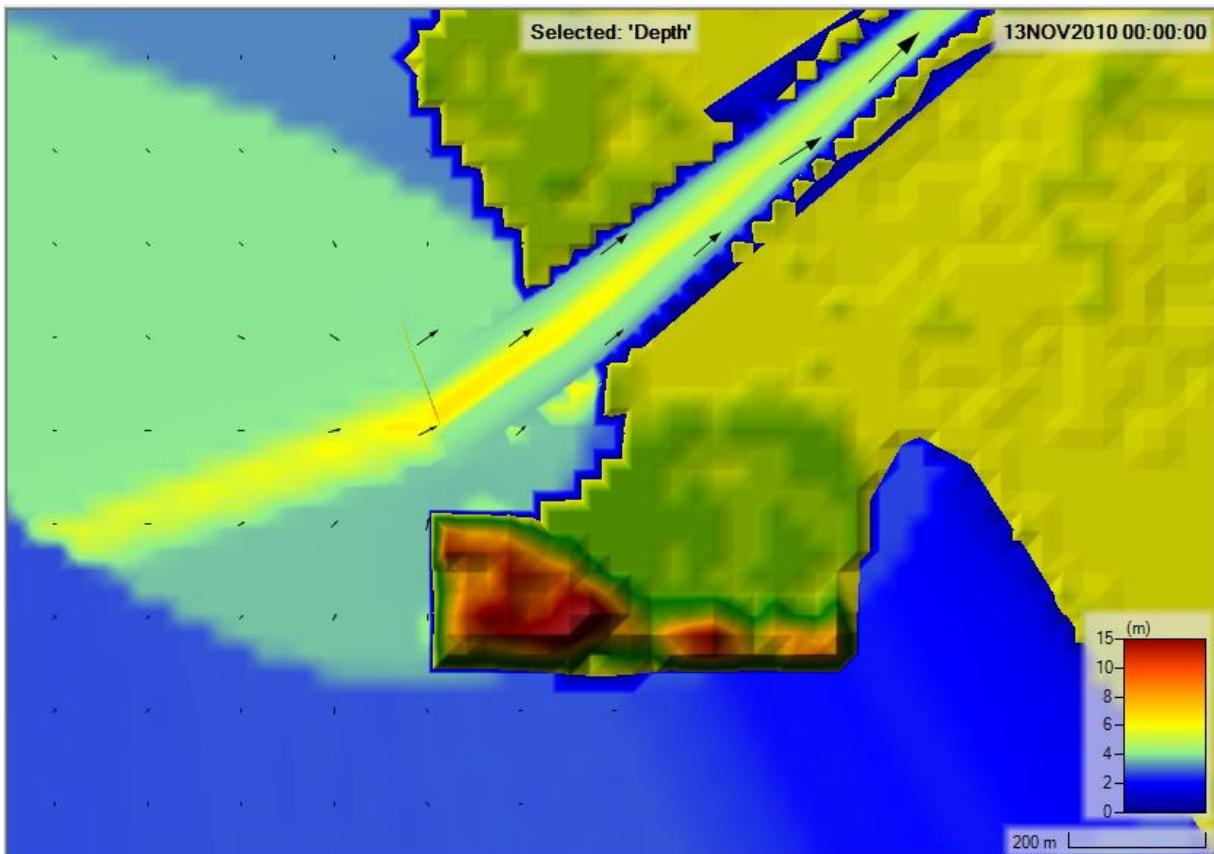


Figure 5-9 : Interaction d'écoulement entre le lac de Guiers et le canal de Taoué

5.2.2 Cas de l'aménagement du canal

Lorsque le canal devient plus étroit en raison du dragage et du nettoyage de la végétation envahissante (le Typha), le canal retrouve avec une section transversale plus dégagée cela réduit la résistance au flux et augmente la capacité du canal à transporter les débits. Avec un canal plus étroit mais moins obstrué, l'eau peut circuler plus librement, ce qui améliore l'efficacité du transport des débits et diminue les risques de stagnation ou d'envasement.

Cette amélioration du débit a également des effets significatifs sur le remplissage du canal sur une année. Un débit accru signifie que l'eau est transportée plus efficacement à travers le canal, ce qui peut entraîner une meilleure régulation du niveau d'eau et une réduction des périodes de stagnation ou de faible débit.

Avec des valeurs de Manning modifié pour : avec typha ($n=0.0928$) et sans typha ($n=0.030$), on voit une augmentation considérable du volume d'eau au fur des années de plus de 10 % par an (voir fig.5.10).

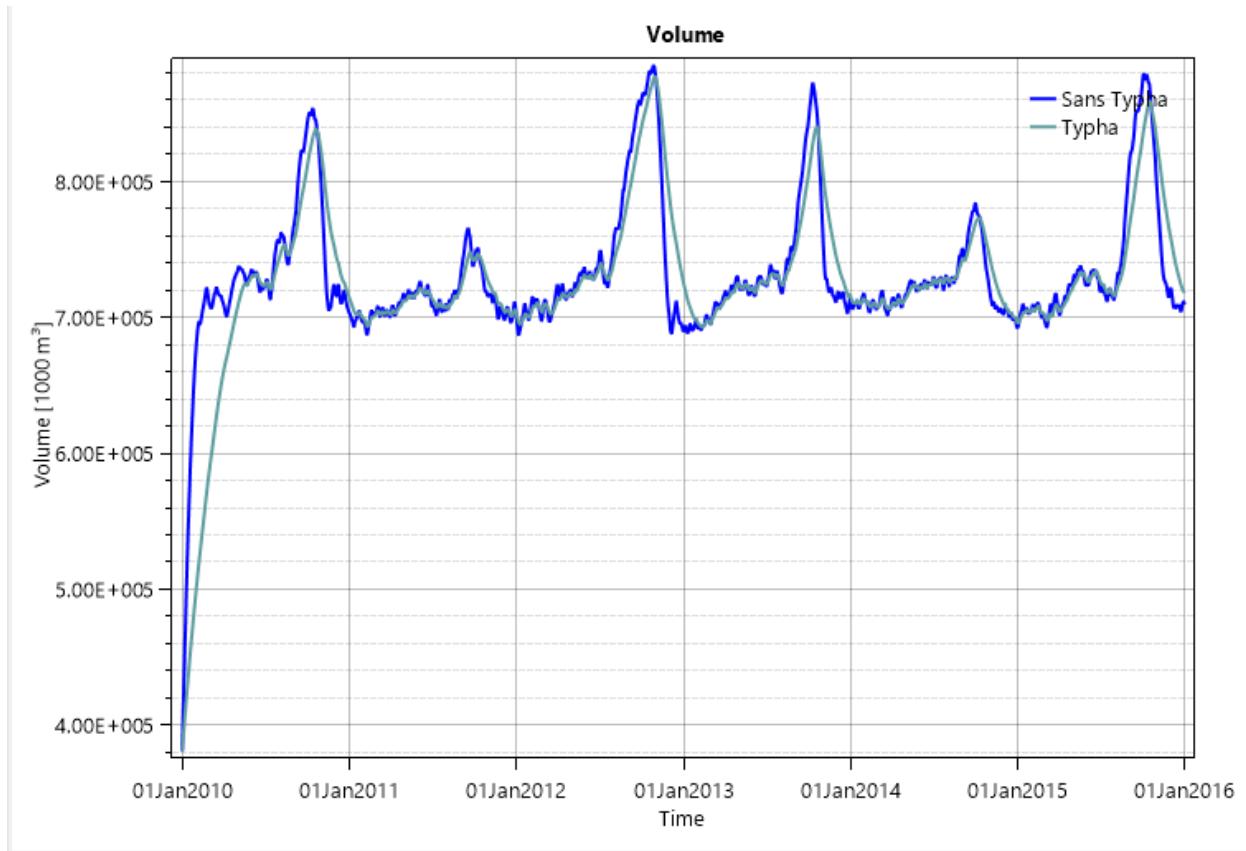


Figure 5-10 : Comparaison de volume entre cas de Typha et sans Typha

5.2.1 Simulation hauteur d'eau dans le lac de Guiers

La comparaison entre les hauteurs d'eau observées à la station Ngnith dans le lac de Guiers et les hauteurs simulées par le modèle 1D/2D révèle une tendance globale de concordance, avec des valeurs proches tout au long de la période étudiée (2010-2016). Cette correspondance indique que le modèle reproduit les variations générales du niveau d'eau dans le lac, reflétant fidèlement les conditions hydrologiques globales et la dynamique de l'eau voir (fig.5.11).

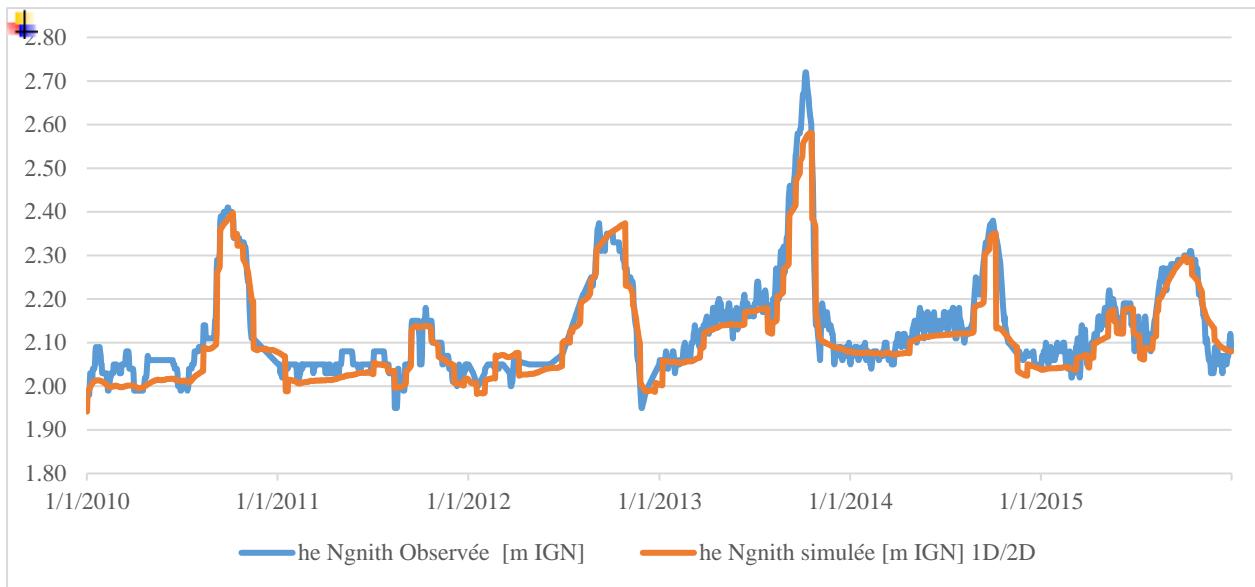


Figure 5-11 : Comparaison niveau d'eau du lac observée et stimulé (1D/2D)

5.2.2 Simulation du débit dans le canal

La simulation du canal du débit tant en amont qu'en aval, révèle des variations significatives du débit le long du canal, oscillant généralement autour de $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces fluctuations sont principalement influencées par plusieurs facteurs hydrologiques et climatiques. En période hivernale, notamment entre août et septembre, des pics notables de débit sont observés, souvent en raison d'un apport accru d'eau par le fleuve Sénégal. On remarque aussi les valeurs négatives du débit dans le canal cela s'explique par un faible apport d'eau et une remontée d'eau du lac vers le canal, voir le détail dans la figure 5.11.

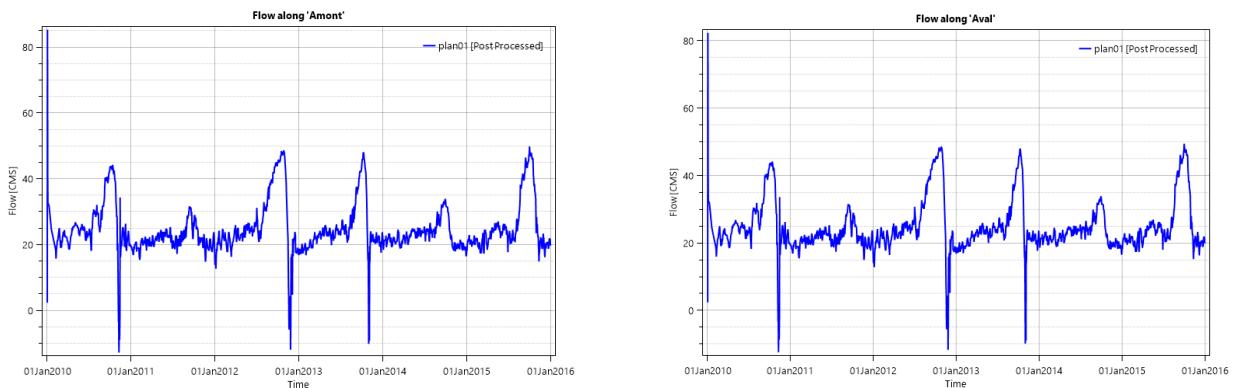


Figure 5-12 : Série temporelle du débit ($\text{Q m}^3/\text{s}$) amont et aval dans le canal de Taoué

5.2.3 Simulation du volume dans le canal

La simulation du volume dans le canal de Taouey montre des variations significatives variant autour de 4 000 000 m³ pendant la période hivernale (entre août et septembre), avec des valeurs négatives notables durant la période séche et la remontée d'eau vers le canal.

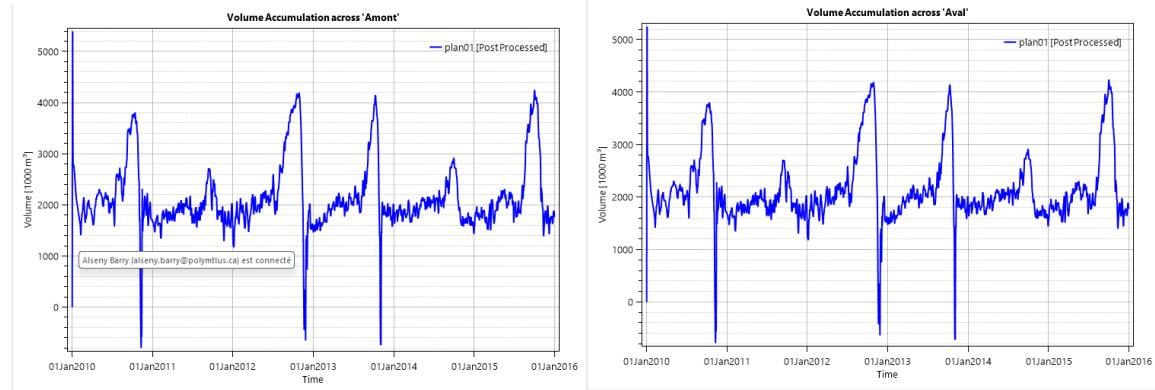


Figure 5-13 : Série temporelle du volume (V m³) amont et aval dans le canal de Taoué

CHAPITRE 6 DISCUSSION

6.1 Incertitudes

La compréhension des incertitudes, des limites et des hypothèses liées à un modèle est une étape cruciale de son interprétation (Ancey, 2012; DAI & USAID, 2013). Les simplifications sont une nécessité inhérente à la construction d'un modèle visant à reproduire un système réel (Miles & Huberman, 2003). C'est en appréhendant l'impact de ces simplifications qu'il devient possible de tirer des conclusions pertinentes à partir d'une analyse basée sur la modélisation (Carré et al., 2015).

6.1.1 Dues à la modélisation

Les modèles sont des outils précieux pour comprendre et prédire le comportement de systèmes complexes (Neal et al., 2019), par leur nature ils sont des simplifications de la réalité et ne peuvent pas capturer tous les détails d'un système complexe d'où ils peuvent omettre certains processus importants ou mal représenter d'autres (Pappenberger et al., 2008). Toutes fois, ils font souvent appel à des méthodes numériques pour résoudre des équations complexes, et ce choix peut introduire des incertitudes (Trigg et al., 2009).

Si les flux d'eau restent confinés dans le lit mineur du cours d'eau, ou même s'ils débordent dans le lit majeur, ce modèle offre une fiabilité relative, à condition que le tracé du cours d'eau soit assez rectiligne (Laforce, 2008).

De façon générale, toute modélisation comporte une certaine dose d'incertitude, qui sont souvent dues à diverses sources (Cullen & Frey, 1999; Matthies et al., 1997; Uusitalo et al., 2015), telles que : le Choix des méthodes numériques, les simplifications du modèle, la variabilité spatiale et temporelle, etc.

6.1.2 Dues aux intrants

Le modèle (HEC RAS) utilisé dans le cadre de la modélisation du canal Taouey et le lac de Guiers, tous les paramètres hydrologiques liés à l'infiltration dans les sols sont moins complexes à comprendre (Dimitriadis et al., 2016). L'option de coupler avec d'autres paramètres (réseaux) offre une représentation précise des phénomènes, particulièrement lorsqu'ils sont comparés aux données de terrain et aux observations lors d'événements historiques (Ghimire et al., 2020; Piveteau et al.,

2021). Par ailleurs, les résultats obtenus doivent être interprétés avec prudence : car ils sont accompagnés d'une incertitude liée à de multiples facteurs (Brunner, 2016) : les données topographiques et hydrologiques, les limites du modèle, le maillage 2D, les paramètres de calibration, les mesures imparfaites (jaugeage et bathymétrie), le manque de données, etc.

Les incertitudes associées aux données topographiques et bathymétriques sont relativement limitées, étant donné que des relevés sur le terrain ont été réalisés. Cependant, des erreurs de mesure restent toujours envisageables.

Ces éléments portent tous un certain degré d'incertitude qui se répercute dans les résultats du modèle (Laforce, 2008).

6.2 Limites de l'étude

Cette recherche, bien que significative, présente plusieurs limitations principales liées aux hypothèses simplificatrices adoptées pour le modèle. Les hypothèses concernant l'homogénéité des caractéristiques physiques et hydrauliques du canal Taouey et du lac de Guiers, ainsi que la régularité des processus météorologiques et climatiques, ont été nécessaires pour simplifier la modélisation. Cependant, la complexité réelle du lac et du canal, y compris leur interaction avec la nappe phréatique, n'a pas été complètement représentée, ce qui a limité la précision des résultats.

Ces simplifications peuvent affecter la fiabilité des simulations. Des défis liés à la disponibilité et à la qualité des données, tels que la résolution spatiale insuffisante et le nombre limité de profils en travers, compliquent également l'analyse. Les ajustements du cours d'eau, les envasements, ainsi que des facteurs comme la présence de Typha et la gestion des infrastructures de régulation, ne sont pas toujours intégrés de manière détaillée dans le modèle, introduisant des incertitudes. Ainsi, les résultats doivent être interprétés avec prudence, en considérant ces limitations pour une gestion plus précise et efficace des ressources en eau.

6.2.1 Paramètres du modèle

La mise en place du modèle hydraulique pour le canal Taouey et le lac de Guiers, avec l'utilisation du logiciel HEC RAS, a rencontré des défis majeurs liés à la schématisation et à l'importation des paramètres du modèle. Le modèle s'appuie sur le fichier raster TanDEM de 30 x 30 mètres de

résolution comme entrée clé, spécifiquement pour la grille 2D, qui est l'élément central de toute modélisation bidimensionnelle.

Lors de la schématisation dans HEC RAS, la première étape consiste à importer le maillage 2D. Ce fichier doit être conforme au format exact, y compris le nombre de colonnes et de lignes, du fichier de définition de la hauteur. Des incohérences, même mineures, dans le format du fichier peuvent entraîner des erreurs lors de la simulation.

Même avec une attention particulière portée aux détails du fichier d'entrée, certaines limites associées aux paramètres du modèle subsistent, ce sont:

- (i) Précision des données d'entrée: Les erreurs ou inexactitudes dans les données d'entrée, comme le fichier raster TanDEM, peuvent affecter la précision du modèle.
- (ii) Hypothèses simplificatrices: Le modèle pourrait supposer certaines conditions simplifiées, comme l'uniformité de la rugosité du canal ou la constance du débit, qui peuvent ne pas correspondre entièrement à la réalité.
- (iii) Temporalité et spatialité des paramètres: Les paramètres comme le débit d'eau et la rugosité du canal peuvent varier dans le temps et dans l'espace, des variations que le modèle pourrait ne pas être en mesure de capturer.
- (iv) Interaction entre les paramètres: Les interactions complexes entre différents paramètres, comme la relation entre le débit d'eau, la rugosité du canal et la pente, peuvent ne pas être pleinement intégrées dans le modèle.
- (v) Incertitudes dans les paramètres du modèle: Certains paramètres, comme l'évaporation, peuvent être difficiles à mesurer avec précision et peuvent varier en fonction de nombreux facteurs.
- (vi) Prévisions futures: Le modèle utilise des données historiques et actuelles pour faire des prévisions, mais les changements futurs imprévus, comme les modifications climatiques, peuvent affecter la précision de ces prévisions.

Ces limites soulignent l'importance de la validation continue et de la mise à jour du modèle pour améliorer sa précision et sa fiabilité.

6.2.2 Effets des conditions limites et initiales

La modélisation du comportement hydraulique du canal Taouey et du lac de Guiers repose fortement sur les conditions initiales et limites fournies par les données d'entrée, qui peuvent avoir un impact significatif sur les résultats du modèle.

Les conditions initiales, qui définissent l'état du système au début de la période de modélisation, sont également cruciales. Elles peuvent inclure des paramètres tels que le niveau d'eau initial dans le canal et le lac. Si ces conditions initiales sont incorrectement définies, cela peut entraîner des erreurs significatives dans les prédictions du modèle et la simulation de l'évolution du niveau d'eau.

De même, les conditions aux limites, qui définissent les paramètres aux extrémités de la zone d'étude, jouent également un rôle crucial dans la modélisation. Elles peuvent inclure des facteurs tels que les débits d'eau entrant et sortant, la topographie et la rugosité à la limite de la zone d'étude. Des erreurs ou des imprécisions dans ces conditions aux limites peuvent avoir un effet domino sur les résultats de la modélisation.

Cependant, dans cette étude, l'effet de ces conditions aux limites et initiales n'a pas été exploré en profondeur. C'est un domaine qui nécessiterait des recherches supplémentaires pour mieux comprendre comment différentes conditions aux limites pourraient affecter les résultats du modèle et pour améliorer la précision et la fiabilité des prévisions du modèle.

6.2.3 Effets de la rugosité de la surface

La rugosité de la surface du canal, représentée par le coefficient de Manning dans le modèle hydraulique, joue un rôle crucial dans la détermination de la vitesse d'écoulement de l'eau (Liu et al., 2019) et par conséquent, dans l'évolution de la dynamique de l'eau dans le canal Taouey et le lac de Guiers. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment la topographie, la végétation (Typha dans le canal) et les caractéristiques du sol.

L'une des principales limites de ce modèle est qu'il n'est pas possible de représenter parfaitement les caractéristiques complexes de la rugosité de la surface terrestre du canal dans un modèle numérique. De façon générale, la rugosité est souvent représentée par des valeurs moyennes ou des valeurs "effectives" qui sont supposées représenter la rugosité moyenne sur une zone donnée (Mason, 1988; Schmid & Bünzli, 1995). Bien que cela permette de simplifier le modèle et de rendre

la modélisation plus gérable (Mason, 1988), ça peut également introduire des erreurs et des incertitudes si la rugosité réelle varie de manière significative au sein de la zone.

Une représentation plus précise de la rugosité pourrait améliorer notre compréhension de la dynamique de l'eau dans le canal Taouey et le lac de Guiers. L'utilisation de techniques d'observation plus avancées, ou l'affinement des données et des méthodes de modélisation, pourrait aider à accroître la précision du modèle.

6.3 Difficulté d'estimation du ruissellement et du prélèvement

L'estimation du ruissellement local autour du lac de Guiers est complexe en raison de la diversité des sols, des usages des terres et de la végétation, qui influencent le volume de ruissellement lors des pluies. Les données pédologiques très peu disponibles ne capturent pas toujours cette variabilité, rendant difficile une estimation précise.

Les informations sur les prélèvements d'eau autour du lac posent également des difficultés, car les usagers de l'eau (agriculteur, industriel, etc.) ne fournissent pas souvent les données sur les volumes prélevés et parfois fragmentées ou incomplètes, surtout au niveau des petits prélèvements non enregistrés ou qui ne souhaitent déclarer.

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Principales conclusions de l'étude

L'application de l'ensemble des données sur le canal Taouey et le lac de Guiers à l'aide du modèle hydrodynamique HEC RAS a démontré une applicabilité opérationnelle pour la modélisation du canal et du lac de Guiers. HECRAS a été utilisé avec succès dans de nombreuses études et a montré sa capacité à simuler et à fournir des résultats précis pour une zone d'étude de plus de 212 km² et un canal de près de 17 km de long.

À travers l'utilisation du modèle HEC-RAS pour simuler le canal de Taoué et le lac de Guiers, plusieurs aspects cruciaux ont été révélés. L'une des découvertes les plus marquantes concerne la dynamique du niveau d'eau, qui montre des variations significatives en fonction des saisons et des apports en eau. La simulation a permis de comprendre comment les obstructions au niveau de la jonction du canal et du fleuve, ainsi que la prolifération des plantes aquatiques, influencent directement la capacité du canal à alimenter le lac.

De plus, les résultats ont mis en évidence l'impact des fluctuations saisonnières sur le remplissage du lac, révélant des périodes critiques où le niveau d'eau baisse considérablement affectant son remplissage. Cette simulation a également permis de quantifier lorsque le niveau d'eau dans le lac est supérieur à celui du canal causant une réduction du débit, offrant ainsi des informations précieuses pour la gestion et l'entretien du canal et du lac.

- (i) Bien que le modèle soit bien calibré, les résultats simulés ont montré qu'avec les données d'entrée appliquées aux conditions initiales et limites, les hypothèses du modèle, les valeurs empiriques du coefficient de rugosité Manning et la représentation grossière de la résolution spatiale : l'approche a pu générer une simulation étendue qui se rapprochait de l'étendue observée en 1999, d'où les résultats simulés du modèle correspondent raisonnablement bien aux données observées. De plus, les données sur les caractéristiques telles que les hauteurs d'eau, le débit, étaient plutôt rares.
- (ii) Les résultats de la simulation pourraient probablement être améliorés si des informations supplémentaires étaient disponibles, telles que les données sur d'autres

prélèvements, la végétation dans le canal, et les structures hydrauliques dans le lit du canal.

(Zeiger & Hubbart, 2021) et (ELEUTÉRIO et al., 2012) dans leurs études ont également utilisé des méthodes pour extraire et représenter la forme du canal à partir de données LiDAR et bathymétriques, par la suite pour une utilisation dans la modélisation hydrodynamique.

En raison de contraintes de données, il n'a pas été possible d'appliquer cette méthode au cours de cette étude.

- (iii) Il est essentiel d'obtenir les informations supplémentaires sur les sections transversales du canal à partir d'autres sources, comme des enquêtes sur le terrain et du modèle numérique d'élévation. Ces informations devraient être jointes au DEM en ajustant les sections du canal pour que les niveaux des berges du canal correspondent aux niveaux du DEM du terrain naturel. Cela garantira une référence cohérente entre le canal et le terrain naturel.

7.2 Contributions de la recherche à la gestion des ressources en eau

Cette recherche contribue à la gestion des ressources en eau de plusieurs façons importantes :

- (i) L'amélioration de la compréhension de la dynamique de l'eau : en utilisant des techniques de modélisation avancées, cette étude a permis d'améliorer la compréhension de la dynamique de l'eau dans le canal Taouey et le lac de Guiers. Cela permettra aux gestionnaires de ressources en eau de prendre des décisions plus éclairées concernant l'usage de l'eau, la conservation et l'allocation de l'eau, la régulation de l'eau et d'autres questions liées à l'eau.
- (ii) L'identification des lacunes dans les données : l'étude a également permis d'identifier les lacunes existantes dans les données hydrologiques, ce qui pourrait encourager une meilleure collecte et gestion des données à l'avenir.

7.3 Recommandations pour les recherches futures

Cette recherche a permis d'apporter d'importantes contributions à la modélisation hydraulique du canal Taouey dans le lac de Guiers au Sénégal. Cependant, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour affiner le modèle et l'améliorer. Voici quelques recommandations pour les futures recherches :

- (i) L'utilisation de données LiDAR, SWOT pourraient mieux représenter l'élévation réelle de la surface terrestre, fournir des informations détaillées sur la surface terrestre et permettre d'améliorer la paramétrisation de la rugosité. Il serait également intéressant d'explorer la possibilité de différencier la rugosité des différents éléments de la surface terrestre (par exemple : les ouvrages, les zones végétalisées, etc.).
- (ii) L'utilisation des sorties du modèle pour des calculs de scénarios et simulations : Pour les calculs de scénarios, il est recommandé d'utiliser les sorties du modèle comme entrées pour simuler les conditions aux limites. Cela aidera à améliorer l'exactitude des scénarios de simulation.
- (iii) L'intégration d'autres informations locales : Cette étude s'est basée sur un modèle uni et bidimensionnel. Pour améliorer la précision de ce modèle, il serait intéressant de l'étendre pour prendre en compte des détails complémentaires, y compris les réseaux de drainage locaux et les pompages. Cela permettrait de modéliser avec plus de précision les voies complexes d'écoulement des eaux de crue dans ces environnements.

7.4 Recommandations aux intervenants dans le lac de Guiers

Pour améliorer davantage le modèle et favoriser une gestion efficace des ressources en eau, les recommandations suivantes sont adressées à tous les intervenants (politique, chercheur, ONG, etc.) :

- (i) L'amélioration des réseaux de données hydrologiques : Cette recherche a souligné le besoin de données précises, notamment les courbes de tarages, et de séries de données hydrologiques à long terme. Les réseaux de données hydrologiques existants dans la zone d'étude doivent être entretenus correctement. Des ensembles de données

hydrologiques à long terme incomplets et insuffisants rendent la modélisation et l'analyse des tendances difficiles.

- (ii) La réalisation de levés bathymétriques supplémentaires : Au vu du nombre limité de données bathymétriques disponibles, il est nécessaire d'effectuer des levés supplémentaires pour prendre en compte la morphologie exacte du canal.
- (iii) Le Curage du canal : En raison de la forte présence et de la prolifération de typha qui a un impact direct sur la dynamique de l'écoulement de l'eau et sur le processus de remplissage du lac. Pour contrer ce problème et assurer une bonne gestion de l'eau, il est recommandé d'effectuer régulièrement le curage du canal. Ce processus d'entretien permettra de maintenir la capacité de transport d'eau du canal, d'améliorer l'efficacité du système d'irrigation et de contrôler les niveaux d'eau du lac de Guiers.
- (iv) L'amélioration de l'acquisition des données existantes : Il est recommandé d'améliorer l'acquisition des données existantes pertinentes et d'intégrer ces données dans une base de données de référence spatiale. Cela soutiendra les analyses scientifiques et les modélisations futures.

BIBLIOGRAPHIE

- Abou THIAM, M. (2012). Étude de la flore vasculaire, de la végétation et des macrophytes aquatiques proliférants dans le delta du fleuve Sénégal et le lac de Guiers (Sénégal).
- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., . . . Van Donk, E. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2), 2283-2297. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283
- [#588 utilise un type de document non défini dans ce style].
- Alexis, C. (2016). Compréhension du système lac de Guiers et faisabilité d'une modélisation. *RAPPORT DE STAGE DE RECHERCHE, ÉCOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY*.
- An, H., & Yu, S. (2012). Well-balanced shallow water flow simulation on quadtree cut cell grids. *Advances in Water Resources*, 39, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.003>
- An, H., Yu, S., Lee, G., & Kim, Y. (2015). Analysis of an open source quadtree grid shallow water flow solver for flood simulation. *Quaternary International*, 384, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.01.032>
- Ancey, C. (2012). Notes de cours Hydraulique à surface libre, version 4.2 du 2 mai 2012, Laboratoire hydraulique environnementale (LHE), École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- ANSD. (2020). SITUATION ECONOMIQUE ET SOCIALE REGIONALE 2017-2018, Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Louga. *MINISTÈRE DE L'ECONOMIE, DU PLAN ET DE LA COOPÉRATION*.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J. E., Mahe, G., Niel, H., & Dieulin, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 77-89. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.77>
- Ate Poortinga , Q. N., Nyein Soe Thwal, Andréa Puzzi Nicolau. (2023). APPLICATIONS AQUATIQUES ET HYDROLOGIQUES : Bilan hydrique et sécheresse. <https://doi.org/https://google-earth-engine.com/Aquatic-and-Hydrological-Applications/Water-Balance-and-Drought/>
- Auclair, A. (2013). Le bassin du fleuve Sénégal: vers une gestion participative?: implication des populations dans la gestion des ressources du bassin et évolution des relations entre riverains.
- BAD. (2013). Plan de gestion environnementale et sociale du Projet de restauration des fonctions socio-écologiques du lac de Guiers - PREFELAG. *Département de l'Agriculture et de l'Agro-industrie*, 48.
- Bader, J.-C. (1992). Etude de l'impact du barrage de Manantali sur le régime hydrologique du Sénégal au niveau de Bakel. *ORSTOM, Dakar, Sénégal*.

- Bader, J.-C. (1997). Le soutien de crue mobile dans le fleuve Sénégal, à partir du barrage de Manantali. *Hydrological Sciences Journal*, 815-831. ACL : Articles dans des revues avec comité de lecture répertoriées par l'AERES. <https://doi.org/10.1080/0262669709492081>
- Bader, J.-C., Belaud, G., Lamagat, J.-P., Ferret, T., & Vauchel, P. (2016). Modélisation de propagation d'écoulement entre lits mineur et majeur sur les fleuves Sénégal et Niger. *Hydrological Sciences Journal*, 62(3). <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1148815>
- Bader, J.-C., Cauchy, S., Duffar, L., & Saura, P. (2015). *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal: de l'origine des mesures jusqu'en 2011*. IRD Marseille, France.
- Bader, J.-C., Piedelievre, J.-P., & Lamagat, J.-P. (2010). Prévision saisonnière du volume de crue du Fleuve Sénégal: utilisation des résultats du modèle ARPEGE Climat. *Hydrological Sciences Journal*, 51(3), 406-417. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.3.406>
- Bader, J.-C., & Poussin, J.-C. (2019). Analyse de deux phénomènes observés en saison sèche à la station de Podor sur le fleuve Sénégal, en régime d'écoulement influencé par les barrages de Diama et Manantali : abaissement anormal du niveau et fluctuations périodiques infra-journalières.
- Banque Mondiale, B. (2022). Défis et Recommandations pour la Sécurité de l'Eau au Sénégal au Niveau National et dans le Triangle Dakar-Mbour-Thiès *Pôle d'Expertise de l'Eau, Région Afrique*.
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness characteristics of natural channels*. US Government Printing Office.
- BEI. (2016). Approvisionnement en eau de dakar : KMS III. *Banque Européenne d'Investissement*. <https://www.eib.org/fr/projects/pipelines/all/20140043>
- BELMIN, R. (2020). Contribution aux politiques nationales pour une transition agroécologique au Sénégal. <https://agritrop.cirad.fr/595783/1/DyTAES%202020.pdf>
- Betsholtz, A., & Nordlöf, B. (2017). Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS. *TVVR17*.
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), 279-298.
- Blazkova, S., & Beven, K. (2009). Uncertainty in flood estimation. *Structure Infrastructure Engineering*, 5(4), 325-332.
- Brunner. (2016). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0. *US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center*.
- 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>
- Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Arsenault, R., Chaumont, D., Paquin, D. and Brissette, F. (2018). Impacts of Regional Climate Model Spatial Resolution on Summer Flood Simulation, in HIC 2018. . *13th International Conference on Hydroinformatics*, vol. 3, pp. 372–362.

- Casulli, V., & Stelling, G. S. (1998). Numerical simulation of 3D quasi-hydrostatic, free-surface flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(7), 678-686.
- Chow, V. t. (1959). Open-Channel Hydraulics. University of Illinois. États-Unis. 680 pp.
- Christensen, J. H., Kanikicharla, K. K., Aldrian, E., An, S. I., Cavalcanti, I. F. A., de Castro, M., . . . Kanyanga, J. K. (2013). Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. Dans *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (p. 1217-1308). Cambridge University Press.
- Cogels, F.-X., Niang, A., Coly, A., & Gac, J.-Y. (1994). Le lac de Guiers : étude générale du système lacustre et problématique de gestion.
- Cogels, F.-X., Thiam, A., & Gac, J.-Y. (1993). Premiers effets des barrages du fleuve Sénégal sur l'hydrologie, la qualité des eaux et la végétation aquatique du lac de Guiers. *Re v. Hydrobiologie Tropicale*, 26, (2)
- Cogels, F., Dacruz, E., & Gac, J. (1991). L'évaporation du lac de Guiers (Sénégal) de 1976 à 1989. *Bilan et essai d'interprétation. Rapport multigraphié*.
- Cogels, F., & Gac, J.-Y. (1982). Le lac de Guiers: fonctionnement, bilans hydriques. Évolution d'une nappe d'eau libre en zone sahélienne (Senegal). *Cahiers ORSTOM Serie Geologie*, VIII, 1, p.41-60. , 12.
- Cogels, F., & Gac, J. (1983). Aménagements et évolution hydrogéochimique du lac de Guiers depuis 1916. *Rapp. ORSTOM, Dakar-Hann*.
- Cogels, F. X., & Gac, J.-Y. (1985). L'après barrage au Sénégal : gestion future (quantitative et qualitative) des eaux du lac de Guiers.
- Coly, A. (1996). *Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée*.
- Coon, W. F. (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks (2441). Retrieved from <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2441>.
- COWI. (2011). Etude hydrogéologique de la nappe profonde au Sénégal. *PSE/COWI/POLYCONSULT*.
- [#607 utilise un type de document non défini dans ce style].
- Cullen, A. C., & Frey, H. C. (1999). *Probabilistic techniques in exposure assessment: a handbook for dealing with variability and uncertainty in models and inputs*. Springer Science & Business.
- [#486 utilise un type de document non défini dans ce style].
- Dasallas, L., Kim, Y., & An, H. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. 11(10), 2048. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/10/2048>
- Daziano, L. (2014). Chapitre 9 - Les enjeux des ressources en eau dans les pays émergents. Dans *Les pays émergents* (p. 137-146). Armand Colin.

- DEEC. (2018). Etude Stocktaking for National Adaptation Planning sur l'évaluation de la prise en compte des changements climatiques dans la planification et la budgétisation *Direction de l'Environnement et des Établissements Classés*.
- Dezetter, A., & Servat, E. (1995). Evaluation régionale des ressources en eau : la régionalisation des paramètres des modèles pluie-débit : exemple de la zone nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Dans L. Le Barbé & E. Servat (édit.), *Régionalisation en hydrologie : application au développement* (p. 549-559). ORSTOM.
- DHI. (2003). Mike-11: a modelling system for rivers and channels, reference manual. *DHI-Water Development, Horsholm, Denmark*.
- Dia, S. (1986). Nature et Métropole: évolution des politiques publiques dans le Delta du Sénégal: les réponses organisationnelles et spatiales au désengagement de la SAED. . *VertigO* 12(2) 19 p.
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., . . . Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>
- Dingkuhn, M., Le Gal, P. Y., & Poussin, J.-C. (1995). RIDEV : un modèle de développement du riz pour le choix des variétés et des calendriers. Dans P. Boivin, I. Dia, A. Lericollais, J.-C. Poussin, C. Santoir, & S. M. Seck (édit.), *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal* (p. 205-222). ORSTOM.
- Dinku, T., Funk, C., Peterson, P., Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., & Ceccato, P. (2018). Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, 292-312.
- Diop, P. (2017). *Vers une stratégie de gestion participative multi-usages de la ressource en eau dans le delta du fleuve Sénégal: processus de décision et outils de régulation autour du lac de Guiers*, Université Paris Saclay (COMUE); Université Cheikh Anta Diop (Dakar)].
- Diop, S. (2008). ANALYSIS OF MERIS DATA FOR ASSESSING THE WATER QUALITY IN LAKE GUIERS (SENEGAL): PRELIMINARY RESULTS.
- [#334 utilise un type de document non défini dans ce style].
- Douben, K. J. (2006). Characteristics of river floods and flooding: a global overview, 1985–2003. *The journal of the International Commission on Irrigation Drainage*, 55(S1), S9-S21.
- Duvail, S., Bergkamp, G., Ould Baba, M. L., Acreman, M., & Hamerlynck, O. (2002). Modélisation hydraulique et gestion sociale de l'eau. . In D. Orange, R. Arfi, M. Kuper, P. Morand, & Y. Poncet (éds.), *Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales (1-)*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.8640>.
- Duvail S., M. M., Gourbesville P., . (2001). Gestion de l'eau et interactions société-nature : le cas du delta du Sénégal en rive mauritanienne. *NSS*, 9 (2) : 5-16.
- El Koujok, M. (2010). *Contribution au pronostic industriel: intégration de la confiance à un modèle prédictif neuro-flou*, Université de Franche-Comté].
- ELEUTÉRIO, J., MOSÉ, R., & ROZAN, A. (2012). Evaluation des dommages potentiels liés aux inondations.

- Esteves, M. (1996). Cartographie d'unités hydrologiques homogènes et modélisation hydrologique, exemple de l'expérience Hapex-Sahel. Dans M. Hoepffner, T. Lebel, & B. Montenay (édit.), *Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel* (p. 463-473). ORSTOM.
- Fall, A. A. (2006). Impact du crédit sur le revenu des riziculteurs de la vallée du fleuve Sénégal (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat: Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier (France)). https://www.bameinfopol.info/IMG/pdf/These_AAFall.pdf
- FAO. (2017). Irrigation in Africa in figures – AQUASTAT survey 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAYE, M. M. (2005). Programme de Développement des Marchés Agricoles du Sénégal. <https://documents1.worldbank.org/curated/zh/189801468168571797/pdf/E11890v40P0836145579B01PUBLIC10ESMF.pdf>
- Feng, Q. L., Gong, J. H., Liu, J. T., & Li, Y. (2015). Flood Mapping Based on Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis and Random Forest Classifier-The Case of Yuyao, China. *Remote Sensing*, 7(9), 12539-12562. <https://doi.org/10.3390/rs70912539>
- Fowler, S. L., & Cavanagh, R. D. (2005). *Sharks, rays and chimaeras: the status of the Chondrichthyan fishes: status survey* (vol. 63). IUCN.
- Freer, J., Beven, K. J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J., & Bates, P. (2013). Flood risk and uncertainty.
- Funk, C., Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell & Joel Michaelsen. (2015). CHIRPS The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66> 2015
- Gac, J.-Y. (1987). *L'évolution du plan d'eau du lac de Guiers (Sénégal) : les barrages de Rheune et de Diama : deux opportunités* [AP : Autres productions]. ORSTOM. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:26166>
- Gac, J.-Y., Coly, A., Niang, A., Carn, M., & Cogels, F.-X. (1992). Bilan hydrologique du lac de Guiers en 1992 : vers une gestion concertée des crues du fleuve Sénégal ?
- Gac, J.-Y., & Kane, A. J. S. G., bulletins et mémoires. (1986). Le fleuve Sénégal: I. Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulières à l'embouchure. Senegal river. Part I. Water budget and flux of carried load through the estuary. 39(1), 99-130.
- Gac, J.-Y. C., François-Xavier. (1994). Evaluation des ressources en eau du fleuve Sénégal : bilans hydrologiques du lac de Guiers de 1976 à 1992. Dakar (SEN) : ORSTOM. <https://doi.org/10.10016935>
- GAC, J., Cogels, F., & Evora, N. (1991). Bilan hydrologique du lac de Guiers en 1990. *Rapport CEE et ORSTOM Dakar, Projet EQUESEN*.
- GAC, J. Y., Carn, M., EVORA, N., & COGELS, F. X. (1991). Fonctionnement et bilan hydrologique du lac de Guiers en 1991. *Rapport CEE et ORSTOM Dakar, Projet EQUESEN, 40 p.+ annexes.*

- Gandu, A., Silva, R., & Martins, E. (2015). Drought identification in Cearà state using the standardized precipitation index (SPI). *Proceedings of the VI Simpósio Internacional de Climatologia, Natal, Brazil*, 13-16.
- Ghimire, E., Sharma, S., & Lamichhane, N. (2020). Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1), 110-126. <https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1824621>
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014. Incidences, adaptation et vulnérabilité. Notes à l'attention des décideurs. Contribution du Groupe de Travail au Cinquième Rapport d'Evaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), 40p.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Hajjout, N. (2019). Thèse : Prise en compte des incertitudes dues au coefficient de rugosité de Manning : application aux modèles hydrodynamiques 1D et 2D. *Polytechnique Montréal*.
- Henderson, F. M. (1996). Open channel flow: Macmillan.
- Hubert, P., Bader, J.-C., & Bendjoudi, H. (2007). Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 68-73. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.68>
- Janssen, C. (2016). Manning'sn values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas. *Revised by PAC*.
- Jupon, M. (1977). Elements de factibilité du barrage de Diama. OMVS. Saint-Louis. .
- Kamara, S., Coly, A., Martin, P. J. J. o. H. M., & Volume, E. R. (2012). Gestion des ouvrages hydrauliques et des ressources en eau dans le delta du Sénégal. 3(2), 66-75.
- Khosravi, K., Mao, L., Kisi, O., Yaseen, Z. M., & Shahid, S. (2018). Quantifying hourly suspended sediment load using data mining models: case study of a glacierized Andean catchment in Chile. *Journal of Hydrology*, 567, 165-179.
- Laforce, S. (2008). Cartographie des zones inondables dans un contexte de changements climatiques : cas de la Rivière du Nord à Lachute. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure.
- Leenhardt, D., Voltz, M., & Barreteau, O. (Eds.) (2020). L'eau en milieu agricole : Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale. Éditions Quæ. Tiré de <http://books.openedition.org/quae/37215>.
- Lhomme, J., Sayers, P., Gouldby, B., Samuels, P., Wills, M., & Mulet-Marti, J. (2008). Recent development and application of a rapid flood spreading method.
- Liu, Z., Merwade, V., & Jafarzadegan, K. J. J. o. F. R. M. (2019). Investigating the role of model structure and surface roughness in generating flood inundation extents using one-and two-dimensional hydraulic models. *12(1)*, e12347.

- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer.
- Mahé, G., & Olivry, J.-C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. 6(1), 109-117. ACLN : Articles dans des revues à comité de lecture non répertoriées dans des bases internationales.
- Mandal SP, C. A. (2016). Flash flood risk assessment for upper Teesta river basin: using the hydrological modeling system (HEC-HMS) software. *Model Earth Syst Environ* 2(2):1–10. <https://doi.org/doi.org/10.1007/s40800-016-0110-1>
- Mar, N. F., & Magrin, G. (2006-06-26 / 2006-06-28 2006). *Peut-on décentraliser des ressources stratégiques ? Réflexions sur l'articulation des niveaux de gestion autour du lac de Guiers* [Communication sans actes]. Colloque GECOREV, gestion concertée des ressources naturelles et de l'environnement, Saint-Quentin-en-Yvelines, France.
- Martel, J.-L., & Arsenault, R. (2020). Guide de modélisation hydraulique avec HEC-RAS version RiverGIS (QGIS) : Cours CTN769 - Ressources hydriques. *École de technologie supérieure : Groupe de recherche HC3*, 118.
- Mason, P. J. (1988). The formation of areally-averaged roughness lengths. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(480), 399-420.
- Matthies, H. G., Brenner, C. E., Bucher, C. G., & Soares, C. G. J. S. s. (1997). Uncertainties in probabilistic numerical analysis of structures and solids-stochastic finite elements. *Structural Safety*, 19(3), 283-336. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00013-1)
- Mbow, M. (2017). Les défis de l'agriculture sénégalaise dans une perspective de changements climatiques. Maîtrise en environnement. Université de Sherbrooke, 79p.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (vol. 17, p. 179-183).
- Merz, B., & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), 114-132.
- Michel Mietton, D. D., Olivier Hamerlynck, Alioune Kane, Adrien Coly, et al... . (2005). Le delta du fleuve Sénégal : Une gestion de l'eau dans l'incertitude chronique. Incertitude et Environnement,. Arles, France. pp.321-336. [ffhal-00370662](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00370662)
- MIKE, D. (2012). 21-2D Modelling of Coast and Sea. *DHI Water Environment Pty Ltd.: Hørsholm, Denmark*.
- MIKE, D. W. (2012). 21-2D Modelling of Coast and Sea. DHI Water & Environment Pty Ltd.: Hørsholm, Denmark.
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (2003). *Analyse des données qualitatives*. De Boeck Supérieur.
- Moghim, S., Gharehgoragh, M. A., & Safaie, A. (2023). Performance of the flood models in different topographies. *Journal of Hydrology*, 620, 129446.
- Monaghan, J. (1994). Simulating free surface flows with SPH. *Journal of computational physics*, 110(2), 399-406.

- Mondal I, B. J., Paul AK. (2016). Estimation of hydrodynamic pattern change of Ichamati River using HEC RAS model, West Bengal India. *Model Earth Syst Environ* 2(3):1–13. . https://doi.org/doi.org/10.1007/s4080_8-016-0138-2
- Munawar, H. S., Hammad, A. W. A., & Waller, S. T. (2022). Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review. *Sensors (Basel)*, 22(3), 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960>
- N. Moriasi, D., G. Arnold, J., W. Van Liew, M., L. Bingner, R., D. Harmel, R., & L. Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- N. Moriasi, D., W. Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Navratil, O. (2014). La modélisation hydraulique en pratique. *UNIT : Canal-U*. <https://www.canal-u.tv/81523> (Consultée le 29 juillet 2023).
- Ndiaye, A. C. (2005). *La problématique de l'accès aux ressources foncières des populations de la zone du lac de Guiers. Cas de la communauté rurale de MBane* [Mémoire, Ecole nationale d'économie appliquée]. Agritrop 18-juin-2023.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., Deme, A., Dezetter, A., Djaman, K., & Ogilvie, A. (2020). Trend and Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration in the Senegal River Basin Using NASA Meteorological Data. *Water*. <https://doi.org/195710.3390/w12071957>
- 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>
- Nedjraoui, D., & Bédrani, S. J. V. (2008). La désertification dans les steppes algériennes: causes, impacts et actions de lutte. 8(1), 15.
- Néelz, S. (2009). *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Bristol: Environment Agency.
- Néelz, S., & Pender, G. (2010). Benchmarking of 2D hydraulic modelling packages.
- Néelz, S., & Pender, G. (2013). Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages. *Environment Agency: Bristol, UK*.
- Niang, A. (2011). Aménagement du lac de Guiers de 1824 à l'avènement des grands barrages du fleuve Sénégal. Prospective géographique. *Revue Climat et Développement*.
- Niang, A. (2011). Aménagement du lac de Guiers de 1824 à l'avènement des grands barrages du fleuve Sénégal: Prospective géographique. *Climat et développement*, 12, 27-38.
- NIANG FALL, A. A. K. (2008). Problématique d'un lac sahélien aux multiples usages. 1er Séminaire sur la Gestion du cycle hydrologique et le développement durable : Problèmes et solutions pour l'Afrique.
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13-29.

- O'Connor and Costa, E. O. C., J.E. Costa. (2004). The World's Largest Floods, Past and Present—Their Causes and Magnitudes: U.S. Geological Survey Circular, vol. 1254 (2004), p. 13.
- OLAC. (2020). Projet Intégré Sécurité de l'Eau et de l'Assainissement au Sénégal PISEA : Composante "Sécurisation des eaux du Lac de Guiers". *Ministère de l'Eau et de l'Assainissement*.
- OLAG. (2019). Projet de Gestion Rationnelle de l'Eau du Système du lac de Guiers (PGRESL). *Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement*, 20.
- Olivry, J.-C. (1995). Fonctionnement hydrologique de la cuvette lacustre du Niger et essai de modélisation de l'inondation du delta intérieur. Dans J. Boulègue & J.-C. Olivry (édit.), *Grands bassins fluviaux pératlantiques : Congo, Niger, Amazone*. ORSTOM.
- OMM. (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, Organisation météorologique mondiale N° 1090.
- OMVS/Tropis/DHI. (2007). Étude sur la modélisation pluies/débits et la conception d'un système d'alerte précoce contre les inondations dans le haut bassin du fleuve Sénégal.
- Ould Baba M. L, D. S., Hamerlynck O., . (1998). « Une alternative à la gestion des eaux du fleuve Sénégal ? ». In : 2e conf. int. Zones humides et le développement, Dakar, 8-14 novembre 1998.
- Pappenberger, F., Beven, K. J., Ratto, M., & Matgen, P. (2008). Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models. *Advances in Water Resources*, 31(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.04.009>
- PDIDAS. (2016). Projet de Développement Inclusif et Durable de l'Agribusiness au Sénégal : ACTUALISATION DU CADRE DE GESTION ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE. *Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement Rural* 173.
- Pender, G. (2006). *Briefing: Introducing the flood risk management research consortium*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (vol. 159, p. 3-8).
- Picouet, C., Hingray, B., & Olivry, J. C. (2005). Modélisation conceptuelle globale du régime du transport particulaire sur les fleuves tropicaux d'Afrique : application aux bassins du Niger supérieur et du Bani, Mali. *Revue des sciences de l'eau*, 13(4), 463-481. <https://doi.org/10.7202/705403ar>
- Piveteau, A., Solera, B., & Frey, B. (2021). Modélisation du ruissellement : enjeux et réponses des modèles numériques. *LHB*, 107. <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912961>
- PNUD, U.-W. S. (2002). Vers une gestion intégrée du littoral et du bassin fluvial. Programme pilote du delta du fleuve Sénégal et de sa zone côtière. 113 p. .
- Powell, D. M. (2014). Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. *Earth-Science Reviews*, 136, 301-338. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.001>
- PREFELAG. (2019). Rapport de capitalisation du Projet de Restauration des Fonctions Ecologiques et Economiques du Lac de Guiers.
- Ramírez, J. A. (2000). Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics. *Inland flood hazards: Human, riparian aquatic communities*, 498.

- Refsgaard, J. C., & Henriksen, H. J. J. A. i. W. R. (2004). Modelling guidelines : Terminology and guiding principles. 27(1), 71-82.
- Requier-Desjardins, M. J. C. I. d. H. É. A. M., Montpellier. (2010). Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Maroc et en Tunisie et priorités d'adaptation.
- Rickenmann, D., & Recking, A. (2011). Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, 47(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010WR009793>
- Roberson, J. A., Cassidy, J. J., & Chaudhry, M. H. (1998). *Hydraulic engineering*. John Wiley & Sons.
- Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., Sexton, J., & Davies, G. (2015). ANUGA user manual. *Commonwealth of Australia the Australian National University*, 127.
- Rochette, C. (1974). *Le bassin du fleuve Sénégal* (vol. 1). IRD Editions.
- Rubiu, F. (2018). *Flood risk assessment in the vicinity of kartena town using hec-ras 1d-2d models*, Aleksandro Stulginskio universitetas].
- Sambou, D., Diekkrüger, B., Weihrauch, D., & Hellwig, V. (2018). Water availability and demand under climate change and population growth in Lake Guiers, Senegal.
- Sambou, D., Fall, A. C., & Sane, T. (2019). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau du Lac de Guiers au Sénégal.
- Saravanan, V., McDonald, G. T., & Mollinga, P. P. (2009). *Critical review of integrated water resources management: moving beyond polarised discourse*. Natural Resources Forum.
- Schmid, H., & Bünzli, B. (1995). The influence of surface texture on the effective roughness length. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(521), 1-21.
- Seck, S., Valarié, P., & Leclerc, G. (2005). Acteurs, utilisation des ressources et gestion de l'espace dans la région du lac de Guiers: éléments de contribution au diagnostic des enjeux politiques. *Document de travail CIRAD* . 70p.
- SEN'EAU. (2022). SUEZ en Afrique : Accompagner le Sénégal dans ses besoins en eau et en assainissement. <https://www.suez.com/fr/afrique/nos-references/accompagner-senegal-besoins-eau-assainissement>, <https://www.seneau.sn/>.
- Sleigh, 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.
- Smith, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological processes*, 11(10), 1427-1439.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. J. J. o. h. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. 523, 739-757.
- Strickler, A. (1923). *Contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams, channels and closed pipelines*. WM Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of
- Sturm, T. W. (2001). *Open channel hydraulics* (vol. 1). McGraw-Hill New York.

- Tazin, T. J. M. S. E. (2018). Flood Hazard Mapping of Dharla River Floodplain Using HEC-RAS 1D/2D Coupled Model. *Thesis, Bangladesh University of Engineering Technology, Dhaka*.
- Te Chow, V. (1959). Open-channel hydraulics (Vol. 1): McGraw-Hill New York.
- Teeter, A. M., Johnson, B. H., Berger, C., Stelling, G., Scheffner, N. W., Garcia, M. H., & Parchure, T. J. H. (2001). Hydrodynamic and sediment transport modeling with emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). 444, 1-23.
- 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>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., 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>
- Trigg, M. A., Wilson, M. D., Bates, P. D., Horritt, M. S., Alsdorf, D. E., Forsberg, B. R., & Vega, M. C. (2009). Amazon flood wave hydraulics. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.004>
- Triplet, P., Dodman, T., Ogilvie, A., Ndiaye, P., Saliou, N., Kane, A., & Ouédraogo, P. (2018). *Rapport de mission Ramsar sur la cuvette du Ndiaël, Sénégal, 4-8 DECEMBRE 2017 ; ram87fndiael senegal 2017*.
- UNWATER. (2022). Études de cas sur l'accélération des pays pour l'ODD (Sénégal). 6, 12.
- Uusitalo, L., Lehtinen, A., Helle, I., & Myrberg, K. (2015). An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support. *Environmental Modelling & Software*, 63, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.017>
- Wade, M., Duc, T., & Dacosta, H. (2005). Les ressources en eau.
- Wilson, I. B. D. T., Mahamane; Bazoun, Janvier; Fraval, Pierrick; Bea, Sylvestre; Davy, Thierry; Moutouama, Fidele Tchossi;. (2018). Atlas de l'eau du Massif du Fouta Djalon : Le Château d'eau de l'Afrique de l'Ouest. 114.
- World Bank, B. (2022). Sécurité de l'Eau au Sénégal : Sommaire Executif (French). Washington, D.C. : World Bank Group.
- Yamani K, H. A., Sekkoum M, Slimane T. (2016). Mapping of vulnerability of flooded area in arid region: case study: area of Ghardaïa-Algeria. *Model Earth Syst Environ* 2(3):1–17. . <https://doi.org/doi.org/10.1007/s4080 8-016-0183-x>
- Ye, J., & McCorquodale. (1998). Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(7), 687-698.
- Yen, B. C. (2002). Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (1).
- Yuen, K. W., Hanh, T. T., Quynh, V. D., Switzer, A. D., Teng, P., & Lee, J. S. H. (2021). Interacting effects of land-use change and natural hazards on rice agriculture in the Mekong and Red River deltas in Vietnam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1473-1493. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1473-2021>

Zeiger, S. J., & Hubbart, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *J Environ Manage*, 285, 112125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>

Zieminska-Stolarska, A., Skrzypski, J. J. E. C., & Engineering. (2012). Review of mathematical models of water quality. *19*(2), 197.

ANNEXE

ANNEXE A : FORMULES

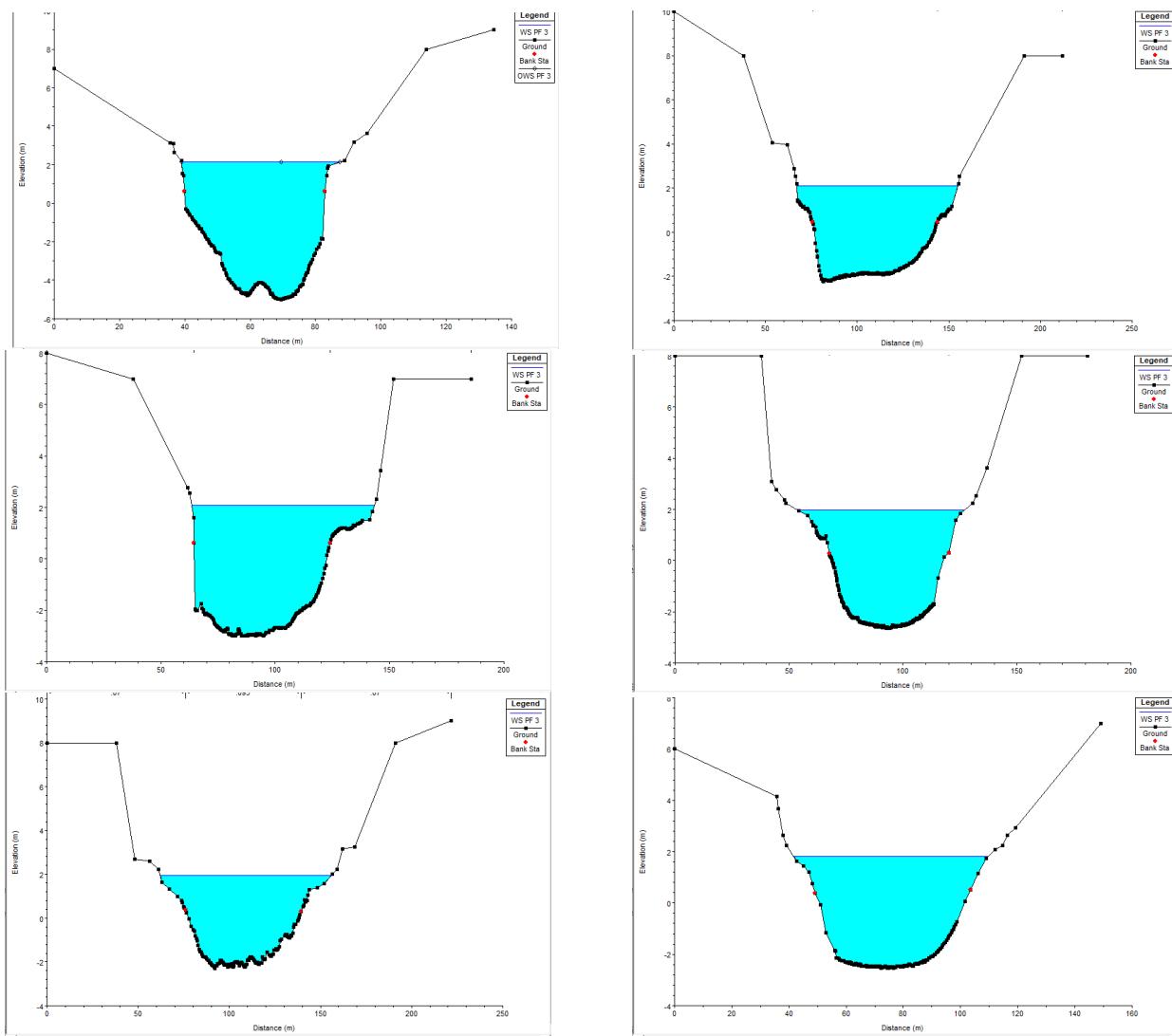
La formule de Thornthwaite pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle est donnée par :

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \cdot \bar{t}}{I} \right)^a$$

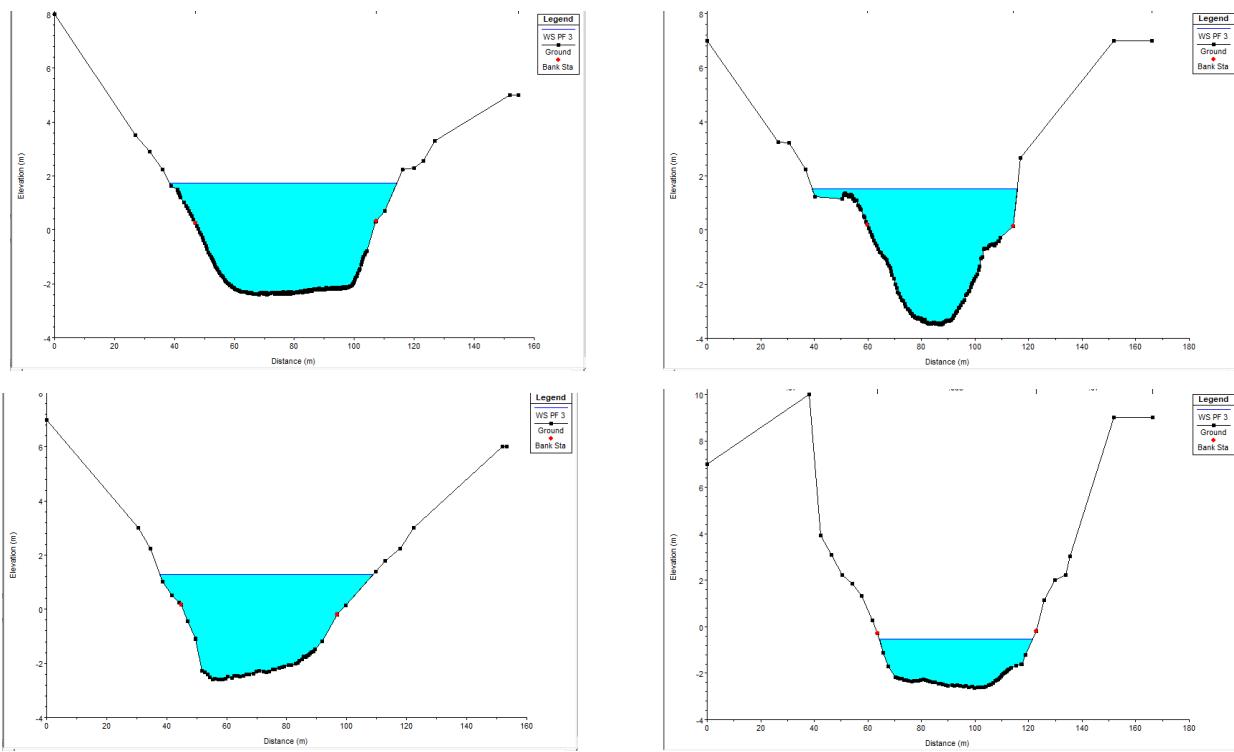
$$I = \sum_{i=1}^{12} i \text{ et } i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \text{ et } a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.79 \times 10^{-2} \times I + 0.49239$$

Où : i = indice mensuel de chaleur; I = indice annuel de chaleur; t_{moy} = température moyenne mensuelle en $^{\circ}\text{C}$; a est un coefficient qui dépend I

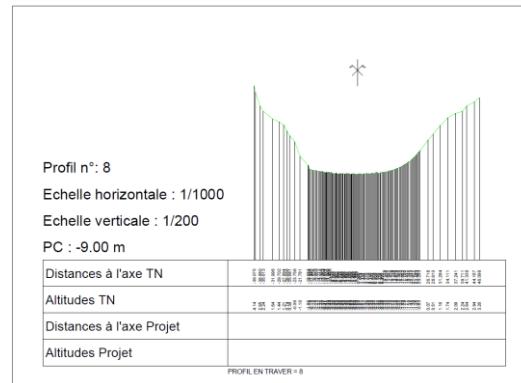
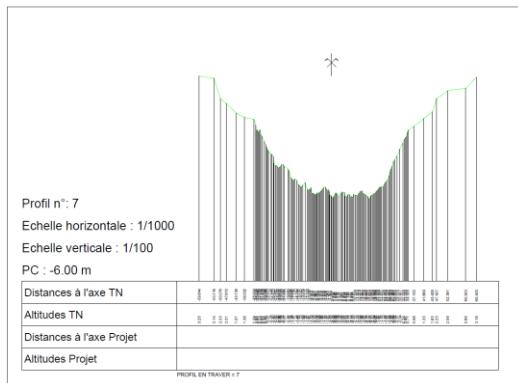
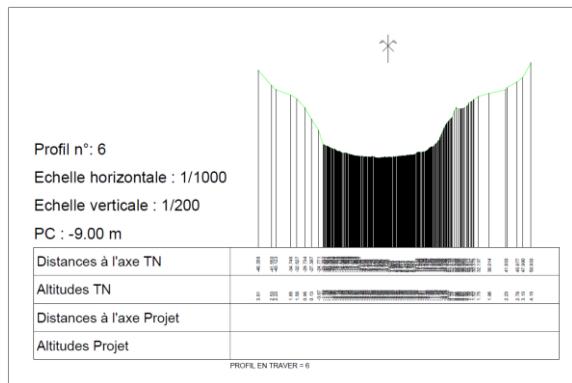
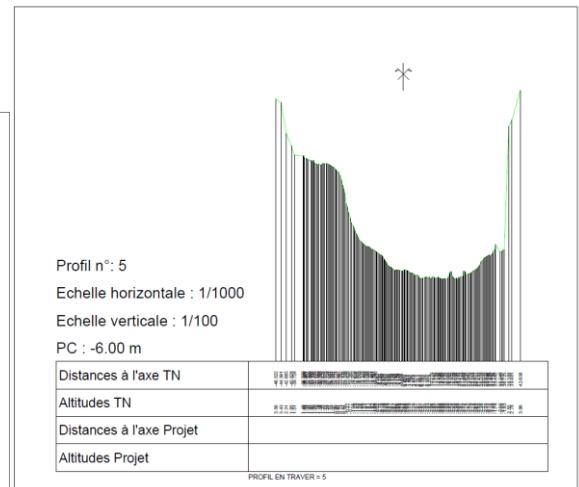
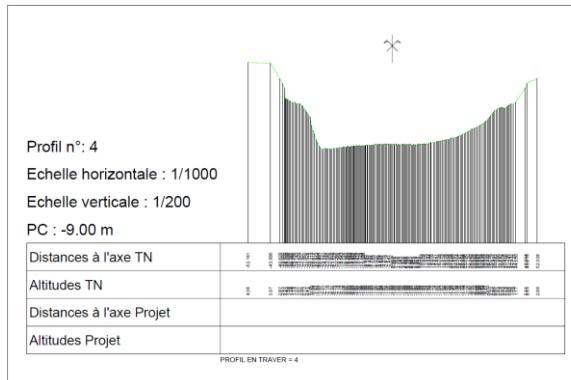
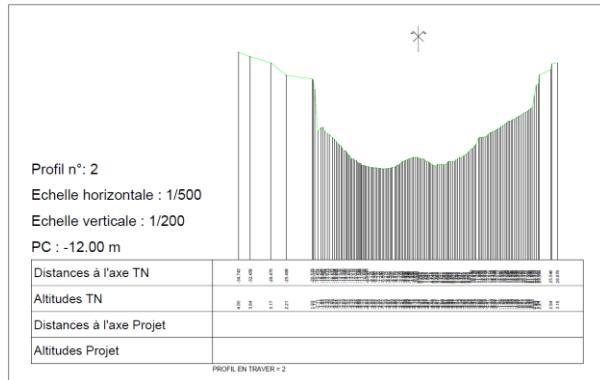
ANNEXE B : PROFILS EN TRAVERS DU CANAL TAOUHEY (HEC-RAS)



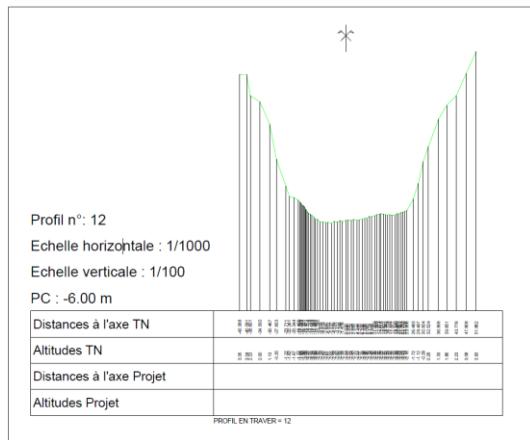
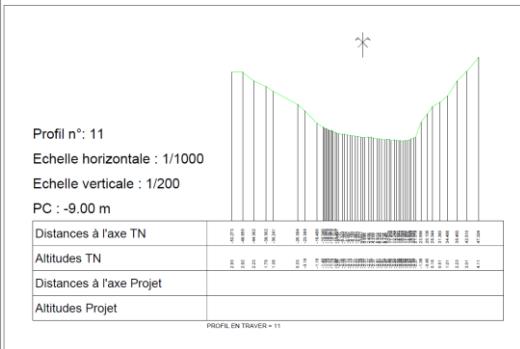
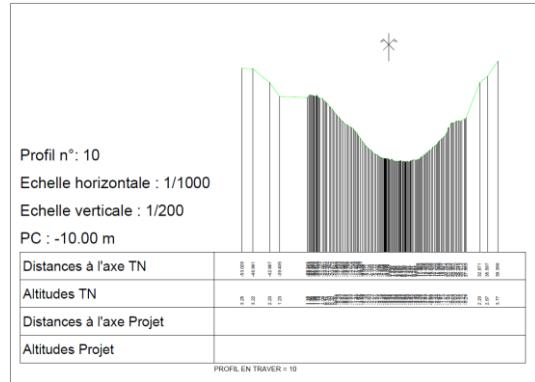
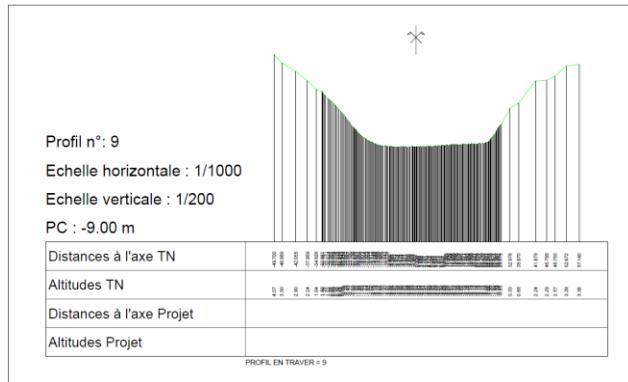
ANNEXE B : PROFILS EN TRAVERS DU CANAL TAOUHEY (HEC-RAS) (SUITE)



ANNEXE C : PROFILS EN TRAVERS DU CANAL TAOUEY (DONNEES BRUTES, COVADIS)



ANNEXE C : PROFILS EN TRAVERS DU CANAL TAOUEY (DONNEES BRUTES, COVADIS) (SUITE)



ANNEXE D : DETAILS DE LA SORTIE AMONT

Plan: Plan p01 Taoue Amont RS: 16803.64 Profile: PF 3					
E.G. Elev (m)	2.14	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.00	Wt. n-Val.	0.070	0.093	0.070
W.S. Elev (m)	2.14	Reach Len. (m)	81.48	79.05	78.56
Crit W.S. (m)	-3.36	Flow Area (m2)	5.44	201.40	0.01
E.G. Slope (m/m)	0.000057	Area (m2)	5.44	201.40	0.01
Q Total (m3/s)	48.10	Flow (m3/s)	0.38	47.72	0.00
Top Width (m)	48.04	Top Width (m)	10.46	37.56	0.02
Vel Total (m/s)	0.23	Avg. Vel. (m/s)	0.07	0.24	0.00
Max Chl Dpth (m)	6.60	Hydr. Depth (m)	0.52	5.36	0.73
Conv. Total (m3/s)	6350.1	Conv. (m3/s)	49.6	6300.5	0.0
Length Wtd. (m)	79.06	Wetted Per. (m)	10.66	40.58	1.46
Min Ch El (m)	-4.46	Shear (N/m2)	0.29	2.79	0.01
Alpha	1.03	Stream Power (N/m s)	0.02	0.66	0.00
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m3)	62.56	3087.51	72.46
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	120.43	987.42	119.00

ANNEXE E : DETAILS DE LA SORTIE AVAL

Plan: Plan p01 Taoue Amont RS: 27.52336 Profile: PF 3					
E.G. Elev (m)	-1.18	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.00	Wt. n-Val.	0.070	0.093	0.070
W.S. Elev (m)	-1.18	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	-3.75	Flow Area (m2)	9.39	214.19	45.93
E.G. Slope (m/m)	0.000180	Area (m2)	9.39	214.19	45.93
Q Total (m3/s)	48.10	Flow (m3/s)	0.96	40.13	7.01
Top Width (m)	232.86	Top Width (m)	24.06	144.32	64.48
Vel Total (m/s)	0.18	Avg. Vel. (m/s)	0.10	0.19	0.15
Max Chl Dpth (m)	3.39	Hydr. Depth (m)	0.39	1.48	0.71
Conv. Total (m3/s)	3582.6	Conv. (m3/s)	71.6	2989.2	521.8
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	24.11	144.83	64.75
Min Ch El (m)	-4.57	Shear (N/m2)	0.69	2.61	1.25
Alpha	1.03	Stream Power (N/m s)	0.07	0.49	0.19
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)			
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)			

ANNEXE F : TABLEAU RECAPITULATIF DES SORTIES PAR PROFIL

HEC-RAS Plan: Plan p01 River: Taoue Reach: Amont Profile: PF 3												
Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
Amont	16803.64	PF 3	48.10	-4.46	2.14	-3.36	2.14	0.000057	0.24	206.85	48.04	0.03
Amont	16566.50	PF 3	48.10	-5.02	2.13		2.13	0.000041	0.20	239.47	48.47	0.03
Amont	16216.45	PF 3	48.10	-2.22	2.12		2.12	0.000052	0.18	271.03	87.78	0.03
Amont	15726.79	PF 3	48.10	-3.00	2.09		2.09	0.000041	0.18	277.55	79.86	0.03
Amont	13621.28	PF 3	48.10	-2.65	1.97		1.97	0.000079	0.23	215.50	72.81	0.04
Amont	13440.76	PF 3	48.10	-2.29	1.96		1.96	0.000074	0.21	241.29	93.90	0.04
Amont	11825.50	PF 3	48.10	-2.54	1.82		1.83	0.000089	0.24	207.20	68.18	0.04
Amont	10625.38	PF 3	48.10	-2.40	1.73		1.73	0.000076	0.22	227.33	75.62	0.04
Amont	8350.026	PF 3	48.10	-3.50	1.52		1.52	0.000106	0.25	198.40	76.55	0.04
Amont	6557.274	PF 3	48.10	-2.60	1.28		1.28	0.000151	0.28	177.43	71.12	0.05
Amont	1034.851	PF 3	48.10	-2.65	-0.53		-0.51	0.001219	0.52	93.19	57.35	0.13
Amont	27.52336	PF 3	48.10	-4.57	-1.18	-3.75	-1.18	0.000180	0.19	269.51	232.86	0.05

ANNEXE G : LOGICIELS DE MODÉLISATION HYDRAULIQUE (TENG, J. ET AL., 2017).

Développeur	1D	2D	1D + 2D	3D	Simplifié	Statut	Note
Uni. Nat. Géoscience Australie		ANUGA Hydro				Open source	https://anuga.anu.edu.au/
Corps des ingénieurs de l'armée américaine	HEC-RAS	HEC-RAS 2D				Gratuit	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras
DHI	MIKE11/MIKE HYDRO	MIKE21	MIKE Inondation	MIKE 3		Commercial	
Électricité de France (EDF)	MASCARET	TÉLÉMAC 2D		TÉLÉMAC 3D		Open source	
Innovyze	Info Works RS	InfoWorks 2D	ICM InfoWorks			Commercial	Moteur simulation de flux ISIS.
Université de Tokyo		CaMa-Inondation				Recherche	Modèle à l'échelle mondiale.
BMTWBM	TUFLOW Classic 1D	TUFLOW Classic 2D TUFLOW FV	TUFLOW Classic	TUFLOW FV		Commercial	
Université de Cardiff	FASTER	DIVAST, DIVAST-TVD				Recherche	Base d'ISIS 2D
CH2M Hill (Groupe Halcrow)	Solveurs Flood Modeller Pro1D	Solveurs Flood Modeller Pro 2D	Inondation Modeler Pro		Solveur Flood Modeller Pro 2D	Commercial	Flood Modeller Pro, successeur de la suite ISIS.
DELTARES	Suite SOBEK	Suite SOBEK DELFT3D	Suite SOBEK	DELFT3D		Commercial	DELFT3D open source http://oss.deltares.nl/web/delft3d/get-started .
Autodesk				Bifrost		Commercial	Maya
Université de Kyūshū				Flip3D		Open source	https://code.google.com/p/fli-p3d/
TU Munich & ETH Zurich				Coulemanta		Open source	http://mantaflow.com