



**Étude hydrologique pour la maîtrise des eaux d'inondation dans le quartier de Khar Yalla (Saint-Louis, Sénégal) : analyse de la faisabilité d'ouvrages de protection tels que digue, déversoir et bassin de dissipation**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE  
**MASTER**  
**SPECIALITE : GENIE DE L'EAU DE L'ASSAINISSEMENT ET DES  
AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLE (GEAAH)**

---

Présenté et soutenu publiquement le 16 juillet 2025 par :

**Abdoulaye NDIAYE (20221102)**

**Directeur de mémoire :** Dr Angelbert Chabi BIAOU, Maître de Conférences (CAMES), 2iE

Travaux dirigés par :

**Encadrant 2iE :** Dr Moussa Diagne FAYE, Maitre-Assistant (CAMES), 2iE

**Maître de stage :** M. Moustapha BA, Chef de service de la Division Territoriale à la DPGI  
M. Ibrahima FAYE, Expert consultant en hydraulique à la DPGI

**Structure d'accueil du stage :** Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations (DPGI)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : **Mahamadou KOITA**

Membres et correcteurs : **Mme Tani Fatimata Andréa COULIDATI**

**M. Adama ZOMBRE**

Promotion [2024/2025]

# DÉDICACES

Tout d'abord, je rends grâce à ALLAH, le Tout-Puissant, le Très Miséricordieux, de m'avoir permis de mener à bien ce travail. Que la paix et la bénédiction soient sur le Prophète Mohammed (PSL), ses compagnons et tous ceux qui suivent sa voie.

JE DÉDIE CE MÉMOIRE À :

✚ **Mes parents, Ndickou SENE et Mamadou Lamine NDIAYE,**

*Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs prières, et leur patience infinie. Que dieu, le Pourvoyeur inépuisable vous accorde une longue vie, une santé parfaite, une fin heureuse, et Sa récompense ici-bas et dans l'au-delà. Votre foi en moi m'a porté jusqu'ici.*

✚ **Mes sœurs,**

**Daba NDOUR, Ndèye Fatou NDIAYE, Mame Diarra NDIAYE, Amy NDIAYE,**  
*Soutien constant de l'ombre à la lumière, pour votre affection, vos encouragements et votre présence, visibles ou discrètes, qui m'ont toujours accompagné, Que le Très-Haut veille sur vous, vous comble de paix, de succès, et vous accorde une fin heureuse.*

✚ **Et tout particulièrement à toi, Daba NDOUR,**

*Plus qu'une sœur, tu as occupé pour moi la fonction parentale avec une noblesse rare.*

*Tu as été un phare dans l'obscurité, une voix de sagesse, une épaule fidèle, un refuge dans chaque tempête.*

*Depuis mes premiers pas, tu as porté les charges et construit mes ailes avec patience inlassable.*

*Chaque étape de mon parcours porte ton empreinte, discrète mais profondément puissante.*

*Par ton dévouement sans faille, ton soutien moral, financier et affectif, tu as tout mis en œuvre pour que je sois toujours à la hauteur, présent là où l'on m'attendait.*

*Que Le Très-Reconnaisant, Celui qui récompense avec justice, te rende chaque sacrifice par des milliers de bénédictions, ici-bas et dans l'au-delà. Et qu'Il t'accorde une fin heureuse, douce et honorée.*

## Citations

**Essaie toujours de te cacher toi qui es à la quête du savoir... Aie de la détermination, ainsi tu dépasseras ta génération.**

**Ne te plains pas tout le temps des épreuves qui t'accablent. Sois courageux et agis de telle sorte que les gens croient que tu ne manques de rien.**

*-----Cheikh Ahmadou Bamba Khadimu Rassoul*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Mes remerciements s'adressent particulièrement à :

- L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ainsi qu'à l'ensemble de son corps professoral et administratif, pour la qualité de la formation dispensée, l'accompagnement académique, et le professionnalisme dont ils ont fait preuve tout au long de mon parcours.
- Mon directeur de mémoire, Dr Angelbert Chabi BIAOU, pour sa rigueur scientifique et sa collaboration tout au long de ce travail ;
- Mon encadrant, Dr. Moussa Diagne FAYE, pour son suivi méthodologique et ses orientations pertinentes ;
- Monsieur Madické CISSE, Directeur de la Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations (DPGI), pour m'avoir offert cette opportunité de stage et mis à ma disposition les moyens nécessaires à sa réussite, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de la DPGI, pour leur accueil et leur collaboration tout au long de cette expérience ;
- Mes maîtres de stage :
  - À Moustapha BA, pour sa disponibilité, son encadrement institutionnel et son accompagnement dans le cadre du stage
  - À Ibrahima FAYE, pour son implication exceptionnelle, sa rigueur bienveillante, sa disponibilité inlassable et ses conseils qui ont profondément marqué l'orientation et l'aboutissement de ce travail.
- Pape Mbagnick FAYE et Cheikh Tidiane DIALLO pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur constante présence pour la réussite de ce travail ;
- La communauté sénégalaise de 2iE, pour son soutien moral et sa solidarité durant toute ma formation ;
- Dr Momath NDIAYE, Directeur Adjoint de l'UFR SFI à l'USSEIN, pour la qualité de l'enseignement qu'il y assure et son accompagnement constant ;
- La chaleureuse colocation de la maison palais pro et particulièrement à Adama DIALLO, Adama DIAME, Yaya SOW et Cheikh DIAWARA, avec qui j'ai partagé non seulement un espace, mais aussi des moments inoubliables de complicité et de soutien ;
- Ma famille et mes ami(e)s, dont l'amour, le soutien, les encouragements et la confiance ont été des piliers essentiels tout au long de ma vie.
- Mohamed Niang, présent et fidèle sans faille : merci pour ton soutien constant et ta loyauté, tu as été bien plus qu'un ami, un frère.

## RESUME

Ce mémoire porte sur la conception d'un dispositif de protection contre les inondations dans le quartier de Khar Yalla, à Saint-Louis (Sénégal). Cette zone, située en contrebas du niveau de la mer, est exposée à de fortes inondations pluviales et souterraines en raison de sa topographie en cuvette, de la faible perméabilité de ses sols argileux et de l'absence de système de drainage efficace. L'étude s'appuie sur une analyse hydrologique complète du bassin versant **de 44,4 km<sup>2</sup>**, dont les apports liquide annuels utiles sont estimés à environ **597 396 m<sup>3</sup>**.

Le débit de crue centennale, évalué à **244,02 m<sup>3</sup>/s** par la **méthode ORSTOM**, a servi de base pour le dimensionnement des ouvrages. La digue principale, conçue en terre homogène à dominante argileuse, présente une hauteur maximale de **3,44 m**, une largeur en crête de **3 m**, des talus inclinés à **1V/2H** et une longueur totale d'environ **1500 m**. Un déversoir-poids en béton cyclopéen a été prévu en position frontale pour assurer l'évacuation contrôlée des crues. Il est calé à la cote **3,3 m**, avec une longueur utile de **196,45 m** intégrant l'effet de laminage pour optimiser le fonctionnement hydraulique. En aval, un bassin de dissipation à ressaut, renforcé par des gabions disposés en escalier, a été dimensionné pour maîtriser la vitesse d'écoulement et limiter les risques d'érosion.

Malgré la présence de ces ouvrages, certaines zones du quartier restent difficilement sécurisables. Ainsi, une relocalisation partielle ou temporaire des habitants les plus exposés a été envisagée. L'enquête de terrain a mis en évidence une acceptabilité modérée mais lucide de cette option, à condition qu'elle soit accompagnée par un cadre clair de compensation, de transparence et de relogement digne. Un Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) a été élaboré en complément d'une Notice d'Impact Environnemental et Social (NIES) afin d'anticiper les effets du projet sur le milieu naturel et humain, tout en définissant les mesures de suivi, d'atténuation et de gouvernance à mettre en œuvre.

Le coût total du projet est estimé à **169 000 000 FCFA**.

### Mots Clés :

- Inondations
- Digue de protection
- Relocalisation
- Hydrologie urbaine
- PGES

## ABSTRACT

This thesis focuses on the design of a flood protection system in the Khar Yalla neighborhood of Saint-Louis, Senegal. This low-lying area, located below sea level, is highly vulnerable to both pluvial and groundwater flooding due to its bowl-shaped topography, the low permeability of its clayey soils, and the absence of an effective drainage system. The study is based on a complete hydrological analysis of the **44.4 km<sup>2</sup>** watershed, with estimated useful annual runoff of about **597 396 m<sup>3</sup>**.

The 100-year flood discharge, estimated at **244.02 m<sup>3</sup>/s** using the **ORSTOM method**, served as the basis for sizing the protective structures. The main levee, designed as a homogeneous earthfill with a clay-dominant profile, has a maximum height of **3.44 m**, a **3 m** crest width, side slopes of **1H/2V**, and a total length of approximately **1500 m**. A gravity spillway made of cyclopean concrete is placed frontally to allow controlled flood discharge. It is set at elevation **3.3 m**, with a usable length of **13.5 m** and a maximum height of **3.25 m**, integrating a flood attenuation effect to optimize hydraulic behavior. Downstream, a stepped stilling basin reinforced with gabions was designed to dissipate energy and control flow velocity, thereby minimizing erosion risk.

Despite these protective structures, some areas remain highly exposed and cannot be fully secured. Thus, a partial or temporary relocation of the most vulnerable residents was considered. Field surveys revealed a moderate but realistic level of acceptance, provided the process ensures transparency, fair compensation, and dignified resettlement. An Environmental and Social Management Plan (ESMP) was developed alongside an Environmental and Social Impact Notice (ESIN) to anticipate project impacts on the natural and human environment, while defining the necessary mitigation, monitoring, and governance measures.

The overall cost of the project is estimated at **169 000 000 FCFA**.

### Key Words:

- Floods
- Protective levee
- Resettlement
- Urban hydrology
- ESMP

<b>FICHE TECHNIQUE DU PROJET</b>	
<b>Rubrique</b>	<b>Données du projet</b>
<b>DONNEES GENERALES</b>	
<b>LOCALISATION</b>	
Région administrative	SAINT-LOUIS
Commune	Ville de Saint-Louis
Quartier concerné	Khar Yalla
Situation	Zone sud de la ville, à proximité de l'aéroport Ousmane Masseck Ndiaye
Accès	Facilité d'accès par voirie urbaine
Coordonnées GPS	X: 16° 2' 1,66" N
	Y: 16° 27' 37,73" W
Objectif principal du projet	Réduction durable du risque d'inondation dans le quartier de Khar Yalla
Date de lancement de l'étude	Janvier 2025
<b>BASSIN VERSANT</b>	
Superficie	44,4 km <sup>2</sup>
Superficie approximative de la zone en cuvette	Environ 9 ha (≈ 90 000 m <sup>2</sup> )
Périmètre	101,85 Km
Indice de pente global	1,23 m/Km
Densité de drainage	2,30 Km/Km <sup>2</sup>
Nature des sols	Argileux, faiblement perméables
<b>DONNEES PLUVIOMETRIQUES</b>	
Station météorologique de référence	Saint-Louis
Pluie moyenne annuelle (1980–2018)	≈ 257,77 mm
Pluie journalière maximale (1980–2018)	320,10 mm
Pluie journalière max décennale P10 (mm)	204 mm
Pluie annuelle décennale Pan10 (mm)	380 mm
<b>DEBITS DE CRUES CARACTERISTIQUES</b>	
Débit de crue décennale (Q <sub>10</sub> )	126,52 m <sup>3</sup> /s

Débit de crue centennale (Q <sub>100</sub> )	244,02 m <sup>3</sup> /s
<b>APPORTS LIQUIDES ANNUEL</b>	
APPORTS LIQUIDES	662 036,51 m <sup>3</sup>
Apport quinquennal sèche	463 425,56 m <sup>3</sup>
Apport décennal sèche	331 018,26 m <sup>3</sup>
<b>CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES PROJETES</b>	
<b>DIGUE</b>	
Type	Terre homogène argileuse
Hauteur PEN	2,5 m
Hauteur PHE	3,3 m
Longueur	1500 m
Largeur crête	3,06 m
Hauteur	3,44 m
Pente des talus	26,56°
<b>DEVERSOIR</b>	
Type	Déversoir poids
Forme	Trapézoïdale
Longueur du déversoir laminé	196,45 m
Débit laminé	175,69 m <sup>3</sup> /s
Lame d'eau déversant	0,8 m
Largueur en crête du seuil b1	1 m
Côte de la crête	1,33
Cote fond de la cuvette	-1,17 m
Bassin de dissipation	À ressaut de type II t USBR
Longueur du Bassin de dissipation	3,25 m
<b>COÛT DU PROJET</b>	
Construction d'ouvrages	144 840 000 FCFA
Coût du PGES	25 000 000 FCFA
Coût total estimatif du projet	<b>169 000 000 FCFA</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS

**2iE** : Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

**MHA** : Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement

**DPGI** : Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations

**ORSTOM** : Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement

**ONBAH** : Office National des Barrages et des Aménagement Hydroagricoles

**CIEH** : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

**BV** : Bassin Versant

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**NIES** : Notice d'Impact Environnemental et Social

**PGES** : Plan de Gestion Environnemental et Social

**DEEC** : Direction de l'Environnement et des Établissements Classés

**CGES** : Cadre de Gestion Environnementale et Social

**PROGEP** : Projet de Gestion des Eaux Pluviales

**GPS** : Global Positioning Système

**Gradex** : Gradient Exponentiel

**ANSD** : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

**IPR** : Institut Pédologique Régional de Saint Louis

**DQE** : Devis Quantitatif Estimatif

**SFI** : Sciences Fondamentales et de l'ingénieur

## SOMMAIRE

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	viii
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	3
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	4
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	6
<b>II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE</b> .....	7
<b>II.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL</b> .....	7
<b>II.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</b> .....	8
<b>III. PRESENTATION DU PROJET</b> .....	10
<b>III.1 Contexte et Problématique</b> .....	10
<b>III.2 Objectifs du travail</b> .....	11
<b>III.3 Résultats attendus</b> .....	12
<b>IV. METHODOLOGIE DE CONCEPTION</b> .....	12
<b>IV.1 Recherche documentaire</b> .....	12
<b>IV.2 Collectes des données</b> .....	13
<b>IV.3 Traitement des données</b> .....	13
<b>IV.4 Etudes topographiques</b> .....	13
<b>IV.5 Etudes pédologiques</b> .....	14
<b>IV.6 Etudes hydrologiques</b> .....	14
<b>V. Méthodologie de l'étude de la relocalisation des populations touchées par les inondations du quartier Khar Yalla.</b> .....	34
<b>V.1. Cadre de réflexion intégré</b> .....	34
<b>V.2. Approche méthodologique de l'étude sociale</b> .....	35
<b>VI. Etude de faisabilité technique</b> .....	35
<b>VI.1 État des lieux</b> .....	35
<b>VI.2 Caractérisation du bassin versant</b> .....	40

<b>VI.3 Détermination du débit de crue du projet</b> .....	44
<b>VI.4 Evaluation des apports au niveau du bassin versant</b> .....	46
<b>VI.5 Evaluation des pertes au niveau de la digue</b> .....	47
<b>VI.6 Conception et du dimensionnement de la digue de protection</b> .....	48
<b>VI.7 Conception et du dimensionnement du déversoir</b> .....	50
<b>VI.8 Conception et du dimensionnement du bassin de dissipation</b> .....	53
<b>VII. Exploration de l'option de la relocalisation</b> .....	54
<b>VII.1 Résultats de l'enquête : une acceptabilité faible mais lucide</b> .....	54
<b>VII.2 Analyse critique :</b> .....	55
<b>VIII. Notice d'impact environnemental et social / plan de gestion environnemental et social</b> .....	56
<b>VIII.1 Rappel du cadre législatif régissant le projet</b> .....	56
<b>VIII.2 Rappel des composantes et phases du projet</b> .....	56
<b>VIII.3 Identification et évaluation des impacts</b> .....	57
<b>VIII.4 Plan de Gestion Environnemental et Social (PGES)</b> .....	57
<b>x. Conclusion et recommandation</b> .....	60
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	62

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Choix du période de retour selon Degoutte et Fry .....	21
Tableau 2 : Dimensionnement du drain .....	27
Tableau 3 : Valeur de $D_{50}$ en fonction de la hauteur des vagues.....	28
Tableau 4 : Paramètres de conception et du dimensionnement du bassin de dissipation .....	33
Tableau 5 : Caractéristiques descriptives des données pluviométriques de la station de Saint-Louis de 1980 à 2018 .....	39
Tableau 6 : Récapitulatif des ajustements des données pluviométriques par les lois de GAUSS et GUMBEL .....	39
Tableau 7 : Paramètres géo-morphométriques.....	41
Tableau 8 : Caractéristiques relatives au relief du bassin versant.....	43
Tableau 9 : Caractéristiques relatives au réseau hydrographique .....	43
Tableau 10 : La crue centennal du projet .....	44
Tableau 11: Estimation des apports liquides par la méthode de Coutagne.....	46
Tableau 12 : Estimation des apports liquides par la méthode de RODIER .....	46
Tableau 13 : Estimation des pertes spatiales dues aux dépôts solides .....	48
Tableau 14 : Paramètres de conception et du dimensionnement de la digue de protection.....	49
Tableau 15 : Résultats du laminage de crue par la méthode EIER-CIEH.....	51
Tableau 16 : Paramètres de conception et de dimensionnement du déversoir.....	51
Tableau 17 : Étude de la stabilité du déversoir .....	52
Tableau 18 : Conception du bassin de dissipation .....	53
Tableau 19 : Paramètres géométriques des dispositifs dissipateurs du bassin.....	54
Tableau 20 : DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF DE L'OUVRAGE .....	58
Tableau 21 : DONNEE DE TRACE DE LA COURBE HYPSONOMETRIQUE .....	64
Tableau 22 : DONNEE DE TRACE DES COURBE HAUTEUR-VOLUME ET HAUTEUR-SURFACE.....	64
Tableau 23: Données pluviométriques de la station de Saint-Louis .....	65
Tableau 24 : Résultat de l'Ajustement par la loi NORMAL des pluies moyenne annuelle .....	68
Tableau 25 : Résultat de l'Ajustement par la loi GUMBEL des pluies journalières maximale .....	69
Tableau 26:Données mensuelles des paramètres climatiques à Saint-Louis : évaporation, température et ensoleillement.....	70

Tableau 27 : Détermination du débit centennal du projet selon ORSTOM et CIEH.....	71
Tableau 28 : Détermination du temps de base et du temps de montée à partir d'abaques .....	73
Tableau 29 : Tableau des coefficients CIEH.....	76
Tableau 30: Effet du laminage de crue (méthode du coefficient X0) .....	78
Tableau 31: Paramètres d'entrée de la méthode EIER-CIEH pour le laminage de crue.....	79
Tableau 32 : Classification des charges agissant sur le déversoir.....	80
Tableau 33 : Paramètres techniques du bassin de dissipation et du chenal d'évacuation .....	82
Tableau 34 : Les principaux impacts par phase .....	86
Tableau 35 : Appréciation de l'importance des impacts par la matrice de FECTEAU .....	87
Tableau 36 : Evaluation des risques par la matrice LEOPOLD.....	88

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation du quartier de Khar Yalla dans la commune de Saint-Louis .....	8
Figure 2 : Stagnation des eaux pluviales dans le quartier de Khar Yalla en période d'hivernage.....	36
Figure 3 : Topographie du quartier Khar Yalla au Nord-Ouest .....	36
Figure 5: Courbe Hauteur Surface .....	37
Figure 6 : Courbe Hauteur Volume.....	38
Figure 7 : Bassin versant de la zone d'étude.....	41
Figure 8 : courbe hypsométrique.....	42
Figure 9 : Hydrogramme de crue simulée à Khar Yalla.....	45
Figure 10: Ajustement par la loi NORMAL des pluies moyenne annuelle par HYFRAN+ ...	67
Figure 11 : Histogramme des fréquences d'apparition en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle (mm) .....	67
Figure 12 : Ajustement par la loi de GUMBEL des pluies maximales journalières par HYFRAN .....	69
Figure 13 : Abaque du coefficient de ruissellement Kr70 .....	72
Figure 14 : Abaque du coefficient de ruissellement Kr100 .....	73
Figure 15 : Abaque du temps de base décennal .....	74
Figure 16 : Abaque de détermination du temps de montée.....	75
Figure 17 : Abaque du coefficient d'abattement d'une pluie décennal.....	75
Figure 18 : digue homogène en terre équipée d'un drain vertical.....	77

Figure 19 : Parabole de KOZENY .....	78
Figure 20 : Abaque de détermination du coefficient de laminage $\beta$ .....	79
Figure 21 : Matérialisation des forces qui agissent sur le déversoir .....	82
Figure 22 : Abaque de détermination de l'enfoncement du bassin de dissipation.....	84
Figure 23 : Abaque de détermination des caractéristiques du bassin de dissipation.....	85

## I. INTRODUCTION

La ville de Saint-Louis, située à l'embouchure du fleuve Sénégal, figure parmi les zones les plus vulnérables aux effets combinés du changement climatique, de l'élévation du niveau marin et de la pression urbaine croissante. Chaque année, durant la saison des pluies, plusieurs quartiers sont touchés par des inondations récurrentes, affectant la sécurité, la santé et les conditions de vie des populations. Selon le **rapport de cadrage** de la (DPGI/MHA, 2024), cette vulnérabilité est bien documentée et particulièrement marquée dans les zones basses de la ville, où les phénomènes d'accumulation d'eau sont fréquents.

Le quartier de Khar Yalla, en particulier, présente une vulnérabilité extrême en raison de sa position topographique basse, de la saturation de ses sols argileux, de son urbanisation dense et informelle, ainsi que de l'insuffisance des infrastructures d'assainissement. La population y est exposée à des inondations pluviales et souterraines causées par les ruissellements, la remontée de la nappe phréatique, voire des débordements ponctuels du fleuve. Cette combinaison accroît la complexité des mécanismes de gestion et de contrôle des inondations. Toujours selon le rapport de la (DPGI/MHA, 2024), Khar Yalla constitue une zone critique nécessitant une approche spécifique.

Face à ces défis, il est devenu impératif de concevoir des réponses durables, intégrées et adaptées aux réalités du terrain. Ce mémoire s'inscrit dans une démarche de résilience urbaine et propose des solutions techniques et sociales pour réduire significativement les risques d'inondation à Khar Yalla. Il s'articule autour de deux volets complémentaires. Le premier, qui constitue le cœur du projet, porte sur l'étude hydrologique et la conception d'ouvrages de protection (digues, bassins, déversoirs) prenant en compte les spécificités physiques dudit quartier. Le second volet concerne l'étude sociale relative à la relocalisation des populations exposées, dans une perspective d'adaptation territoriale. Certaines zones très vulnérables, parfois non constructibles, ne peuvent être sécurisées uniquement par des ouvrages. La relocalisation temporaire, partielle ou définitive y apparaît comme une mesure complémentaire incontournable, à condition qu'elle soit socialement acceptable, bien planifiée et équitable.

Pour garantir la faisabilité des solutions, le mémoire intègre une Notice d'Impact Environnemental et Social (NIES) accompagnée d'un Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES), en conformité avec la réglementation sénégalaise et les standards internationaux.

## **II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE**

### **II.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL**

La Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations (DPGI) a été créée par le décret n° 2018-841 du 09 mai 2018, à la suite de plusieurs réformes institutionnelles initiées dans le cadre de la gestion des zones inondables au Sénégal. Elle succède à la Direction de l'Aménagement et de la Restructuration des Zones d'Inondation (DARZI), mise en place en 2013 dans le cadre du Programme Décennal de Gestion des Inondations (PDGI). La DPGI est rattachée au Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (décret n° 2019-910).

La création de la DPGI s'inscrit dans un contexte marqué par la récurrence des inondations et les défis liés au changement climatique. Elle vise à fédérer les actions des différents acteurs impliqués dans la prévention et la gestion de ce risque, en favorisant une approche intégrée, cohérente et durable.

La DPGI a pour mission principale l'élaboration et la mise en œuvre de la politique nationale de prévention des risques d'inondation. Elle coordonne les actions de réduction de la vulnérabilité, assure l'information des populations, et appuie les collectivités dans la planification et l'entretien des ouvrages de drainage et de protection.

Ses attributions couvrent entre autres :

- La réalisation d'études sur les risques d'inondation et la surveillance des zones exposées
- La conception et l'exécution d'infrastructures de prévention (bassins, digues, canaux, etc.)
- L'accompagnement des collectivités territoriales dans l'exploitation des ouvrages ;
- La planification d'opérations d'aménagement et de résilience urbaine ;
- Le renforcement du cadre réglementaire en matière de gestion des inondations ;
- L'anticipation et la gestion des situations de crise.

La Direction de la Prévention et de la Gestion des Inondations comprend deux (02) divisions et un (01) bureau :

- La Division de l'Information préventive et de la Prospective ;
- La Division de l'Appui à la Gestion des Risques d'Inondation et de l'Action territoriale
- Le Bureau administratif et financier.

## II.2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### II.2.1 Situation géographique

Le site étudié se trouve au nord du Sénégal, dans la commune de Saint-Louis. Il concerne le quartier de Khar Yalla, situé au sud de l'agglomération, juste au sud du nouvel aéroport Ousmane Masseck Ndiaye, dans une zone urbaine en pleine transformation.

Délimité par Khor Cabane à l'est et la Cité Vauvert à l'ouest, Khar Yalla est exposé à des contraintes hydrologiques importantes, liées à la proximité du fleuve Sénégal et à l'intensification du ruissellement due à l'urbanisation.

Ses coordonnées géographiques approximatives sont :

- **Latitude** : 16° 2' 1,66" N
- **Longitude** : 16° 27' 37,73" W

La figure ci-dessous montre la localisation du quartier de Khar Yalla dans la commune de Saint-Louis.

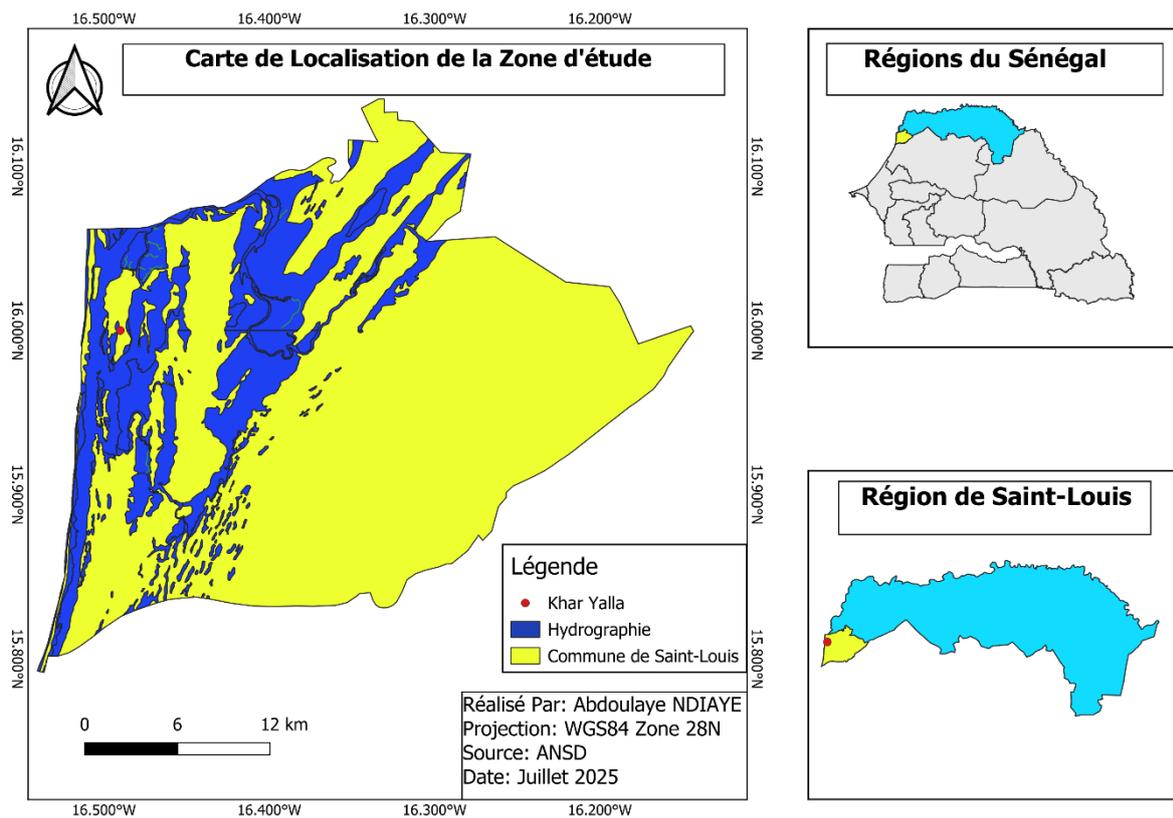


Figure 1: Localisation du quartier de Khar Yalla dans la commune de Saint-Louis

### II.2.2 Milieu physique

Les éléments présentés ici s'appuient sur les caractéristiques physiques et humaines décrites dans le rapport du (CGES / PROGEP, 2019) relatif à la commune de Saint-Louis.

### ➤ **Relief et sols**

Le relief local se caractérise par une topographie globalement plate, liée à l'édification du delta du fleuve Sénégal. Le site présente des formations deltaïques récentes avec des dépressions, des vasières, et des cordons sableux, notamment sur la Langue de Barbarie. Les sols sont majoritairement sableux, parfois mêlés à des éléments argileux ou limoneux, en lien avec l'activité fluviale et marine qui façonne l'environnement.

### ➤ **Hydrologie**

Le principal cours d'eau de la région est le fleuve Sénégal, dont le lit, orienté nord-sud, est contraint entre la Langue de Barbarie et les dunes littorales. En aval de Diama, le réseau hydrographique devient dense, avec de nombreuses dépressions, marigots et bras secondaires (Djeuss, Ngalam, Khor, etc.). La configuration deltaïque, combinée à l'absence de plaine d'inondation développée, rend la zone particulièrement vulnérable aux inondations, surtout lorsque le débit du fleuve baisse et laisse progresser la langue salée vers l'amont.

### ➤ **Hydrogéologie**

La région repose sur deux nappes principales. L'aquifère profond du Maestrichtien, très salé, est peu exploité. L'aquifère superficiel du Quaternaire, quant à lui, est plus accessible mais montre une salinité variable. À Saint-Louis et dans le Gandiolais, quelques lentilles d'eau douce peuvent être captées, mais elles sont fragiles et peu durables. La proximité de la nappe avec la surface provoque une saturation fréquente des sols, notamment en saison des pluies, favorisant des remontées capillaires et des résurgences dans les zones les plus basses.

### ➤ **Végétation**

Le site d'étude est fortement urbanisé et présente peu de végétation spontanée. Cependant, des espèces adaptées au climat sec et aux sols salés sont présentes dans les environs, telles que l'Acacia Sénégal, le Ziziphus mauritiana ou encore le Tamarix senegalensis, typique des zones salines.

### ➤ **Faune**

La faune est quasi absente sur le site même du projet, à l'exception de quelques insectes. Cette faible diversité s'explique par l'artificialisation du milieu urbain.

### ➤ **Climat**

La zone d'étude se situe dans une région sahélienne soumise à un climat semi-aride, marqué par une faible pluviométrie annuelle avoisinant 300 mm. La température moyenne tourne autour de 28 °C et l'humidité relative est modérée, proche de 50 %. Ce climat est néanmoins adouci par l'influence océanique, notamment la présence des alizés maritimes qui atténuent les fortes chaleurs. Les vents soufflent à une vitesse moyenne de 4,2 m/s.

### II.2.3 Milieu humain

Les informations présentées dans cette section sont issues du rapport régional établi par l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), à travers le Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Saint-Louis (ANSD, 2021).

#### ➤ Population et main-d'œuvre

La région de Saint-Louis bénéficie d'une population jeune et en croissance, dont une large part est en âge de travailler. En 2019, la tranche des 15 ans et plus représentait plus de 610 000 individus, dont une légère majorité de femmes. Le taux d'activité reste relativement modéré, mais le potentiel de main-d'œuvre est important pour soutenir les secteurs productifs comme l'agriculture, la pêche ou l'artisanat. Cette dynamique démographique constitue un levier pour le développement économique local.

#### ➤ Agriculture

L'agriculture occupe une place stratégique dans la région de Saint-Louis, tant en matière de sécurité alimentaire que de création d'emplois. Elle constitue l'un des principaux piliers économiques locaux et contribue activement à la dynamique de transformation visée par les politiques nationales telles que le PSE. Diverses cultures y sont pratiquées, notamment le riz, le maïs et le sorgho, qui dominent les plaines irriguées et les terres cultivables de la vallée

#### ➤ Pêche

Grâce à sa façade maritime et son réseau hydrographique dense, la région joue un rôle central dans la pêche nationale. Ce secteur, à forte dominante artisanale, est pratiqué en mer, sur le fleuve Sénégal et dans les plans d'eau intérieurs. Il assure une part importante de l'alimentation locale et contribue notablement au PIB régional. Toutefois, la pêche fait face à des contraintes telles que le manque de systèmes de conservation, les difficultés d'accès aux licences et la gestion irrégulière des ressources halieutiques.

## III. PRESENTATION DU PROJET

### III.1 Contexte et Problématique

Le quartier de Khar Yallah est situé au sud du nouvel aéroport international **Ousmane Masseck Ndiaye** de Saint-Louis. Faisant parti des quartiers périphériques de Saint-Louis qui ont une urbanisation rapide, combinée à une planification inadéquate. Cette situation, combinée à une topographie défavorable (zone en cuvette) a rendu le quartier particulièrement vulnérable aux phénomènes naturels, notamment les inondations durant chaque hivernage.

Ces inondations, causées par les eaux de ruissellement, la remontée de la nappe phréatique, et

parfois le débordement du fleuve, provoquent des dommages importants : dégradation des logements, perte de biens, insécurité sanitaire, perturbation des activités économiques. Face à cette situation, la construction d'ouvrages « digue de protection » apparaît comme une solution technique majeure pour maîtriser les eaux et préserver la sécurité des populations et leurs biens. Cependant, ces infrastructures ne suffisent pas à elles seules à éliminer tous les risques. Certaines zones du quartier, classées à très haut aléa hydrologique, restent difficilement défendables sans mesures d'assainissement souterrain et sans désengorgement humain. C'est dans ce cadre que la relocalisation partielle, temporaire ou définitive des populations vivant dans les secteurs les plus vulnérables est envisagée comme une mesure d'adaptation complémentaire.

Ce double volet : protection par les ouvrages et relocalisation stratégique s'inscrit dans une logique d'aménagement durable et de résilience urbaine. Il s'agit non seulement de sécuriser les populations, mais aussi de repenser la planification territoriale pour un développement harmonieux, sûr et respectueux des dynamiques environnementales locales.

### III.2 Objectifs du travail

#### ➤ Objectif général

Contribuer à la réduction durable du risque d'inondation dans le quartier de Khar Yalla (Saint-Louis) à travers la proposition de solutions techniques d'aménagement hydrologique adaptées.

#### ➤ Objectifs spécifiques

De manière spécifique, il s'agira :

- De faire un état des lieux ;
- Conduire une étude hydrologique du bassin versant en amont pour évaluer les crues et apports.
- Déterminer les dimensions optimales et du type de digue le mieux adapté au contexte local, ainsi que les dimensions du déversoir et du bassin de dissipation
- Analyser la perception des habitants et évaluer leur niveau d'acceptation des mesures de relocalisation, à partir des données d'enquête collectées sur le terrain.
- Identifier et apprécier les impacts potentiels du projet sur les plans environnemental et social.
- Proposer un Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) intégrant les mesures de mitigation et d'accompagnement social.

- Formuler des recommandations pratiques pour faciliter la mise en œuvre opérationnelle du projet.

### **III.3 Résultats attendus**

- La réalisation d'une étude hydrologique approfondie, fondée sur des méthodes reconnues (ORSTOM, CIEH, GRADEX, etc.), permettant de comprendre l'hydrodynamique de surface du bassin versant et de proposer des solutions techniques adaptées et durables.
- La détermination des dimensions optimales et du type de digue le mieux adapté au contexte local, ainsi que le dimensionnement du déversoir et du bassin de dissipation.
- L'analyse de la perception des populations concernées et de leur niveau d'acceptation des mesures de relocalisation, à partir des données issues des enquêtes de terrain.
- L'évaluation des impacts environnementaux et sociaux potentiels liés au projet, dans une logique de prévention et d'atténuation.
- La proposition d'un Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) intégré, en conformité avec les exigences réglementaires et les standards internationaux.
- L'élaboration d'un devis quantitatif et estimatif du projet, englobant les ouvrages hydrauliques, les mesures sociales et environnementales.
- La formulation de recommandations stratégiques en vue d'une mise en œuvre durable, inclusive et techniquement efficace du projet.

## **IV. METHODOLOGIE DE CONCEPTION**

Cette section expose la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de l'étude hydrologique pour la conception d'ouvrages de contrôle des inondations à Khar Yalla. L'objectif principal de cette démarche est de garantir une analyse rigoureuse, fondée sur des données fiables et des méthodes appropriées, pour proposer des solutions techniques efficaces et durables.

### **IV.1 Recherche documentaire**

La recherche documentaire a permis de constituer une base de connaissances solides sur les thématiques liées à la gestion des eaux pluviales, les inondations urbaines, les techniques de dimensionnement d'ouvrages hydrauliques et les caractéristiques des bassins versants. Les principales sources consultées sont des ouvrages scientifiques, des articles de recherche, des

rapports institutionnels (CIEH, ORSTOM, GRADEX, etc.), ainsi que les normes et recommandations internationales en matière d'aménagement hydraulique.

## IV.2 Collectes des données

Les données utilisées dans cette étude proviennent de diverses sources :

- **Données pluviométriques** : recueillies auprès de la station météorologique la plus proche de Khar Yalla, couvrant une série chronologique représentative allant de **1980 à 2018**.
- **Données topographiques** : obtenues à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), à résolution de 2 m, pour caractériser la morphologie du bassin versant et de relevés GPS de terrain.
- **Données pédologiques** : issues d'observations de terrain pour identifier la nature du sol, sa perméabilité et sa capacité de rétention ainsi que des données collectées à l'Institut Pédologique Régional de Saint Louis (IPR).

## IV.3 Traitement des données

Les données collectées ont été analysées puis traitées afin de garantir leur qualité et leur pertinence pour l'analyse. Le traitement a porté sur :

- La reconstitution des séries pluviométriques et l'analyse statistique des hauteurs de pluie avec le logiciel hyfran
- La délimitation du bassin versant de Khar Yalla à l'aide d'ArcMap ;
- Le calcul des paramètres morphométriques, hypsométriques et hydrométriques à l'aide d'Excel ;
- L'intégration des données dans des modèles de calcul pour le dimensionnement des ouvrages ;

## IV.4 Etudes topographiques

Les études topographiques réalisées en planimétrie avec un relevé de haute précision à l'aide de la technologie Lidar, reconnue pour sa fiabilité et sa finesse dans la modélisation du terrain. Ce travail a été effectué en étroite collaboration avec le bureau d'études **Parar Consulting**, spécialisé dans l'analyse des zones à risque. L'objectif principal était de produire des données topographiques précises permettant d'évaluer la configuration du terrain en vue d'éventuelles solutions d'aménagement ou de protection contre les aléas hydrologiques.

## IV.5 Etudes pédologiques

Pour ce qui est des études pédologiques, nous avons fait recours à la méthode du complément de la méthode des anneaux, une approche efficace pour caractériser les sols. Cette technique a consisté à réaliser des modèles ou coupes de sondage jusqu'à une profondeur d'un mètre, permettant une observation détaillée de la stratification et de la texture du sol. Ces analyses ont permis d'évaluer la nature pédologique du terrain, notamment la capacité d'infiltration et la perméabilité du sable, des éléments essentiels dans un contexte exposé aux risques d'inondation comme celui du quartier Kharr Yalla à Saint-Louis. Ces données sont fondamentales pour orienter les choix d'aménagements adaptés aux conditions du sol local.

## IV.6 Etudes hydrologiques

L'objectif de cette étape est d'évaluer le comportement du bassin versant face aux précipitations afin d'estimer les volumes d'eau à gérer en période de pluie. Elle repose sur l'exploitation des données climatiques, la description du bassin versant et le calcul de ses caractéristiques hydrométriques.

### IV.6.1 Analyse des données pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées proviennent de la station météorologique la plus proche du site de Khar Yalla. La série couvre une période suffisamment longue pour garantir une bonne représentativité des événements climatiques, notamment des épisodes extrêmes.

Les analyses ont été réalisées avec les logiciels **Excel** et **Hyfran Plus**, ce qui a permis de traiter les valeurs moyennes annuelles ainsi que les pluies journalières maximales. Deux lois statistiques ont été utilisées pour étudier les précipitations :

- La loi **normale** (ou de Gauss), pour l'analyse des valeurs moyennes,
- La loi **de Gumbel**, pour les valeurs extrêmes comme les pluies décennales ou centennales.

Ces traitements nous ont permis de dégager des hauteurs de pluie caractéristiques pour différentes périodes de retour (10, 20, 50 et 100 ans), qui seront utilisées dans les calculs de débits de crue.

### IV.6.2 Description du bassin versant

Un bassin versant est une zone naturelle qui collecte les eaux de pluie et les achemine, en suivant les pentes du terrain, vers un point commun appelé exutoire. Cette unité géographique, constituée d'un ensemble de cours d'eau est essentielle pour étudier le cycle hydrologique (KARAMBIRI & NIANG, 2011).

Dans le cas de Khar Yalla, le bassin versant sera délimité à l'aide d'un MNT fourni par la DPGI, d'une résolution de 2 mètres, sous ArcMap. Cette démarche reposera sur l'identification de l'exutoire, du réseau hydrographique et des lignes de crête.

### IV.6.3 Caractéristiques Hydrométriques du bassin versant

L'analyse hydrométrique vise à déterminer les paramètres physiques et géométriques qui influencent directement le comportement hydrologique du bassin versant. Ces paramètres permettent de mieux comprendre le processus de concentration des eaux de ruissellement et de modéliser les débits de crue à différentes périodes de retour. L'approche adoptée dans cette étude respect la méthodologie recommandée dans le Bulletin 54 de FAO et s'inscrit sur la même logique que des travaux menés dans des zones similaires notamment, celui de (FAYE, 2024).

#### IV.6.3.1 Caractéristiques relatives à la géo-morphométrie du Bassin Versant

##### ❖ Le périmètre et la superficie du bassin versant

Ces deux paramètres ont été déterminés automatiquement à l'aide de l'outil ArcGIS, à partir des données du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ils sont essentiels pour classer le bassin selon la typologie proposée par Rodier (Bulletin 54 FAO : CIEH, ORSTOM & LCT, 1996).

##### ❖ Le rectangle équivalent : la longueur et la largeur

Il facilite la comparaison entre plusieurs bassins versants, en mettant en évidence l'effet de leurs caractéristiques sur l'écoulement de l'eau (KARAMBIRI & NIANG, 2011). Ses dimensions se calculent à partir des formules suivantes :

$$L_{\text{éq}} = \frac{P + \sqrt{(P^2 - 16 \times S)}}{4}$$

$$l_{\text{éq}} = \frac{P - \sqrt{(P^2 - 16 \times S)}}{4}$$

Où :  $L_{\text{éq}}$  est la longueur équivalente en Km

$l_{\text{éq}}$  est la largeur équivalente en Km

$P$  est le périmètre (en km) et  $S$  la superficie (en km<sup>2</sup>)

##### ❖ Indice de compacité de Gravelus

Encore appelé coefficient de forme, il sert à évaluer la forme du bassin. Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$I_{\text{comp}} = \frac{0,282 \times P}{\sqrt{S}}$$

Un indice proche de 1 indique un bassin presque circulaire, donc potentiellement plus réactif face à une pluie intense.

#### IV.6.3.2 Caractéristiques relatives au relief du bassin versant

##### ❖ Les altitudes caractéristiques

Les altitudes maximale et minimale (se situant en général à l'exutoire du bassin) ont été extraites à partir du MNT sur ArcGIS.

##### ❖ La pentes moyenne

Elle donne une indication générale de la déclivité du bassin. Elle est calculée à l'aide des altitudes caractéristiques par la formule suivante :

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{S}}$$

##### ❖ La pente longitudinale

Cette pente, représente la déclivité suivant l'axe principal du bassin. Elle est obtenue à l'aide de la formule simplifiée de GRESILION. Selon sa valeur, six classes de bassins versants sont distingué d'après la classification de l'ORSTOM (Bulletin 54 FAO : CIEH, ORSTOM & LCT, 1996), actuel IRD. Ainsi elle s'obtient à partir de l'expression ci-dessous.

$$I_{long} = \frac{0,026}{\sqrt{S}}$$

##### ❖ La pente transversale

Elle est déterminée à partir de 4 à 6 sections transversales du bassin. Les valeurs de pente sont relevées via Google Earth, puis la moyenne de ces pentes est calculée

##### ❖ La courbe hypsométrique

Elle permet de visualiser la répartition des altitudes sur l'ensemble du bassin. La courbe est établie à partir du MNT et donne les altitudes correspondant à 5 % et 95 % de la surface cumulée (KARAMBIRI & NIANG, 2011).

##### ❖ L'indice globale de pente

L'indice global de pente caractérise le relief du bassin versant. Il influence les débits de crue en modifiant la vitesse d'écoulement selon que la pente soit forte ou faible. Il se calcule selon la formule suivante :

$$I_g = \frac{\Delta H}{L_{\acute{e}q}}$$

Où  $\Delta H$  est la différence d'altitude entre les niveaux à 5 % et 95 % de la surface.

##### ❖ L'indice de pente corrigée

Si la pente transversale dépasse de 20 % la pente longitudinale, on calcul l'indice de pente corrigée en appliquant la formule suivante :

$$I_{gcor} = \frac{(n - 1) \times I_g + I_t}{n}$$

Où  $n$  dépend de la longueur du rectangle équivalent.

#### ❖ Le dénivelé spécifique

Ce paramètre exprime les différentes formes de relief du bassin. Il est donné par :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S}$$

Selon Faye Ibrahima (2024), les reliefs peuvent être classés en fonction de la valeur du  $D_s$  comme suit :

- $D_s < 50$  m : relief faible
- $50 \text{ m} \leq D_s \leq 100$  m : relief modéré
- $D_s > 100$  m : relief marqué

### IV.6.3.3 Caractéristiques relatives au réseau hydrographique

#### ❖ La densité de drainage

Elle correspond au rapport entre la longueur totale des cours d'eau et la surface du bassin :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$$

Où  $\sum L_i$  est la longueur cumulée des cours d'eau.

### IV.6.4 Détermination du débit de crue du projet

La crue de projet correspond à un débit rare et élevé, caractérisé par une montée rapide des eaux dans le cours d'eau. Elle a une faible fréquence de retour mais un impact potentiellement important. Pour garantir la sécurité, les ouvrages seront dimensionnés pour évacuer la crue centennale, c'est-à-dire un événement avec une probabilité de survenue annuelle de 1 % (ou une occurrence moyenne tous les 100 ans).

La détermination des débits décennaux repose sur la méthode déterministe de l'ORSTOM et la régression linéaire de Puech et Chabi ou CIEH. La crue centennale, crue de projet, est ensuite calculée par la méthode GRADEX, qui applique un coefficient multiplicateur aux débits décennaux obtenus.

#### IV.6.4.1 Méthode ORSTOM de AUVREY et RODIER

Elle permet d'estimer la crue décennale à partir de données climatiques et morphologiques du bassin versant. Elle repose sur des formules empiriques adaptées aux bassins versant non jaugés

en Afrique de l'Ouest. Cette méthode a été largement utilisée pour les études hydrologiques dans des contextes similaires en raison de sa simplicité et de sa pertinence.

#### ❖ Détermination du débit de ruissellement décennal de la crue décennale

Le débit de ruissellement décennal ( $Q_{r10}$ ) représente le volume d'eau ruisselée en surface pendant un événement de crue ayant une période de retour de 10 ans. Ci-après sa formule :

Formule	Paramètres
$Q_{r10} = 10 \times A \times P_{10} \times K_{r10} \times \alpha_{10} \times \frac{S}{T_{b10}}$	<p><math>T_{b10}</math> = Temps de base déterminé par les abaques de Rodier et Auvrey de l'ORSTOM (mn)</p> <p><math>S</math> = Superficie du BV (Km<sup>2</sup>)</p> <p><math>\alpha_{10}</math> = Coefficient de pointe de la crue décennale pris égale à 2.6</p> <p><math>K_{r10}</math> = Coefficient de ruissellement décennale</p> <p><math>P_{10}</math> = Pluie journalière décennale</p> <p><math>A</math> = Coefficient d'abattement</p>

Son calcul repose sur plusieurs paramètres décrits ci-après.

- **Détermination des paramètres du débit de ruissellement de période décennale ( $Q_{r10}$ )**

- **Le coefficient d'abattement (A)**

C'est un facteur de correction qui permet de transformer une pluie ponctuelle en une valeur moyenne sur l'ensemble du bassin versant. Il diminue lorsque la surface du bassin augmente. Il est calculé suivant cette formule :

Formule	Paramètres
$A = \left( 1 - \frac{161 - 0.042 \times P_{an}}{1000} \right) \log_{10} S$	<p><math>P_{an}</math> = moyenne annuelle des précipitations (en mm)</p> <p><math>S</math> = Superficie du BV (Km<sup>2</sup>)</p>

#### ✚ Le coefficient de ruissellement décennal ( $K_{r10}$ )

Le coefficient de ruissellement décennal ( $K_{r10}$ ) est estimé à partir d'un événement pluvieux exceptionnel ayant une période de retour de dix ans, généralement associé à une hauteur de précipitation comprise entre 70 mm et 100 mm. Lorsque la valeur de la pluie décennale ( $P_{10}$ ) ne coïncide pas exactement avec ces seuils, une interpolation linéaire est appliquée pour déterminer  $K_{r10}$ . Cette estimation repose sur les données issues de l'abaque spécifique à ce coefficient, tirées du Bulletin 54 de la FAO (voir annexe III).

#### ✚ Le temps de base ( $T_{b10}$ )

Le temps de base correspond à la durée approximative du ruissellement en surface durant une crue, du début de la montée du niveau d'eau jusqu'à la fin du ruissellement. Sa valeur est déterminée par interpolation linéaire.

#### ✚ Le débit de pointe décennal ( $Q_{10}$ )

Une fois le débit de ruissellement décennal ( $Q_{r10}$ ) connu, on peut estimer le débit de pointe décennal ( $Q_{10}$ ) selon la méthode de ORSTOM comme suit :

Formule	Paramètres
$Q_{10} = m \times Q_{r10}$	<p><math>m</math> = Coefficient de majoration, fonction de la classe d'infiltrabilité du bassin et de la zone climatique</p> <p><math>Q_{r10}</math> = débit de ruissellement décennal (m<sup>3</sup>/s)</p>

#### IV.6.4.2 Méthode CIEH

La méthode repose sur des relations empiriques établies à partir d'observations hydrologiques et météorologiques. Développée par Puech et Chabi-Gonni (1983), elle s'appuie sur l'étude de nombreux bassins africains situés en zones sahéliennes et soudano-sahéliennes. Cette base lui confère une bonne adaptation aux conditions du Sénégal. Elle est applicable aux bassins versants de moins de 1000 km<sup>2</sup>. Le débit de pointe décennal est estimé à l'aide d'un modèle de régression multiple (FAO, 1996), selon la formule suivante :

$$Q_{10} = a \times S^s \times P_{an}^p \times I_g^i \times K_r^k \times D_d^d$$

Dans cette étude, quatre (04) équations seront utilisées, car jugées les plus représentatives pour estimer la crue décennale. Leur choix repose sur l'analyse combinée des paramètres S,  $I_g$  et  $K_r$ .

Il s'agit :

N° Equation	Formules	Condition
-------------	----------	-----------

<b>09</b>	$0,92 \times S^{0,745} \times \epsilon \times I_g^{0,731} \times K_r^{0,475}$	Découpage climatique pour une zone d'intervention $\epsilon$ [0 – 400mm]
<b>11</b>	$0,41 \times S^{0,524} \times I_g^{0,406} \times K_r^{0,982}$	Découpage zone d'intervention où $P_{an} \leq 1000$ mm
<b>12</b>	$0,095 \times S^{0,643} \times I_g^{0,406} \times K_r^{1,038}$	
<b>33</b>	$0,195 \times S^{0,471} \times I_g^{0,239} \times K_r^{1,046}$	Groupe de pays : Sénégal + Mauritanie

Par précaution, le débit maximal obtenu parmi les différentes équations sera retenu comme débit de crue décennale, afin d'intégrer les incertitudes liées aux équations.

#### IV.6.4.3 Méthode GRADEX

Le débit de crue centennale du projet est déterminé à partir des crues décennales et du coefficient multiplicateur  $C$ . Ce coefficient supérieur à 1, permet de relier la crue décennale à la crue centennale, en prenant en compte l'excédent de pluie par rapport à la décennale. La relation utilisée est la suivante :

$$Q_{100} = C \times Q_{10}$$

La méthode utilisée pour le calcul de ce coefficient est celle du Gradex, telle que définie par Grésillon et al. (1977), et est largement appliquée en Afrique de l'Ouest et du Centre. Cette approche a été utilisée dans les études de (OUEDRAOGO, 2020), pour la construction du barrage de Lantaga dans la région du Nord du Burkina Faso, et de (FAYE, 2024), pour la réhabilitation de la mare d'Aghor en Mauritanie.

#### ❖ Détermination de l'hydrogramme de crue

C'est un graphique qui montre l'évolution du débit en fonction du temps pendant une période de crue. Ce graphique dépend du temps de base ainsi que du temps nécessaire à la montée des eaux. Le débit de pointe, combiné avec le débit de décrue, constitue la courbe de décrue de l'hydrogramme. La détermination de ce débit se fait à l'aide de la formule suivante :

Formule	Paramètres
	$T_{b10}$ = Temps de base (min)

$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{2}{\alpha_{10}} \times \frac{T_{b10} - \alpha_{10} \times T_{m10}}{T_{b10} - 2 \times T_{m10}}$	$T_{m10}$ = Temps de montée décennale (min) $Q$ = Débit de discontinuité (m <sup>3</sup> /s) $Q_{max}$ = Débit du projet (m <sup>3</sup> /s) $\alpha_{10}$ = Coefficient de pointe décennal
--	--

❖ **La crue de sécurité de la digue ou période de retour de la crue du projet ( $H^2\sqrt{V}$ )**

La crue de sécurité représente le débit de projet à considérer pour garantir la sûreté hydraulique de l'ouvrage face aux événements extrêmes. Elle dépend d'une **durée de retour**, que l'on choisit en fonction de l'importance de l'ouvrage, de sa vulnérabilité et des enjeux en aval.

La période de retour à adopter peut-être estimée à partir de la relation :  $H^2\sqrt{V}$ , d'après les recommandations du comité français des petits barrages (DEGOUTTE & FRY, 2002).

Tableau 1 : Choix du période de retour selon Degoutte et Fry

$H^2\sqrt{V} < 5$	$5 < H^2\sqrt{V} > 30$	$30 < H^2\sqrt{V} > 100$	$100 < H^2\sqrt{V} > 700$
100	500	1.000	5.000
Centennale	Cinq centennale	Millénaire	Cinq millénaire

❖ **La crue de rupture de la digue**

La crue de rupture est définie comme celle que l'ouvrage doit pouvoir supporter sans se rompre, même en cas de conditions exceptionnelles dépassant celles du projet.

Le Comité International des Grands Barrages (CIGB) propose une approche basée sur les dimensions de l'ouvrage pour estimer cette crue.

$Q_{rup} = 2 \times l_{dév} \times (a + 0,2)^{1,5} + 0,15 \times L_d$	$l_{dév}$ : Longueur du déversoir $L_d$ : Longueur de la digue sans le déversoir $a$ : Revanche totale
---	--

**IV.6.5 Etude de la retenue**

L'étude de la retenue est essentielle pour la gestion des crues et de la conception des ouvrages hydrauliques tels que les bassins de rétention et les digues. Elle permet de déterminer les caractéristiques des structures de stockage d'eau, telles que les bassins de rétention ou les digues

de protection, et de dimensionner les ouvrages pour garantir leur capacité à gérer les événements extrêmes. Cette étude repose sur l'analyse de plusieurs critères, tels que la capacité de stockage, les pertes par évaporation, les infiltrations et les risques de débordement.

#### ❖ Estimation des apports liquides

L'estimation du volume d'eau provenant du bassin versant est une étape essentielle pour vérifier la capacité de remplissage de la retenue. Ainsi, le volume des apports est déterminé à partir de la relation suivante :

Formule	Paramètres
$V = K_e \times S \times P$	<p><math>V</math> : volume d'eau écoulé à l'exutoire,</p> <p><math>K_e</math> : coefficient d'écoulement,</p> <p><math>S</math> : superficie du bassin versant,</p> <p><math>P</math> : pluviométrie moyenne annuelle.</p>

#### • La méthode de COUTAGNE

Cette méthode repose sur des relations empiriques liant les paramètres climatiques notamment la pluviométrie et la température annuelle moyenne à la lame d'eau écoulée sur un bassin versant. Selon COUTAGNE, les paramètres nécessaires à l'estimation des apports annuels sont

Formule	Paramètres
$L_e = P - D$ $D = P - \lambda P^2$ $\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 \times T}$	<p><math>T</math> : température annuelle moyenne (°C)</p> <p><math>D</math> : Déficit d'écoulement annuelle (mm)</p> <p><math>P</math> : pluviométrie moyenne annuelle (mm) <math>L_e</math> : Lame d'eau écoulée (mm)</p>

Les corrélations présentées par l'ONBAH (KARAMBIRI & NIANG, 2011) permettent d'estimer les apports annuels en années sèches (quinquennale et décennale sèche) à partir du coefficient d'écoulement moyen  $K_e$ , défini par la relation suivante :

$$K_e = \frac{L_e}{P}$$

Les coefficients d'écoulement en année quinquennale sèche ( $K_{e5}$ ) et décennale sèche ( $K_{e10}$ ) sont ensuite déterminés à partir du coefficient moyen, selon les formules suivantes :

$K_{e5} = 0,7 \times K_e$	$K_e = 0,5 \times K_e$
---------------------------	------------------------

Ces coefficients spécifiques serviront à estimer les apports correspondants en années sèches.

- **La méthode de RODIER**

L'approche consiste à identifier un bassin type représentatif du bassin versant étudié, en précisant sa zone d'influence. La courbe de distribution des lames d'eau, tracée en fonction des fréquences cumulées de non-dépassement, permet ensuite de déterminer les coefficients d'écoulement ainsi que les volumes associés pour les périodes de retour quinquennales et décennales. Ces résultats sont obtenus après un ajustement des données pluviométriques suivant la loi normale.

En analysant les paramètres morphologiques du bassin versant, il apparaît que celui-ci se rattache au bassin type de l'Oued Djajibine, rattaché au système de l'Oued Ghorfa en Mauritanie. Ce bassin type se caractérise par une densité de drainage de 2,02 km/km<sup>2</sup> et un dénivelé spécifique de 25 mètres.

#### **IV.6.6 Etude des pertes**

L'étude des pertes constitue une étape essentielle pour garantir l'efficacité des ouvrages de protection contre les inondations, tels que les digues et bassins de rétention. Elle s'attache à évaluer les pertes d'eau par évaporation, infiltration et accumulation de dépôts solides. Ces pertes, en réduisant la capacité de stockage utile, peuvent compromettre les performances de l'ouvrage. Il est donc indispensable de les estimer avec précision afin de dimensionner correctement la retenue et d'assurer une gestion optimale des crues.

##### **❖ Estimation des pertes par évaporation**

Les données pluviométriques relevées à la station de Saint Louis vont permettre d'évaluer les pertes par évaporation. Dans le cadre des ouvrages projetés, ces pertes restent limitées par rapport aux volumes mobilisés lors des crues. Elles seront néanmoins prises en compte pour garantir l'efficacité du dispositif de protection contre les inondations.

##### **❖ Estimation des pertes par infiltration**

Les pertes par évaporation, tout comme celles liées à l'infiltration, jouent un rôle essentiel dans le calage hydraulique d'un ouvrage de retenue. Leur prise en compte permet d'ajuster plus finement les volumes réellement mobilisables, en évitant une surestimation des besoins de

stockage. Ainsi, l'intégration de ces pertes contribue à dimensionner la capacité utile de la retenue de manière plus réaliste, tout en garantissant une gestion optimale des apports, notamment en période de forte sollicitation hydrique.

### ❖ Estimation des pertes spatiales dues aux dépôts solides

Les apports solides du bassin versant réduisent progressivement la capacité de stockage de la retenue et peuvent perturber l'efficacité hydraulique des ouvrages de protection contre les inondations. Ainsi, la topographie en cuvette du bassin versant induit un ralentissement naturel des écoulements, ce qui favorise la décantation et l'accumulation progressive de sédiments. Il est donc crucial d'intégrer cette dynamique dès la phase de conception, afin de calibrer correctement les ouvrages et de planifier une fréquence de curage adaptée pour garantir leur efficacité dans le temps.

Pour estimer ces pertes solides à l'échelle du projet, plusieurs formules empiriques reconnues ont été utilisées, notamment celles de Grésillon, de Gottschalk et la formule modifiée du professeur Karambiri (1998), adaptées aux conditions hydrologiques de la région.

Auteurs	Formules
<b>GRISILLON</b>	$D = 700 \times \left(\frac{P}{500}\right)^{-2,2} \times S^{-0,1}$
<b>GOTTSCHALK</b>	$D = 260 \times S^{-0,1}$
<b>KARAMBIRI</b>	$D = 137 \times \left(\frac{P}{500}\right)^{-2,2} \times S^{-0,05} \times [0,25 + 1,13 \times (h + r)]^{1,15}$
<p><b>D</b> : Dégradation spécifique annuelle (m<sup>3</sup>/Km<sup>2</sup>/an)  <b>P</b> : Pluie Moyenne annuelle (mm)  <b>S</b> : Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)  <b>V</b> : Volume annuel des apports en sédiments (m<sup>3</sup>)  <b>h</b> : Paramètre anthropique (h=0,3) pour un bassin versant comportant des petites villes/villages ou situés à proximité de ceux-ci (Bulletin 54 FAO : CIEH, ORSTOM &amp; LCT, 1996)</p>	

**r** : Paramètre morphologique ( $r=0,2$ ) pour un relief peu accidenté, accusé (Bulletin 54 FAO : CIEH, ORSTOM & LCT, 1996)

Le volume annuel des apports solides peut alors être déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$V = D \times S$$

#### IV.7.7 Méthodologie de la conception et du dimensionnement de la digue de protection

##### ❖ Choix du type de la digue

Le choix du type de digue repose sur plusieurs critères essentiels : la nature du sol en place, la disponibilité locale des matériaux, le coût d'exécution, les conditions hydrologiques et topographiques du site. Dans le cadre de ce projet, l'option retenue est celle d'une digue en terre homogène, qui s'adapte bien au contexte local en raison de la présence de matériaux argileux disponibles à proximité, de la simplicité d'exécution et du bon comportement mécanique de ce type d'ouvrage vis-à-vis des infiltrations (MOHAMMEDI & BOULANOUAR, 2016).

##### ❖ Calage de la hauteur de la digue

La hauteur de la digue est déterminée en additionnant : la hauteur de la retenue ( $H_r$ ) ou Plan d'Eau Normal (PEN), la lame d'eau déversant ( $h$ ) et la revanche libre ( $R_l$ ), qui constitue une marge de sécurité contre les débordements en période de crue.

Ainsi, la hauteur  $H$  de la digue est définie par l'équation :

$$H_d = H_r + h + R_l$$

##### ❖ Le Plan d'Eau Normal (PEN) et le Plan des Hautes Eaux (PHE)

Le Plan d'Eau Normal correspond à la hauteur maximale que la digue doit contenir en situation de fonctionnement habituel, hors crue exceptionnelle.

Le Plan des Hautes Eaux est cote maximale atteinte par l'eau lors d'une crue de référence, avant débordement ou submersion. Il est déterminé en ajoutant à la cote PEN la lame d'eau au-dessus du seuil.

$$H_{PEN} = \text{côte crête du déversoir} - \text{cote fond de la cuvette}$$

$$H_{PHE} = H_{PEN} + h$$

### ❖ La revanche libre

C'est une hauteur de sécurité prévue au-dessus du niveau des plus hautes eaux afin d'éviter que la digue déborde lors des crues. Elle protège la digue contre les risques de débordement dus aux vagues générées par le vent (fetch), la longueur du plan d'eau exposé (fetch), et la hauteur des vagues. Elle peut être obtenue à partir de la formule de Gaillard :

$R_l = A \times \left( h_{vague} + \frac{V^2}{2g} \right)$	A= coefficient de sécurité ; $h_{vague}$ = Hauteur des vagues (m) ;
Et d'après Miltor :	$g$ = Accélération de pesanteur ; $V$ = Vitesse des vagues (m/s) ; $f$ = Fetch (Km)
$h_{vague} = 0,76 + 0,032 \times (\sqrt{f})$	

### ❖ La largeur en crête de la digue

La largeur en crête est dimensionnée selon les formules empiriques classiques. Elle doit permettre le passage des engins lors des travaux et éventuellement l'accès pour la surveillance. Les deux formules suivantes sont utilisées pour le calcul :

<b>Preece</b>	$L_c = 1,1 \times \sqrt{H_d} + 1$	$L_c$ = Largeur en crête de la digue $H_d$ = Hauteur de la digue
<b>Knappen</b>	$L_c = 1,65 \times \sqrt{H_d}$	

### ❖ La largeur en base de la digue

La base de la digue est calculée selon la forme trapézoïdale de l'ouvrage :

$L_b = L_c + \frac{2 \times H_d}{\tan \alpha}$	$\tan \alpha$ = Pente de de talus
--	-----------------------------------

### ❖ Le choix du talus de la digue et son optimisation

Les pentes des talus (amont et aval) sont choisies selon la nature du sol, les conditions de saturation, et les risques d'érosion. Des pentes trop raides fragilisent l'ouvrage, tandis que des pentes trop faibles augmentent inutilement les volumes de terrassement.

Selon les recommandations de (DEGOUTTE & FRY, 2002), une pente de 1V/2H à l'amont comme à l'aval est généralement utilisée pour les digues en terre homogène. Ces valeurs permettent un bon compromis entre stabilité, économie de matériaux et facilité d'exécution.

L'optimisation des talus vise aussi à limiter les risques d'érosion par ruissellement et infiltration.

### ❖ Estimation du débit de fuite traversant la structure de la digue

Considérons que notre digue homogène en terre dispose d'un drain vertical. Avant d'entreprendre les calculs de stabilité, il est nécessaire de déterminer la position de la ligne de saturation, qui sépare la zone sèche ou partiellement humide (au-dessus de la ligne) de la partie saturée en eau (en dessous). Cette ligne influence fortement la poussée interstitielle et donc la stabilité, ainsi que la distribution des contraintes internes.

Kozeny a montré que, dans un barrage en terre homogène non drainé, la ligne de saturation peut être assimilée dans sa partie médiane à une parabole d'axe horizontal dont le foyer est situé au pied du talus aval. Le débit de fuite  $q$  (obtenu par la loi Darcy), lié aux infiltrations, s'exprime alors en fonction de cette parabole (voir Annexe IV) par les relations suivantes :

$y^2 = 2xy_0 + y_0^2$ $y_0 = \sqrt{H_r^2 + d^2} - d$ $q = K_r \times y_0$	$y_0$ = Point d'intersection de l'axe verticale avec la parabole de KOZENY ;  $K_r$ = La perméabilité du remblai compacté en m/s  $q$ = Débit de fuite en $m^3/s/ml$
---	--

### ❖ Dimensionnement du drain

Le drain joue un rôle essentiel dans le contrôle des infiltrations à l'intérieur de la digue. Il a pour fonction de rabattre la ligne de saturation à l'intérieur du corps de la digue et d'évacuer les infiltrations. Un drain vertical est ainsi prévu ses caractéristiques sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 2 : Dimensionnement du drain

Dimensions	Paramètres
$e_d = \sqrt{\frac{q \times l_d}{K_d}}$	$e_d$ = Epaisseur du drain en m $l_d$ = Largeur du drain en m $l_f$ = Largeur de la fondation en m
$l_d = \frac{1}{2} \times l_f$	

$l_f = L_c + \frac{2 \times H_d}{\tan \alpha}$	$K_d$ = Perméabilité du drain en m/s $q$ = Débit de fuite $m^3/s/ml$
--	---

### ❖ Protection des talus

Afin de protéger les talus de la digue contre l'érosion hydrique et le battillage des vagues, une couche d'enrochement est prévue. La protection en aval se fera par perré maçonné, tandis qu'en amont, elle sera assurée par des perrés secs. L'épaisseur de cette protection est déterminée par la formule suivante :

$e = 1,5 \times D_{50}$	$e$ = épaisseur de la couche de protection $D_{50}$ = est fonction de la hauteur des vagues
-------------------------	--

Le tableau ci-après présente différentes valeurs de  $D_{50}$  en fonction de la hauteur des vagues

Tableau 3 : Valeur de  $D_{50}$  en fonction de la hauteur des vagues

$h_{vague}$	$D_{50}$
0 - 0,3	0,2
0,3 – 0,6	0,25
0,6 – 1,2	0,3
1,2 – 1,8	0,4
1,8 – 2,4	0,45
2,4 – 3	0,55

(LÔ, 2019)

- **Estimation du volume des matériaux nécessaires à la réalisation du drain**

La nappe étant peu profonde dans la zone d'intervention, un **drain vertical** est prévu afin d'assurer un drainage efficace et homogène de l'eau à travers le corps de la digue.

- **Le volume d'argile**

L'argile constitue le matériau principal du remblai, tandis que du sable grossier y est mélangé pour améliorer sa cohésion et sa compacité. Les volumes de ces deux matériaux sont estimés selon les dimensions du drain, en utilisant la relation

$V = e_d \times l_d \times L_d$	$e_d$ : Épaisseur (m) $l_d$ : Largeur (m) $L_d$ : Longueur du drain (m)
---------------------------------	---

## - Autres matériaux

Pour ainsi faciliter l'écoulement de l'eau, des matériaux plus perméables comme le gravier ou la pierre concassée sont mis en place autour du tuyau de drainage. Ce tuyau, installé à la base du drain, assure la collecte et l'évacuation de l'eau vers l'exutoire. Le volume de ces éléments est calculé à partir de leur section d'implantation et de leur longueur.

### ❖ Protection de la crête

La crête de la digue sera renforcée par un revêtement en latérite compactée de 20 cm d'épaisseur. Afin d'assurer une protection supplémentaire contre les débordements et l'érosion, des murets parapets en maçonnerie, de dimensions 0,5 m × 0,5 m, seront implantés en rive amont (avec barbicanes pour l'évacuation des eaux) et en rive aval.

## IV.7.7 Méthodologie de la conception et du dimensionnement du déversoir

### IV.7.7.1 Intégration de l'effet de laminage dans la conception

Dans le cadre de la protection contre les crues extrêmes à Khar Yalla, un déversoir poids à seuil mince en béton cyclopéen a été choisi. Afin d'éviter un surdimensionnement, l'effet de laminage a été intégré dans le dimensionnement, conformément aux recommandations de (DURAND et al., 1999), qui en soulignent les bénéfices pour optimiser la longueur sans compromettre la sécurité hydraulique.

La méthode employée repose sur le coefficient  $X_0$ , issu de l'approche développée par l'EIER-CIEH, également citée par (DURAND et al., 1999). Elle a été efficacement appliquée par (OUEDRAOGO, 2020) au Burkina Faso, illustrant une application réussie dans un contexte sahélien similaire. Cette approche est donc pleinement applicable au cas de Khar Yalla, dont les conditions hydrologiques s'inscrivent dans la même dynamique régionale.

Le processus débute par le calcul d'une longueur de seuil sans laminage à partir de la relation classique :

$L = \frac{Q_{max}}{m \times \sqrt{2 \times g} \times h^{3/2}}$	<p>L= longueur seuil du déversoir (m)</p> <p><math>Q_{max}</math>= Débit de projet (m<sup>3</sup>/s)</p> <p>m= Coefficient du débit de l'évacuateur obtenu à partir de l'abaque de détermination de débit sur seuil (m ; h/B)</p> <p>h= Lamme d'eau déversant ; g= pesanteur (m.s<sup>-2</sup>)</p>
---	---

On introduit ensuite le coefficient  $X_0$ , définit par :

	<p><math>T_m</math>: Temps de monté des eaux en (s)</p> <p>S: Surface du plan d'eau en (m<sup>2</sup>)</p>
--	--

$X_0 = \frac{m^2 \times g \times L^2 \times Q_{max} \times T_m^2}{S^3}$	L= longueur seuil du déversoir
---	--------------------------------

La valeur de  $X_0$  permet d'accéder au coefficient de laminage  $\beta = \frac{Q_e}{Q_{max}}$  à partir l'abaque (ANNEXE V) basé sur  $\text{Log}_{10}(X_0)$ . Le débit évacué  $Q_e$  est ajusté itérativement jusqu'à convergence de  $\beta$ .

#### IV.7.7.2 Vérification de la stabilité du déversoir

La stabilité du déversoir repose sur l'analyse des différentes forces qui s'exercent sur sa structure. Une fois ces charges identifiées, on peut vérifier les conditions d'équilibre de l'ouvrage en analysant à la fois la stabilité externe (glissement et renversement) et la stabilité interne (fissuration et rupture).

##### **Evaluation des charges**

L'étude de la stabilité du déversoir nécessite l'identification et l'évaluation de l'ensemble des charges qui s'exercent sur l'ouvrage. Leur représentation graphique est présentée **Annexe V**, Figure 16. Ces actions sont ensuite classées en charges favorables et charges défavorables, comme résumé dans le Tableau 4, également **Annexe V**.

- **Le poids propre (W)**

**Le poids propre du déversoir**, en agissant vers le bas, contribue de manière favorable à sa stabilité, notamment en s'opposant au glissement et au renversement. Il permet d'ancrer l'ouvrage au sol en augmentant l'adhérence. Il est calculé selon la formule suivante :

$W = \gamma_b \times S$	$\gamma_b = 24 \text{ kN/m}^3$ , le poids volumique du béton classique S= la section de base du massif
-------------------------	---

- **La poussée hydrostatique externe  $P_e$**

Elle est exercée par l'eau amont sur la face amont du déversoir. Elle agit horizontalement et tend à déstabiliser l'ouvrage par glissement ou renversement vers l'aval. La pression exercée varie avec la profondeur, augmentant avec celle-ci.

La poussée hydrostatique externe d'un déversoir de hauteur H, soumis à une lame déversant h, peut être obtenu par cette formule :

$P_e = \left( \frac{1}{2} \times \gamma_w \times H_r^2 \right) + (\gamma_w + H_r \times h)$	$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ , le poids volumique de l'eau
---	--

- **La pression hydrostatique interne (U)**

La pression hydrostatique interne est la force exercée par l'eau souterraine sous le déversoir, qui tend à le soulever. Dans notre cas, la nappe phréatique est très proche de la surface, ce qui accentue ce risque. Pour limiter cette poussée, **réduire les infiltrations d'eau souterraine** et stabiliser le sol, des palplanches sont prévues.

La pression totale  $U$  est calculée comme la moyenne entre deux points situés sous le déversoir

$U = \left( \frac{U_A + U_B}{2} \right) \times b_2$	$U_A$ et $U_B$ Correspondent respectivement les pressions aux points A et B
$U_A = \gamma_w \left[ h + \frac{2}{3} (H_r - h) \right]$	
$U_B = \gamma_w \times h$	

- **La poussée des terres (Pt)**

Lorsqu'une couche importante de sédiments s'accumule en amont du déversoir, son poids exerce une force horizontale qui peut compromettre la stabilité de l'ouvrage. Cette poussée, semblable à celle de l'eau, agit vers l'aval et tend à faire glisser ou basculer la structure. Elle est généralement évaluée à partir du poids volumique des sédiments et de leur hauteur, selon la relation :

$P_t = \frac{1}{2} \times \gamma_{séd} \times h_{séd}^2 \times \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$	$\gamma_{séd}$ = Le poids volumique des sédiments $h_{séd}$ = La hauteur de sédiments
---	--

#### Etude de la stabilité

Une fois les différentes forces agissant sur le déversoir identifiées, il est essentiel d'analyser sa stabilité. Cette étape vise à s'assurer que l'ouvrage peut résister aux efforts qui pourraient compromettre son équilibre. Deux types de vérifications sont réalisées : la stabilité externe (glissement, renversement) et la stabilité interne (fissuration, rupture).

- **Stabilités de sécurités externes**

Les conditions de stabilités de sécurités externes sont vérifiées si :  $F_g \geq 1,2$  et  $F_r \geq 1,5$

<b>Stabilité de sécurité au non-glissement</b>	$F_g$ = Facteur de sécurité au non glissement
$F_g = \frac{(W - U) \times \tan \varphi}{P_e + P_t} \geq 1,2$	

<p><b>Stabilité de sécurité au non-renversement</b></p> $F_r = \frac{\sum m/B (W - U) \times \tan\varphi}{\sum m/B (P_e + P_t)} \geq 1,5$	<p><math>\tan\varphi = 0,65</math>, L'angle de frottement des sédiments</p> <p><math>F_r</math> = Facteur de sécurité au non renversement</p>
---	---

- **Stabilités de sécurité interne**

Les conditions de stabilités de sécurités internes sont vérifiées si et seulement si :

<p><b>Stabilité de sécurité à la non-fissuration</b></p> $e \leq \frac{b_2}{6}$ <p><b>Stabilité de sécurité de non-rupture</b></p> $\sigma_{max} \leq \sigma_{béton}$ $\sigma_{lim\ béton} = 0,3 \times f_{c28}$	<p><math>e</math> = L'excentricité</p> <p><math>b_2</math> = largeur en crête du déversoir</p> <p><math>\sigma_{max}</math> = Contrainte d'application au sol (Mpa)</p> <p><math>f_{c28}</math> = La résistance du béton à 28 jours</p> <p><math>\sigma_{lim\ béton}</math> = Contrainte admissible du béton (Mpa)</p>
--	--

#### IV.7.8 Pose de gabions

Les gabions sont des casiers métalliques remplis de pierres, utilisés pour renforcer la stabilité des berges et dissiper l'énergie de l'eau. Ils sont posés en série de marches, en aval immédiat du déversoir, pour ralentir le débit et éviter l'érosion.

Dans notre projet, les gabions sont disposés en escalier dans le bassin de dissipation. Cette disposition permet de transformer une chute brutale en une série de petites chutes, réduisant ainsi la vitesse de l'eau et limitant les risques de dégradation du lit aval. Cette solution est simple à mettre en œuvre, économique, et adaptée aux matériaux disponibles localement, comme recommandé par le CEMAGREF (DURAND et al., 1999).

#### IV.7.9 Méthodologie de conception et du dimensionnement du bassin de dissipation

Le bassin de dissipation a pour rôle principal de réduire l'énergie (potentielle et cinétique) de l'eau provenant du déversoir avant qu'elle n'atteigne le sol. Cette dissipation est essentielle pour éviter que la puissance hydraulique de l'eau ne compromette la stabilité de l'ouvrage.

Les paramètres fondamentaux, présentés dans le Tableau ci-dessous, sont pris en compte pour déterminer le type de bassin et en définir les dimensions.

Tableau 4 : Paramètres de conception et du dimensionnement du bassin de dissipation

Grandeur	Formule	Description
Tirant d'eau normal $y_n$	$\frac{Q}{\sqrt{I}} = K_s \times (b \times y_n) \times \left(\frac{b \times y_n}{b + 2y_n}\right)^{2/3}$	Déterminé par itération par la méthode de Manning-Strickler
Vitesse d'entrée V	$V = \sqrt{2g \left[ 0,9 \times \left( H_0 + h + \frac{V_0^2}{2g} \right) - y_1 \right]}$ $V = \frac{Q_{max}}{L_{dév} \times y_1} = \frac{q}{y_1}$	Estimée à partir de l'équation de Bernoulli
Nombre de Froude F	$F = \frac{V}{\sqrt{g \times y_1}}$	Caractérisation du régime hydraulique
Tirant d'eau après ressaut	$y_2 = 0,5 \times y_1 \left( \sqrt{1 + 8F^2} - 1 \right)$	Calcul basé sur la relation du ressaut hydraulique
Vitesse du fluide	$V_0 = \frac{Q}{L_{dév} \times h}$	Vitesse du fluide au niveau du seuil du déversoir

#### ❖ *Enfoncement du bassin*

L'enfoncement (profondeur) du bassin de dissipation est déterminé à partir d'abaques qui mettent en relation des ratios caractéristiques tels que  $\frac{y_n}{H_0}$  et  $\frac{h}{H_0}$  où  $H_0$  est la hauteur libre du déversoir.

#### ❖ *Utilisation des gabions*

Les gabions sont installés à l'aval du déversoir, en association avec le bassin de dissipation. Leur rôle est double :

- Retenir le sol pour prévenir l'érosion due à l'écoulement des eaux,
- Permettre le passage de l'eau, tout en ralentissant sa vitesse, ce qui complète l'effet du bassin.

#### ❖ *Dimensionnement du chenal d'évacuation*

Le chenal d'évacuation constitue une partie intégrante de l'évacuateur de crue. Généralement, sa section est rectangulaire ou trapézoïdale, et sa longueur est relativement faible. Pour garantir un écoulement fluvial efficace, le chenal doit avoir une pente inférieure à la pente critique.

Dans cette étude, un canal à section rectangulaire a été retenu. Le dimensionnement hydraulique vise à déterminer le tirant d'eau le long du chenal afin d'adapter la hauteur des murs et éviter tout débordement (OUEDRAOGO, 2020).

La méthode de variation des profondeurs sera appliquée pour calculer :

$y_c = \sqrt[3]{\frac{1}{g} \left(\frac{Q}{b}\right)^2}$	$y_c$ = Tirant d'eau critique $y_n$ = Tirant d'eau normale I = Pente de 0,2% m = Fruit de berge, pris égal à 1 b = Base du chenal
$\frac{Q}{\sqrt{I}} = K_s \times \frac{[y_n(b + my_n)]^{5/3}}{(b + 2my_n)^{2/3}}$	

## V. Méthodologie de l'étude de la relocalisation des populations touchées par les inondations du quartier Khar Yalla.

### V.1. Cadre de réflexion intégré

Dans le cadre du projet de protection contre les inondations à Khar Yalla, la relocalisation partielle des populations a été envisagée non pas comme une option secondaire, mais comme une composante complémentaire et potentiellement incontournable du dispositif global de résilience. En effet, bien que des ouvrages tels que digues, bassins de dissipation ou déversoirs puissent limiter les submersions pluviales et fluviales, ils ne permettent pas à eux seuls d'endiguer les inondations récurrentes observées à Khar Yalla.

L'analyse technique a révélé que certaines zones du quartier se trouvent en dépression topographique, avec des sols argileux et une nappe phréatique particulièrement haute. Ces conditions favorisent les remontées d'eau par capillarité et les inondations souterraines, difficiles à maîtriser uniquement par des ouvrages de surface. Pour un contrôle total des eaux, il serait nécessaire d'ajouter un réseau d'assainissement souterrain performant, une station de pompage, et un système d'évacuation pluviale structuré, ce qui représente un coût très élevé.

Dans ce contexte, la relocalisation ciblée des habitants vivant dans les secteurs les plus critiques apparaît non seulement comme une mesure de sécurité, mais aussi comme une alternative économiquement rationnelle, en permettant :

- La réduction des coûts d'aménagement,
- La libération d'emprises pour les ouvrages hydrauliques,
- Et une meilleure planification de l'urbanisme résilient.

## V.2. Approche méthodologique de l'étude sociale

L'étude sociale a été conduite à travers une enquête de terrain participative, dans les secteurs les plus exposés du quartier. Un questionnaire semi-directif a été administré à un échantillon représentatif de ménages affectés (31 ménages) à l'aide de l'outil SurveyMonkey, permettant de recueillir leurs ressentis, leurs craintes, leurs conditions de vie, ainsi que leur niveau d'acceptabilité de l'option de relocalisation.

L'analyse qualitative s'est appuyée sur :

- Le vécu des inondations récurrentes ;
- La perception des solutions proposées (ouvrages, relogement) ;
- Le niveau de confiance envers les autorités et le projet ;
- Les freins émotionnels, économiques et sociaux à un éventuel départ.

## VI. Etude de faisabilité technique

### VI.1 État des lieux

L'étude de faisabilité technique est une étape clé dans la mise en œuvre d'un projet d'aménagement hydraulique, en particulier dans un quartier urbain vulnérable comme Khar Yalla. Elle permet de juger de la pertinence et de la faisabilité des solutions envisagées, à partir d'analyses objectives et de données précises.

Cette phase s'appuie sur plusieurs investigations : topographiques, pédologiques et hydrologiques. Elles ont pour but de mieux comprendre le fonctionnement du site, d'identifier les contraintes du terrain, et d'orienter la conception des ouvrages de protection contre les inondations. Les résultats obtenus forment le socle technique sur lequel reposent la conception des ouvrages (digue, déversoir, bassin de dissipation), ainsi que les mesures complémentaires comme la relocalisation des populations, l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux, ou encore l'estimation budgétaire du projet.



Figure 2 : Stagnation des eaux pluviales dans le quartier de Khar Yalla en période



Figure 3 : Topographie du quartier Khar Yalla au Nord-Ouest



Figure 4 : Topographie du quartier Khar Yalla à l'est

### VI.1.1 Études topographiques

L'analyse topographique de la zone d'étude repose sur un Modèle Numérique de Terrain de haute résolution (2 mètres), complété par une levée de terrain effectuée par le bureau d'études Parar Consulting. Les altitudes enregistrées s'échelonnent entre **-1,17 m** et **2,82 m**, avec une large portion du quartier de Khar Yalla se situant en dessous du niveau de la mer. Cette configuration en cuvette, caractérisée par un très faible dénivelé, empêche un écoulement gravitaire efficace et accroît la vulnérabilité aux inondations.

La combinaison des données issues du MNT et des relevés de terrain a permis de générer plusieurs courbes essentielles à la compréhension du fonctionnement hydrologique de la zone : la courbe hypsométrique, la courbe hauteur-volume, et la courbe hauteur-surface.

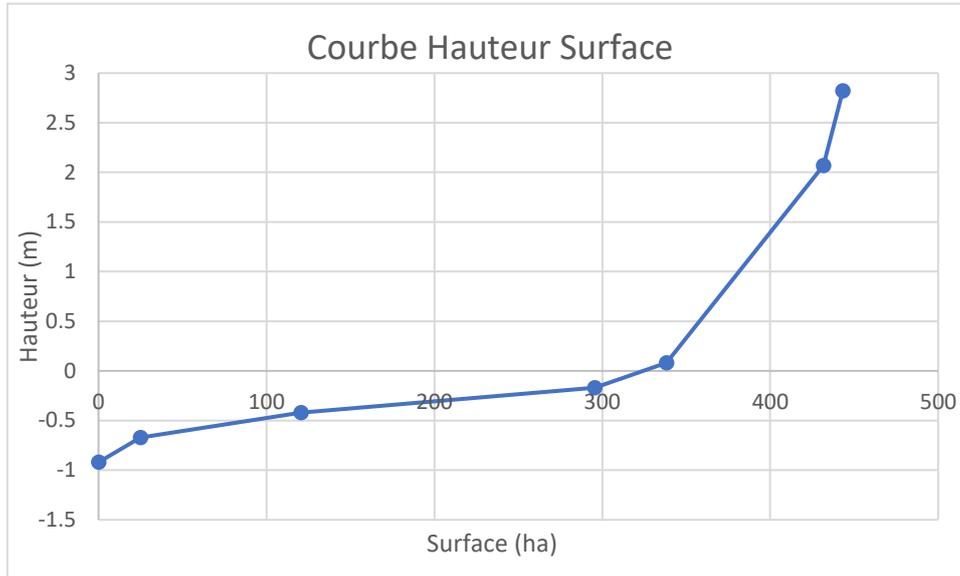


Figure 4: Courbe Hauteur Surface

Cette courbe montre l'évolution de la surface inondée en fonction de la hauteur d'eau. Jusqu'à 300 hectares environ, la croissance est progressive, puis s'accélère nettement. Cela reflète l'ouverture soudaine de la cuvette dans ses parties supérieures, où une légère hausse de niveau entraîne une large extension spatiale.

### Interprétation

Dès que l'eau dépasse un certain seuil (environ 0,08m), la surface inondée augmente très rapidement. Ce comportement souligne la vulnérabilité de certaines zones du quartier, qui peuvent être submergées en peu de temps si aucune mesure de régulation n'est mise en place.

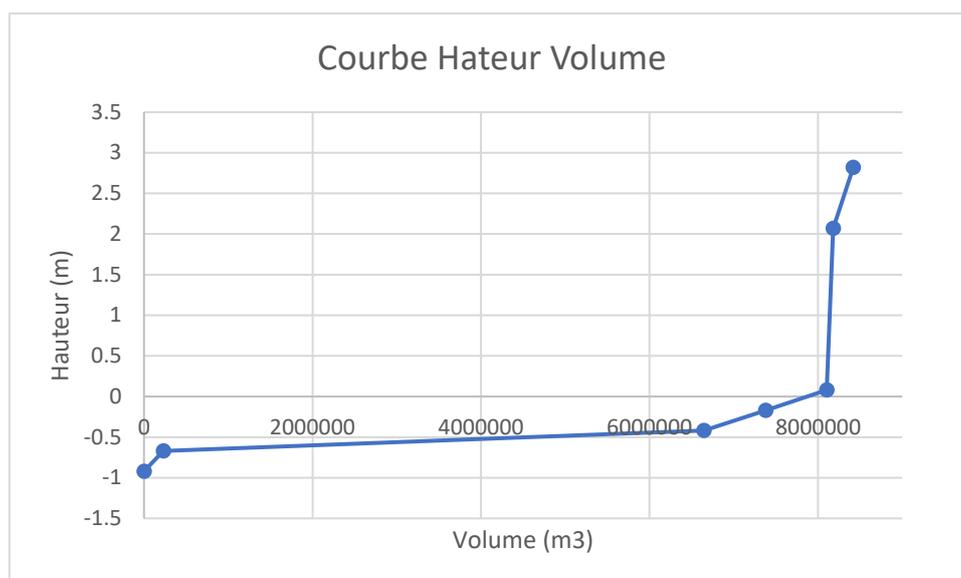


Figure 5 : Courbe Hauteur Volume

La courbe hauteur-volume met en évidence la relation entre la hauteur d'eau dans la cuvette et le volume stocké. On note une progression lente du volume jusqu'à environ 8 000 000 m<sup>3</sup>, suivie d'une hausse marquée. Cette rupture traduit la faible pente dans les zones basses, où l'eau s'accumule sans générer de grands volumes, puis un remplissage plus rapide à mesure que le niveau monte. Cela confirme la forme en cuvette de la zone de retenue.

### Interprétation :

Le stockage d'eau démarre lentement, ce qui signifie que les premières zones inondées saturent vite, sans apporter beaucoup de capacité. Ce phénomène accentue le risque d'inondation dès les premières pluies importantes.

### VI.1.2 Études pédologiques

Les résultats des sondages pédologiques effectués sur plusieurs points stratégiques de la zone d'étude révèlent une forte présence d'argile dans les couches superficielles, sur une profondeur moyenne d'un mètre. Cette texture dominante confère au sol une perméabilité très faible, limitant l'infiltration de l'eau et favorisant la stagnation en surface.

### VI.1.3 Études hydrologiques

L'analyse hydrologique a permis de caractériser le bassin versant de Khar Yalla, de mieux comprendre le régime des pluies et d'estimer les précipitations extrêmes pouvant entraîner des crues. Elle repose sur les données pluviométriques locales et l'application de méthodes statistiques selon différentes périodes de retour.

#### ➤ Analyse des données pluviométrique

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé les données pluviométriques de la station

synoptique de Saint-Louis de 1980 à 2018. Elles ont été soumises à une analyse statistique à l'aide du logiciel HYFRAN Plus, avec un ajustement selon les lois de Gumbel et Gauss.

Cette analyse a permis d'estimer les quantiles de pluie associés à différentes périodes de retour, ce qui aide à anticiper les épisodes extrêmes.

L'étude s'est focalisée sur deux types de quantiles :

- **Les quantiles secs**, qui représentent les précipitations minimales observées pour des périodes de retour données. Ils sont utiles notamment pour l'évaluation des périodes de faible ruissellement ou pour l'analyse de la recharge.
- **Les quantiles humides**, qui correspondent aux précipitations maximales attendues à ces mêmes périodes. Ils sont essentiels pour la conception des ouvrages de protection contre les inondations.

Le Tableau ci-dessous présente les résultats obtenus, avec pour chaque période de retour les hauteurs de pluie estimées selon les deux lois. Les variables réduites associées ( $U_i$ ) sont également précisées.

Tableau 5 : Caractéristiques descriptives des données pluviométriques de la station de Saint-Louis de 1980 à 2018

Caractéristiques descriptives des données pluviométriques de la station de Saint-Louis de 1980 à 2018		
Station	Saint-Louis	
Nature	Pluies moyennes annuelles	Pluies maximales journalières
Taille	39	39
Moyenne (m)	255.77	127.45
Ecart-type ( $\sigma$ )	98.36	59.18
Maximale	593.6	320.1
Minimale	58.6	33.1
Médiane	261.3	126.8
Intervalle de confiance (%)	95	95

Tableau 6 : Récapitulatif des ajustements des données pluviométriques par les lois de GAUSS et GUMBEL

Récapitulatif des ajustements des données pluviométriques				
Quantile			Loi NORMAL	Loi de GUMBEL

Récapitulatif des ajustements des données pluviométriques						
	Période de retour	$q=F(x_i)$ probabilité au non dépassement	$U_i$ : variable réduite de GAUSS	Pluie (mm)	$U_i$ : variable réduite	Pluie (mm)
Sèche	100	0.01	-2.33	26.95	-1.527	36.19
	50	0.02	-2.05	53.76	-1.364	43.71
	10	0.1	-1.28	129.72	-0.834	68.18
	5	0.2	-0.84	172.99	-0.476	84.71
Médiane	2	0.5	0	255.77	0.367	123.6
Humide	5	0.8	0.84	338.56	1.5	175.92
	10	0.9	1.28	381.83	2.25	210.556
	50	0.98	2.05	457.78	3.902	286.79
	100	0.99	2.33	484.6	4.6	319.02

Les résultats révèlent une progression logique des hauteurs de pluie avec l'augmentation de la période de retour, reflétant un accroissement du risque en cas d'événements exceptionnels. Les ajustements graphiques (ANNEXE II) ont montré une bonne concordance avec les lois de Gauss et de Gumbel, avec plus de 90 % des données incluses dans les intervalles de confiance. Cela valide la pertinence de ces lois pour modéliser les données pluviométriques dans la zone d'étude.

## VI.2 Caractérisation du bassin versant

### VI.2.1 Caractéristiques géo morphométriques

Le bassin versant qui alimente la zone d'étude s'étend sur une superficie de 44,4 km<sup>2</sup>, soit un périmètre total de 101,85 km. D'après la classification de Rodier (Bulletin 54 de la FAO), il s'agit d'un bassin de taille moyenne (40 km<sup>2</sup> < S < 1000 km<sup>2</sup>). Sa morphologie est allongée, comme en témoigne son indice de compacité élevé de 4,31. En référence à la typologie proposée par Rodier et Auvrey (Bulletin FAO, 1998), il est classé en catégorie P3 ou RI, ce qui indique une perméabilité faible du bassin versant.

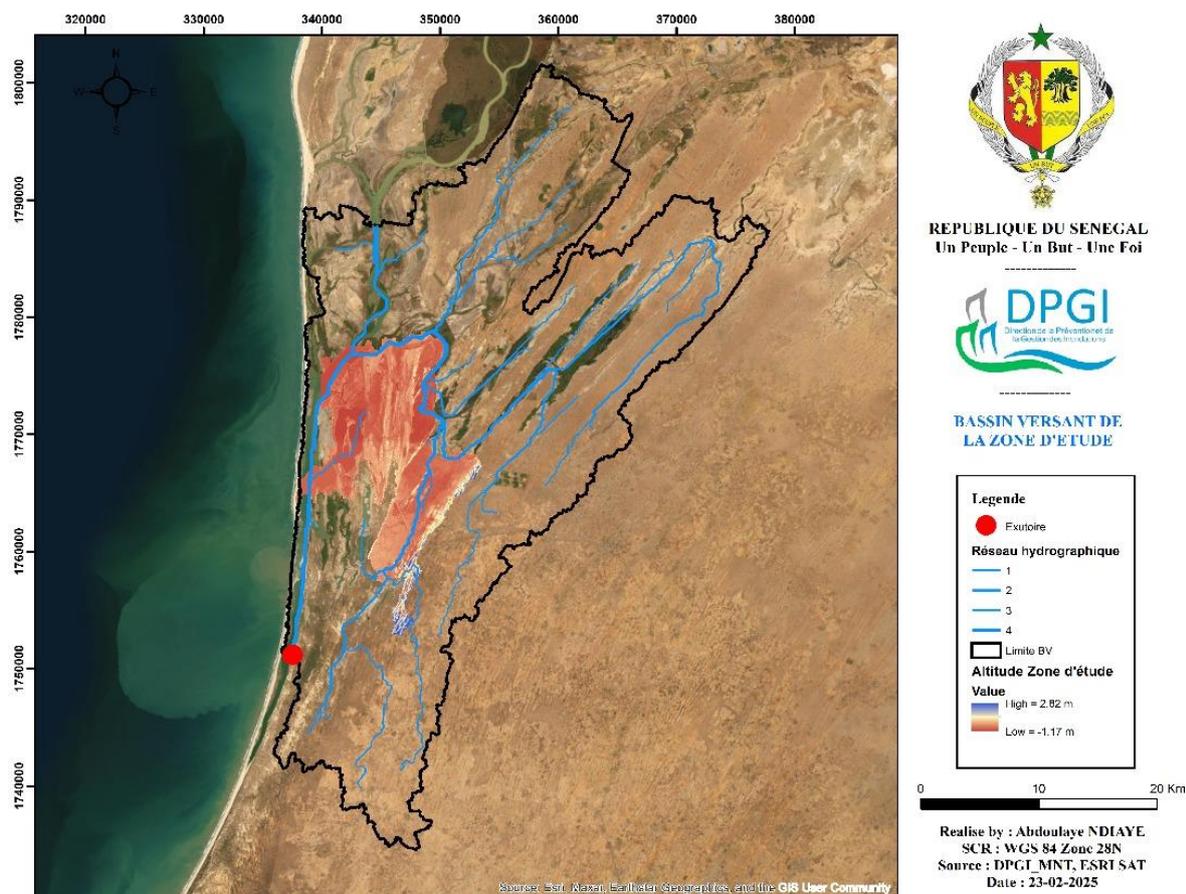


Figure 6 : Bassin versant de la zone d'étude

Tableau 7 : Paramètres géo-morphométriques

Paramètre	Valeur	Unité	Interprétation
Superficie (S)	44,4	Km <sup>2</sup>	Bassin moyen
Périmètre (P)	101,85	Km	-
Indice de compacité Gravelius ou (Indice de forme)	4,31	-	Forme allongée
Longueur équivalente (Leq)	50,04	Km	Allongé
Largeur équivalente (leq)	0,89	Km	Très étroit
Classe d'infiltrabilité	RI (P3)	-	Relativement imperméable

En résumé, le bassin présente une forme allongée et une faible perméabilité, accentuant les risques de ruissellement rapide vers l'exutoire

## VI.2.2 La courbe hypsométrique

L'analyse de la courbe hypsométrique permet d'apprécier la répartition altitudinale du bassin. Les altitudes varient de -1,17 m à 2,82 m ce qui traduit une très faible amplitude topographique.

- H5 %  $\approx$  2,82 m : 5 % du bassin se situent à cette altitude élevée
- H95 %  $\approx$  -0,90 m : 95 % du bassin sont en dessous de ce seuil.

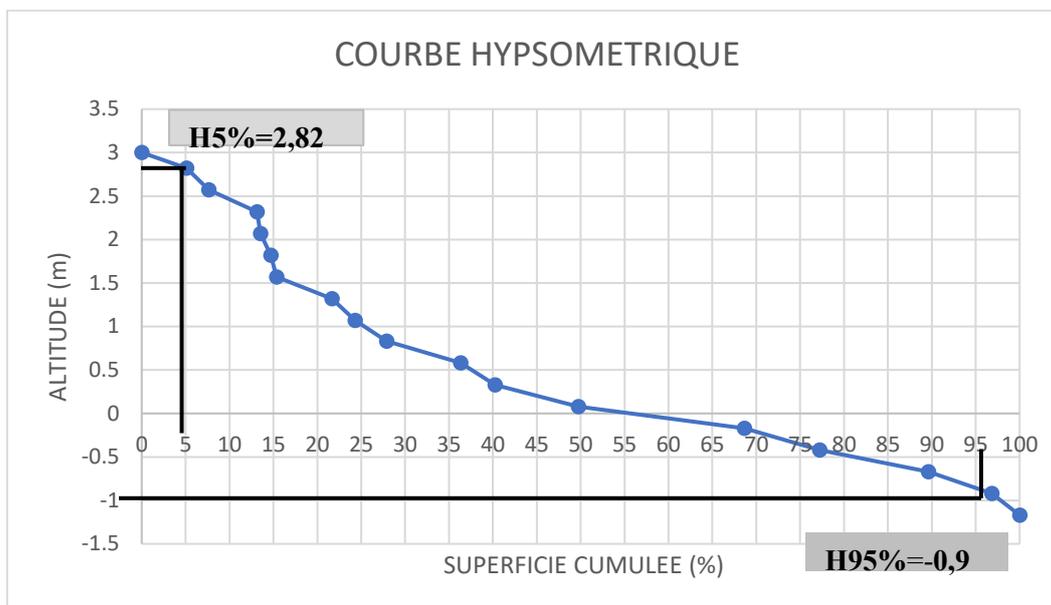


Figure 7 : courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique confirme la topographie en cuvette de Khar Yalla, avec plus de 60 % du bassin situé entre +0,5 m et -1,0 m. Cette structure altimétrique, en cohérence avec les résultats géo morphométriques, explique les difficultés d'évacuation naturelle des eaux : les pentes faibles limitent l'écoulement gravitaire, tandis que les altitudes négatives par rapport au niveau marin favorisent la remontée de nappe et les inondations par submersion ou saturation. Cette configuration justifie la nécessité d'ouvrages hydrauliques adaptés pour compenser l'absence de drainage naturel et protéger durablement la zone.

### VI.2.3 Caractéristiques relatives au relief du bassin versant

Tableau 8 : Caractéristiques relatives au relief du bassin versant

Paramètre	Valeur	Unité	Interprétation
Pente moyenne (Imoy)	1,37	-	Faible pente
Pente longitudinale (I <sub>l</sub> )	3,90	m/km	Douce
Pente transversale moyenne	4,69	m/km	-
Indice de pente global (I <sub>g</sub> )	0,08	-	Plat
Indice de pente corrigé	1	-	Plat (confirmé)
Dénivelé spécifique (D <sub>s</sub> )	6,65 (D <sub>s</sub> <50 m)	m	Relief faible (Bulletin de FAO)

Le relief très faible empêche un écoulement naturel efficace, ce qui favorise la stagnation des eaux et aggrave le risque d'inondation.

### VI.2.4 Caractéristiques relatives au réseau hydrographique

Tableau 9 : Caractéristiques relatives au réseau hydrographique

Paramètre	Valeur	Unité	Interprétation
Longueur totale du réseau	101,91	Km	Réseau important
Nombre d'ordres	8	-	Hierarchisation confirmée
Densité de drainage (D <sub>d</sub> )	2,30	Km <sup>-1</sup>	Réseau très dense

Bien que la densité de drainage soit élevée, reflétant un réseau potentiellement favorable à l'évacuation des eaux, son efficacité réelle reste limitée par le relief. En l'absence de pente suffisante, l'écoulement demeure lent et mal structuré, réduisant la capacité de drainage lors des fortes pluies et aggravant le risque d'inondation.

#### Synthèse de la caractérisation du bassin versant

L'ensemble des caractéristiques géo-morphométriques, hypsométriques, topographiques et hydrographiques du bassin versant de Khar Yalla révèle un territoire à forte vulnérabilité hydrologique. La combinaison d'une forme allongée, de faibles pentes, d'un relief déprimé et d'une perméabilité réduite favorise le ruissellement rapide mais limite l'évacuation naturelle des eaux. Malgré une densité de drainage relativement élevée, l'efficacité du réseau

hydrographique reste compromise par la topographie quasi-plane. Ces facteurs justifient pleinement la mise en place d'ouvrages de protection contre les inondations, adaptés à un contexte de faible dynamique naturelle.

### VI.3 Détermination du débit de crue du projet

Pour dimensionner les ouvrages de protection, la crue centennale a été retenue comme crue de projet, correspondant à un débit rare, de forte intensité, et dont la période de retour est de 100 ans (probabilité de 1 % par an). Deux approches ont été mobilisées pour estimer ce débit : la méthode empirique de l'ORSTOM, intégrant les caractéristiques locales du bassin, et celle du CIEH fondée sur des équations de régression. Le passage de la crue décennale à la crue centennale a été réalisé à l'aide du coefficient majorateur de la méthode GRADEX. Compte tenu du contexte topographique (bassin en cuvette), de la saturation des sols et de la faible perméabilité, le débit issu de la méthode ORSTOM a été retenu comme valeur de référence.

Tableau 10 : La crue centennial du projet

Débit de la crue centennial du projet				
Méthode	ORSTOM	CIEH	Coefficient majorateur de GRADEX	Q100 retenu (ORSTOM)
Débit décennal (m <sup>3</sup> /s)	240.18	95.82	1.02	244.02
Débit centennial (m <sup>3</sup> /s)	244.02	97.35		

#### ❖ L'hydrogramme de crue

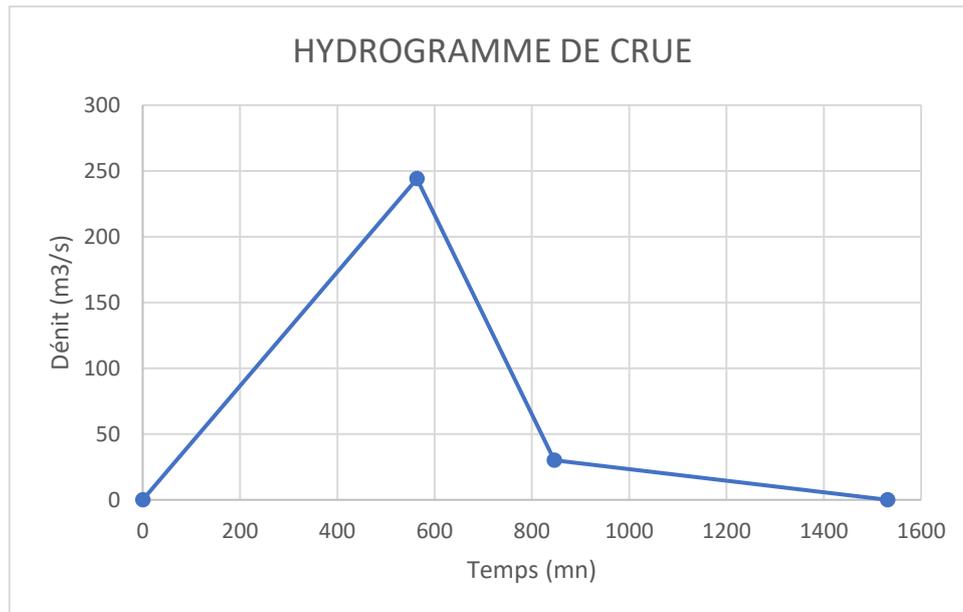


Figure 8 : Hydrogramme de crue simulée à Khar Yalla

L'hydrogramme de crue simulée illustre l'évolution du débit au cours du temps lors d'un épisode pluvieux critique dans le bassin versant de Khar Yalla. Il se décompose en trois phases hydrologiques distinctes :

- Phase de montée : depuis l'état initial jusqu'au débit de projet  $Q_p=244,02\text{m}^3/\text{s}$ . Cette montée rapide traduit une réaction vive du bassin, liée à l'imperméabilité du sol et à la topographie en cuvette.
- Phase de décrue : du pic de crue jusqu'au débit de discontinuité  $Q_d=30,13\text{m}^3/\text{s}$ . La pente plus douce reflète une évacuation progressive des volumes ruisselés.
- Phase de tarissement : phase finale ramenant le débit à zéro, marquant la fin de l'épisode de crue.

Les données ayant permis le tracé sont présentées en annexe II

#### ❖ La période de retour et crue de sécurité

Le volume prévisionnel du bassin de dissipation est de  $597\,396\text{ m}^3$  pour une hauteur normale de 2,5 m. Les estimations indiquent une période de retour théorique de plus de 4 737 ans, traduisant une capacité de stockage élevée. La crue de rupture a été évaluée à  $1\,020,17\text{ m}^3/\text{s}$ , soit plus de quatre fois le débit de projet fixé à  $244,02\text{ m}^3/\text{s}$ .

Toutefois, afin de rester cohérent avec la taille de l'ouvrage et les réalités locales, une **période de retour de 100 ans** a été retenue de manière pratique pour le dimensionnement.

## VI.4 Evaluation des apports au niveau du bassin versant

Cette évaluation vise à quantifier les volumes d'eau générés dans le bassin lors d'un épisode pluvieux. Deux méthodes empiriques (**Coutagne** et **Rodier**) basée sur des formules régionales issues d'observations africaines sont mobilisées.

### VI.4.1 Estimation des apports liquides par la méthode de COUTAGNE

L'intérêt de cette méthode réside dans sa simplicité d'application et sa capacité à fournir une approximation plus cohérente à partir de données pluviométriques et morphologiques.

L'estimation basée sur cette méthode a permis d'évaluer les apports générés pour différentes périodes de retour. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11: Estimation des apports liquides par la méthode de Coutagne

Paramètres de calcul	Symbole	Résultats
Lambda	$\lambda$	0,229
Déficit d'écoulement annuelle	D (m)	0,241
Pluie moyenne annuelle	P <sub>man</sub> (mm)	255,77
Température moyenne annuelle	T (°c)	25,6
Lame d'eau écoulee annuellement	Le (mm)	1492
Coefficient d'écoulement	Ke %	5,83
Coefficient d'écoulement quinquennal sèche	Ke <sub>5</sub> %	4,08
Coefficient d'écoulement décennal sèche	Ke <sub>10</sub> %	2,92
Apport liquide annuelle	V (m <sup>3</sup> )	662036,51
Apport liquide quinquennal	V <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> )	463425,56
Apport liquide décennal	V <sub>10</sub> (m <sup>3</sup> )	331018,26

### VI.4.2 Estimation des apports liquides par la méthode de RODIER

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 11.

Tableau 12 : Estimation des apports liquides par la méthode de RODIER

Paramètres de calcul	Symbole	Résultats
Pluie moyenne annuelle	P <sub>man</sub> (mm)	255,77
Lame d'eau écoulee annuellement	Le (mm)	6
Coefficient d'écoulement	Ke %	2,33
Coefficient d'écoulement quinquennal sèche	Ke <sub>5</sub> %	1,64
Coefficient d'écoulement décennal sèche	Ke <sub>10</sub> %	1,17

Paramètres de calcul	Symbole	Résultats
Apport liquide annuelle	V (m <sup>3</sup> )	226197,84
Apport liquide quinquennal	V <sub>5</sub> (m <sup>3</sup> )	186338,49
Apport liquide décennal	V <sub>10</sub> (m <sup>3</sup> )	133098,92

Afin de garantir une marge de sécurité dans le dimensionnement des ouvrages tout en restant réaliste, la moyenne des volumes obtenus est retenue, soit environ 397 567 m<sup>3</sup>. Ce choix permet de limiter les écarts liés aux méthodes empiriques et sert de référence pour la suite de l'analyse hydraulique.

## VI.5 Evaluation des pertes au niveau de la digue

Dans cette étude, il est essentiel de tenir compte des pertes naturelles qui réduisent le volume d'eau réellement mobilisable, car cela permet d'ajuster de manière réaliste les volumes à gérer par les ouvrages hydrauliques. À Khar Yalla, elles sont principalement liées à 3 phénomènes : l'infiltration dans le sol, l'évaporation atmosphérique et les pertes spatiales dues aux dépôts solides.

### VI.5.1 Estimation des pertes par infiltration

Les observations de terrain, croisées avec les résultats de l'étude hydrologique, justifient une estimation des pertes par infiltration fixée à 2 mm/jour, soit 730 mm/an rapportée à une année hydrologique.

### VI.5.2 Pertes par évaporation

L'évaporation a été estimée à partir des données climatiques de la station de Saint-Louis. Les moyennes journalières mensuelles (en mm/jour) ont été multipliées par le nombre de jours de chaque mois afin d'obtenir un cumul annuel. Le total obtenu est de 1 570,8 mm/an, soit 15 708 m<sup>3</sup>/ha/an. Les pertes par évaporation sont plus marquées en début d'année, avec un pic en janvier de 6,1 mm/j (voir annexe II).

### VI.5.3 Estimation des pertes spatiales dues aux dépôts solides

L'évaluation des pertes spatiales dues aux dépôts solides a été réalisée à partir de trois méthodes empiriques couramment utilisées dans les études hydro-sédimentaires. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Estimation des pertes spatiales dues aux dépôts solides

Méthode d'estimation	Dégradation spécifique Ds (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /an)	Volume annuel (m <sup>3</sup> /an)
GRISILION	2093,43	92877,58
GOTTSCHALK	177,94	7894,44
KARAMBIRI	820,63	36408,18
Valeur retenue	<b>1457,03</b>	<b>64642,88</b>

L'analyse révèle une variabilité entre les méthodes. Par prudence et pour refléter les risques réels d'envasement, la moyenne des volumes issus des méthodes de Grésillon et Karambiri a été retenue, soit environ 64 643 m<sup>3</sup>/an. Cette valeur sert de base pour estimer les capacités de stockage sédimentaire minimales à prévoir dans les ouvrages projetés, ainsi que la fréquence des opérations de curage.

### Synthèse des pertes

En combinant les trois différentes formes de pertes hydriques identifiées dans la zone d'étude, le volume total soustrait annuellement atteint **87 650,88 m<sup>3</sup>**. Le cumule de ces pertes a été intégrées dans le bilan hydrique général du projet afin d'assurer un dimensionnement réaliste des ouvrages.

## VI.6 Conception et du dimensionnement de la digue de protection

Les sections précédentes ont permis de caractériser le site de Khar Yalla sur les plans topographique, pédologique et hydrologique. Elles ont mis en évidence une forte vulnérabilité à l'accumulation des eaux pluviales. En l'absence d'infiltration et d'écoulement efficace, l'eau sature rapidement les zones basses, entraînant des inondations localisées récurrentes. Face à cette réalité, la construction d'ouvrages de protection s'impose. La digue constitue un élément capital du dispositif, destinée à intercepter et contenir les eaux excédentaires avant qu'elles n'envahissent les zones habitées.

### VI.6.1 Choix du type de la digue

La majorité de la zone du barrage et des sites d'emprunt est constituée d'argile. Ce matériau, une fois compacté, offre une étanchéité et une stabilité suffisantes pour une digue homogène en terre. Pour limiter les risques d'érosion liés à l'action des vagues, la digue sera protégée par un enrochement. Un drain vertical sera également intégré pour assurer la gestion des eaux et renforcer la stabilité de l'ensemble.

## VI.6.2 Calage des dimensions de la digue

### VI.6.3 Choix du talus de la digue et son optimisation

Selon la méthodologie de conception d'un remblai pour digue homogène, la pente de talus recommandée (DEGOUTTE & FRY, 2002) est 1V/2H (angle de pente  $\approx 26,6^\circ$ )

Tableau 14 : Paramètres de conception et du dimensionnement de la digue de protection

<b>Conception et du dimensionnement de la digue de protection</b>		
<b>Paramètres hydrauliques caractéristiques</b>		
<b>Élément</b>	<b>Symbole</b>	<b>Valeur</b>
Plan d'eau normal	PEN	2,50 m
Plan des Hautes Eaux	PHE	3,30 m
Hauteur de vague	$H_v$	0,53 m
Revanche libre	$R_l$	0,53 m
Revanche libre minimum (Moussa LO, 2019)		0,57 m
Revanche libre retenu		0,6 m
Fetch (distance d'exposition au vent)	F	1,03 km
Vitesse des vagues	$V_v$	1,85 m/s
Hauteur totale de la digue	$H_d$	<b>3,44 m</b>
<b>Dimensions géométriques</b>		
<b>Élément</b>	<b>Méthode / Règle</b>	<b>Résultat</b>
Largeur en crête	Knapen	3,06 m (adoptée)
	Preece	3,04 m
Talus amont	Norme	1V / 2H
Talus aval	Norme	1V / 2H
Angle au pied des talus $\alpha$	1V / 2H	26,56°
Largeur en base/fondation	Géométrie (trapèze)	15,63 m
<b>Longueur de la digue</b>	-	<b>1500 m</b>
<b>Paramètres du drain</b>		
<b>Élément</b>	<b>Symbole</b>	<b>Valeur</b>
Perméabilité du drain ( $K_d$ )	$K_d$	$1 \times 10^{-5}$ m/s
Largeur du drain ( $l_d$ )	$l_d$	7,677 m

<b>Conception et du dimensionnement de la digue de protection</b>		
Épaisseur du drain (ed)	$e_d$	0,046 m
Épaisseur de la couche de protection	$e$	0,375 m
Débit de fuite	$q$	$7 \times 10^{-10}$ m <sup>3</sup> /s/ml
Hauteur du drain	$y_0$	0.672 m
Paramètre	$d$	4.317 m
<b>Matériaux utilisés pour la réalisation du drain</b>		
<b>Matériau</b>	<b>Symbole</b>	<b>Volume estimé (m<sup>3</sup>)</b>
Argile	$V_{\text{argile}}$	5,60
Sable	$V_{\text{sable}}$	5,60

Le dimensionnement proposé est en cohérence avec les normes empiriques (Knapen, Preece), les contraintes locales et les hypothèses hydrauliques. La digue conçue offre une protection réaliste face aux crues de fréquence décennale, avec une marge de sécurité intégrée via la revanche libre. Les choix géométriques optimisent l'emprise au sol tout en assurant la stabilité mécanique de l'ouvrage.

L'intégration du drain améliore nettement le comportement de la digue face aux remontées d'eau souterraine et aux infiltrations, éléments clés dans un contexte argileux saturé. Le débit de fuite négligeable confirme l'efficacité du système. Toutefois, il conviendra d'assurer une bonne mise en œuvre des couches filtrantes pour éviter les risques de colmatage ou de surpression.

En complément de cette barrière physique, un dispositif de sécurité est indispensable pour faire face aux crues supérieures au projet. Un déversoir d'évacuation contrôlée est ainsi prévu en point bas de la digue. Il est détaillé dans la section suivante.

## **VI.7 Conception et du dimensionnement du déversoir**

Le déversoir projeté est un ouvrage de type poids à seuil mince, de section trapézoïdale. Il repose sur la capacité de son massif en béton cyclopéen (béton massif intégrant de gros blocs de pierre, utilisé pour sa forte inertie et sa mise en œuvre économique) à résister aux sollicitations, principalement par son propre poids. Il permet une évacuation contrôlée des eaux excédentaires en crue, tout en assurant une stabilité globale face aux efforts internes et externes.

### **V.7.1 laminage de crue**

Comme le montrent les travaux de (DURAND et al., 1999), la prise en compte de l'effet de

laminage permet d'optimiser la conception des seuils. Dans notre cas, cette approche a conduit à une réduction notable du débit de crue à évacuer, ce qui s'est traduit par une baisse significative de la longueur du seuil initialement estimée. Le tableau ci-après résume les paramètres retenus à l'issue des itérations :

Tableau 15 : Résultats du laminage de crue par la méthode EIER-CIEH

Laminage de crue par la méthode EIER-CIEH	
Paramètre	Valeur
Longueur du déversoir laminé	196,45 m
Débit laminé $Q_l$	175,69 m <sup>3</sup> /s
Coefficient de laminage $\beta$	72%

Cette optimisation hydraulique et économique facilite également l'intégration de l'ouvrage dans un environnement urbain contraint, tout en maintenant la sécurité hydraulique requise.

Les détails de calcul du coefficient  $X_0$ , la détermination de  $\beta$  et les paramètres de base sont en **Annexe V**.

### V.7.2 Conception et dimensionnement du déversoir

Les résultats de conception sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Paramètres de conception et de dimensionnement du déversoir

Paramètres de conception du déversoir	
Paramètre	Valeur
Longueur du déversoir	140 m
Largeur ( $b_2$ )	2,25 m
Largeur en crête ( $b_1$ )	1,00 m
Forme de section	Trapézoïdale
Coefficient de débit ( $m$ )	0,34
Charge déversant ( $h_{\max}$ )	0,80 m
Poids volumique de l'eau $\gamma_w$	10 kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique du béton $\gamma_b$	24 kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique des terres $\gamma_{\text{sed}}$	20 kN/m <sup>3</sup>
Angle de frottement sédiment $\tan\varphi$	0,65
$\varphi$	33,023°
Hauteur des sédiments $h_{\text{sed}}$	1,5 m

### VI.7.3 Vérification de la stabilité du déversoir

L'analyse de stabilité a été conduite selon les méthodes classiques, en tenant compte des principales sollicitations : charges permanentes (poids propre), poussées actives (eau, sédiments), effets hydrauliques (sous-pression), et contraintes internes (excentricité, contraintes admissibles).

Toutes les vérifications ont abouti à des résultats satisfaisants, indiquant que le déversoir résiste aux risques de glissement, renversement, fissuration et rupture. Le tableau ci-après présente les résultats de la stabilité du déversoir. Les calculs complémentaires, incluant l'évaluation des charges et l'analyse de stabilité du déversoir, sont disponibles en **Annexe V**.

Tableau 17 : Étude de la stabilité du déversoir

Étude de la stabilité du déversoir				
Type de stabilité	Vérification	Condition	Résultat	Conclusion
Externe	Coefficient de sécurité au glissement ( $F_g$ )	$F_g \geq 1,20$	1,89	Stable
	Coefficient de sécurité au renversement ( $F_r$ )	$F_r \geq 1,50$	7,01	Stable
Interne	Excentricité ( $e$ )	$-b_2/6 \leq e \leq b_2/6$ ( $\pm 0,81$ m)	-0,23 m	Pas de fissuration
	Contrainte maximale ( $\sigma_{\max}$ )	$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{adm}}$ (6 MPa)	0,03 MPa	Pas de rupture

Ces résultats traduisent un équilibre satisfaisant entre conception structurelle et contraintes du site. Le choix d'une section trapézoïdale permet une meilleure répartition des efforts internes, tout en limitant l'effet des poussées latérales. La pente retenue ( $\approx 57^\circ$ ) optimise la stabilité sans excès de matière. Le poids propre est suffisant pour s'opposer aux poussées et garantir une assise stable, même en présence de sous-pressions.

L'excentricité obtenue respecte la règle du tiers central, assurant que les charges se répartissent

correctement sans risque de fissuration. Quant aux contraintes admissibles, elles restent largement inférieures à la limite du matériau utilisé, confirmant une sécurité structurelle fiable.

Le déversoir proposé satisfait aux critères hydrauliques et mécaniques, avec une stabilité confirmée. Robuste et adapté à Khar Yalla, il régule efficacement les excédents d'eau tout en protégeant les ouvrages en aval. Il complète harmonieusement la digue dans le système global de lutte contre les inondations.

## VI.8 Conception et du dimensionnement du bassin de dissipation

À la sortie du déversoir, les vitesses d'écoulement demeurent importantes et peuvent provoquer des phénomènes d'érosion graves si l'énergie n'est pas convenablement dissipée. Pour cette raison, un bassin de dissipation a été prévu, basé sur le principe du ressaut hydraulique, renforcé par des structures dissipatrices complémentaires. Cette section présente les résultats de la conception dudit bassin et résultats du dimensionnement sont détaillés en ANNEXE IV.

### ➤ Présentation des résultats

Tableau 18 : Conception du bassin de dissipation

Conception du bassin de dissipation	
Paramètre	Résultat
Type du bassin de dissipation	Type II
Longueur du bassin $L_b$	3,25 m
Tirant d'eau à l'entrée $y_1$ (itération)	0,14 m
Tirant d'eau à la sortie $y_2$	1,21 m
Nombre de Froude $Fr$	6,16
Enfoncement retenu $D$	1 m
Vitesse à l'entrée du ressaut $V$	7,60 m/s
Vitesse du fluide en sortie (aval) $V_o$	1,55 m/s

### ➤ Dispositifs dissipateurs

Les dimensions des dispositifs dissipateurs tels que les blocs de chute, les chicanes, ainsi que le seuil terminal ont été définies pour maximiser la dissipation de l'énergie en fin de chute. Le tableau ci-après présente les caractéristiques géométriques retenues pour ces éléments.

Tableau 19 : Paramètres géométriques des dispositifs dissipateurs du bassin

Disposition	Paramètre	Valeur
<b>Blocs de chute</b>	Hauteur	0,08 m
	Largeur	0,08 m
	Espacement entre les blocs	0,08 m
<b>Blocs chicanes</b>	Hauteur $h_2$	0,39 m
	Largeur $l_2$	0,29 m
	Espacement entre les blocs $e_2$	0,29 m
	Épaisseur en crête $b_2$	0,08 m
<b>Disposition générale</b>	Distance blocs de chute-chicanes $D$	1,02 m
<b>Seuil terminal</b>	Rapport seuil/entrée $h_4/y_1$	1,50
	Hauteur du seuil	0,196 m

Le dimensionnement valide l'efficacité du bassin de dissipation pour freiner un écoulement initialement supercritique (torrentiel). Le ressaut est bien contrôlé, les vitesses sont réduites, et l'énergie est dissipée de manière sécurisée. Les dispositifs complémentaires (blocs et seuil) optimisent cette fonction, assurant une transition hydraulique stable vers l'aval, en phase avec les objectifs de protection contre les inondations à Khar Yalla.

## VII. Exploration de l'option de la relocalisation

### VII.1 Résultats de l'enquête : une acceptabilité faible mais lucide

L'enquête a révélé une forte résistance à l'idée de relocalisation :

- **89 %** des habitants interrogés sont contre,
- **5,5 %** des personnes interrogées accepteraient de quitter leur maison de manière temporaire
- **5,5 %** des habitants accepteraient de quitter définitivement le quartier, mais à des conditions très strictes (cadre de vie meilleur, un accompagnement adapté, ...).

Les raisons invoquées sont profondes : attachement au quartier, peur de l'isolement, méfiance envers les promesses politiques, et risque de marginalisation. Néanmoins, une partie

minoritaire, mais significative, reconnaît que les inondations deviennent invivables et que des solutions de relogement bien encadrées pourraient être acceptées.

**Conclusion partielle :** la relocalisation à Khar Yalla ne doit pas être perçue comme un échec de l'aménagement, mais comme une décision stratégique d'optimisation du projet. Elle est techniquement fondée, économiquement justifiable, et potentiellement socialement acceptable, si elle est préparée avec méthode et sensibilité.

## VII.2 Analyse critique :

Les résultats sociaux, croisés avec les données hydrauliques et topographiques, confirment que les inondations à Khar Yalla sont dues à une combinaison de facteurs : la remontée de la nappe phréatique, les débordements du fleuve et les ruissellements pluviaux. Cette superposition des risques rend la gestion du phénomène particulièrement complexe.

Dans ce contexte, la digue principale, bien qu'indispensable, ne saurait constituer à elle seule une réponse suffisante et durable. Elle doit être accompagnée d'un ensemble cohérent d'ouvrages complémentaires, parmi lesquels :

- Un réseau d'assainissement pluvial souterrain dimensionné pour répondre aux précipitations extrêmes ;
- Des stations de pompage efficaces, capables de gérer les excès d'eau, notamment en période de nappe haute.

Ces mesures combinées s'inscrivent dans une approche intégrée de gestion des inondations, plus résiliente et mieux adaptée aux réalités locales.

**Enfin**, à la lumière des résultats sociaux obtenus, la relocalisation partielle ou ciblée des populations les plus exposées devrait être explorée de manière approfondie. Bien encadrée, elle pourrait représenter la solution la plus efficace à long terme, en réduisant la vulnérabilité humaine et en facilitant l'aménagement rationnel du territoire.

## VIII. Notice d'impact environnemental et social / plan de gestion environnemental et social

Ce projet de construction d'ouvrages de protection contre les inondations à Khar Yalla, accompagné d'une relocalisation partielle des populations exposées, génère des effets potentiels sur l'environnement physique et humain. Conformément à la législation sénégalaise, une Notice d'Impact Environnemental et Social (NIES) est requise afin d'anticiper les risques et de définir des mesures d'atténuation adaptées.

### VIII.1 Rappel du cadre législatif régissant le projet

Le projet est soumis aux exigences du Code de l'environnement (Loi n°2001-01) et du décret n°2001-282 relatif aux études d'impact environnemental. Il est classé en **catégorie B**, en raison d'impacts modérés mais localement significatifs (PGESPI, 2019). Les principaux textes réglementaires applicables sont :

- Le Code de l'Environnement (Loi n°2023-15)
- Le Code de l'Eau (Loi n°86-04)
- Le Code Forestier (Loi n°98-03)
- La Loi sur les déchets plastiques (Loi n°2020-04)
- Le Code Pastoral (Loi n°2004-16)

Le projet respecte également les normes environnementales et sociales de la Banque Africaine de Développement et, si applicable, celles de la Banque Mondiale, en intégrant les principes de précaution, de participation et de gestion des risques. Les institutions concernées sont principalement le Ministère de l'Environnement, la Direction de l'Environnement et des Établissements Classés (DEEC), les collectivités territoriales et le Maître d'Ouvrage.

### VIII.2 Rappel des composantes et phases du projet

Le projet s'articule autour de deux composantes principales :

- La **construction d'ouvrages hydrauliques** (digues, déversoirs, bassins) pour le contrôle des eaux pluviales, fluvial et de la nappe phréatique.
- La **relocalisation partielle des populations** situées dans les zones à très haut risque.

Ces composantes se déroulent en trois phases :

- **Phase préparatoire** : études, emprises, concertation.
- **Phase de travaux** : réalisation des ouvrages, relocalisation, suivi environnemental.
- **Phase post-projet** : entretien, évaluation, accompagnement social.

### VIII.3 Identification et évaluation des impacts

#### a) Identification des impacts

L'analyse croisée des composantes environnementales et sociales (eau, sol, air, biodiversité, population, patrimoine, etc.) et des activités du projet a permis de dresser une cartographie des effets potentiels. La **matrice de Fecteau** (Annexe VII) synthétise ces interactions selon leur nature : positive ou négative, directe ou indirecte, temporaire ou permanente.

#### b) Évaluation de l'importance des impacts

L'importance des impacts a été évaluée selon trois critères, conformément à la **méthode de Leopold** (voir annexe VII) :

- **Intensité** : faible, moyenne, forte
- **Portée** : ponctuelle, locale, régionale
- **Durée** : courte, moyenne, longue

#### c) Évaluation des risques

Une évaluation complémentaire a été menée à l'aide des deux critères : la gravité potentielle (faible à très grave) et la probabilité de survenue (très improbable à très probable), afin de hiérarchiser les mesures de prévention.

### VIII.4 Plan de Gestion Environnemental et Social (PGES)

Le PGES regroupe l'ensemble des mesures nécessaires à la maîtrise des impacts, à la valorisation des bénéfiques et à la conformité environnementale du projet. Il couvre toutes les phases, du chantier à l'exploitation.

#### Conclusion partielle

Le projet aura des effets tangibles sur le milieu naturel et humain. Cependant, les impacts négatifs identifiés sont maîtrisables grâce aux mesures techniques, sociales et environnementales prévues dans le PGES. Par son approche intégrée, durable et inclusive, le projet contribuera significativement à réduire la vulnérabilité du quartier de Khar Yalla tout en améliorant durablement le cadre de vie des populations.

## VIX. DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF DE L'OUVRAGE

Tableau 20 : DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF DE L'OUVRAGE

<b>DEVIS QUANTITATIF ESTIMATIF (DQE) : PROJET DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS À KHAR YALLA</b>					
<b>N°</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>	<b>Quantité estimée</b>	<b>Prix unitaire (FCFA)</b>	<b>Montant total (FCFA)</b>
<b>1</b>	<b>Frais du chantier</b>				
1.1	Amenée et repli	ff	1	10 000 000	13 000 000
1.2	Installation de chantier	ff	1	7 000 000	8 000 000
	<b>Sous-total 1</b>				<b>21 000 000</b>
<b>2</b>	<b>Travaux de la digue de protection</b>				
2.1	Terrassement général (tranchées, décapage, mise en dépôt)	m <sup>3</sup>	10 400	3 500	36 400 000
2.2	Remblai compacté (terre argileuse sélectionnée)	m <sup>3</sup>	12 200	5 000	61 000 000
2.3	Nivellement, mise en forme des talus (1V/2H)	m <sup>2</sup>	1 500	2 000	3 000 000
2.4	Fourniture et pose de géotextile (optionnel – pied de digue)	m <sup>2</sup>	600	2 800	1 680 000
	<b>Sous-total 2</b>				<b>102 080 000</b>
<b>3</b>	<b>Déversoir en béton cyclopéen</b>				
3.1	Excavation et plateforme du déversoir	m <sup>3</sup>	2105	4 000	8 420 000
3.2	Coffrage et coulage béton cyclopéen (13,5 m x 3,25 m x 1,2 m)	m <sup>3</sup>	50	85 000	4 250 000
3.3	Ferraillage (mise en œuvre armature)	kg	3 000	1 200	3 600 000
3.4	Seuil de surverse calé à la cote 3,3 m ( finition + étanchéité)	ml	13,5	80 000	1 080 000
	<b>Sous-total 3</b>				<b>17 350 000</b>
<b>4</b>	<b>Bassin de dissipation avec gabions</b>				
4.1	Terrassement du bassin (type II à ressaut)	m <sup>3</sup>	90	4 000	360 000
4.2	Fourniture gabions + moellons + pose (gabions escalier)	m <sup>3</sup>	45	90 000	4 050 000
	<b>Sous-total 4</b>				<b>4 410 000</b>

5	<b>PGES, suivi et accompagnement institutionnel</b>				
5.1	Mise en œuvre du PGES (mesures de mitigation et suivi)	Forfait	1	3 000 000	20 000 000
5.2	Formation et équipement du comité local de gestion	Forfait	1	2 000 000	5 000 000
	Sous-total 5				<b>25 000 000</b>
	<b>TOTAL</b>				<b>169 000 000</b>

## x. Conclusion et recommandation

### CONCLUSION

Le quartier de Khar Yalla, situé en contrebas du niveau de la mer dans la ville de Saint-Louis, est confronté à un risque d'inondation particulièrement aigu, alimenté par une combinaison de facteurs : topographie en cuvette, faible perméabilité des sols argileux, nappe phréatique affleurante, et urbanisation croissante sans plan d'assainissement adapté. Ce mémoire a permis de proposer une réponse structurée à cette vulnérabilité en combinant la mise en œuvre d'ouvrages hydrauliques adaptés à une réflexion sociale sur la relocalisation partielle des populations les plus exposées.

L'étude s'est appuyée sur une analyse hydrologique rigoureuse du bassin versant de 44,4 km<sup>2</sup>, dont les apports utiles annuels ont été estimés à environ 597 396 m<sup>3</sup>, avec un débit de crue centennale évalué à 244,02 m<sup>3</sup>/s. À partir de ces données, plusieurs ouvrages ont été dimensionnés pour répondre aux contraintes locales. Il s'agit notamment d'une digue en terre homogène argileuse de type poids, haute de 3,44 m, longue de 615 m et large de 3 m en crête, avec des talus inclinés à 1V/2H. Le déversoir, en béton cyclopéen et positionné de façon frontale, est calé à la cote 3,3 m. Long de 13,5 m, il est conçu pour évacuer le débit de projet tout en assurant un effet de laminage efficace. En aval, un bassin de dissipation à ressaut renforcé par des gabions disposés en escalier permet de maîtriser la vitesse des écoulements et d'éviter l'érosion.

En parallèle, une réflexion sociale a permis d'identifier les zones non sécurisables, justifiant le recours à une relocalisation partielle, envisagée comme mesure complémentaire. L'enquête menée à ce sujet a révélé une acceptabilité conditionnelle de la population, à condition que la démarche soit transparente, inclusive et respectueuse de la dignité des habitants. Pour encadrer les impacts et garantir une mise en œuvre responsable, une Notice d'Impact Environnemental et Social (NIES) et un Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES) ont été élaborés, intégrant des mesures concrètes de suivi, d'atténuation et de compensation.

Le coût global du projet, incluant les ouvrages de protection, les mesures sociales et environnementales, est estimé à **169 000 000** millions FCFA. Ce travail, bien qu'inscrit dans un cadre académique, offre une base concrète et contextualisée pour la mise en œuvre d'un projet pilote de résilience urbaine à Khar Yalla, conciliant ingénierie, gouvernance locale et justice sociale.

## RECOMMANDATIONS

Pour assurer la pérennité du projet proposé et maximiser ses bénéfices pour les habitants de Khar Yalla à moyen et long terme, il est recommandé :

### **Pour les ouvrages hydrauliques**

- D'assurer un entretien régulier de la digue et du déversoir : inspection des talus, stabilité de la crête et curage des dépôts.
- D'intégrer à moyen terme une solution d'**assainissement souterrain**, en particulier dans les zones où la nappe remonte de manière récurrente, pour limiter les infiltrations dans les habitations et éviter l'engorgement de certains secteurs en amont de la digue.
- Prévoir une **station de pompage et/ou un dispositif de vidange contrôlée**, au moment de réalisation de l'ouvrage, afin d'évacuer les eaux piégées dans la zone protégée par la digue. Cela permettrait de gérer efficacement les eaux pluviales et souterraines en cas de saturation, et d'éviter que l'ouvrage ne transforme la zone en bassin fermé.
- D'**accompagner le projet d'un réseau d'assainissement pluvial minimal**, afin de canaliser les eaux vers les exutoires naturels ou vers les points de pompage.

### **Pour la relocalisation des populations exposées**

- D'associer étroitement les populations ciblées dès les premières phases de planification, afin de renforcer leur compréhension du projet et leur adhésion à la démarche.
- De garantir une **compensation équitable et transparente**, à travers un mécanisme clair de réinstallation volontaire, basé sur des critères sociaux et environnementaux objectifs.
- De privilégier des zones de relogement aménagées de manière durable, avec des services de base (eau, assainissement, voirie), pour éviter le déplacement de la vulnérabilité vers d'autres zones.

### **Pour la mise en œuvre du PGES**

- D'accompagner la relocalisation par un **dispositif social d'écoute de médiation et de suivi post-installation**, pour éviter les tensions communautaires et renforcer l'intégration des ménages relogés.
- De mettre en place une cellule locale de suivi environnemental, composée de représentants des habitants, de la commune, et de techniciens, afin de veiller à l'application des mesures du PGES.
- De Planifier des campagnes de sensibilisation régulières sur la gestion de l'eau, l'entretien des ouvrages, et les bonnes pratiques d'adaptation au changement climatique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANSD. (2021). Rapport régional de l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), à travers le Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Saint-Louis. [Gouvernemental]. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie du Sénégal.
- Bulletin 54 FAO : CIEH, ORSTOM & LCT. (1996). Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche (p. 265) [Manuel]. des et Unies pour Organisation Nations l'alimentation l'agriculture.
- CGES / PROGEP. (2019). Profil biophysique et socio-économique de la commune de Saint-Louis [Rapport]. Ministère de l'Environnement et du Développement durable du Sénégal. [Gouvernemental].
- DEGOUTTE, G., & FRY, J. J. (2002). Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi = Small dams : Guidelines for design, construction and monitoring. Comité Française des Grands Barrages.
- DPGI/MHA. (2024). Rapport de cadrage technique et contextuel des zones inondables de Saint-Louis : Cas du quartier de Khar Yalla.
- DURAND, J.-M., ROYET, P., & MERIAUX, P. (1999). Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale.
- FAYE, I. (2024). Étude Hydrologique de la réhabilitation de la mare d'Aghor au profit du cheptel des réfugiés dans la commune de Meghve, dans la Moughataa de Bassékounou, Wilaya de Hodh El Chargui – MAURITANIE (p. 107) [Mémoire de fin de cycle master]. Institut 2iE.
- KARAMBIRI, H., & NIANG, D. (2011). Cours hydrologie.
- LÔ, M. (2019). Dimensionnement d'un barrage en terre.
- MOHAMMEDI, H., & BOULANOUAR, A. (2016). Conception et dimensionnement d'une digue à talus Cas de la digue de Doui Thabet-Wilaya de Saida (p. 77) [Mémoire de fin de cycle master].
- OUEDRAOGO, O. (2020). ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE DE TAMPOUY-YARCE, COMMUNE DE ZITENGA, REGION DU PLATEAU CENTRAL, AU BURKINA FASO (p. 135) [Mémoire de fin de cycle master]. Institut 2iE.
- PGESPI. (2019). République du Sénégal. (S.d.). Procédure de gestion environnementale et sociale des projets d'investissement. Document institutionnel.

## **LISTE DES ANNEXES**

**ANNEXE I : DONNEES TOPOGRAPHIQUE POUR LA CONDUITE DE L'ETUDE**

**ANNEXE II : ANALYSE STATISTIQUES DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES**

**ANNEXE III : ESTIMATION HYDROLOGIQUE DU DEBIT DE PROJET ET  
PARAMETRES ASSOCIES**

**ANNEXE IV : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DE LA DIGUE**

**ANNEXE V : ETUDE DE LA STABILITE DU DEVERSOIR**

**ANNEXE VI : DIMENSIONNEMENT DU BASSIN DE DISSIPATION**

**ANNEXE VII : NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL / PLAN DE  
GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL**

## ANNEXE I : DONNEES TOPOGRAPHIQUE POUR LA CONDUITE DE L'ETUDE

Tableau 21 : DONNEE DE TRACE DE LA COURBE HYPSONOMETRIQUE

DONNEE DE TRACE DE LA COURBE HYPSONOMETRIQUE			
Superficie	Superficie cumulée	Superficie cumulée en %	Altitudes
2.26	2.26	5.099853323	2.82
1.13	3.39	7.649779984	2.57
2.43	5.82	13.13325059	2.32
0.17	5.99	13.51686788	2.07
0.52	6.51	14.69028546	1.82
0.3	6.81	15.36725714	1.57
2.795	9.605	21.67437662	1.32
1.17	10.775	24.31456617	1.07
1.58	12.355	27.87995036	0.83
3.74	16.095	36.31953063	0.58
1.74	17.835	40.24596638	0.33
4.2	22.035	49.7235699	0.08
8.38	30.415	68.63364549	-0.17
3.8	34.215	77.20862011	-0.42
5.5	39.715	89.61976757	-0.67
3.2	42.915	96.84079883	-0.92
1.4	44.315	100	-1.17

Tableau 22 : DONNEE DE TRACE DES COURBE HAUTEUR-VOLUME ET HAUTEUR-SURFACE

DONNEE DE TRACE DES COURBE HAUTEUR-VOLUME ET HAUTEUR-SURFACE				
Hauteur (m)	Superficie (Ha)	Volume (m <sup>3</sup> )	Superficie cumulée	Volume Cumulé (m <sup>3</sup> )
-0.95	-	-	0	0
-0.92	24.883	228 921.34	24.883	228 921.34
-0.67	95.737	6414404.46	120.62	6 643 325.80
-0.42	174.934	734 723.64	295.554	7 378 049.44
-0.17	42.71	726 083.94	338.264	8 104 133.38

<b>DONNEE DE TRACE DES COURBE HAUTEUR-VOLUME ET HAUTEUR-SURFACE</b>				
0.08	93.386	74 709.12	431.65	8 178 842.50
2.07	11.578	239 677.02	443.228	8 418 519.52
2.82	9.86	278 328.36	453.088	8 696 847.88

## ANNEXE II : ANALYSE STATISTIQUES DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Cette annexe présente les données pluviométriques collectées à la station de Saint-Louis ainsi que les traitements statistiques réalisés pour caractériser le régime des pluies dans la zone d'étude. Les ajustements des séries de précipitations aux lois de probabilité (Gumbel et Normale) ont été effectués à l'aide du logiciel HYFRAN+, afin d'estimer les valeurs extrêmes utiles aux calculs hydrologiques. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Tableau 23: Données pluviométriques de la station de Saint-Louis

Année	Pluie annuelle	Année	Pluie max jour	Rang i
1992	58.6	1992	33.1	1
1983	99.7	1996	46.6	2
1984	109.1	1991	52.7	3
1996	110.8	1983	60	4
2014	112.8	1990	61.5	5
2004	139.7	1984	65	6
1986	158.4	2014	68.8	7
1991	179.7	1986	75.2	8
1990	182.4	2018	87.7	9
1982	191.3	2002	88.8	10
2018	216.4	2017	89.1	11
1997	220.2	2008	91.1	12
2017	223.3	1982	92.7	13
2015	237.7	2004	94.8	14
1993	238.8	2001	107.3	15
1989	240.9	2006	114.5	16
2016	243.2	2009	114.5	17
2001	255.9	2011	115.8	18
2008	257	1995	125.9	19

Année	Pluie annuelle	Année	Pluie max jour	Rang i
1985	261.3	1993	126.8	20
2002	261.8	2016	127.7	21
1998	272.8	2015	130.5	22
2011	276.8	1998	134.4	23
2005	281.5	1985	137.1	24
1995	282	1980	137.3	25
1994	284.3	1989	144.1	26
1980	294.3	1997	146.2	27
2006	294.6	1999	146.6	28
2009	294.6	2005	147.1	29
1988	310.1	1988	149.2	30
2007	310.7	2013	151.7	31
2000	329.3	2007	160.6	32
1981	335.8	2000	168.5	33
1987	342.7	1981	168.7	34
2003	349.8	1994	192.3	35
1999	361.6	2012	197.7	36
2013	374.8	2003	228.6	37
2012	386.8	1987	270.3	38
2010	593.6	2010	320.1	39

Tableau 24 : Données du tracé de l'hyrogramme de crue

Débit Q (m <sup>3</sup> /s)	0	244.02	30.19	0
Temps (mn)	0	563.9	845.85	1530.99

➤ Ajustement par la loi NORMAL des pluies moyenne annuelle

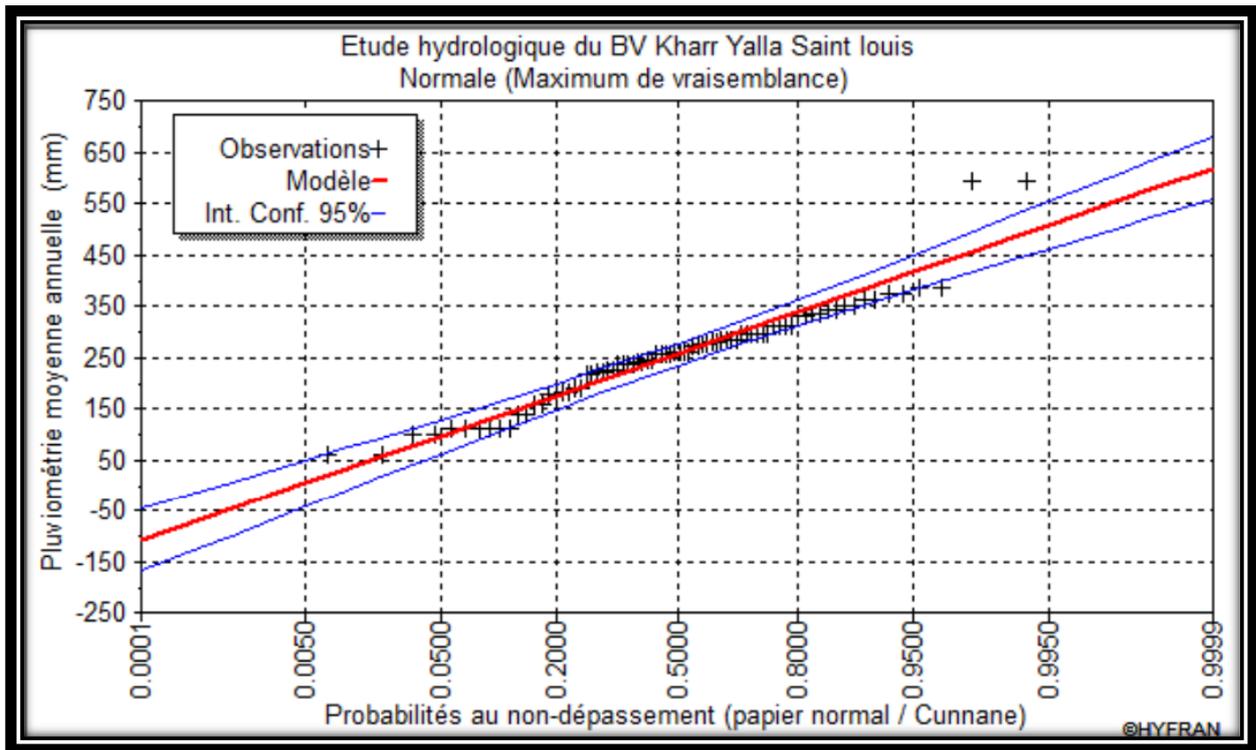


Figure 9: Ajustement par la loi NORMAL des pluies moyenne annuelle par HYFRAN+

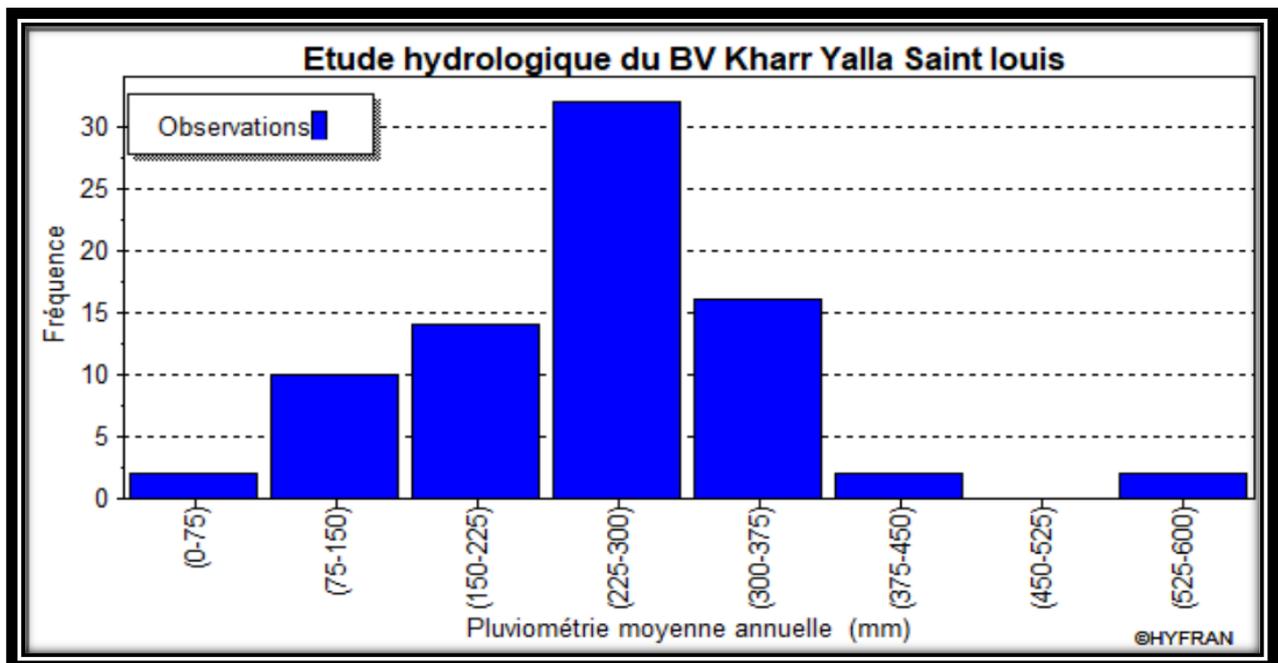


Figure 10 : Histogramme des fréquences d'apparition en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle (mm)

Tableau 25 : Résultat de l'Ajustement par la loi NORMAL des pluies moyenne annuelle

T	Q	XT	Ecart type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	619	31.3	557 - 680
2000.0	0.9995	577	28.2	522 - 632
1000.0	0.9990	557	26.7	505 - 610
200.0	0.9950	507	23.1	462 - 552
100.0	0.9900	483	21.4	441 - 525
50.0	0.9800	456	19.6	418 - 494
20.0	0.9500	416	17.0	383 - 449
10.0	0.9000	380	15.0	351 - 410
5.0	0.8000	337	12.9	312 - 363
3.0	0.6667	297	11.6	275 - 320
2.0	0.5000	255	11.1	234 - 277
1.4286	0.3000	204	11.8	181 - 227
1.2500	0.2000	173	12.9	148 - 198
1.1111	0.1000	130	15.0	101 - 159
1.0526	0.0500	94.5	17.0	61.1 - 128
1.0204	0.0200	54.5	19.6	16.1 - 92.9
1.0101	0.0100	27.9	21.4	-14.0 - 69.9
1.0050	0.0050	3.53	23.1	-41.8 - 48.8
1.0010	0.0010	-46.7	26.7	-99.1 - 5.68
1.0005	0.0005	-66.3	28.2	-122 --11.1
1.0001	0.0001	-108	31.3	-169 --46.8

➤ Ajustement par la loi de GUMBEL des pluies maximales journalières

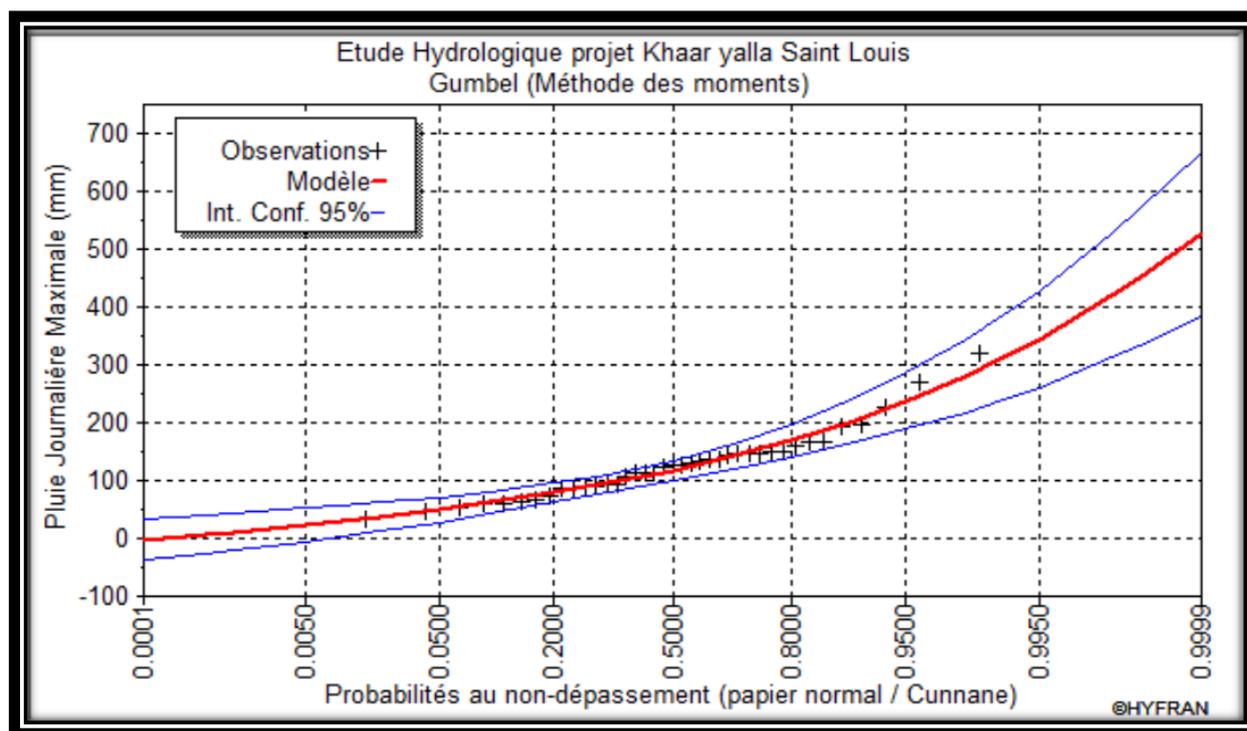


Figure 11 : Ajustement par la loi de GUMBEL des pluies maximales journalières par HYFRAN

Tableau 26 : Résultat de l'Ajustement par la loi GUMBEL des pluies journalières maximale

T : Année de retour	q : Probabilité au non déplacement	XT : valeur des pluies max (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
10000.0	0.9999	525	72.5	383 - 668
2000.0	0.9995	451	60.1	333 - 569
1000.0	0.9990	419	54.8	312 - 527
200.0	0.9950	345	42.5	262 - 428
100.0	0.9900	319	37.2	240 - 386
50.0	0.9800	286.80	31.9	218 - 343
20.0	0.9500	237	25.0	188 - 286
10.0	0.9000	210.56	19.8	165 - 243
5.0	0.8000	175.92	14.7	141 - 198
3.0	0.6667	142	11.1	120 - 164
2.0	0.5000	117	8.70	100 - 134
1.4286	0.3000	91.8	7.99	76.1 - 107
1.2500	0.2000	78.4	8.51	61.7 - 95.1

T : Année de retour	q : Probabilité au non déplacement	XT : valeur des pluies max (mm)	Ecart type	Intervalle de confiance
1.1111	0.1000	61.9	9.84	42.6 - 81.2
1.0526	0.0500	49.7	11.2	27.8 - 71.6
1.0204	0.0200	37.4	12.7	12.5 - 62.3
1.0101	0.0100	29.9	13.7	2.99 - 56.7
1.0050	0.0050	23.4	14.6	-5.24 - 52.0
1.0010	0.0010	11.2	16.4	-20.9 - 43.2
1.0005	0.0005	6.74	17.0	-26.6 - 40.1
1.0001	0.0001	-2.12	18.4	-38.1 - 33.9

➤ Estimation des pertes par évaporation

Le tableau ci-dessous présente la base de données qui a permis d'estimer les pertes par évaporation. Ces données proviennent de la station de Saint-Louis.

Tableau 27: Données mensuelles des paramètres climatiques à Saint-Louis : évaporation, température et ensoleillement

Synthèse mensuelle des paramètres climatiques à Saint-Louis : évaporation, température et ensoleillement			
Mois	Évaporation (mm/j)	Température (°C)	Insolation (h/j)
Janvier	6,1	15,8	6,8
Février	5,9	16,9	8,9
Mars	5,5	18	8,4
Avril	4,4	18,3	8,8
Mai	4	19,8	8,3
Juin	3,4	22,6	6,3
Juillet	3,1	24,6	6,9
Août	2,8	25,1	7,6
Septembre	2,5	25,2	7,2
Octobre	3,5	23,9	8
Novembre	4,9	20,2	7,5
Décembre	5,6	17,2	7

## ANNEXE III : estimation hydrologique du débit de projet et paramètres associés

### III.1 Estimation hydrologique du débit de projet

Estimation du débit centennal par les deux méthodes (ORSTOM et CIEH)

Tableau 28 : Détermination du débit centennal du projet selon ORSTOM et CIEH

<b>Détermination du débit centennal du projet</b>	
<b>Débit de ruissellement décennal par méthode ORSTOM</b>	
Paramètre	Valeur
Pluie journalière max centennale $P_{100}$ (mm)	313
Pluie journalière max décennale $P_{10}$ (mm)	204
Pluie annuelle décennale $P_{an10}$ (mm)	380
Coefficient d'abattement (A)	0,75
Coefficient de ruissellement décennal $K_{r10}$ (%)	33,60
Temps de base $T_b$ (mn)	1530,99
Temps de montée $T_m$ (mn)	563,90
Coefficient de pointe de crue décennal $\alpha_{10}$	2,60
Coef multiplicateur m (en fonction de notre BV de type RI et de la Surface)	1,03
Débit de ruissellement décennal $Q_{r10}$ (m <sup>3</sup> /s)	233,18
Débit de pointe décennal $Q_{10}$ (m <sup>3</sup> /s)	240,18
<b>Débit de la crue centennal <math>Q_{100}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>244,02</b>
<b>Débit de la crue décennal par la méthode CIEH</b>	
Numéro équation de régression	Valeur en m <sup>3</sup> /s
$Q_9$	95,82
$Q_{11}$	94,34
$Q_{12}$	45,16
$Q_{33}$	48,28
<b>Débit de la crue centennal <math>Q_{100}</math></b>	<b>97,35</b>

Le tableau ci-dessus regroupe l'ensemble des paramètres hydrologiques utilisés pour estimer le débit de crue centennale du bassin versant de Khar Yalla. Deux approches empiriques ont été mobilisées : la méthode ORSTOM, qui repose sur les paramètres climatiques, morphologiques

et temporels (abattement, ruissellement, coefficient de pointe), et la méthode CIEH, fondée sur des équations de régression issues de l'analyse de nombreux bassins.

### III.2 Paramètres hydrologiques et abaques pour l'estimation du débit de projet

#### ➤ Coefficient de ruissellement décennale $K_{r10}$

Nous sommes dans le cas où la valeur de la pluie décennale ( $P_{10}$ ) ne coïncide pas avec les précipitations comprises entre 70 mm et 100 mm. Le  $K_{r10}$ , sera ainsi déterminés par interpolation à partir des abaques  $K_{r70}$  et  $K_{r100}$ , en considérant une infiltrabilité de classe RI,  $I_g = 1.23$  m/Km et la surface 44,4 Km de notre bassin.

Avec une classe d'infiltrabilité RI et  $I_g = 3$ m/km, nous avons  $K_{r100} = 16$  et  $K_{r70} = 15$

Avec une classe d'infiltrabilité RI et  $I_g = 7$ m/Km, nous avons  $K_{r100} = 20$  et  $K_{r70} = 17$

Avec une classe d'infiltrabilité RI et  $I_g = 1.23$  m/Km nous aurons un  $K_{r10} = ?$

$$\left. \begin{aligned} K_{r70} &= 15 + \frac{(17-15)(1.23-3)}{(7-3)} = 14.115 \\ K_{r100} &= 16 + \frac{(20-16)(1.23-3)}{(7-3)} = 14.23 \end{aligned} \right\} K_{r10} = 14.115 + \frac{(14.23-14.115)(380-70)}{(100-70)}; K_{r10} = 14,63\%$$

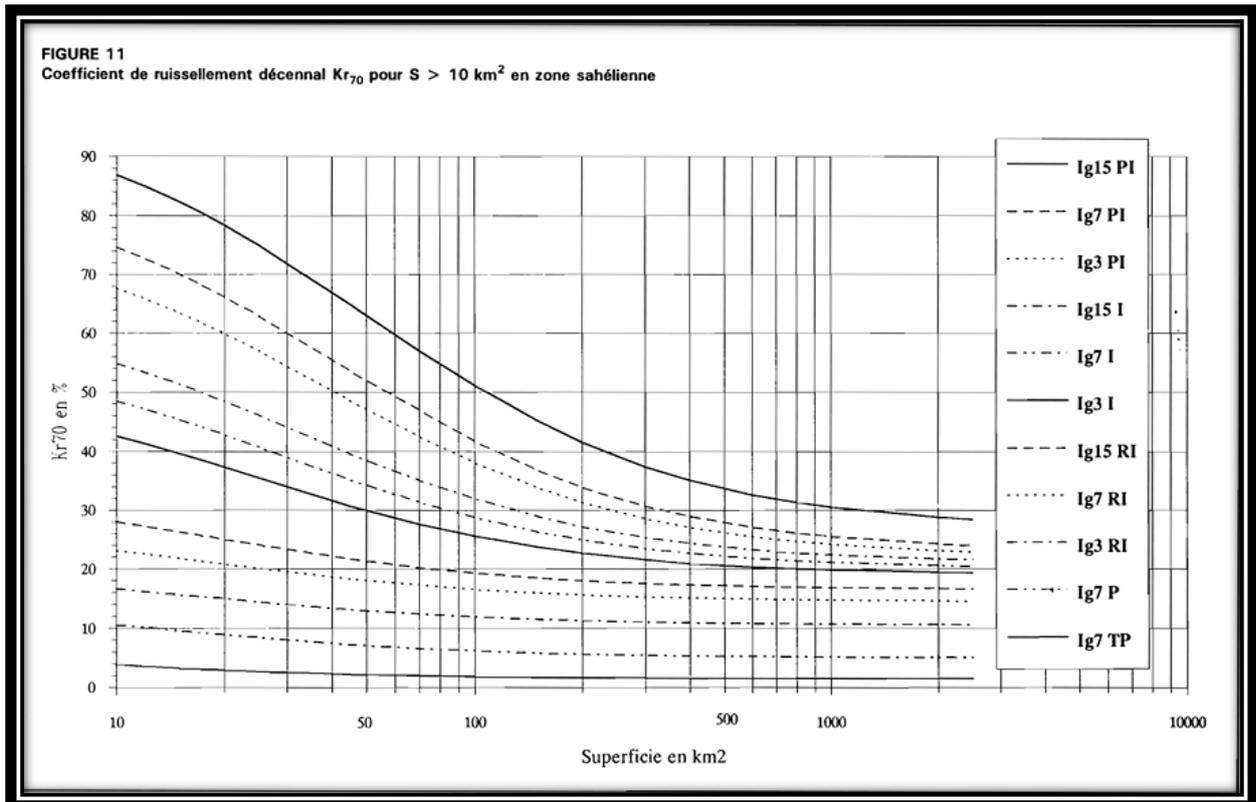


Figure 12 : Abaque du coefficient de ruissellement  $K_{r70}$

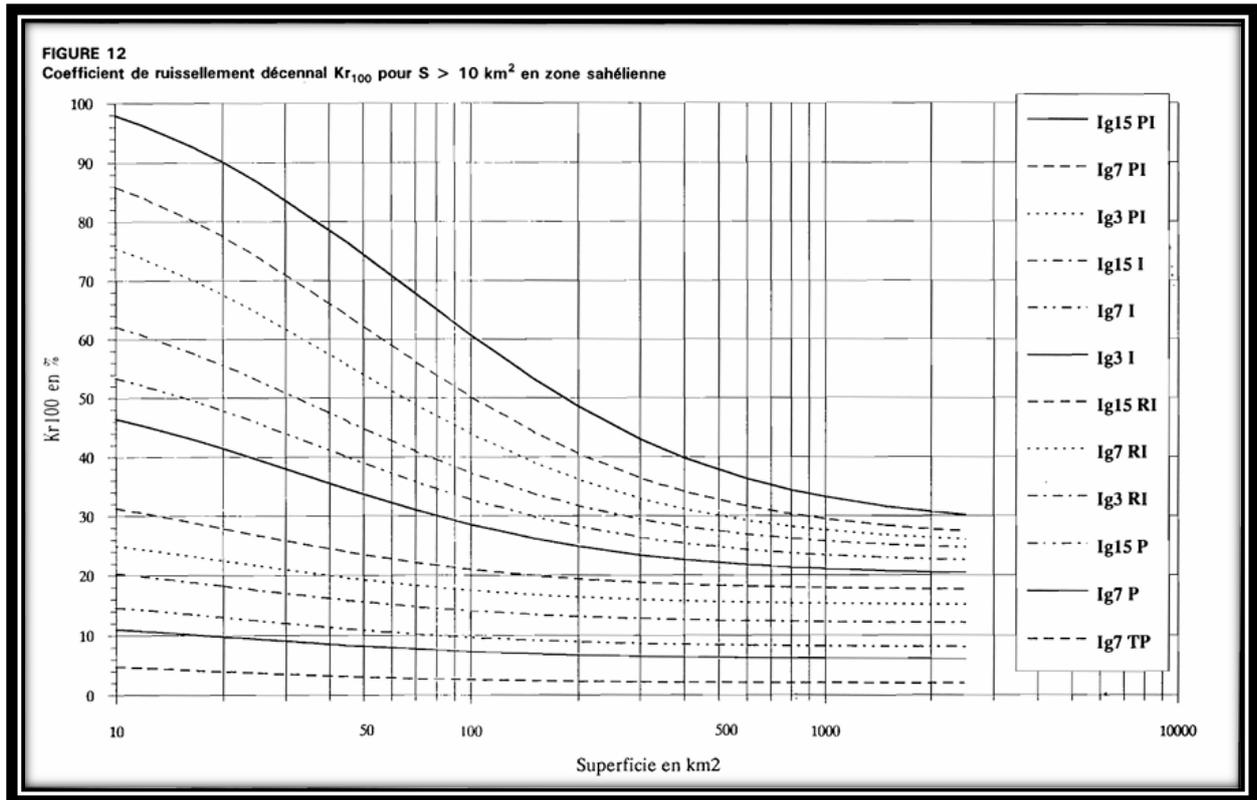


Figure 13 : Abaque du coefficient de ruissellement  $Kr_{100}$

### ➤ Temps de base et temps de montée

Le temps de base et le temps de montée des eaux à l'exutoire du bassin ont été estimés à partir des abaques empiriques proposés par Auvray et Rodier, tels que présentés dans le Bulletin FAO n°54. Ces abaques tiennent compte de la zone (zone sahélienne pour notre cas), de la surface du bassin versant ainsi que de l'indice global de pente. Le tableau ci-après présente les calculs réalisés et les valeurs retenues.

Tableau 29 : Détermination du temps de base et du temps de montée à partir d'abaques

Paramètre (min)	Formule appliquée	Valeur de $T_{b10}$ et $T_m$ en fonction de $I_g$ lue sur les abaques	Résultat
Temps de base	$T_{b10} = 1230 + \frac{(550-1230)(1,23-3)}{(7-3)}$	$I_g = 3 : T_{b10} = 1230$ $I_g = 7 : T_{b10} = 550$	1530,90
Temps de montée	$T_m = 440 + \frac{(160-440)(1,23-3)}{7-3}$	$I_g = 3 : T_m = 440$ $I_g = 7 : T_m = 160$	563,90

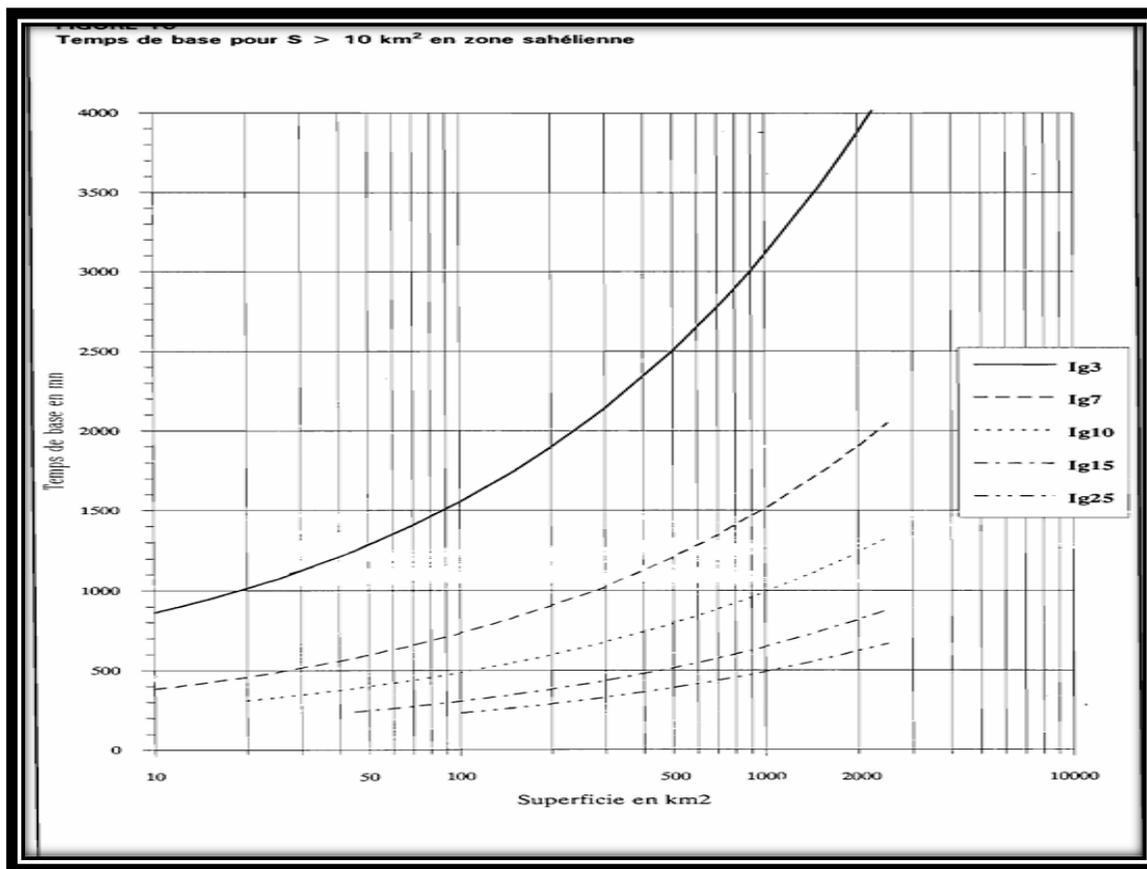


Figure 14 : Abaque du temps de base décennal

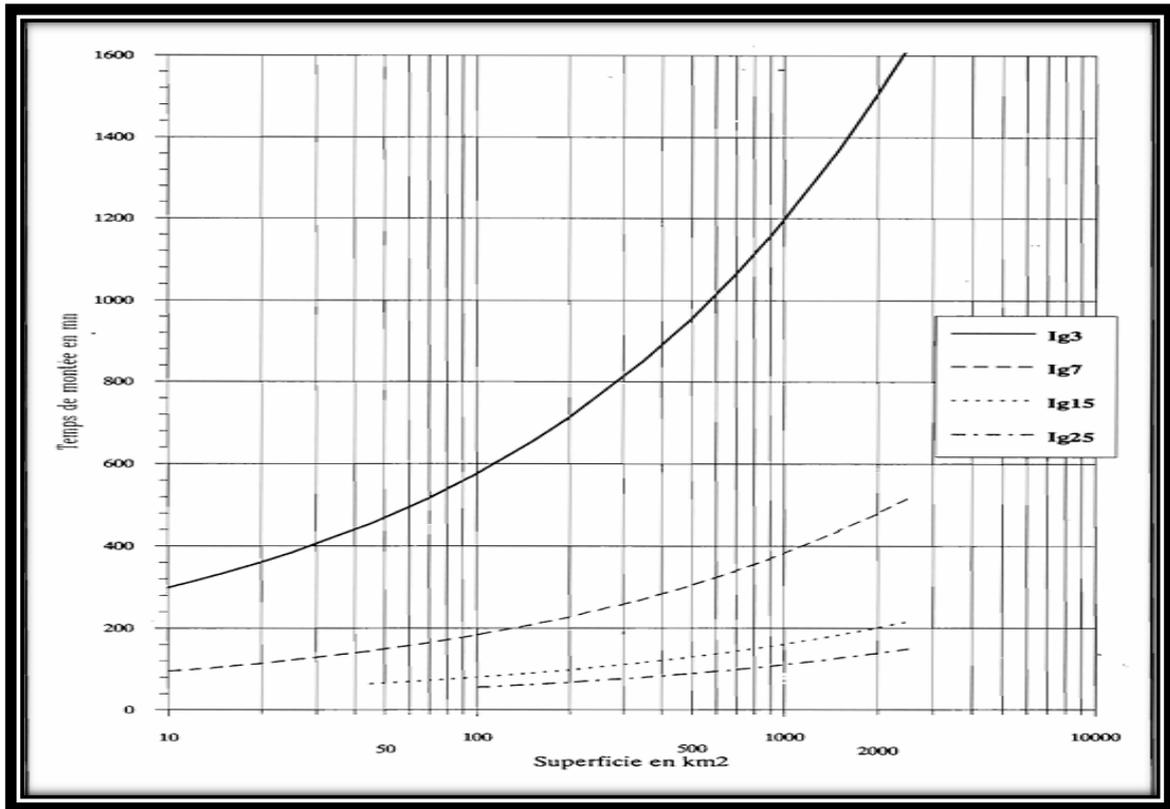


Figure 15 : Abaque de détermination du temps de montée

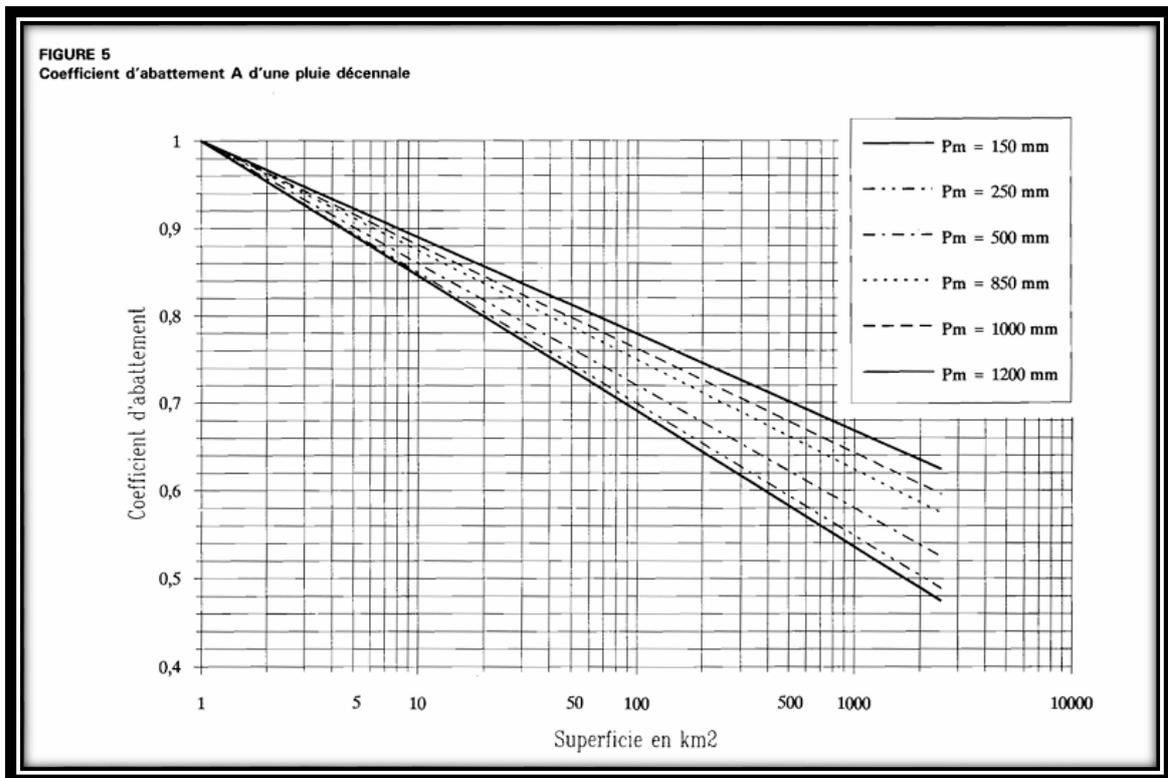


Figure 16 : Abaque du coefficient d'abattement d'une pluie décennal

Tableau 30 : Tableau des coefficients CIEH

Coefficients de l'équation 4.1										
N°	Description	Echantillon n	Corrélation		Constante a	Exposants des paramètres de l'équation 4.1				
			r <sup>2</sup>	r		S	Ig	Pan	PM10	Kr10
<b>DECOUPAGE CLIMATIQUE SANS KR10</b>										
avec S et Ig										
1	0-400 mm	71	0.760	0.874	2.83	0.624	0.491			
2	400-800 mm	128	0.570	0.755	2.03	0.590	0.588			
3	1200-1600 mm	87	0.579	0.761	1.33	0.596	0.457			
avec S, Ig et Dd										
4	0-400 mm	33	0.629	0.793	-2.43	0.583	0.506			0.320
5	400-800 mm	69	0.598	0.773	1.83	0.620	0.618			0.121
6	800-1200 mm	87	0.591	0.769	2.01	0.649	0.066			0.824
<b>DECOUPAGE CLIMATIQUE AVEC KR10</b>										
avec S et Kr10										
7	0-400 mm	66	0.758	0.870	0.553	0.655				0.802
8	400-800 mm	116	0.736	0.858	0.461	0.540				0.941
avec S, Ig et Kr10										
9	0-400 mm	65	0.847	0.920	0.167	0.745	0.731			0.475
10	400-800 mm	116	0.806	0.898	0.0833	0.696	0.953			0.534
<b>DECOUPAGE POUR LA ZONE Pan &lt; 1000 mm</b>										
Tous les bassins										
11	S, Kr10	180	0.716	0.846	0.410	0.524				0.982
12	S, Ig, Kr10	176	0.795	0.892	0.095	0.643	0.406			1.038
Longitude < 10° Ouest (seulement au Sénégal et en Mauritanie)										
13	S, Ig	21	0.569	0.754	1.78	0.557	0.805			
14	S, Ig, PM10	21	0.581	0.762	55.0	0.462	0.667		-0.652	
15	S, Ig, Kr10	20	0.722	0.850	0.224	0.540	0.622			0.767
16	S, Kr10	20	0.645	0.803	0.661	0.375				0.910
Longitude comprise entre 10° Ouest et 10° Est										
17	S, Kr10, PM10	117	0.764	0.874	30.2	0.492				-0.972
18	S, Ig, Kr10	117	0.788	0.888	0.0678	0.661	0.412			1.105
Longitude supérieure à 10° Est (seulement au Tchad et au nord Cameroun)										
19	S, PM10	46	0.646	0.804	0.00372	0.605				1.778
20	S, Ig	45	0.645	0.803	2.72	0.626	0.360			
21	S, Ig, PM10	45	0.679	0.824	0.00638	0.694	0.305			1.411
22	S, Kr10	39	0.77	0.877	0.610	0.523				0.908
23	S, Ig, Kr10	39	0.821	0.906	0.134	0.678	0.374			0.940
24	S, PM10, Kr10	39	0.805	0.897	0.00243	0.608				1.263
<b>DECOUPAGE PAR PAYS OU GROUPES DE PAYS</b>										
Afrique de l'Ouest (de 10°E à 10°W)										
25	S, KR10	295	0.628	0.792	1.41	0.542				0.511
26	S, Kr10, PM10	295	0.654	0.809	146	0.479			-0.969	0.457
27	S, Kr10, Ig	288	0.650	0.806	0.560	0.619	0.279			0.510
Afrique centrale										
28	S, KR10	50	0.738	0.859	0.521	0.625				0.876
29	S, Kr10, Ig, PM10	49	0.815	0.903	893	0.773	0.567			-2.051
30	S, Kr10, Ig	49	0.778	0.882	0.109	0.771	0.419			0.887
Sénégal + Mauritanie										
31	S, PM10	40	0.563	0.750	5450000	0.215				-2.830
32	S, Kr10	35	0.843	0.918	0.288	0.405				1.117
33	S, Kr10, Ig	35	0.851	0.922	0.195	0.471	0.239			1.046
Côte d'Ivoire										
34	S	37	0.713	0.844	4.83	0.562				
35	S, Ig	34	0.729	0.854	2.29	0.651	0.216			
36	S, PM10	36	0.706	0.840	0.000174	0.645				2.149
37	S, Kr10	31	0.791	0.889	0.380	0.586				0.805
38	S, Kr10, Ig	28	0.787	0.887	0.275	0.618	0.099			0.798
Burkina Faso										
39	S, Kr10	61	0.818	0.904	0.410	0.425				0.923
40	S, Kr10, Ig	60	0.824	0.908	0.254	0.462	0.101			0.976
Burkina Faso + Mali + Niger										
41	S, Kr10	137	0.688	0.829	0.407	0.532				0.941
42	S, Kr10, Ig	133	0.755	0.869	0.0912	0.643	0.399			1.019
43	S, A*P10	133	0.589	0.767	35600	0.342				
44	S, Kr10, PM10	133	0.757	0.870	203	0.459				-1.808
45	S, Ig, PM10	130	0.592	0.769	22400	0.363	0.059			-1.748
Tchad + Nord Cameroun (Pan < 1000 mm)										
46	S, Ig	55	0.638	0.799	1.28	0.412	0.739			
47	S, Kr10	49	0.838	0.915	0.525	0.530				0.950
48	S, Kr10, Ig	48	0.884	0.940	0.105	0.709	0.432			0.949

Les coefficients ci-dessus sont utilisés dans les équations empirique de régressions linéaire de la méthode CIEH pour estimer le débit de projet.

## ANNEXE IV : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DE LA DIGUE

### ➤ Détermination du débit de fuite

Dans le cadre de cette étude, la digue homogène en terre sera dotée d'un drain vertical afin de limiter la surpression en pied d'ouvrage et de contrôler les écoulements souterrains. L'évaluation des fuites s'appuiera sur la modélisation de Kozeny, représentée par une parabole de la forme  $y^2 = ax + b$ .

A partir de cette équation, on détermine la hauteur  $y_0$  qui est le point d'intersection entre l'axe verticale et la parabole de KOZENI  $y^2 = 2y_0x + y_0^2$  avec  $y_0 = \sqrt{H_f^2 + d^2} - d$

$$d = l_f - 0,7b - l_a ; l_a = \frac{1}{2}l_f ; d = 15,63 - 0,7 \times \frac{2,5}{\tan 26,56} - \frac{15,63}{2} ; d = 4,32 \text{ m}$$

$$\text{Ainsi, } y_0 = \sqrt{2,5^2 + 4,32^2} - 4,32 ; y_0 = 0,67 \text{ m}$$

Nous pouvons maintenant estimer le débit de fuite à l'aide de la loi de DARCY

$$Q = K_r \times y_0 \quad Q = 10^9 \times 0,67 \quad Q = 7.10^{-10} \text{ m}^3/\text{s/ml}$$

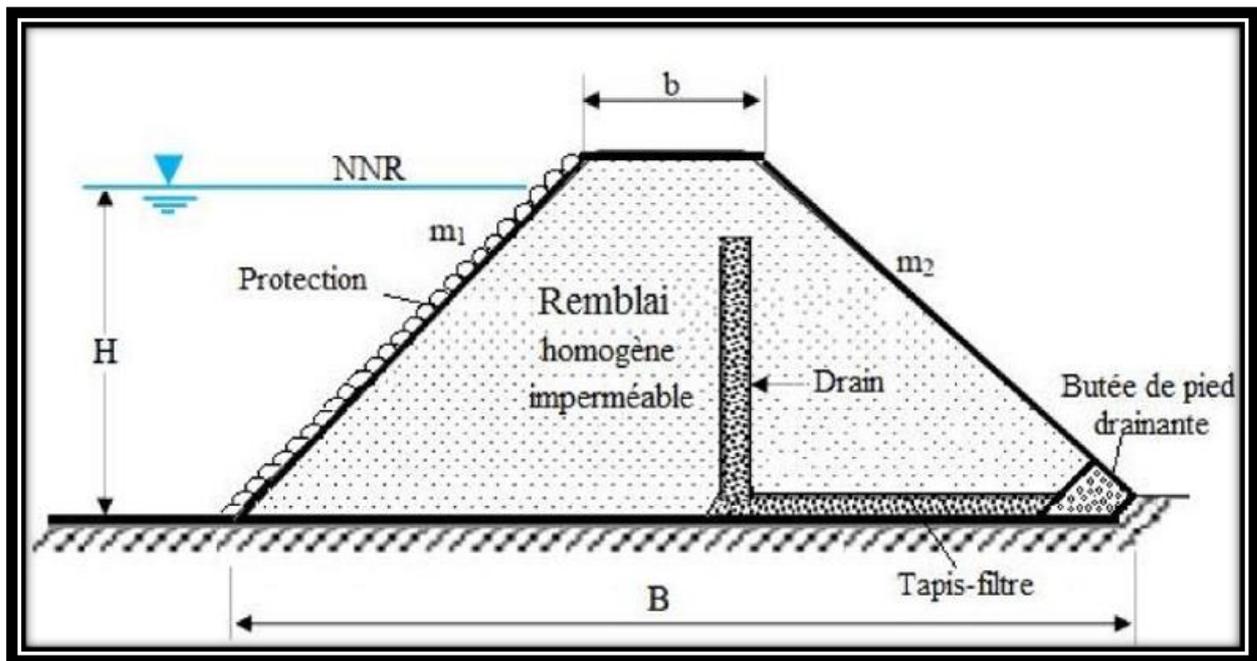


Figure 17 : digue homogène en terre équipée d'un drain vertical

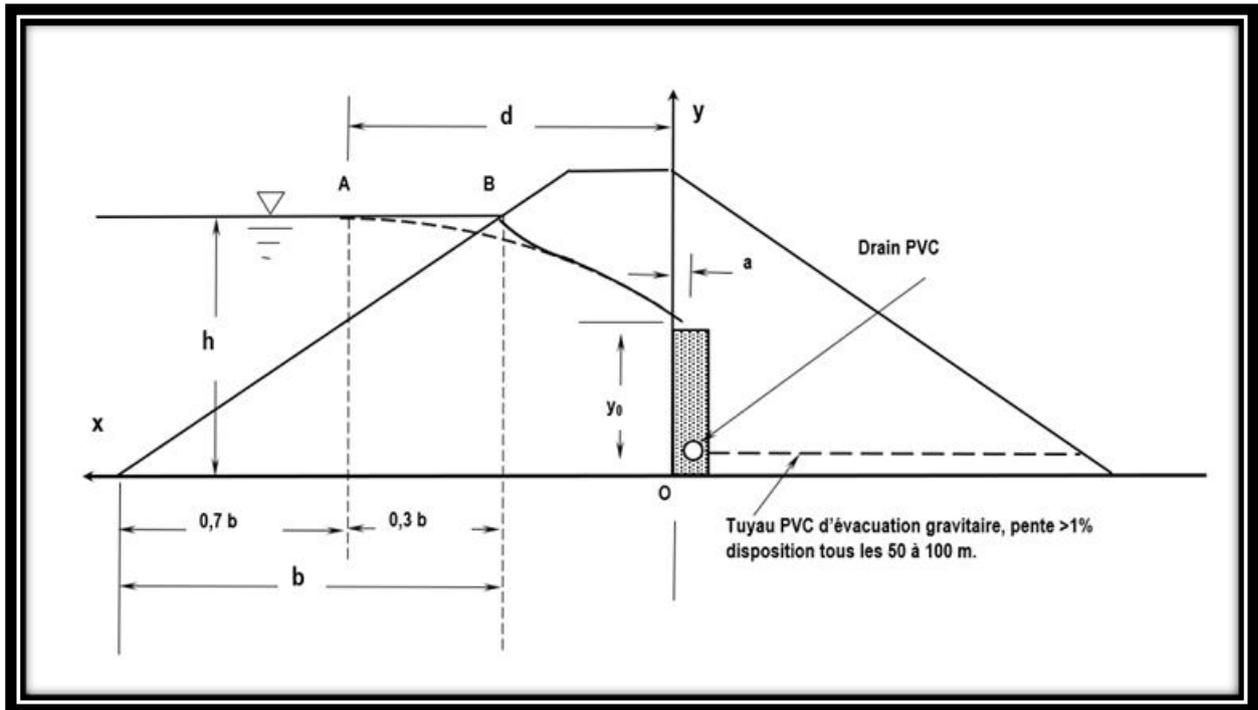


Figure 18 : Parabole de KOZENY

## ANNEXE V : CONCEPTION DU DEVERSOIR

### V.1 Laminage de crue par la méthode du coefficient X0 ou méthode EIER-CIEH

Tableau 31: Effet du laminage de crue (méthode du coefficient X0)

Application du laminage de crue (méthode du coefficient X0)				
Li	X0	Log(X0)	Béta %	Qe (m <sup>3</sup> /s)
226,45	6,08	0,78	0,75	183,02
216,45	5,55	0,74	0,74	180,57
206,45	5,05	0,7	0,73	178,13
<b>196,45</b>	4,57	0,66	0,72	<b>175,69</b>
186,45	4,12	0,61	0,72	175,69
176,45	3,69	0,57	0,72	175,69

Tableau 32: Paramètres d'entrée de la méthode EIER-CIEH pour le laminage de crue

Paramètre d'entrée du laminage de crue	
Surface du plan d'eau	4488810,67 m <sup>2</sup>
Coefficient de débit m	0,34
Pesanteur g	9,81 m.s <sup>-2</sup>
Longueur déversoir	226,45 m
Débit du projet Q <sub>100</sub>	244,02 m <sup>3</sup> /s
T <sub>m</sub>	338334 s

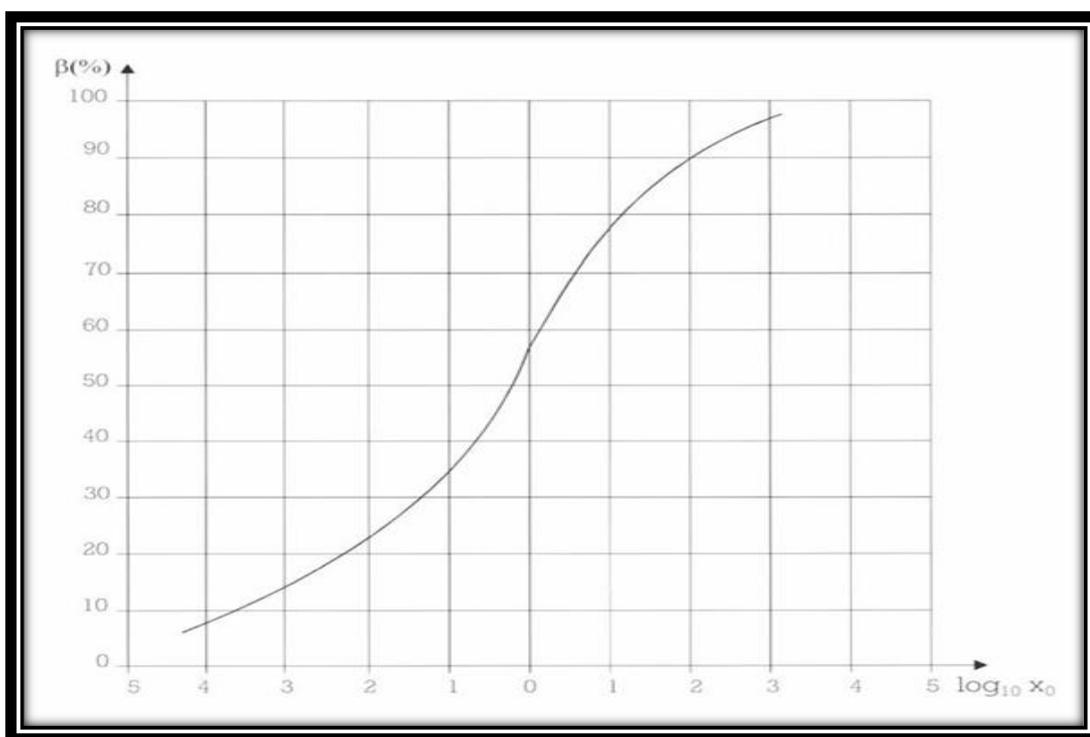


Figure 19 : Abaque de détermination du coefficient de laminage  $\beta$

## V.2 Evaluation des charges

Tableau 33 : Classification des charges agissant sur le déversoir

Charge	Effet	Type
Poids propre (W)	Stabilise	Favorable
Poussée hydrostatique externe	Pousse vers l'aval	Défavorable
Poussée des terres (Pt)	Pousse vers l'aval	Défavorable
Pression hydrostatique interne (U)	Soulève l'ouvrage	Défavorable

### - Le poids propre du déversoir

$$W = \gamma_b \times S ; \text{ Avec } S = H_r(b_1 + \frac{1}{2} H_r \times \tan \alpha)$$

$$W = 24 \times H_r + 12 \times H_r^2 \times \tan \alpha$$

### - La poussée hydrostatique externe $P_e$

$$P_e = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times H_r^2 + \gamma_w \times H_r \times h$$

$$P_e = 5 \times H_r^2 + 8 \times H_r \quad \longrightarrow \quad P_e = 51,25 \text{ KN/m}$$

### - La pression hydrostatique interne (U)

$$U = \left( \frac{U_A + U_B}{2} \right) \times b_2 ; \quad \text{Larguer à la base } b_2 = 1,5 + H_r \times \tan \alpha ;$$

$$\text{Pression aval : } U_B = \gamma_w \times h = 10 \times 0,8 = 8 \text{ KN}$$

$$U_A = \gamma_w \left[ h + \frac{2}{3} (H_r - h) \right] = 10 \times \left[ 0,8 + \frac{2}{3} (H_r - 0,8) \right] = \frac{8}{3} + \frac{20}{3} H_r$$

$$\text{Ainsi : } U = \left( \frac{16}{3} + \frac{10}{3} H_r \right) \times (1,5 + H_r \times \tan \alpha)$$

$$U = 3,33 \times H_r^2 \times \tan \alpha + 5H_r + 5,33H_r \times \tan \alpha + 8$$

### - La poussée des terres (Pt)

$$P_t = \frac{1}{2} \times \gamma_{séd} \times h_{séd}^2 \times \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \longrightarrow \quad P_t = 7,43 \text{ KN/m}$$

### V.3 Etude de la stabilité

#### V.3.1 Stabilités de sécurités externes

Les conditions de stabilités de sécurités externes sont vérifiées si :  $F_g \geq 1,2$  et  $F_r \geq 1,5$

✓ **Stabilité de sécurité au non-glissement**  $F_g = \frac{(W-U) \times \tan \varphi}{P_e + P_t} \geq 1,2$

$$W - U = 24H_r + 12 \times H_r^2 \times \tan \alpha - (3,33 \times H_r^2 \times \tan \alpha + 5H_r + 5,33H_r \times \tan \alpha + 8)$$

En remplaçant  $H_r$  par sa valeur on aboutit à :  $W - U = 26,37 + 40,86 \times \tan \alpha$

Sachant que :  $P_e + P_t = 51,25 + 7,43 = 58,68 \text{ KN/m}$  et  $\tan \varphi = 0,65$

La condition est satisfaisante si :  $F_g = \frac{17,14 + 26,56 \times \tan \alpha}{58,68} \geq 1,2$  ce qui implique

$$\alpha_g \geq \tan^{-1}(2,01)$$

La stabilité au glissement est garantie si l'angle d'inclinaison  $\alpha_g$  est supérieur ou égal à  $63,7^\circ$

✓ **Stabilité de sécurité au non-renversement**  $F_r = \frac{\sum m/B (W-U) \times \tan \varphi}{\sum m/B (P_e + P_t)} \geq 1,5$

$$m/B (W) = W \times (b_2 - X_{gouv}) \quad \left\{ \begin{array}{l} X_{gouv} = \frac{\sum X_{Gi} \times S_i}{\sum S_i} \\ b_2 = b_1 \times H_r \times \tan \alpha \end{array} \right.$$

$$X_{gouv} = \frac{\frac{1}{2}b_1(b_1 \times H_r) + (b_1 + \frac{1}{3}H_r \times \tan \alpha) \times \frac{1}{2} \times 1H_r^2 \times \tan \alpha}{b_1 \times H_r + \frac{1H_r^2 \times \tan \alpha}{2}}$$

$$m/B (W) = 24H_r + 12H_r^2 \tan \alpha \times \frac{3 + 6H_r \tan \alpha + 2H_r^2 \tan^2 \alpha}{6 + 3H_r \tan \alpha}$$

$$m/B (W) = 4H_r(3 + 6H_r \tan \alpha + 2H_r^2 \tan^2 \alpha)$$

$$m/B (P_t) = \frac{1}{3} \times h_{séd} \times P_t = \frac{1}{3} \times 1,5 \times 7,45 \quad \longrightarrow \quad m/B (P_t) = 3,71 \text{ KN/m}$$

$$m/B (P_e) = \left( \frac{1}{2} H_r \times P_{e1} \right) + \left( \frac{1}{3} H_r \times P_{e2} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} P_{e1} = \gamma_w + H_r \times h = 8H_r \\ P_{e2} = \frac{1}{2} \times \gamma_w \times H_r^2 = 5H_r^2 \end{array} \right.$$

$$m/B (P_e) = \frac{5}{3} H_r^3 + 4H_r^2$$

$$m/B (U) = \left( \frac{b_2}{2} U_1 \right) + \left( \frac{2b_2}{3} U_2 \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} U_1 = U_B \times b_2 = 8 b_2 \\ U_2 = b_2 (U_A - U_B) = b_2 \left[ \left( \frac{8}{3} + \frac{20}{3} H_r \right) - 8 \right] = \frac{20}{3} H_r - \frac{16}{3} \end{array} \right.$$

$$m/B (U) = \left( \frac{b_2^2}{2} U_B \right) + \left( \frac{2}{3} \times b_2^2 \times (U_A - U_B) \right)$$

- **Stabilités de sécurité interne**

Les conditions de stabilités de sécurités internes sont vérifiées si :

#### Stabilité de sécurité à la non-fissuration

$$e \leq \frac{b_2}{6}$$

**Stabilité de sécurité de non-rupture**

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{béton}$$

$$\sigma_{lim\ béton} = 0,3 \times f_{c28}$$

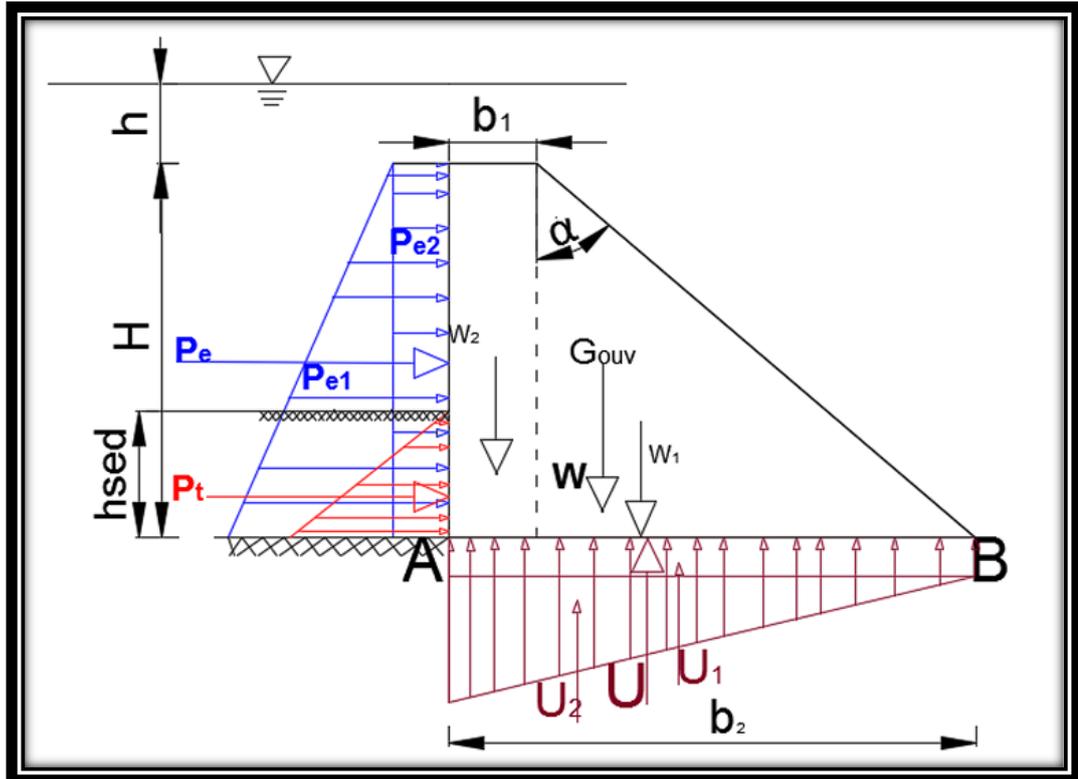


Figure 20 : Matérialisation des forces qui agissent sur le déversoir

**ANNEXE VI : DIMENSIONNEMENT DU BASSIN DE DISSIPATION**

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des paramètres techniques du dimensionnement du bassin, répartis en trois sous-parties : les paramètres hydrauliques, les dimensions géométriques du bassin et les paramètres du chenal d'évacuation.

Tableau 34 : Paramètres techniques du bassin de dissipation et du chenal d'évacuation

Conception et du dimensionnement du bassin de dissipation	
Paramètres hydrauliques du bassin de dissipation	
Paramètre	Valeur
Tirant d'eau à l'entrée y1 (itération)	0,155 m

<b>Conception et du dimensionnement du bassin de dissipation</b>	
Tirant d'eau critique $y_c$	0,540 m
Tirant d'eau normal $y_n$ (itération)	0,453 m
Vitesse à l'entrée du réseaut V	7,60 m/s
Nombre de Froude Fr	6,16
Tirant d'eau à la sortie $y_2$	1,275 m
Rapport des tirants $y_2/y_1$	8,23
Vitesse du fluide en sortie (aval) $V_o$	1,55 m/s
Hauteur de la ligne d'eau $H_e$	0,92 m
Hauteur de chute totale H	4,42 m
<b>Paramètres géométriques du bassin de dissipation</b>	
Hauteur du déversoir $H_o$	2,50 m
Rapport $y_n/H_o$	0,18
Rapport $h/H_o$	0,32
Rapport $D/H_o$	0,32
Enfoncement calculé D	0,80 m
Enfoncement retenu D	1,00 m
Longueur du bassin $L_b$	3,25 m
<b>Chenal d'évacuation</b>	
Débit max	175,69 m <sup>3</sup> /s
Largeur en plafond b	196,45 m
Coefficient de rugosité (Manning-Strickler) $K_s$	70
Pente longitudinale i	0,20 %
Fruit de berge m	1
Profondeur	0,55 m

Dans le cas d'un déversoir-poids, comme celui envisagé dans ce projet, et pour des rapports  $h/H_o$  compris entre 0,05 et 0,7, ainsi que des valeurs de  $y_n/H_o$  allant de 0,1 à 0,8, la détermination du paramètre D peut se faire à l'aide de l'abaque ci dessous proposé par J. M. Durand, et al. (1999) dans leur ouvrage de référence sur les petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale.

équatoriale.

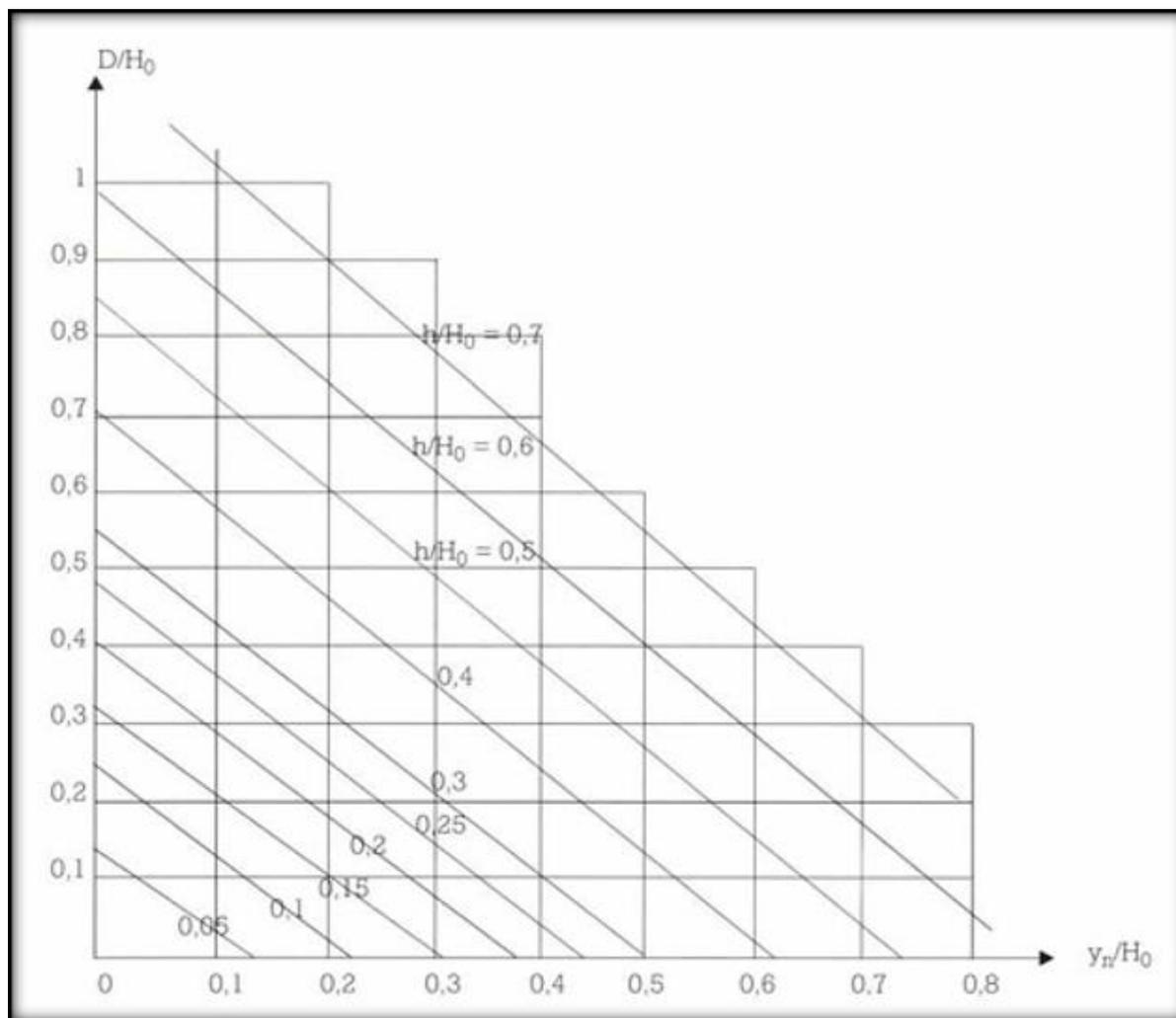


Figure 21 : Abaque de détermination de l'enfoncement du bassin de dissipation



## ANNEXE VII : NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL / PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL

### ➤ Identification des principaux impacts par phase

Le tableau ci-dessous synthétise les interactions entre les activités du projet et les composantes environnementales et sociales concernées. Chaque ligne associe un type d'action à ses effets potentiels sur l'air, l'eau, le sol, la biodiversité, les conditions de vie, la santé, la sécurité ou encore l'emploi local.

Tableau 35 : Les principaux impacts par phase

Phase du projet	Activités	Milieu biophysique					Milieu humain			
		Air	Eau	Sol	Faune	Flore	Social	Santé	Emploi	Sécurité
Préparatoire	Reconnaissance du site	0	0	0	0	0	+	0	+	0
	Enquêtes sociales et environnementales	0	0	0	0	0	+	+	+	+
	Sensibilisation et concertation	0	0	0	0	0	++	+	+	+
De travaux	Débroussaillage et décaissement	-	0	-	-	-	+	-	+	0
	Abattage d'arbres	-	0	-	-	--	-	-	+	-
	Terrassements / construction digue	0	+	-	-	-	0	-	+	0
	Mise en place des ouvrages	0	+	-	-	-	+	0	+	0
	Circulation des engins / bruit	-	0	-	-	-	-	-	+	-
	Rejet de poussières	-	0	-	0	0	-	-	0	-
	Travaux de relocalisation	0	0	0	0	-	++	+	++	+
Post-projet	Suivi des ouvrages	+	+	+	+	+	+	+	+	

Entretien / maintenance	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Restauration écologique	+	+	+	+	++	+	+	+	+
Réinstallation et accompagnement social	0	0	0	0	0	++	+	++	+

**Légende :** ++ fort impact positif / + positif / 0 neutre

-- fort impact négatif / - négatif /

### ➤ Appréciation de l'importance des impacts

Les impacts identifiés ont été analysés selon une grille combinant leur nature (positive ou négative), leur intensité, leur portée spatiale, leur durée dans le temps et leur réversibilité. Cette lecture systémique permet de hiérarchiser les enjeux prioritaires.

Tableau 36 : Appréciation de l'importance des impacts par la matrice de FECTEAU

Impact potentiel	Nature	Intensité	Portée	Durée	Importance
Débroussaillage / décaissement	Négative	Moyenne	Locale	Courte	Modérée
Abattage d'arbres	Négative	Forte	Locale	Moyenne	Élevée
Terrassements	Mixte	Moyenne	Locale	Moyenne	Modérée
Travaux de relocalisation	Positive	Forte	Globale	Moyenne	Élevée
Circulation des engins	Négative	Moyenne	Locale	Courte	Moyenne
Poussières et bruit	Négative	Moyenne	Locale	Courte	Modérée
Entretien des ouvrages	Positive	Forte	Locale	Longue	Élevée
Restauration écologique	Positive	Forte	Locale	Longue	Élevée
Relocalisation accompagnée	Positive	Forte	Globale	Longue	Majeure

### ➤ Analyse des risques spécifiques

Une lecture par les risques environnementaux et sociaux permet de mettre en lumière certaines vulnérabilités à surveiller, notamment durant la phase de mise en œuvre.

Tableau 37 : Evaluation des risques par la matrice LEOPOLD

Source de danger	Composante affectée	Risque	Gravité	Probabilité	Niveau de risque
Circulation engins	Populations et animaux	Accident	Grave	Probable	Moyen
Travaux de terrassement	Sol / écosystème	Dégradation / érosion	Moyenne	Probable	Moyen
Relocalisation mal planifiée	Populations	Conflits, tensions sociales	Élevée	Moyenne	Élevé
Non-entretien des bassins	Eau / santé animale	Contamination, maladies	Très grave	Probable	Élevé
Défaut de structure de la digue	Population / biens	Inondation brutale	Très grave	Probable	Majeur

#### ➤ Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES)

Le PGES présente les mesures d'atténuation, de compensation et de bonification environnementales et sociales envisagées dans le cadre du projet. Il couvre l'ensemble des milieux impactés par les ouvrages (digues, bassins, déversoirs) ainsi que les effets induits par la relocalisation partielle des populations. Les mesures sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Total estimé : 25 000 000 FCFA**

Milieu récepteur	Impacts potentiels	Mesures proposées	Acteurs de mise en œuvre	Suivi	Calendrier	Indicateurs de suivi	Coût estimé (FCFA)
<b>Air / Microclimat</b>	Émissions de poussières et gaz (CO <sub>2</sub> )	Arrosage des voies, contrôle technique régulier des engins	Entreprise, Mairie	MDC, comité local	Pendant les travaux	Poussière maîtrisée, engins fonctionnels	1 000 000
<b>Sols</b>	Pollution par hydrocarbures, compactage, érosion	Plan de gestion des déchets, remise en état des carrières	Entreprise	MDC, DPEA	Pendant les travaux	Sites réhabilités, déchets évacués	1 500 000
<b>Eaux de surface / souterraines</b>	Pollution par ruissellement, hydrocarbures	Collecte des eaux usées, comités de gestion, protection des berges	Entreprise, CGB, Mairie	MDC, CGB	Avant, pendant et après	Comité actif, périmètre protégé	3 000 000
<b>Végétation</b>	Destruction du couvert végétal,	Reboisement compensatoire, plantations	Entreprise, riverains	MDC, DPEEVCC	Pendant et post-travaux	Taux de reboisement atteint	2 000 000

	plantes envahissantes	autour des bassins					
<b>Faune / Animaux</b>	Risques de collision, perturbation de la faune	Limitation de vitesse, sensibilisation, interdiction de braconnage	Entreprise, services des eaux et forêts	MDC, DPEEVCC	Pendant les travaux	Nombre d'incidents faible, faune protégée	1 200 000
<b>Foncier / habitat</b>	Inondation ou destruction de logements, perte de terrains	Plan de réinstallation avec compensation équitable et accompagnement social	Mairie, services domaniaux, entreprise	MDC, Mairie, comité de relogement	Avant et pendant les travaux	Populations relogées, parcelles attribuées	15 000 000
<b>Santé / Sécurité</b>	Nuisances, accidents, maladies hydriques	EPI, limitation de vitesse, balisage, arrosage, hygiène, zones interdites	Entreprise, district sanitaire	MDC, DPEEVCC, comité santé	Dès le début des travaux	Baisse d'accidents, présence de signalisation, EPI portés	3 500 000

<b>Population riveraine</b>	Conflits d'usage d'eau, noyade, VIH/SIDA	Comités de gestion, sensibilisations ciblées, sécurisation des berges	Mairie, ONG, district sanitaire	MDC, DPEEVCC, comités communautaires	Avant et pendant les travaux	PV de sensibilisation, comités fonctionnels	2 800 000
<b>Emploi local</b>	Chômage, exclusion des jeunes	Embauche locale, contrats avec entreprises locales, suivi de l'inclusion sociale	Mairie, entreprise	MDC, Mairie	Dès le début des travaux	% de main-d'œuvre locale, satisfaction sociale	1 800 000

Tableau 33 : Plan de Gestion Environnementale et Sociale (PGES)