



Contribution à la réalisation d'étude diagnostique pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central au Burkina Faso.

MASTER EN GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE
OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques (IRH)

Présenté et soutenu publiquement le, 04/07/2019 par
OUEDRAOGO W Marthe

Sous la direction de **Harouna KARAMBIRI** Professeur Titulaire

Sous l'encadrement de **Dial NIANG** Maître Assistant

Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA)

Sous l'encadrement externe de **M. Aley SAOUTO** Ingénieur du Génie Rural

Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Angelbert BIAOU

Membres et correcteurs : Dr Chaim Vivien DOTO

Mr Moussa FAYE

Promotion [2018/2019]

DEDICACE

Parce que mon parcours pour en arriver jusque-là a été rendu possible grâce à tout le soutien et l'amour reçu, parce que le souhait d'un avenir radieux leur tient à cœur,

Je dédie ce modeste travail,

A mon très cher père,

A ma très chère mère,

A mes chers frères, sœurs.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement de ce travail et de notre formation. Plus particulièrement à :

- L'ensemble du personnel et du corps professoral de 2iE pour tous les efforts et l'enseignement reçu ;
- Monsieur KARAMBIRI Harouna, mon directeur de mémoire pour son suivi et ses directives pour la consistance de ce mémoire ;
- Monsieur Dial NIANG, mon encadreur interne pour tous ces conseils et ses directives pour la rédaction de ce mémoire ;
- Monsieur Patrice O. GUISSOU, Directeur Général des Infrastructures Hydrauliques pour nous avoir reçu et facilité le déroulement du stage au sein de sa structure ;
- Monsieur SAOUTO Aley, mon maître de stage pour ses conseils, sa disponibilité et l'encadrement nécessaire dont j'ai bénéficié tout au long de ce stage ;
- A l'ensemble du personnel de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques pour l'accueil et le soutien témoignés à mon endroit ;
- Tous mes amis et camarades de 2iE.

Fiche synoptique du barrage

Tableau 1: Fiche synoptique du barrage

1. Localisation	<p>Région : Plateau Central Province : Ganzourgou Commune : Méguet Coordonnées : Latitude 12° 21' 10,4'' Nord Longitude 0° 42' 30'' Ouest</p>
2. Bassin versant	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie du bassin versant : 27 km² • Indice de compacité : 1,74 • Débit de crue centennale (m³/s) : 93,18 m³/s • Pluviométrie moyenne annuelle : 769 mm • Apport liquide en année moyenne : 1038150 m³ • Apport solide annuel : 4725,0017 m³/an
3. Retenue	<ul style="list-style-type: none"> • Cote Plan d'Eau Normale (PEN) : 295 m • Cote des PHE : 295,8 m • Volume de la Retenue Normale : 1036491 m³ • Surface du plan d'eau Normale : 87,62 ha
4. Digue	<p>Type : Remblai homogène Cote de la crête : 296,3 m Hauteur maximale : 4,1 m Longueur en crête (déversoir non compris) : 1193,18 m Largeur en crête : 3,5 m Pente talus amont : 2H/1V Pente talus aval : 2H/1V Volume de remblais : 15660 m³</p>
5. Evacuateur de crue	<ul style="list-style-type: none"> • Type : Poids • Cote de calage : 295 m

<ul style="list-style-type: none"> • Longueur : 70 m • Charge maximale sur le seuil : 0,8 m • Revanche sur les PHE : 0,5 m • Largeur bassin de dissipation : 3,5 m
--

Caractéristiques du barrage actuel

Tableau 2: Caractéristiques actuels du barrage

Caractéristiques du barrage actuel	
Type de l'ouvrage	Barrage homogène en terre
Côte de calage de la digue	295,2 m
Hauteur maximale de la digue	3 m
Longueur de la digue	794,51 m
Largeur en crête	3 à 4,5 m
Déversoir	Latérale en rive gauche, seuil en béton cyclopéen
Côte de calage du déversoir	294,11 m
Longueur du déversoir	100 m
Largeur du déversoir	0,5 m

RÉSUMÉ

Cette étude réalisée au plateau central au niveau de la commune de Méguet au Burkina Faso avait pour objectif principal la contribution à l'amélioration de la sécurité alimentaire par la réhabilitation du barrage de Kabouda. En effet, plusieurs éléments de ce barrage connaissent une dégradation continue en ce sens que cet ouvrage hydraulique, construit en 2007 n'a pas été mis en place à partir d'études techniques. Dans un premier temps, destiné à un but agricole, ce barrage connaît beaucoup de défauts dans sa conception entraînant une destruction de la digue avec comme conséquence une réduction très importante de sa capacité de stockage. Pour corriger ce dysfonctionnement, cette étude a été initiée pour proposer des solutions de réhabilitation. La démarche adoptée a consisté d'abord à procéder à un diagnostic exhaustif du barrage pour évaluer l'ensemble des défauts de construction. Puis un redimensionnement a été proposé en vue de pérenniser l'aménagement en aval gage de l'atteinte de la sécurité alimentaire dans cette région. Les résultats montrent un barrage totalement détruit entraînant un stockage presque vide d'où l'absence d'eau pour conduire des activités agricoles au niveau de l'aménagement de 5 ha. La réhabilitation proposée a favorisé un rallongement de la digue avec la construction d'un ouvrage évacuateur de type seuil en béton cyclopéen à un déversoir poids trapézoïdal de 70 m. La côte de calage du nouveau déversoir devra être de 295 m avec une capacité au plan d'eau normal de 1036491 m^3 afin de répondre aux besoins et pertes en eau qui s'élèvent à 804548 m^3 . Un bassin de dissipation de 3,5 m de longueur et un chenal de 30 m ont été construits pour prévenir l'érosion régressive dans cet ouvrage hydraulique. Le coût total du projet de barrage s'élève à sept cent quatre-vingt-dix-sept millions trois cent huit mille quatre cent quatre-vingt-dix-huit (797 308 498) FCFA toutes taxes comprises.

Mots clés : Barrage, Digue, Evacuateur de crue, Périmètre irrigué, Burkina Faso

ABSTRACT

This study carried out at the “Plateau Central” in the commune of Meguet in Burkina Faso had for main purpose the contribution to improving food security through the rehabilitation of Kabouda’s dam. Indeed, several elements of this dam are experiencing a continuous degradation in this sense that this hydraulic structure built in 2007 was set up from technical studies. Initially intended for an agricultural purpose, this dam has many flaws in its design resulting in destruction of itself which consequence is a very significant reduction in its storage capacity. To correct this dysfunction, this study was initiated to propose rehabilitation solutions. The approach adopted consisted first of all in carrying out an exhaustive diagnosis of the dam to evaluate all the defects of construction. Then a resizing was proposed in life to perpetuate the irrigated perimeter downstream pledge of achieving food security in this region. The results show a completely destroyed dam resulting in almost empty storage, hence the absence of water to conduct agricultural activities for the 5 ha perimeter. So we proposed a rehabilitation and an extension of the dike and the passage of a cyclopean concrete threshold to a 70 m trapezoidal spillway. The shoreline of the new spillway shall be at the 295m shore with a capacity of 1036491 m^3 to meet the water needs in losses which are à 804548 m^3 . The spillway will be followed by an energy dissipation basin and a flow channel to prevent regressive erosion. The total cost of the dam’s project is equal to seven hundred and ninety seven million three hundred eight thousand and four hundred ninety eight (797 308 498) FCFA, all taxes include.

Key words: Dam, Dike, Spillway, Irrigated perimeter, Burkina Faso

LISTE DES ABREVIATIONS

2IE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AITB	: Associations des Ingénieurs et Techniciens en génie civil du Burkina
CAFI-B	: Compagnie Africaine d'Ingénierie-Burkina
CEMAGREF	: Centre national du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
CIEH	: Comité Inter africain d'Etudes Hydrauliques (fermé depuis 1995)
CILSS	: Comité Inter Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel
CNBB	: Comité National des Barrages du Burkina
DGIH	: Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques
FAO	: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GID	: Général de l'Ingénierie pour le développement /
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique Outre-mer
RGPH	: Recensement Général de la Population et de l'Habitation
PEN	: Plan d'Eau Normal
PGES	: Plan de Gestion Environnemental et Sociale
PHE	: Plus Hautes Eaux
PNDES	: Plan National de Développement Economique et Social

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Fiche synoptique du barrage	IV
Tableau 2: Caractéristiques actuels du barrage.....	V
Tableau 3: Evolution de la population de Kabouda de 2013 à 2018.....	5
Tableau 4: Equations pour calculer les caractéristiques physiques du bassin versant	9
Tableau 5: Effectif du cheptel par espèce	16
Tableau 6: Estimation de la revanche par l'approche simplifiée.....	20
Tableau 7: Caractéristiques du dimensionnement du bassin de dissipation.....	24
Tableau 8: Caractéristiques des matériaux.....	25
Tableau 9: Conditions de stabilité du déversoir poids	26
Tableau 10: Pré dimensionnement du mur bajoyer.....	27
Tableau 11: Equations des moments et forces stabilisants et renversants	28
Tableau 12: Dégradations du barrage, causes et conséquences	31
Tableau 13: Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant	37
Tableau 14: Valeurs caractéristiques des pluies journalières maximales et annuelles de Kabouda	38
Tableau 15: Paramètres de calcul des débits.....	39
Tableau 16: Valeurs des débits décennaux et centennal	39
Tableau 17: Apports liquides	40
Tableau 18: Valeurs des dépôts solides	41
Tableau 19: Résultats de la simulation numérique	42
Tableau 20: Valeurs de la revanche	44
Tableau 21: Dimension de la largeur en crête.....	44
Tableau 22: Autres paramètres de la digue	44
Tableau 23: Vérification de la stabilité du déversoir	45
Tableau 24: Paramètres du bassin de dissipation.....	46

Tableau 25: Caractéristiques des murs bajoyers	46
Tableau 26: Vérification de la stabilité externe des murs bajoyers	47
Tableau 27: Matrice de Leopold	50
Tableau 28: Matrice de Fecteau	50
Tableau 29: Liste des barrages nouvellement réalisés ou réhabilités entre 2016 et 2018.....	56
Tableau 30: Paramètres climatiques de la station de Ouagadougou	59
Tableau 31: Données pluviométriques.....	60
Tableau 32: Résultats obtenus pour la courbe hypsométrique.....	63
Tableau 33: Résultats des pentes transversales.....	65
Tableau 34: Valeurs du coefficient n	66
Tableau 35: La classification des reliefs selon l'ORSTOM	66
Tableau 36 : Ajustement des pluies annuelles	67
Tableau 37: Ajustement des pluies maximales journalières	68
Tableau 38: Paramètres de détermination de Kr100 pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente et de la classe d'infiltrabilité	70
Tableau 39: Paramètres de détermination de Kr70 pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente et de la classe d'infiltrabilité	70
Tableau 40: Tableau 8: Paramètres de détermination de Tb10 pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente.....	71
Tableau 41: Débits obtenus par la méthode CIEH.....	72
Tableau 42: Paramètres de l'hydrogramme de crue	73
Tableau 43: Estimation des pertes par infiltration	74
Tableau 44: Estimation des pertes par évaporation.....	75
Tableau 45: Besoins en eau de la population et du cheptel.....	75
Tableau 46: Besoins en eau de la tomate	75
Tableau 47: Revanche libre par l'approche simplifiée	77

Tableau 48: Fruits des selon le type et la hauteur du barrage	78
Tableau 49: Résultats du laminage de crues	80
Tableau 50: Plan de Gestion Environnemental et Social	86
Tableau 51: Devis estimatif et quantitatif	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la DGIH	3
Figure 2: Carte de situation du barrage de Kabouda.....	4
Figure 3: Carte de végétation de la commune de Méguet.....	6
Figure 4: Caractéristiques du bassin de dissipation	24
Figure 5: Caractéristiques et forces appliquées sur le mur bajoyer	27
Figure 6: Carte du bassin versant de Kabouda.....	37
Figure 7: Courbe hauteur volume	43
Figure 8: Courbe hypsométrique.....	64
Figure 9: Ajustement des pluies annuelles.....	68
Figure 10: Ajustement des pluies maximales journalières.....	69
Figure 11: Hydrogramme de crue	74
Figure 12: Courbe hauteur surface.....	76
Figure 13: Stabilité de la digue pour un facteur de sécurité de 2,963.....	79
Figure 14: Abaque de détermination des caractéristiques du bassin de dissipation.....	84

LISTE DES PHOTOS

Planche 1: Photos se rapportant à la digue.....	34
Planche 2: Photos se rapportant au déversoir naturel.....	35
Photo 1: Bac aval de l'ouvrage de prise noyé	36
Photo 2: Vue d'ensemble du périmètre irrigué.....	36

TABLE DES MATIERES

I. Introduction	1
1.1 Présentation de la structure d'accueil	2
1.2. Présentation de la zone d'étude.....	4
1.3. Présentation du projet	6
II. Matériels et Méthodes	8
2.1. Démarche méthodologique	8
2.2. Matériels	8
2.3. Méthodes.....	9
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS	30
3.1. Résultats du diagnostic du barrage de Kabouda	30
3.2.Etudes de base.....	37
3.2.5 Caractéristiques de l'ouvrage de prise	47
3.3. Notice d'impact environnemental.....	48
IV. Proposition de réhabilitation.....	48
4.1. Réhabilitation de la digue	48
4.2. Conception du déversoir poids et des ouvrages annexes	49
V. Notice d'impact environnemental.....	49
VII. RECOMMANDATIONS	52
VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
IX. ANNEXES.....	56
5.1. Annexe 1 : Acquis de la mise en œuvre du programme national des aménagements hydrauliques (PNAH) depuis 2016.....	56

5.2. Annexe 2 : Paramètres climatiques.....	59
5.3. Annexe 3 : Données pluviométriques.....	60
X. Annexe 4 : Note de calculs	63
6.1. Etudes hydrologiques.....	63
6.2. Vérification de la digue.....	76
6.3. Conception du déversoir	79
XI. Annexe 7 : Proposition de PGES.....	86
XII. Annexe 8 : Devis estimatif et quantitatif.....	87
XIII. Annexe 9 : Pièces dessinées.....	89
7.1. Profil en travers type de la digue	89
7.2. Infiltration dans la digue	90
7.3. Profil en travers du déversoir.....	91
7.4. Plan de ferrailage du mur bajoyer.....	92
7.5. Bilan d'application des forces sur le déversoir	93

I. Introduction

Le Burkina Faso, pays membre du Comité Inter-Etats de Lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS), connaît à l'instar des autres pays une dégradation de ses ressources naturelles due à la combinaison de la variabilité climatique et de l'action de l'Homme. Cette situation a tendance à impacter négativement l'économie de ces pays en ce sens que l'agriculture l'une des principales composantes du PIB devient peu compétitive. En effet, en raison de sa forte dépendance vis à vis des aléas climatiques, l'agriculture burkinabé demeure très peu développée, avec de fortes fluctuations de la production d'une année à l'autre, et la principale conséquence qui en résulte est la persistance d'une insécurité alimentaire récurrente pour la population. Ainsi pour corriger cette donne, ce pays comme les autres pays du CILSS a décidé en 1995 de mettre la question de l'autosuffisance alimentaire, et plus tard la sécurité alimentaire, une priorité nationale. Dès lors, les autorités du Burkina Faso se sont attelées à moderniser l'agriculture et la rendre plus productive et compétitive. Plusieurs mesures et programmes ont été mis en œuvre pour atteindre cet objectif, tels que l'aménagement des terres pour l'irrigation, l'introduction de la mécanisation et le recours aux semences sélectionnées et à l'utilisation des produits agrochimiques et autres intrants modernes, la mise en œuvre de plans sectoriels de développement des filières, l'organisation des circuits commerciaux et le développement des exportations agricoles. Dans ce cadre, face à une superficie agricole utile relativement limitée et à un contexte climatique difficile, l'irrigation a bénéficié d'une attention particulière des pouvoirs publics et a été placée au centre des actions visant le développement et la modernisation de l'agriculture. Son développement s'est fait dans le cadre d'une politique globale et intégrée de mobilisation et de valorisation des ressources en eau. Mais malheureusement, les eaux souterraines sont relativement limitées et ne permettent pas d'irriguer de grandes superficies.. Cette contrainte a mis en évidence de nombreux goulots d'étranglement qui limitent l'efficacité de la mise en valeur agricole de grandes superficies. Avec la récurrence élevée de plusieurs cycles de sécheresses, des stratégies faisant appel à la maîtrise de l'eau ont été élaborées dans le but d'améliorer la productivité agricole. Plusieurs types d'aménagements ont alors vu le jour, notamment les

aménagements de grandes plaines et la construction de nombreux barrages et périmètres associés, mais les résultats à ce jour restent mitigés avec des infrastructures insuffisamment valorisées et dont la gestion est largement déficiente.

Tirant les enseignements de ces insuffisances et des limites de ces différents types d'aménagements dans un contexte de pauvreté et face à la persistance des aléas climatiques et de la faible productivité de l'agriculture pluviale, le Gouvernement a décidé de revoir ses options et orientations et de définir une stratégie nationale durable de l'agriculture irriguée, sous tendue par la mise en place de grandes retenues. C'est dans ce contexte que le barrage de Kabouda dans la province du Ganzourgou, a été retenu pour cette étude avec comme thématique «*Contribution à la réalisation d'étude diagnostique et proposition de variante d'ouvrage d'évacuateur de crues pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central*».

Le présent rapport est structuré autour de 3 parties. Il s'agira dans un premier temps de procéder à un diagnostic sur les différents ouvrages du barrage, puis suivra en deuxième lieu une proposition de dimensionnement d'un évacuateur de crues. et enfin nous évaluerons le coût de l'ouvrage.

1.1 Présentation de la structure d'accueil

1.1.1. Dispositions générales

La Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) est l'un des services centraux du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA) dont le décret n°2016-342/PRES/PM/MEA du 04 mai 2016 régit les attributions, le fonctionnement et l'organisation. Le Directeur Général des infrastructures hydrauliques est responsable du programme national des aménagements hydrauliques qui fédère tous les projets et programmes du Ministère de l'eau et de l'assainissement intervenant dans la mobilisation et la valorisation des ressources en eau. Ce sont :

- Projet de mobilisation et de valorisation des eaux de surface dans la région du Plateau Central (PMVEC) ;

- Projet de valorisation et de réhabilitation des infrastructures connexes du barrage souterrain de Naré (PRV/BSN) ;
- Programme de développement intégré de la vallée de Samendeni (PDIS) ;
- Projet de réhabilitation de barrages et d'aménagement de périmètres irrigués et de bas-fonds dans les provinces du Boulkiemdé, du Ziro, du Sanguié et des Balés (PRBA) ;
- Projet de construction du barrage de Bambakari dans la commune de Tin-Akoff, province de l'Oudalan, région du Sahel, phase II (PCB-Bambakari) ;
- Projet de réhabilitation et de confortement du barrage de la Comoé (PRCB-Comoé) ;
- Projet d'aménagements hydrauliques multi-usages et multi-villages pour la contribution à l'atteinte de la sécurité alimentaire dans la commune rurale de Kourinion, province du Kéné Dougou, région des Hauts-Bassins au Burkina Faso (PRAMU)
- Programme Saaga.

Un chargé de projet veille à l'exécution et au suivi de la mise en œuvre des activités de chaque projet et rend compte au responsable du programme.

1.1.2. Organigramme de la DGIH

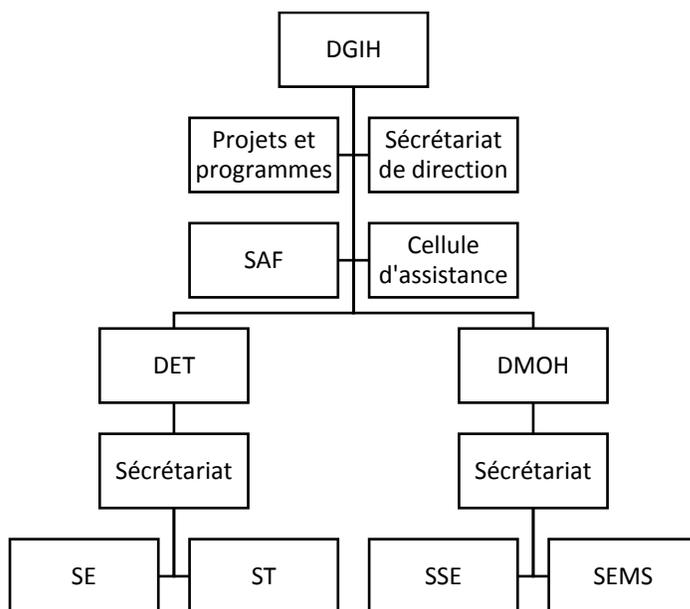


Figure 1 : Organigramme de la DGIH

1.2. Présentation de la zone d'étude

1.2.1. Localisation et accès au site

Le site du barrage de Kabouda se situe dans la commune rurale de Méguet dans la province du Ganzourgou au niveau de la région du Plateau Central. Les coordonnées géographiques de cet ouvrage sont 12°21'10,4" de latitude Nord et 0°42'30" de longitude Ouest. L'accès au site se fait à partir de la route nationale n°4 en direction de Zorgho (figure 2).

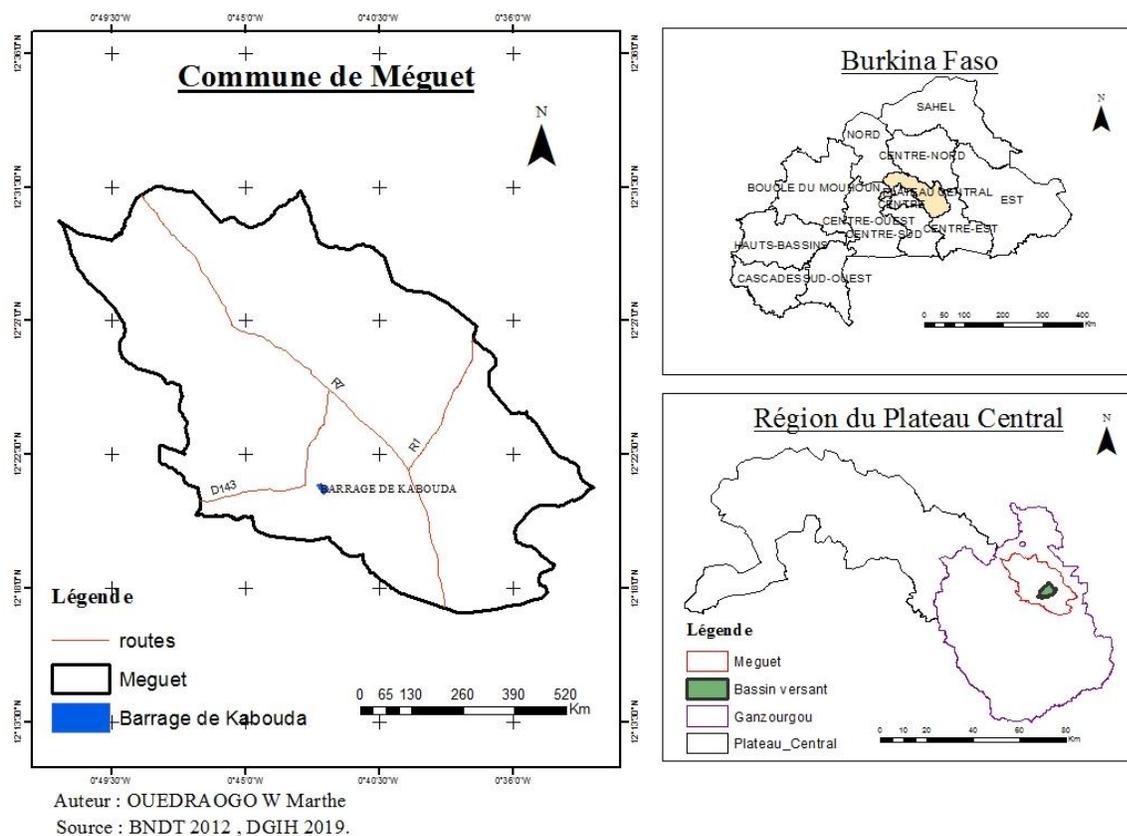


Figure 2: Carte de situation du barrage de Kabouda

1.2.2. Population

Au Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 2006, le village de Kabouda, avait une population totale de **1219** habitants et sa population serait passée en 2018 à 1831 habitants (tableau 3).

Tableau 3: Evolution de la population de Kabouda de 2013 à 2018

Village	2013	2014	2015	2016	2017	2018
KABOUDA	1546	1599	1654	1711	1770	1831

Source 1:RGPH, 2006.

La population est composée en majorité de mossis qui pratiquent des activités telles que l'agriculture et la pêche. Nous y rencontrons également des peulhs pratiquant essentiellement l'élevage.

1.2.3. Climat

Le climat de la zone d'étude est de type soudano-sahélien marqué par une longue saison sèche (d'Octobre en Mai) et une courte saison pluvieuse (de Juin à Septembre). La pluviométrie moyenne interannuelle de la zone d'étude est comprise entre 750 à 800 mm (1955-2010).

1.2.4. Relief et sol

La commune de Méguet est située sur une pénéplaine où se retrouvent des collines et des bas-fonds. On y rencontre trois types de sols : Les sols gravillonnaires, argileux et sablonneux.

- les sols gravillonnaires (Zinka) sont les plus répandus dans la commune. Leur valeur agronomique est très faible et ils sont généralement utilisés comme zones de pâturage. Mais avec la pression foncière, ils sont de plus en plus exploités pour l'agriculture ;
- les sols argileux (bollé) se rencontrent généralement dans les bas-fonds et les zones inondables. Ce sont les sols les plus fertiles de la commune.
- les sols sablonneux (Bisri), peu répandus par rapport aux deux premiers types de sols, sont peu fertiles

1.2.5. Végétation

La végétation de la commune de Méguet est de type savane arbustive (figure 3), mais on y rencontre des savanes arborées et des galeries forestières le long des cours d'eau et au niveau de certains lieux sacrés. Dans l'ensemble, la végétation est très dégradée.

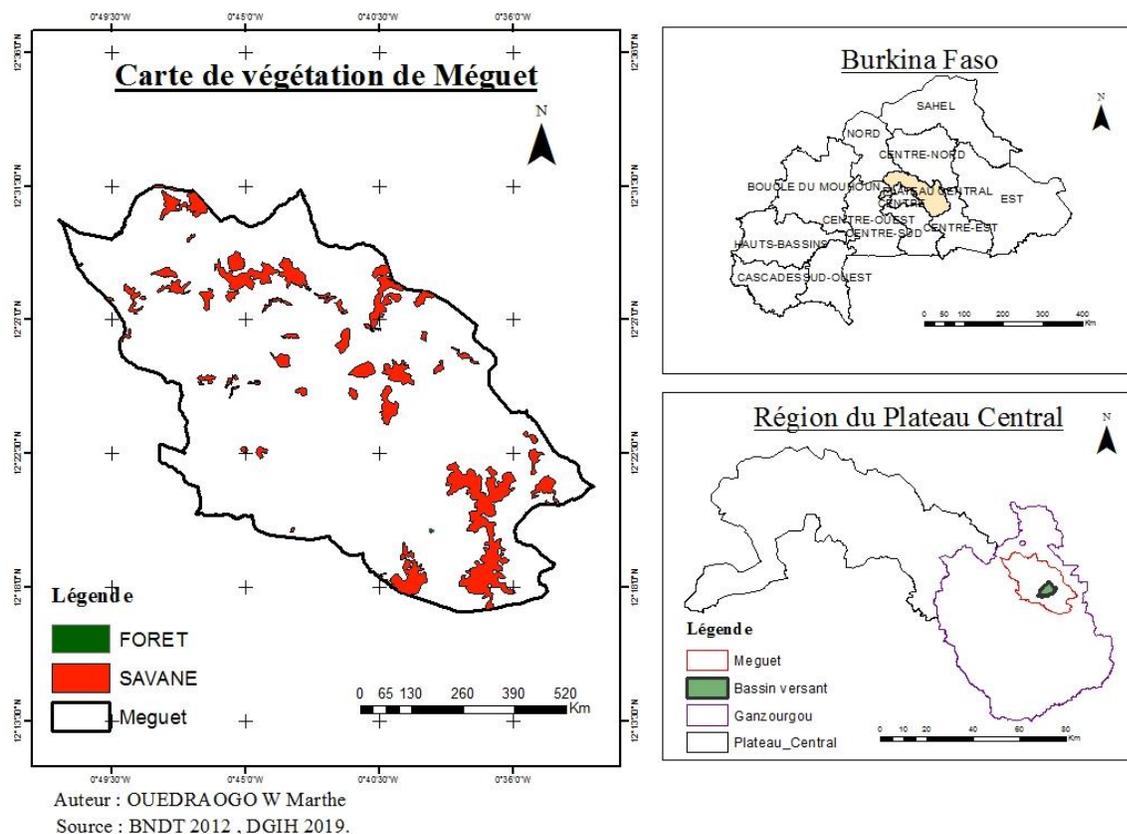


Figure 3: Carte de végétation de la commune de Méguet

1.3. Présentation du projet

1.3.1. Contexte et problématique

Kabouda est un village de la commune de Méguet dans la région du Plateau Central où l'agriculture et l'élevage constituent les principaux secteurs qui occupent les populations. Cependant, la variabilité climatique constitue un handicap pour le développement de ces deux secteurs. Partant de ce constat, l'Etat Burkinabè a mis en place une politique reposant sur la réalisation de petits barrages sur toute l'étendue du territoire national afin de permettre aux

populations riveraines de pratiquer l'agriculture de contre saison en complément de l'agriculture pluviale fragilisée par la récurrence des poches de sécheresses.

La commune de Méguet a, de ce fait, bénéficié du barrage de Kabouda réalisé en 2007 et qui devrait permettre d'améliorer les conditions de vie des populations en leur garantissant un accès à l'eau pour leurs différents besoins. Malheureusement, dès sa mise en eau en 2007, les fortes crues ont provoqué l'ouverture d'une brèche au droit de la digue avec comme conséquence la fragilisation du périmètre irrigué de 5 ha situé à l'aval. Mais en l'absence d'études pour évaluer au préalable les besoins réels en travaux de réhabilitation, les tentatives de remise en état de la digue du barrage par les populations sont restées vaines et l'ouvrage continue de se dégrader. Au regard de l'urgence, la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) en charge des questions de mobilisation des ressources en eau, notamment de surface, s'est vue obligée d'inscrire la réalisation des études de réhabilitation du barrage de Kabouda parmi ses priorités.

1.3.2. Objectifs de l'étude

L'objectif général de ce travail est la contribution à l'amélioration à la sécurité alimentaire par la réalisation d'une étude technique de faisabilité pour la réhabilitation du barrage de Kabouda. Il s'agira spécifiquement de :

- procéder à un diagnostic du barrage ;
- proposer des mesures de réhabilitation de la digue et des ouvrages annexes ;
- concevoir et dimensionner un nouvel évacuateur de crue;
- estimer les coûts de réhabilitation de l'ouvrage

II. Matériels et Méthodes

2.1. Démarche méthodologique

La démarche méthodologique retenue repose sur plusieurs axes :

2.1.1. Revue documentaire

Cette phase a consisté à rassembler et à consulter l'ensemble de la documentation et des informations relatives à la zone d'étude.

2.1.2. Collecte de données

Les données hydro climatiques (56 ans d'observation) utilisées proviennent de la station de Zorgho située à environ une quinzaine de kilomètres de la zone d'étude.

2.1.3. Proposition de réhabilitation du barrage

Cette étape consiste à procéder à un redimensionnement des ouvrages existants. Cette démarche servira à évaluer les dysfonctionnements et à proposer une réhabilitation sur cette base.

2.2. Matériels

Le matériel de travail employé a été diversifié en fonction des différentes opérations effectuées au cours de la conduite de cette étude. Le matériel est composé comme suit :

- **Global Positionning System (GPS) Garmin** : il a servi aux géo-référencements des entités géographiques ;
- **Fiches de visite**: Cette fiche nous a permis de collecter et noter les informations sur les dégradations de l'ouvrage ;
- **CROPWAT 8.0** : Cet outil développé par la FAO nous a servi pour connaître les paramètres climatiques de la station de Ouagadougou ;

- **Arcgis 10.4.1** : Il a été utilisé pour caractériser le bassin versant de Kabouda et aussi pour réaliser la cartographie de l'étude ;
- **Autocad 2013** : cet outil a été utilisé dans la conception d'une majorité de pièces graphiques de l'étude ;
- **Covadis 2007**: il a été utilisé pour faire l'analyse topographique du site d'études, les tracés de profils et les calculs de cubature ;
- **Package Microsoft office 2013** : il a été utilisé tout au long de l'étude pour faire des analyses de données, la conception du système, la production de pièces graphiques et la rédaction du rapport;
- **Ordinateur portable**: il a servi de support, d'interface et d'environnement de travail pour l'usage des autres logiciels.

2.3. Méthodes

2.3.1. Etudes hydrologiques

Paramètres physiques du bassin versant de Kabouda

Le **périmètre (P)**, la **superficie (S)** et la **pente transversale (It)** ont été obtenus à partir de ArcGis. Les autres caractéristiques du bassin versant ont été calculées à partir des équations mathématiques reportées au tableau 4.

Tableau 4: Equations pour calculer les caractéristiques physiques du bassin versant

Formules	Unités	Description
$I = \frac{0,026}{\sqrt{S}}$ <p><i>Equation 1</i></p>	<p>S la superficie du bassin en Km²</p> <p>I la pente longitudinale en ‰</p>	<p>elle est un indicateur du comportement des crues à travers les coefficients de ruissèlement selon que la pente est faible ou forte</p>

$K_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$ <p><i>Equation 2</i></p>	<p>S en km² P en km K_G Indice de compacité de Gravelius sans unité</p>	<p>Il renseigne sur la forme du bassin versant</p>
$L_{eq} = \frac{K_G * \sqrt{S}}{1,128} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G}\right)^2} \right]$ <p><i>Equation 3</i></p>	<p>L_{eq} la longueur du rectangle équivalent en km K_G sans unité S en km²</p>	<p>C'est la longueur d'un rectangle de même superficie, même indice et même distribution hypsométrique que le bassin versant. Sa valeur est généralement voisine de celle du cours d'eau.</p>
$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}}$ <p><i>Equation 4</i></p>	<p>I_g Indice global de pente en m/km L_{eq} en km H_{5%} altitude à un pourcentage de surface de 5% en m H_{95%} altitude à un pourcentage de surface de 95% en m</p>	<p>Il caractérise le relief du bassin versant.</p>
$I_{gcor} = \frac{(n - 1) * I_g + I_t}{n}$ <p><i>Equation 5</i></p>	<p>n : coefficient fonction de L_{eq} I_g Indice global de pente corrigée en m/km I_t en m/km</p>	<p>Se calcule lorsque le rapport de la différence entre les pentes transversale et longitudinale est supérieur à 20%.</p>

$D_s = I_g * \sqrt{S}$ <p><i>Equation 6</i></p>	<p>Ds Dénivelée spécifique en m Ig en m/km S en km²</p>	<p>Elle est fonction de l'indice global de pente et de la superficie du bassin versant. Elle est un indicateur de l'aspect du relief.</p>
$D_d = \frac{L_t}{S}$ <p><i>Equation 7</i></p>	<p>Lt longueur totale des cours d'eau en km S en km² Dd densité e drainage en km⁻¹</p>	<p>Elle se définit comme étant la longueur de réseau hydrographique par unité de surface.</p>

Débit de projet

L'absence de données sur les écoulements du bassin versant nous a permis d'utiliser les méthodes de l'ORSTOM et du CIEH pour déterminer le débit décennal avant de procéder à l'obtention du débit centennal (débit de projet) à travers la méthode du Gradex.

- **Méthode ORSTOM**

C'est une méthode dite déterministe reposant sur un modèle global pluie-débit basé sur la théorie de l'hydrogramme unitaire. Le bassin versant est considéré comme une entité homogène pour les apports pluviométriques et les caractéristiques physiques (**Crués et apports, 1996**).

Le débit de pointe correspondant au ruissèlement superficiel de la crue décennale est calculé à partir de l'équation 8 :

$Q_{10} = m \times A \times P_{10} \times K_{r10} \times \alpha_{10} \times \frac{S}{T_{b10}}$ <p>Equation 8</p>	<p>S : la superficie du bassin versant</p> <p>P_{10} : pluie journalière maximale décennale (mm) ;</p> <p>K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal ;</p> <p>T_b : temps de base de la crue décennale (mn) ;</p> <p>A : coefficient d'abattement (%)</p> <p>et m=coefficient prenant en compte l'écoulement retardé.</p>
--	---

Le coefficient de ruissellement décennal :

Il est déterminé par une interpolation linéaire entre les valeurs K_{r70} et K_{r100} correspondant aux pluies journalières maximales de 70 mm et 100 mm. Ces valeurs peuvent s'obtenir de façon graphique à l'aide de courbes empiriques ou à partir de l'équation 9 :

$$K_{r70} \text{ ou } K_{r100} = \frac{a}{(S+b)} + c \quad \text{Equation 9}$$

Le coefficient d'abattement A

Le coefficient d'abattement est obtenu à partir de l'équation 10

$$A = 1 - \left(\frac{(161 - 0,042 * Pan)}{1000} \right) * \log_{10}(S) \quad \text{Equation 10}$$

Le temps de base et le temps de montée

Ces deux temps sont aussi déterminés par interpolation linéaire entre les valeurs correspondant aux pentes de 3m/km et 7 m/km. Ces valeurs peuvent s'obtenir de façon graphique à l'aide de courbes empiriques ou à partir de formules analytiques (équation 11) :

$$T_{b10} = a * S^{0,36} + b \quad \text{Equation 11}$$

En zone tropicale sèche, on considère que le temps de montée est le tiers du temps de base (Equation 12)

$$T_{m10} = \frac{1}{3} * T_{b10} \quad \text{Equation 12}$$

- **Méthode CIEH**

C'est une méthode statistique proposée dans les études récentes de CIEH par Puech et Chabi-Gonni en 1983 est basée sur 162 bassins versants dont l'origine vient essentiellement du recueil de Dubreuil (1972) sur les bassins expérimentaux.

La détermination du débit de pointe décennal se fait par régression multiple décrite par l'équation 13 :

$Q_{10} = a \times S^s \times \bar{P}_{an}^p \times I_g^i \times K_{r10}^k \times Dd^d \dots$ <p><i>Equation 13</i></p> <p>avec a, s, p, i, k, d des coefficients à déterminer à travers l'utilisation des équations fournies par la méthode.</p>	<p>S : surface du bassin versant (Km²) ;</p> <p>I_g : indice global de pente (m/Km) ;</p> <p>P_{an} : pluie moyenne annuelle (mm) ;</p> <p>K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal ;</p> <p>Dd : densité de drainage</p>
---	---

- **Méthode du GRADEX**

Cette méthode permet le passage du débit décennal au débit projet sous une forme linéaire. L'expression générale de la méthode du Gradex (GRESILLON et Al, 1977) est représentée par les équations 14 et 15:

$Q_{100} = C_{100} * Q_{10}$ <p><i>Equation 14</i></p> $C_{100} = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} * \frac{\left(\frac{T_b}{24}\right)^{0,12}}{K_{r10}}$ <p><i>Equation 15</i></p>	<p>Q₁₀₀ : crue centennale (m³/s) ;</p> <p>Q₁₀ : crue décennale (m³/s)</p> <p>P₁₀ : pluie journalière maximale décennale (mm) ;</p> <p>P₁₀₀ : pluie journalière maximale de la période de retour de 100 ans</p> <p>T_b : temps de base de la crue décennale (h)</p> <p>K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal</p>
---	---

- **Estimations des apports et des pertes**

- **Les apports liquides**

Les apports annuels représentent l'ensemble des écoulements superficiels passant par l'exutoire d'un bassin versant durant une année. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de ces apports mais la plus utilisée est celle de Rodier. Cette dernière consiste à identifier dans le catalogue des bassins types, celui ou ceux ayant les caractéristiques proches du bassin versant étudié pour évaluer ainsi l'écoulement annuel de ce dernier. Les volumes des apports du bassin versant au droit du barrage sont estimés à partir de l'équation 16:

$V = K_e * S * P$ <p><i>Equation 16</i></p>	<p>P la pluviométrie annuelle (mm)</p> <p>Ke le coefficient d'écoulement</p> <p>S la superficie du bassin versant en km²</p>
---	---

La pluie médiane P_{med} (mm) a été obtenue à partir de l'équation 17

$$P_{med} = 0,98 * \overline{P_{an}} - 6,8 \quad \text{Equation 17}$$

où $\overline{P_{an}}$ représente la pluie moyenne annuelle

➤ Estimation des pertes

Les pertes considérées pour cette étude concernent les pertes par évaporation, par infiltration, par dépôts solides et les différents prélèvements (agricoles, pastoraux, humains).

Pertes par évaporation

Les pertes par évaporation sont liées à la taille de la surface du plan d'eau et dépendent de la durée de l'ensoleillement, l'exposition au vent, le déficit de saturation de l'air, la présence de végétation aquatique, la profondeur de la retenue d'eau, etc. (GUEYE, 2015). L'évaporation du barrage (E_{ret}) a été obtenue à partir de la formule de POUYAUD (1985) (équation 18).

$$E_{ret} = 1,664 * E_{bacA}^{0,602} \quad \text{Equation 18}$$

Avec E_{bacA} l'évaporation BAC A en mm/j (Données station synoptique de Ouagadougou).

Pertes par infiltration

Au Burkina Faso, l'infiltration est généralement comprise entre 1 mm et 5 mm (GUEYE, 2012). Pour notre étude nous avons pris en l'absence de mesures d'infiltrométrie, une infiltration moyenne journalière de 3,5 mm vu que la zone où se trouve notre ouvrage présente des sols argilo-limoneux.

Pertes par dépôts solides

L'eau de ruissellement entraîne avec elle des matériaux solides qu'elle arrache le long de son parcours. Ces matériaux se déposent dès que la vitesse de l'eau devient inférieure à un certain seuil. Pour quantifier ces dépôts solides sur notre zone d'étude, nous avons utilisé les formules de KARAMBIRI (1998, équation 20) et de GOTTSCHALK (équation 21) et nous avons opté pour la moyenne comme représentant la quantité de matériaux déposés sur notre zone d'étude.

- **Formule de KARAMBIRI**

$V_s = D * S * n$ <p><i>Equation 19</i></p> <p>avec :</p> $D = 137 * \left(\frac{P}{700}\right)^{-2,02} * S^{-0,05} * [0,25 + 1,13 * (h + r)]^{1,15}$ <p><i>Equation 20</i></p>	<p>où h : paramètre anthropique, pris ceci égale à 0,55 (bassin versant comportant des petites villes et des villages moyens)</p> <p>r : paramètre morphologique, pris égale à 0,55 (relief moyen)</p> <p>P : la pluviométrie moyenne annuelle (mm) ;</p> <p>S : la superficie du bassin versant (km²) ;</p> <p>D : la dégradation spécifique annuelle (m³/km²/an) ;</p> <p>V_s : Volume de dépôts solides (m³) ;</p> <p>n : la durée de vie de l'ouvrage.</p>
---	--

- **Formule de GOTTSCHALK**

$$D = 260 * S^{-0,1}$$

Equation 21

Avec : S = surface du bassin versant en km^2 et D = dégradation spécifique annuelle en $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$.

Estimation des besoins

Les besoins en eau des cultures du périmètre irrigué de 5 ha exploité à l'aval du barrage ainsi que les besoins pastoraux et humains ont été quantifiés (cf. Annexe 4 page 71.)

- **Besoins en eau de la population**

Les enquêtes socioéconomiques effectuées à Kabouda nous ont permis de fixer les besoins de la population à environ 15l/jour/habitant (PAPSA, Août 2018).

- **Besoins en eau pastoraux**

Les besoins pastoraux ont été déterminés à partir des informations fournies par le document Technique des petits barrages en Afrique Sahélienne et Equatoriale (1995 – 1998) et les valeurs utilisées pour cette étude sont:

Gros bétail (Bovins et Arsin): 30 l/j/tête

Petit bétail (Ovins et caprins): 5l /j /tête

Le tableau 4 récapitule l'ensemble du cheptel présent dans notre zone d'étude.

Tableau 5: Effectif du cheptel par espèce

Type	Bovins	Ovins	Caprins	Arsins
Effectif 2008	23839	35496	41747	4311
Effectif 2012	25421	36587	44656	4802

Source 2: ZATE, Méguet, Enquête terrain BGB, mai 2013

L'actualisation de la population a été faite à partir de l'équation 22. Par hypothèse, l'estimation de l'effectif du cheptel a été réalisée en considérant la même équation.

$P_n = P_0(1 + \alpha)^n$ <p>Equation 22</p>	<p>P_n la population à l'échéance du projet (Horizon 2030 pour s'aligner dans la vision des projets du ministère de l'Eau et de l'Assainissement)</p> <p>P_0 la population initiale</p> <p>n le nombre d'années</p> <p>α le taux d'accroissement</p>
--	---

- **Besoins en eau des cultures**

L'outil CropWat a été utilisé pour déterminer l'évapotranspiration de référence (ET₀) en vue d'évaluer les besoins en eau des cultures. Après des enquêtes, il est ressorti que les principales spéculations sur le site sont la tomate, l'oignon et le piment. Le tableau 5 résume l'ensemble des équations (équations 23 à 25) utilisées pour le calcul des besoins en eaux des cultures de notre zone d'étude.

Tableau 5: Calcul des besoins en eau

Formules	Unités	Description
$\begin{cases} \text{Si } P < 5\text{mm} \rightarrow P_e = 0 \text{ mm} \\ \text{Si } 5 < P < 20 \text{ mm} \rightarrow P_e = P \\ \text{Si } P > 20 \text{ mm} \rightarrow P_e = P - (0,15 * P - 3) \end{cases}$ <p>Equation 23</p>	mm	P_e est la pluie efficace représentant la fraction de la pluie qui répond aux besoins en eau des cultures (FAO, 1987). et P la pluie mensuelle
$B_n = K_c * ET_o - P_e$ <p>Equation 24</p>	mm	B_n est le besoin en eau d'irrigation des cultures K_c est le coefficient cultural caractéristique de la culture et de son stade végétatif ET_o l'évapotranspiration d'une culture de référence calculée selon la formule de PENMAN
$B_b = 10 * \left(\frac{B_n}{Ea}\right)$ <p>Equation 25</p>	m^3/ha	B_b Ils représentent les besoins évalués en tête du périmètre. Ea est l'efficience globale prise égale à 0,6 pour l'irrigation gravitaire

- **Evaluation du volume de la retenue**

Les études topographiques ont permis de tracer les courbes hauteur–volume et hauteur-surface du barrage de Kabouda et le volume de la retenue a été calculé à partir de l'équation 26 (GUEYE, 2012)

$$V_{n+1} = \frac{(S_n + S_{n+1})}{2} * h$$

Equation 26

V_{n+1} le volume du bassin versant en m^3

S_n : surface du plan d'eau correspondant à la courbe n (ha)

S_{n+1} : surface du plan d'eau correspondant à la courbe n+1 (ha)

h : dénivelée entre deux courbes de niveau n et n+1 (m)

Simulation de la retenue

La courbe hauteur–volume a été utilisée pour évaluer la disponibilité de la ressource en eau en prenant en compte les différents besoins et pertes. Cette approche nous a permis d'établir la courbe d'exploitation de la retenue en prenant comme point de départ le mois d'octobre où la retenue est pleine (Octobre). Cette simulation se fait mois par mois en retranchant à la fois les pertes et les besoins. Nous avons également utilisé la méthode numérique en procédant par itérations en vue de caler la côte du déversoir (PEN). La démarche utilisée repose sur plusieurs axes:

- Fixer la côte en début de saison (côte à laquelle la retenue est pleine)
- Calculer les besoins en eau et les pertes par période (mois)
- On retranche de la côte initiale la hauteur d'eau correspondant à la perte en eau du 1^{er} mois de la simulation
- On calcule le volume d'eau restant à cette côte par interpolation linéaire
- On retranche de ce volume le volume des besoins en eau (agricoles, pastoraux, etc.) pour obtenir le volume d'eau dans la cuvette à la fin du 1^{er} mois
- La côte à la fin de la 1^{ère} période est connue en faisant également une interpolation linéaire à partir du volume obtenu précédemment

- Cette côte correspond à la côte initiale de la deuxième période (mois)
- On continue ainsi les itérations jusqu'à la fin de la campagne sèche

2.3.2. Dimensionnement des ouvrages

Dimensionnement de la digue

Etude de la stabilité

L'étude de stabilité concerne l'équilibre de l'ensemble de l'ouvrage. L'ouvrage doit résister au glissement sur la fondation et au renversement. Les actions mises en jeu sur une tranche latérale de 1 m du déversoir font intervenir, le poids propre du déversoir, la poussée hydrostatique amont, les sous-pressions, éventuellement la poussée des sédiments accumulés à l'amont et la poussée hydrostatique aval. Comme démarche, nous avons utilisé un certain nombre d'équations mais aussi le logiciel GEO-SLOPE pour la vérification. Pour les talus, il sera retenu un coefficient de sécurité supérieur à 1,5 pour l'amont et un coefficient supérieur à 1,6 pour l'aval (Durand, 1996).

La largeur en crête de la digue

La vérification de la largeur en crête se fera par les formules de PREECE et KNAPPEN (équations 27 et 28).

Formule de KNAPPEN :
$$l_c = 1,65 * \sqrt{H} \quad \text{Equation 27}$$

Formule de PREECE :
$$l_c = 1,1 * \sqrt{H} + 1 \quad \text{Equation 28}$$

La revanche libre

La revanche est la différence de côte entre les Plus Hautes Eaux (PHE) et la crête de la digue et a pour rôle de prévenir le débordement des eaux du réservoir au-dessus de la crête du barrage et leur déferlement sur la pente avale. Une trop grande revanche conduit à l'abaissement de la cote du déversoir, donc à un plus faible volume à emmagasiner dans la retenue. La formule de GAILLARD et du CIEH a été utilisée pour la calculer (équations 29 et 30).

- **Formule de GAILLARD :**

$R = 0,75 * h_{\text{vague}} + \frac{V^2}{2 * g}$ <p><i>Equation 29</i></p>	<p>h_{vague} : Hauteur des vagues V: Vitesse des vagues g : Accélération de la pesanteur</p>
---	--

- Formule du CIEH (Approche simplifiée) :

L'estimation de la revanche en fonction du volume (V) de la retenue et la hauteur de la digue (H) pour les petits barrages peut être effectuée à partir des données fournies par le tableau 6 :

Tableau 6: Estimation de la revanche par l'approche simplifiée

$H^2\sqrt{V}$	5	30	100	700	1500
<i>Equation 30</i>					
Rmin (m)	0,4	0,6	0,8	1,05	1,3

La revanche retenue pour cette étude est la moyenne des valeurs obtenues par les deux méthodes.

La largeur en base de la digue l_f (m) :

La largeur en base de la digue a été calculée à partir de l'équation 31.

$l_f = l_c + \frac{H_d}{\tan \alpha_1} + \frac{H_d}{\tan \alpha_2}$ <p><i>Equation 31</i></p>	<p>l_c: largeur en crête du barrage (m) H_d : hauteur digue (m) α_1 et α_2 les angles d'inclinaisons des talus</p>
---	--

Côte crête, hauteur maximale de la digue

La côte de la digue et l'épaisseur de protection ont été calculées à partir des équations 32 et 33.

Côte digue = Côte PHE + Revanche *Equation 32*

Protection des talus amont et aval

La protection des talus amont et aval est assuré par un perré maçonné.

- Calcul de l'épaisseur de la protection

$e = 1,4 * D_{50}$ Avec $D_{50} = f(h_v)$ *Equation 33*

Estimation du débit de fuite

Le débit de fuite a été calculé à partir de l'équation 34

$$q = K_{ar} * y_0 \quad \text{Equation 34}$$

La parabole de KORENY et l'épaisseur du drain horizontal ont été déterminées respectivement par les équations 35 et 36.

- Parabole de KOZENY

$$y^2 = 2xy_0^2 + y_0^2 \quad \text{Equation 35}$$

- Epaisseur du drain horizontal

$$e = 2 * \sqrt{\frac{q * L_d}{K_d}} \quad \text{Equation 36}$$

✚ Proposition de variantes d'ouvrages évacuateurs de crues

Le choix du déversoir s'est fait par rapport à certains critères que sont :

- La nature de la fondation ;
- La conception du barrage ;
- La disponibilité en matériaux ;
- La disponibilité en main d'œuvre ;
- Le coût par rapport au coût total du barrage ;
- Les possibilités de suivi et d'entretien ;
- L'utilisation de l'aval du barrage ;

Pour ce qui est du cas du barrage de Kabouda, nous nous focaliserons sur les aspects que sont la sécurité, la durabilité de l'ouvrage et la faisabilité. Nous proposons trois solutions pour pallier aux difficultés rencontrées à Kabouda :

- **Le déversoir poids latéral** situé en rive gauche avec un ouvrage de franchissement (dalot). Cette solution sera très coûteuse car en plus du coût du déversoir, il faudra tenir compte du coût du dalot qui permettrait de régler les problèmes de franchissement de la digue. L'un des avantages de cet ouvrage est la maîtrise de sa réalisation et la durée de fonctionnement qu'elle implique.
- **Le déversoir en perré traité au mastic bitumineux** : Le seuil déversant de ce type d'ouvrage est en perré traité au mastic bitumineux de 33 cm reposant directement sur un remblai argileux compacté. Au moins deux barrages en Afrique de l'Ouest (Fronkobo et N'Guessankro en

République de Côte d'Ivoire) ont été réalisées à l'aide de cette technique. Le suivi de ces ouvrages a révélé que le perré en mastic bitumineux est viable pendant au moins 30 ans. Une étude de barrages de ce type réalisés en France a été conduite conjointement par le CEMAGREF (division Mécanique des sols Antony) et la Société SHELL BITUMES en 1989. Cette étude comporte en particulier des analyses chimiques pour juger du vieillissement des bitumes dans leurs conditions d'emploi en talus de barrages et une analyse du comportement de chaque ouvrage. Succinctement, les résultats font état d'un bilan tout à fait satisfaisant. C'est donc une solution qui peut s'avérer sûre du point de vue technique même sous les climats tropicaux. Malheureusement sa mise en œuvre suppose la possession du matériel adéquat, en particulier une centrale à bitume.

- **Le déversoir radier** : Il est assimilable au déversoir en perré traité au mastic bitumineux, à la différence que la couche reposant sur le remblais compacté est une couche en béton armé de 33 cm. L'un des avantages de cette technique est qu'elle est économiquement plus compétitive que le déversoir poids et la technique de mise en œuvre est bien maîtrisée au Burkina Faso. De plus avec ce type de déversoir est plus flexible dans le sens où le seuil peut être directement utilisé comme ouvrage de franchissement, mais seulement en période sèche. Il faudra également associer à ce type de déversoir un ouvrage de franchissement pour permettre aux populations d'avoir accès à tous moments à l'autre rive.

Choix de l'évacuateur de crue

Nous avons choisi un déversoir poids trapézoïdal car comparativement aux deux autres types, il est le plus viable durablement.

Dimensionnement de l'évacuateur de crue

Laminage de crue

L'étude du laminage de crue a pour but la détermination du débit à évacuer en période de crue, la longueur déversante et la hauteur d'eau correspondante. L'effet de laminage dépend de la forme de l'hydrogramme de crue, de la capacité d'évacuation du déversoir et de la capacité de stockage de la retenue en particulier. Tenir compte de l'effet de laminage permet de réduire la longueur du déversoir sans augmenter le risque de submersion du barrage. La longueur déversante a été

calculée à partir de la méthode du « X_0 ». Les équations 37, 38 et 39 ont été utilisées pour calculer ces différents éléments:

$Q = m * L * (2 * g)^{\frac{1}{2}} * h^{3/2}$ <p><i>Equation 37</i></p>	<p>m : Coefficient de débit de l'évacuateur (0,41)</p> <p>g : Accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)</p>
$X_0 = \frac{m^2 * g * L_1^2 * t_m^3 * Q_{cmax}}{S^3}$ <p><i>Equation 38</i></p>	<p>L_1 : Longueur approchée du déversoir (m)</p> <p>Q_{cmax} : Débit de projet</p> <p>T_m : Temps de montée des eaux</p>
$L_1 = \frac{Q_{cmax}}{m * h * \sqrt{2 * g * h}}$ <p><i>Equation 39</i></p>	<p>S : Superficie normale de la retenue</p>

Le chenal d'écoulement

Le chenal d'écoulement de l'évacuateur de crue sera calibré suivant une pente de 3‰ pour faciliter l'écoulement des eaux et freiner l'érosion régressive qui s'amorce à l'aval. Le chenal aura une forme rectangulaire. Le débit du chenal d'écoulement a été calculé à partir des équations 40, 41 et 42:

$Q = K_s * S * R_H^{\frac{2}{3}} * \sqrt{I}$ <p><i>Equation 40</i></p>	<p>Q : Débit de projet</p> <p>K_s : Coefficient de Manning Strickler</p>
$S = y_n * b$ <p><i>Equation 41</i></p>	<p>S : Section mouillée</p> <p>I : pente du canal</p>
$P = b + 2 * y_n$ <p><i>Equation 42</i></p>	<p>b : largeur du canal</p> <p>R_H : Rayon hydraulique</p> <p>Y_n : le tirant d'eau normal</p>

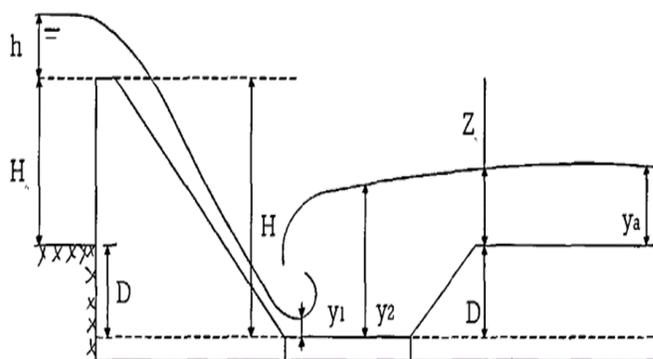
Le tirant d'eau Y_n est obtenu par la méthode de la débitance (équation 43).

$$y_c = 0,47 * \left(\frac{Q}{L}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Equation 43

Le bassin de dissipation

Le bassin de dissipation est dimensionné dans l'intention de dissiper l'énergie à l'aval du déversoir afin d'éviter d'éventuelles dégradations de l'ouvrage par les phénomènes d'érosion régressive. On choisira un bassin à ressaut et les paramètres à dimensionner sont représentés dans la figure 4 et les équations (44 à 51) pour le calcul des caractéristiques de ce bassin de dissipation sont reportées au tableau 7.



H_0 : La ligne d'eau

h : la charge sur le seuil

L : longueur du bassin

D : Enfoncement du bassin

Y_1 : Profondeur d'eau à l'entrée du bassin

Y_2 : Hauteur d'eau à la sortie du bassin

H : Hauteur d'eau au droit du déversoir

Figure 4: Caractéristiques du bassin de dissipation

Tableau 7: Caractéristiques du dimensionnement du bassin de dissipation

Désignation	Formules
Enfoncement D de la fosse <i>Equation 44</i>	$\frac{D}{H_0} = f\left(\frac{y_n}{H_0}, \frac{h}{H_0}\right)$
Formule de GRESILLON <i>Equation 45</i>	$V = \sqrt{2 * g(0,9 * \left(H + h + \frac{V_0^2}{2g}\right) - y1)}$ $V = \frac{Q}{y1}$
Nombre de Froude (Caractéristique du bassin versant) <i>Equation 46</i>	$F = \frac{V}{\sqrt{g * y1}}$
Hauteur H	$H = D + H_0$

<i>Equation 47</i>	
Calcul de Y_2 <i>Equation 48</i>	$y_2 = y_1 * 0.5 * (\sqrt{1 + 8F^2} - 1)$
Calcul de H_4, H_2 et L (par lecture sur abaque en fonction de F)	$H_4 = \frac{H_4}{Y_1} * Y_1$ <i>Equations 49</i> $H_2 = \frac{H_2}{Y_1} * Y_1$ <i>Equations 50</i> $L = \frac{L}{Y_2} * Y_2$ <i>Equations 51</i>

La crue de rupture du barrage

La crue de rupture est la crue qu'un barrage doit supporter dans les conditions exceptionnelles tout en présentant un fonctionnement sûr. Selon le Comité International des Grands Barrages (CIGB), la crue de rupture d'un barrage peut être approchée par l'équation 52 :

$Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,2)^{1,5} + 0,15 * L$ <i>Equation 52</i>	Q_{rupt} : Crue de rupture du barrage en m^3/s L : longueur de la digue sans déversoir (m) l : longueur du déversoir a : revanche totale (m)
---	---

Etude de stabilité du déversoir

Pour l'étude de la stabilité du déversoir, les différentes caractéristiques des matériaux choisies sont reportées au tableau 8.

Tableau 8: Caractéristiques des matériaux

Poids volumique du Béton cyclopéen	25 KN/m ³
Résistance du béton Fc28	20 MPa

Poids volumique de l'eau	10 KN/m ³
Poids volumique des terres	18 KN/m ³

Pour la vérification de la stabilité de l'ouvrage, nous avons placé une parafouille en dessous de l'ouvrage et les équations 53 à 56 ont permis de vérifier les stabilités externe et interne (tableau 9)

Tableau 9: Conditions de stabilité du déversoir poids

Désignation		Conditions
Stabilité externe	Non renversement	$Fr = \frac{M_{/B}(W - U)}{M_{/B}(Pt + Pe)} \geq 1.5$ <i>Equation 53</i>
	Non glissement	$Fsécglis = \frac{W - U}{Pt + Pe} \tan\varphi \geq 1.2$ <i>Equation 54</i>
Stabilité interne	Non fissuration	$\sigma_{min} \geq 0 \rightarrow e \leq \frac{b}{6}$ <i>Equation 55</i>
	Non rupture	$\sigma_{max} \leq \sigma_{lim,béton}$ <i>Equation 56</i>

Murs bajoyers

La figure 5 présente les caractéristiques du mur bajoyer et les différentes forces qui s'appliquent sur celui-ci. Le mur bajoyer est assimilé à un mur de soutènement sans patin pour la vérification de sa stabilité.

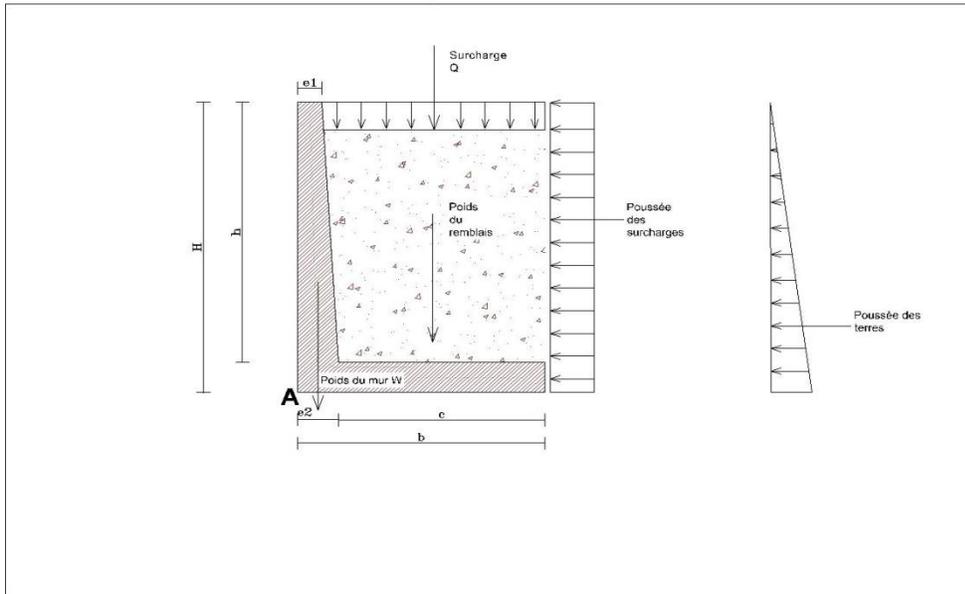


Figure 5: Caractéristiques et forces appliquées sur le mur bajoyer

Pré dimensionnement

Le pré-dimensionnement a été fait à partir des équations 57 à 60 reportées dans le tableau 10.

Tableau 10: Pré dimensionnement du mur bajoyer

Désignation	Formules
Epaisseur de la semelle	$e_2 = \frac{H}{12}$ <i>Equation 57</i>
Epaisseur de la crête	$e_1 = \frac{H}{24}$ <i>Equation 58</i>
Hauteur du voile	$h = H - \frac{H}{12}$ <i>Equation 59</i>
Longueur du talon	$c = 0,2 + 0,45 * H$ <i>Equation 60</i>

Stabilité du mur bajoyer

Les stabilités au glissement et au renversement du mur bajoyer ont été calculées respectivement par les équations 61 et 62.

- Stabilité au glissement : $F_G = \frac{F_v \cdot \tan \phi}{F_h} \geq 1,2$ *Equation 61*
- Stabilité au renversement : $F_R = \frac{M_{S/A}}{M_{R/A}} \geq 1,5$ *Equation 62*

Les équations de calcul des forces et des moments stabilisants sont reportées au tableau 11.

Tableau 11: Equations des moments et forces stabilisants et renversants

Désignation		Sections	Bras de levier/A	Efforts stabilisants
Semelle		$S_S = b * e_2$ <i>Equation 63</i>	$d_{S/A} = \frac{b}{2}$ <i>Equation 64</i>	$P_S = S_S * \gamma_b$ <i>Equation 65</i>
Voile	Partie triangulaire	$S_{v1} = (e_2 - e_1) * \frac{h}{2}$ <i>Equation 66</i>	$d_{v1/A} = e_1 + \frac{1}{3} * (e_2 - e_1)$ <i>Equation 67</i>	$P_{v1} = S_{v1} * \gamma_b$ <i>Equation 68</i>
	Partie rectangulaire	$S_{v2} = h * e_1$ <i>Equation 69</i>	$d_{v2/A} = \frac{e_1}{2}$ <i>Equation 70</i>	$P_{v2} = S_{v2} * \gamma_b$ <i>Equation 71</i>
Remblai	Partie triangulaire	$S_{R1} = (e_2 - e_1) * \frac{h}{2}$ <i>Equation 72</i>	$d_{R1/A} = e_2 - \frac{1}{3} * (e_2 - e_1)$ <i>Equation 73</i>	$P_{R1} = S_{R1} * \gamma_{ar}$ <i>Equation 74</i>
	Partie rectangulaire	$S_{R2} = h * c$ <i>Equation 75</i>	$d_{R2/A} = e_1 + \frac{c}{2}$ <i>Equation 76</i>	$P_{R2} = S_{R2} * \gamma_{ar}$ <i>Equation 77</i>

Surcharges	$S_Q = 1 * c$ <i>Equation 78</i>	$d_{Q/A} = e_1 + (c + (e_2 - e_1))/2$ <i>Equation 79</i>	$Q = q * S_Q$ <i>Equation 80</i>
			Efforts renversants
Poussée des terres		$\frac{H}{3}$ <i>Equation 81</i>	$P_t = K_a * \gamma_R * \frac{H^2}{2}$ <i>Equation 82</i>
Poussée due à la surcharge		$\frac{H}{2}$ <i>Equation 83</i>	$P_Q = K_a * H * Q$ <i>Equation 84</i>

Dimensionnement de l'ouvrage de prise

Pour le dimensionnement de la conduite nous utiliserons la loi de Torricelli pour la vidange des réservoirs par orifice (équations 85 et 86).

$$U_B = \sqrt{2 * g * h}$$

Equation 85

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * U_B}}$$

Equation 86

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Résultats du diagnostic du barrage de Kabouda

3.1.1. Historique du barrage

Le barrage de Kabouda a été réalisé en 2006 sur un financement français dans le cadre de la coopération décentralisée. Ce barrage n'a pas bénéficié d'aucune étude technique, la digue a été faite en terre non sélectionnée de la cuvette avec un faible compactage et la tranchée d'ancrage n'a pas été réalisée pour l'étanchéisation des fondations du barrage. Il s'agit d'un barrage à vocation essentiellement agricole mais est utilisée pour d'autres activités. Les fonctions assurées par la retenue sont les suivantes :

- **l'exploitation agricole:** Un périmètre irrigué de 5 ha a été aménagé à l'aval du barrage en 2006 par un prêtre pour permettre aux habitants d'exploiter la retenue. De nos jours des exploitants se sont installés sur des parcelles pirates estimées à environ 2 ha. Les principales spéculations sont :
 - en saison pluvieuse : le riz pluvial
 - en saison sèche : l'oignon et la tomate
- **la satisfaction des besoins en eau des populations et des animaux :** Bien que le barrage ne serve pas à la consommation d'eau potable, les populations l'utilisent pour le lavage, la fabrication de briques et pour l'artisanat. De même, les animaux domestiques, le cheptel des environs de la localité et des villages environnants ainsi que les animaux en transhumance s'abreuvent dans le barrage
- **la pêche :** le plan d'eau du barrage de Kabouda a favorisé le développement d'une faune aquatique notamment de poissons qui sont pêchés à la ligne, au filet et par d'autres techniques. Les produits de la pêche sont surtout destinés à l'auto consommation.
- **le franchissement du marigot :** le village de Kabouda et les principales infrastructures socio-économiques (centre de santé, école, marché, etc.) sont localisés sur la rive droite du marigot sur lequel a été construit le barrage. La digue du barrage assure la circulation entre les deux rives du marigot mais le type de déversoir (seuil déversant existant) rend très périlleux le franchissement au droit du déversoir.

Les résultats obtenus par les formules de dimensionnement de la digue sont à quelques petits écarts prêts conformes aux dimensions de la digue actuelle. La différence majeure est le passage de la hauteur maximale de la digue de 3 à 4,1 m ; dû au rehaussement de la côte de calage du déversoir.

3.1.2. Etat actuel du barrage

La digue du barrage de Kabouda est de type homogène argileux et s'étend sur une longueur de 794,51 m. Nous notons de très grandes dégradations, notamment la présence de termitières sur la crête ainsi que sur le talus aval de la digue. Les talus amont et aval sont fortement érodés et sont irréguliers. Le perré sec protégeant le talus amont est emporté au pied de la digue et le perré protégeant l'aval n'est pas continu. Nous avons également remarqué l'absence de murets de crête, de drain de pied, de butée de pied et d'échelle limnimétrique. Des infiltrations à travers la digue ont été observées à certains points et la fissure longitudinale au droit du cours d'eau qui avait été colmatée se dégrade à certains endroits. Lors de notre visite le couvert végétal sur la crête était inexistant et faiblement présent sur les talus, dû à l'entretien effectué par les populations. Des dépressions de la couche de couronnement sont observées par endroit le long de la digue. Le tableau 12 regroupe l'ensemble des dysfonctionnements enregistrés sur le barrage de Kabouda.

Tableau 12:Dégradations du barrage, causes et conséquences

Dégradations observées		Cause des dégradations	Conséquences
Digue	Fuites à travers le corps de la digue	Emergement le long du talus aval de la ligne phréatique dû à l'absence de drain	Les infiltrations qui se produisent à travers le barrage ou sa fondation sont responsables de plus de 35% des accidents survenus en terre (J.M Durand
	Dégradation massif en béton utilisé pour colmater la fissure	La pression de l'eau et l'absence d'un dispositif pour assurer la jonction	Favorise l'infiltration des eaux, la Fissuration de la digue avec fuite d'eau et

	longitudinale	entre le béton et le massif de terre	possibilité de rupture de la digue par Renard
	Les dépressions sur la couche de couronnement	Le vieillissement naturel du barrage ou un défaut de compactage des matériaux de la digue.	
	Les griffes d'érosions du talus aval	L'eau de ruissellement et la présence d'arbuste	
	La dégradation du perré sur le talus amont	La pression de l'eau	
	Muret de crête	Absent	
Evacuateur de crue	Crête non uniforme	Défaut de construction	Départ des moellons de protection
	Bassin de dissipation et seuil dégradé	Les dimensions du bassin peuvent être un défaut de conception ou de réalisation	L'eau arrive avec une grande énergie que le bassin n'arrive pas à dissiper, ce qui crée une érosion de ce dernier, mais également du chenal d'écoulement non protégé
Ouvrage de prise		Mauvais calage des vannes	Ceci entraîne un dysfonctionnement et est à l'origine de la submersion de

		la vanne par l'eau
--	--	--------------------

Les photos de la planche 1 sont des illustrations de la dégradation continue de plusieurs parties du barrage.

	
<p>Perré entraîné au pied de digue, colmatage de la digue dégradée</p>	<p>Vue de la digue, protection sur talus aval inexistante à certains endroits</p>



Planche 1: Photos se rapportant à la digue



Le déversoir naturel

Il est constitué d'un seuil déversant non uniforme (déversement différentiel) en béton cyclopéen de 100 m de longueur et de 0,5 m d'épaisseur. Le seuil est légèrement dégradé mais les joints bitumineux le sont. Le bassin de dissipation constitué d'une rangée de gabions cages disposés dans le sens de leur longueur et large de 1 m est totalement dégradé (désorganisation des gabions). La diguette de protection est fortement endommagée et a même été emportée en partie. Le chenal, faute de protection est également érodé et on note la présence de ravines régressives. Il est difficile, voire impossible de franchir le seuil par temps de crues.



Planche 2: Photos se rapportant au déversoir naturel

✚ L'ouvrage de prise

Les bacs amont et aval de l'ouvrage de prise (photo 1) ne sont pas adaptés car ayant été exécutés artisanalement. De plus la vanne dans le bac aval est constamment noyée.



Photo 1: Bac aval de l'ouvrage de prise noyé

L'aval du barrage

A l'aval du barrage se trouve un périmètre irrigué (photo 2) de 5 ha sommairement aménagé. Le type d'irrigation pratiqué est le gravitaire, avec des canaux en terre réalisés manuellement.



Photo 2: Vue d'ensemble du périmètre irrigué

3.2. Etudes de base

3.2.1. Etudes hydrologiques

Le bassin versant de Kabouda est représenté par la figure 6 et couvre une superficie de 27 km² et les autres caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant de Kabouda sont reportées au tableau 13.

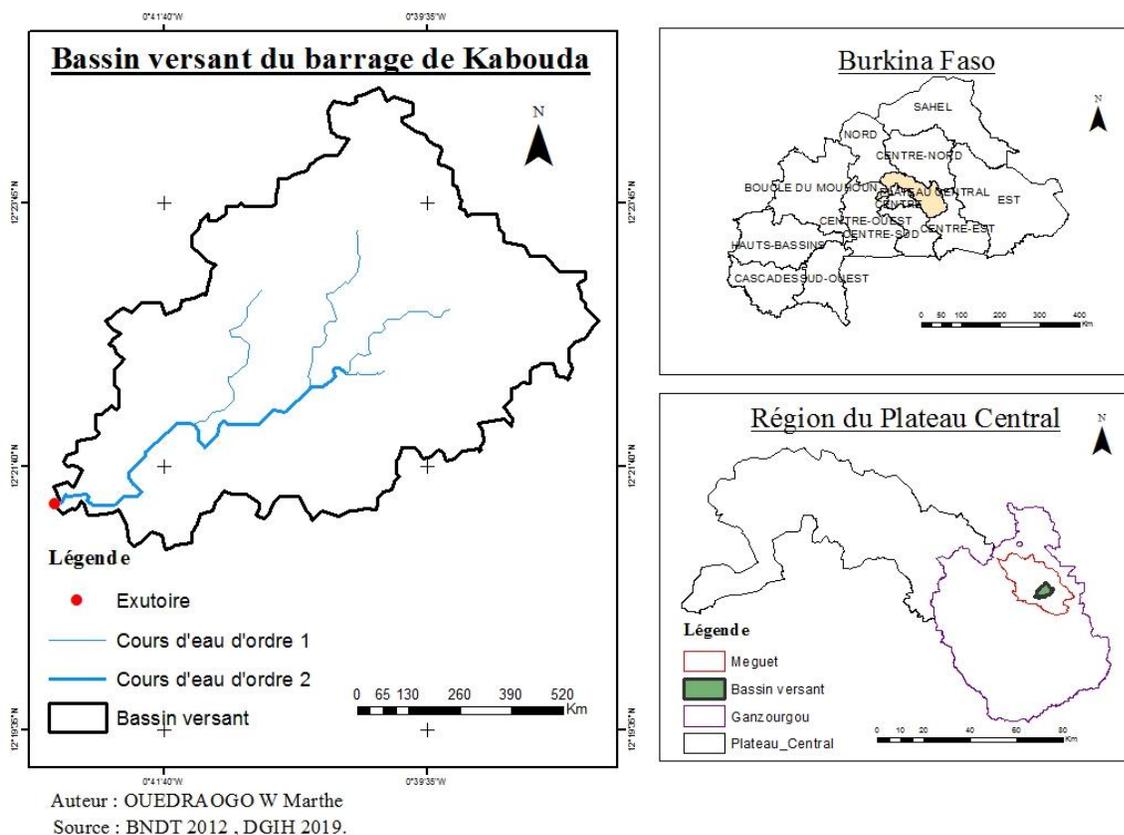


Figure 6: Carte du bassin versant de Kabouda

Tableau 13: Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant

Désignation	Symboles	Valeurs	Unités
Surface	S	27	Km ²
Périmètre	P	32	Km

Longueur du rectangle équivalent	Leq	14,08	Km
Indice de compacité	Icomp	1,74	-
Indice global de pente	Ig	2,56	m/Km
Pente transversale	It	13,21	m/Km
Indice global de pente corrigée	Ig _{cor}	6	m/Km
Dénivelée spécifique	Ds	31,18	M
Densité de drainage	Dd	0,37	Km/Km ²
Pente longitudinale	I	5	-
Hypsométrie	H (5%)	301	M
	H (95%)	337	M

Analyse statistique des données pluviométriques

Les pluies moyennes annuelles ont été ajustées suivant la loi normale ou de GAUSS et les pluies maximales journalières par la loi de GUMBEL. Les résultats de cette analyse sont reportés au tableau 14.

Tableau 14: Valeurs caractéristiques des pluies journalières maximales et annuelles de Kabouda

	Période humide					
Période de retour (années)	1000	100	50	20	10	2
Quantiles annuelles (mm)	1250	1130	1090	1020	967	769
Quantiles journalières (mm)	204	154	138	118	102	61,2
	Période sèche					
Période de retour (années)	1000	100	50	20	10	
Quantiles annuelles (mm)	291	409	451	514	571	
Quantiles journalières (mm)	11,1	19,9	23,5	29,3	35,1	

Débit de projet

Le débit de projet a été déterminé en utilisant la méthode ORSTOM et celle de CIEH. Les paramètres de calcul et les valeurs fournies par les deux méthodes sont présentés respectivement aux tableaux 15 et 16. Le débit décennal retenu est celui du CIEH qui est le plus important parmi les deux et c'est ce débit qui a été utilisé pour donner le débit centennal à travers la méthode du gradex.

Tableau 15: Paramètres de calcul des débits

Désignation	Symbole	Valeur	Unité
Coefficient d'abattement	A	0,82	
Coefficient de ruissellement décennal	Kr ₁₀	25	%
Temps de base	Tb	851,83	min
Temps de montée	Tm	283,94	min
Coefficient de pointe	α	2,6	
Coefficient majorateur	C	2,88	

Tableau 16: Valeurs des débits décennaux et centennal

Désignation	Valeurs de débits	Unités
Méthode ORSTOM	29,43	m ³ /s
Méthode CIEH	32,46	m ³ /s
	32,29	m ³ /s
Méthode du GRADEX	93,18	m ³ /s

Commentaire sur les études hydrologiques

Selon la classification des classes de pentes par ORSTOM, le bassin versant de Kabouda est de type R3 (pentes comprises entre 5 et 1%). De même la valeur de la densité spécifique obtenue classe le bassin dans la catégorie des bassins à relief assez faible ($25 < D_s < 50$). Les types de sols rencontrés à Kabouda sont les sols ferrugineux lessivés plus ou moins gravillonnaires, les vertisols et les sols bruns sur roche basaltique ; ce qui permet de dire que le bassin est relativement imperméable (classe P3). Ces caractéristiques ont ensuite été utilisées pour le calcul de la crue de projet.

3.2.2. Estimation des pertes et des apports

- Apports liquides

Le bassin versant de Kabouda a presque les mêmes caractéristiques que le bassin type Boulsa (Burkina – Faso, 1960-1962), C'est un bassin de classe 1 ($22 \text{ Km}^2 < S < 84,7 \text{ Km}^2$) en zone tropicale sèche, Les valeurs des apports sont reportées au tableau 17.

Tableau 17: Apports liquides

Période de retour (année)	Pluviométrie (mm)	Lame écoulee (mm)	Ke (%)	Superficie (Km ²)	Apports liquides (m ³)
Période Humide					
100 ans	1130	57	5%	27	1525500
50 ans	1090	55	5%	27	1471500
20 ans	1020	51	5%	27	1377000
10 ans	967	48	5%	27	1305450
Année moyenne	769	38	5%	27	1038150
Période sèche					
100 ans	409	20	5%	27	552150
50 ans	451	23	5%	27	608850
20 ans	514	26	5%	27	693900
10 ans	571	29	5%	27	770850

- **Dépôts solides**

Le phénomène d'envasement ou d'ensablement est un processus naturel accéléré par les activités humaines provoquant l'érosion, La quantité de dépôts solides a été obtenue en faisant la moyenne des valeurs trouvées à l'aide des formules de KARAMBIRI et de GOTTSCHALK, Pour se faire une idée de la durée de l'envasement total de la retenue, nous avons fait le rapport entre la capacité du barrage actuelle et le volume moyen des dépôts, ce qui nous donne une durée d'ensablement d'environ 140 ans, Les valeurs de dépôts solides obtenus sont reportées au tableau 18.

Tableau 18: Valeurs des dépôts solides

Désignation	Formule de KARAMBIRI	Formule de GOTTSCHALK
Volume de dépôts (m ³ /an)	4401,05	5048,94
Moyenne	4725	

- **Pertes par infiltration**

Pour une infiltration moyenne prise égale à 3,5 mm/j, nous obtenons une valeur d'infiltration totale égale à 528,5 mm pendant la campagne sèche,

- **Pertes par évaporation**

Nous avons utilisé les données de la station synoptique de Ouagadougou (station synoptique la plus proche), La formule de POUYAUD a permis de calculer l'évaporation du barrage qui s'élève à 755,7 mm,

- **Besoins en eau de la population**

Les besoins en eau de la population tournent autour de 6020 m³ pendant la période considérée.

- **Besoins en eau pour l'agriculture**

Le barrage de Kabouda dispose en aval d'un périmètre irrigué de 5 ha aujourd'hui étendu sur 7 ha. Les enquêtes auprès des exploitants indiquent que la culture la plus pratiquée en maraîchage est l'oignon et les besoins pour la campagne sèche s'élèvent à environ 84386,8 m³.

- **Besoin en eau pastoral**

Le cheptel du village de Kabouda est composé d'ovins, de bovins, de caprins de porcins et d'arsins, Leur effectif a été actualisé à l'horizon du projet (2030) et les besoins totaux s'élèvent à 1573 m³ par mois Les résultats ont été reportées en annexe

- **Simulation de l'exploitation de la retenue**

Le déversoir a été positionné à la côte 295 m et la simulation numérique dont les résultats sont présentés dans le tableau 19 a permis de fixer la côte minimale de la prise à 293,17 m. La figure 7 présente la courbe hauteur volume utilisée pour la simulation de la retenue.

Tableau 19: Résultats de la simulation numérique

Mois	Début simulation		Infiltr + Evapo			Besoins agri + pastor	Fin simulation	
	Niveau	Vol,corr (m3)	Haut d'eau évaporée	Nouveau niveau	V,correspond	Volu,consomé	Volu,res tant	Niveau eau
Octobre	295	1036491	0,26	294,74	842517	55148	787370	294,67
Novembre	294,67	787369	0,25	294,41	598558	54605	543954	294,34
Décembre	294,34	543953	0,26	294,08	447171	55148	392024	293,98
Janvier	293,98	392024	0,26	293,72	299855	56384	243472	293,56
Février	293,56	243471	0,25	293,31	150872	50927	99946	293,17

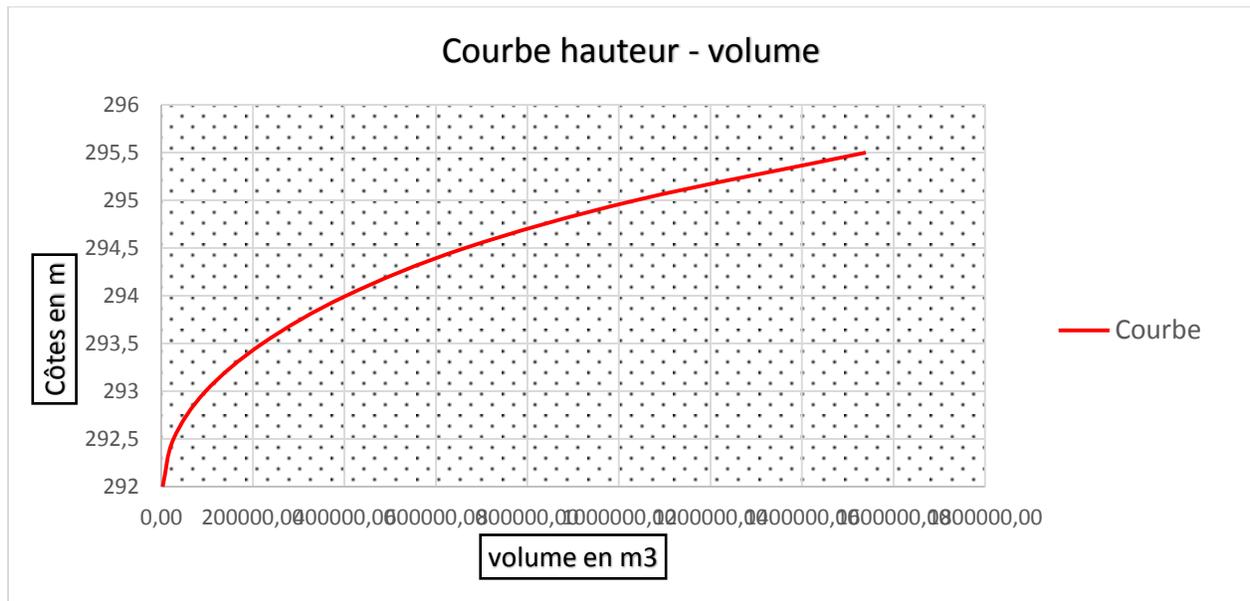


Figure 7: Courbe hauteur volume

Commentaire sur les pertes et apports

Le barrage de Kabouda est utilisé pour les activités agricoles, l'élevage, la pêche et l'artisanat. Le barrage est donc sollicité à hauteur de 100296,873 m³ d'eau par campagne agricole (Octobre à Février). Les pertes par infiltration et par évaporation s'élèvent quant à elles à 698231m³. Les pertes totales s'élèvent à 804548 m³. Avec un volume au plan d'eau normal de 1036491 m³, soit un reliquat de 231943 m³ à la fin de la période de simulation, l'eau ne sera disponible que pour une seule campagne sèche. Le barrage étant soumis à l'effet de l'ensablement, sa capacité de stockage serait réduite au fil des années, ce qui pourrait compromettre la satisfaction des besoins. En effet, le phénomène de l'envasement des barrages est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et du sapement des berges des cours d'eau. Il pose des problèmes de quantité et de qualité des eaux des barrages car elle induit des dépôts successifs de sédiments. Pour lutter contre ce phénomène dans le barrage de Kabouda nous proposons :

- Le reboisement autour de la cuvette
- De combler les ravines en amont du barrage
- La réalisation de banquettes en amont du barrage

3.2.3. Caractéristiques de la digue

➤ Revanche libre

Les valeurs pour le dimensionnement de la revanche sont reportées au tableau 20.

Tableau 20: Valeurs de la revanche

Formules	Revanche obtenue (m)	Revanche retenue (m)	Lame d'eau h (m)	Revanche totale (m)	Côte digue (m)
GAILLARD	0,8	0,5	0,8	1,3	296,3
Approche simplifiée	0,43				

➤ Largeur en crête

Les dimensions de la largeur en crête sont reportées au tableau 21.

Tableau 21: Dimension de la largeur en crête

Formules	Largeur obtenue (m)	Largeur retenue (m)
KNAPPEN	3,34	3,5
PREECE	3,22	

➤ Autres paramètres

Les dimensions des autres paramètres de la digue sont reportées au tableau 22.

Tableau 22: Autres paramètres de la digue

Désignation	Valeur	Unités
Largeur au fond de la digue	20	M
Pente des talus	Talus amont	2H/1V -
	Talus aval	2H/1V
Paramètres de KOZENY	Longueur du drain	5 M
	Epaisseur du drain	5 Cm
	y_0	0,4 M
	Débit de fuite	$3,8 \cdot 10^{-10}$ m ² /s

➤ **Stabilité de la digue**

Le coefficient de sécurité trouvé est de 2,96 ; ce qui indique que les pentes des talus sont stables.

3.2.4. Choix et dimensionnement d'un nouveau type de déversoir

Le déversoir retenu est celui de type poids en position latérale rive gauche surmonté d'un ouvrage de franchissement, qui permettra aux usagers de traverser aisément le barrage en toutes périodes, Ce choix se justifie par la sécurité que confère ce type d'ouvrage et la durabilité de fonctionnement qui y est associée,

✚ **Caractéristiques du déversoir poids**

• **Laminage des crues**

Une démarche itérative a permis de retenir une longueur de 70 m pour le déversoir pour une charge de 0,8 m, Le débit à évacuer est de 75,43 m³/s et la crue de rupture du barrage est d'environ 436,17 m³/s, Les valeurs permettant de vérifier la stabilité externe et interne sont reportées au tableau 23.

• **Stabilité du déversoir**

La stabilité du réservoir a été vérifiée à partir des valeurs obtenues dans le tableau 23.

Tableau 23: Vérification de la stabilité du déversoir

Désignation		Conditions	Etat de la stabilité
Stabilité externe	Non renversement	$Fr = 3,91 > 1,5$	Vérifié
	Non glissement	$Fsécglis = 1,6 \geq 1,2$	Vérifié
Stabilité interne	Non fissuration	$ e = 0,34 \rightarrow e \leq \frac{b}{6} = 0,48$	Vérifié
	Non rupture	$\sigma_{max} = 0,05 MPa \rightarrow \sigma_{max} \leq \sigma_{lim,béton} = 6Mpa$	Vérifié

--	--	--	--

✚ Caractéristiques du chenal d'évacuation

Les paramètres du chenal d'évacuation sont :

$$y_n = 0,45 \text{ m et } y_c = 0,57 \text{ m}$$

$$y_n < y_c$$

Des valeurs pareilles témoignent de la présence d'un régime d'écoulement critique d'où la nécessité d'un bassin de dissipation de l'énergie.

✚ Caractéristiques du bassin de dissipation

Les caractéristiques du bassin de dissipation sont reportées au tableau 24. D'autres paramètres tels que la hauteur des blocs chicanes y_2 , le seuil terminal h_4 et la longueur du bassin ont été obtenus par lecture graphique, Le nombre de Froude étant supérieur à 4,5 et la vitesse de l'eau à l'entrée du bassin inférieure à 15 m/s, le bassin de dissipation sera de type II,

Tableau 24: Paramètres du bassin de dissipation

Paramètres	D	q	y_1	V_0	V_1	Fr	y_2	h_2	h_4	L
Valeurs	0,9 m	1,07 m ³ /s	0,15m	1,34 m/s	7,18m/s	5,91	1,3m	0,25m	0,20m	3,5 m

✚ Caractéristiques des murs bajoyers

Le Pré dimensionnement des murs bajoyers a donné les valeurs reportées au tableau 25.

Tableau 25: Caractéristiques des murs bajoyers

H	e_1	e_2	b	h	C
4,1 m	0,25	0,4 m	1,95 m	3,75 m	1,55 m

✚ Stabilité des murs bajoyers

Les valeurs des coefficients trouvés pour la vérification de la stabilité externe des murs bajoyers sont consignées dans le tableau 26.

Tableau 26: Vérification de la stabilité externe des murs bajoyers

Désignation		Conditions	Etat de la stabilité
Stabilité externe	Non renversement	$Fr = 3,6 > 1,5$	Vérifié
	Non glissement	$F_{secglis} = 2,59 \geq 1,2$	Vérifié
Stabilité interne	Non fissuration	$ e = 0,2 \rightarrow e \leq \frac{b}{6} = 0,33$	Vérifié
	Non rupture	$\sigma_{max} = 0,11 \text{ MPa} \rightarrow \sigma_{max} \leq \sigma_{lim,béton} = 6 \text{ MPa}$	Vérifié

3.2.5 Caractéristiques de l'ouvrage de prise

Longueur : 20 m

Débit : 3,5 l/s

Diamètre nominal : 200 mm

Type de conduite : Conduite en fonte enterrée avec vanne aval

3.3. Notice d'impact environnemental

Le Burkina Faso dispose pour la gestion de l'environnement de politiques et procédures stratégiques. Il a souscrit à des accords et conventions sous régionales et internationales en matière de protection de l'environnement, de la lutte contre la désertification, de gestion des espèces et des écosystèmes. Le décret n°2001-342/PRES/PM/MEE du 17 juillet 2001 réglementant l'étude d'impact environnemental et la notice d'impact sur l'environnement nous permet de classer cette étude dans la catégorie B « Activités soumises à une notice d'impact sur l'environnement ». Le projet de réhabilitation du barrage de Kabouda se fera à travers la reconstruction de la digue, de la diguette de protection, la mise en place d'un déversoir poids latéral et le reboisement autour de la cuvette. Les travaux peuvent s'étaler sur plusieurs mois en saison sèche et nécessitera la mobilisation de gros engins de chantier tels que les compacteurs, les pelles hydrauliques.

La conduite de cette étude a permis suite à l'analyse de l'interaction entre le projet et l'environnement de déceler les impacts positifs et négatifs liés à la réalisation des travaux afin de proposer un Plan de Gestion Environnemental et Social Annexe 7.

IV. Proposition de réhabilitation

4.1. Réhabilitation de la digue

Au vu de l'état de dégradation de la digue, de l'absence de tranchée d'ancrage et du défaut de compactage de la digue, nous proposons pour une réhabilitation de celle-ci, les solutions suivantes :

- Un prolongement de l'axe de la digue des deux côtés des rives (De 794,51 m à 1193,18 m) pour amener la digue à se refermer sur les courbes de niveau afin d'éviter le débordement de l'eau par les rives.
- La réalisation d'une clé d'ancrage au pied du talus amont suivant les caractéristiques d'une tranchée d'ancrage
- Le taillage en redans des talus amont et aval puis un rehaussement de la digue

- Nous proposons également la reconstruction de la diguette de protection en rive droite du déversoir d'une longueur de 80 m et une hauteur de 1,5m. Les pentes de talus seront de 2H/1V. Le talus amont sera recouvert de perré maçonné et le talus aval de perré sec.

4.2. Conception du déversoir poids et des ouvrages annexes

L'ancien déversoir était à une cote qui ne permettait pas à la retenue de satisfaire les différents besoins en eau. Nous proposons un rehaussement de celui-ci à la cote 295 m puis un changement de type de déversoir, en passant d'un déversoir seuil en béton cyclopéen de 0,5 m à un déversoir poids de seuil 1m. Pour permettre le passage des riverains un dalot de 70 m de longueur sera associé au déversoir. Le bassin de dissipation sera ancré de 90 cm et recouvert de béton. Le chenal d'écoulement sera recouvert de gabions sur environ 30 m pour prévenir l'érosion régressive.

V. Notice d'impact environnemental

La réhabilitation du barrage de Kabouda intervient sur insistance des producteurs qui n'ont pas assez d'eau pour leurs exploitants et au regard de la menace sur la sécurité de l'ouvrage. Le projet aura des répercussions positives telles qu'une plus grande disponibilité de l'eau pour couvrir tous les besoins pendant une campagne sèche mais également une création d'emplois pour les populations locales lors des travaux de réhabilitation.

Les impacts négatifs occasionnés par l'exécution du projet seront entre autres la dégradation de la qualité de l'air et des sols pendant la période des travaux. Malgré ces impacts, la notice d'impact environnemental montre que toutes les parties prenantes ont adhéré au projet.

La matrice de Leopold a été utilisée pour l'identification des impacts et les résultats sont consignés dans le tableau 27. La matrice de Fecteau, utilisée pour l'évaluation de ces impacts est résumée dans le tableau 28.

Tableau 27: Matrice de Leopold

Phase	Construction du barrage			Exploitation du barrage		
	Effets négatifs	Effets positifs	Effets nul	Effets négatifs	Effets positifs	Effets nul
Activités source d'impact						
Décapage de la digue	*				*	
Destruction des arbustes	*			*		
Reboisement autour de la cuvette		*			*	
Réalisation du déversoir	*				*	
Réhabilitation de la digue et diguette	*				*	

Tableau 28: Matrice de Fecteau

Impact		Origine	Importance	Intensité	Portée	Durée
Impacts négatifs	Dégradation des sols	Le passage des engins lourds	Modérée	Moyenne	Kabouda	Moyen terme
	Dégradation de la qualité de l'air	Emission de poussière lors des travaux	Modérée	Moyenne	Kabouda	Moyen terme
	Nuisances sonores dues aux vibrations des engins	Fonctionnement des machines	Modérée	Moyenne	Kabouda	Moyen terme
	Encombrement du site	Présence des machines	Modérée	Moyenne	Kabouda	Moyen terme
Impacts	Augmentation	Rehaussement du	Majeure	Forte	Kabouda	Long

Contribution à la réalisation d'étude diagnostique pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central au Burkina Faso.

positifs	de la quantité d'eau	déversoir				terme
	Création d'emplois et de revenus	Emplois locaux générés lors des travaux Accroissement des activités marchandes pendant les travaux	Majeure	Forte	Méguet	Moyen terme
	Renforcement de l'agriculture et l'élevage	Quantité d'eau suffisante	Modérée	Moyenne	Méguet	Long terme
	Réduction de l'ensablement	Reboisement des berges	Majeure	Forte	Barrage de Kabouda	Long terme

VI. Conclusion

De nos jours, le développement économique des pays sahéliens comme le Burkina Faso passe par une meilleure gestion des ressources en eau. Avec les opportunités offertes par le contexte physique (climat et ressources disponibles) et économique (compétitivité potentielle vérifiée du secteur agricole), sans avoir la prétention de résoudre les problèmes de disponibilité alimentaire au niveau national en termes d'autosuffisance, l'agriculture irriguée dans ce pays pourrait contribuer à résorber le déficit en certains produits et réduire localement l'insécurité alimentaire. C'est le prolongement de cette politique que de nombreux barrages ont été construits pour répondre à cette demande. C'est dans ce contexte que le barrage de Kabouda a été construit pour favoriser le développement des activités agricoles dans la commune de Méguet dans la région du plateau central. Malheureusement, cet ouvrage construit sans références techniques, a connu d'énormes défauts à cause de la dégradation continue des principaux éléments du barrage. Cette appréhension a été rendue possible grâce à un diagnostic du barrage de Kabouda. L'analyse de la situation a mis en évidence de nombreux goulots d'étranglement qui limitent l'efficacité de la mise en valeur agricole de l'aménagement de 5 ha situé en aval du barrage.

Cette situation a favorisé un projet de réhabilitation en vue d'améliorer les revenus des exploitants de l'eau du barrage (éleveurs, agriculteurs) et à contribuer au reboisement du village. Le passage du déversoir naturel à seuil en béton cyclopéen à un déversoir de type poids trapézoïdal surmonté d'un ouvrage de franchissement facilitera le franchissement du cours d'eau.

VII. RECOMMANDATIONS

La réhabilitation du barrage de Kabouda implique un rallongement de la digue et un rehaussement du déversoir, ce qui signifie une augmentation de la capacité du barrage. Nous proposons donc les recommandations suivantes pour améliorer la gestion du barrage :

- Au ministère de l'Eau et de l'Assainissement à travers la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques, nous recommandons de prioriser la réhabilitation du barrage, au vue de la menace qui pèse sur la sécurité de celui-ci et des enjeux économiques qu'il représente pour les habitants de la localité ;
- Au regard des dommages et des défauts de réalisations constatés au niveau de la digue, nous proposons une reconstruction de celle-ci dans la mesure du possible ;
- Nous lui recommandons également d'associer la réhabilitation du barrage à celle du périmètre irrigué, car celui-ci a été aménagé de manière artisanale ;
- A l'attention des producteurs et des chefs coutumiers du village, nous recommandons de ne pas pratiquer une activité agricole en amont ou directement sur les rives de la retenue pour minimiser le risque d'envasement.

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

- ADEOSSI, G, 2016. L'étude d'impact environnemental et social, cours 2iE, 68p.
- BERE, C, C, 2016. Etudes techniques détaillées de la réhabilitation du barrage de doudou, dans la province du Boulkiemde, au Burkina Faso, 92p.
- COMPAORE, M, L, 2016. Cours de barrages 2^{ème} édition, 277p.
- DEGOUTTE, G, 2002. Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. CEMAGREF, 182p.
- DGIH, 2019. Dialogue sectoriel – Rapport bilan des activités du Programme national des aménagements hydrauliques (PNAH), période du 1er janvier au 31 décembre 2018, 32p.
- DURAND, J.M, 1996. Petits barrages pour l'équipement rural en Afrique, 266p.
- DURAND, J.M, ROYET, P, & MERIAUX, P, 1999. Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale Cemagref, 415p.
- FAO, 1998. Crues et apports : 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, 265p.
- GUEYE, I, 2012. Cours de barrage L2 & L3, 212p.
- KARAMBIRI, H, 2008. Hydrologie des bassins versant 1, 155p.
- LO, M, 2016. Cours de barrage,
- PODA, T, L, 2017. Contribution à la réalisation des études techniques détaillées de la réhabilitation du barrage de Goinré dans la commune de Ouahigouya (Burkina Faso) ,102p.
- Projet d'Amélioration de la Productivité Agricole et de la Sécurité Alimentaire (PAPSA), (Août 2018). Etudes techniques d'aménagements hydro-agricoles de 2500 ha de périmètres irrigués (2000 ha en aval et 500 ha en amont) dans les régions du Sahel, Centre-Est et Centre-Sud (Lot 6)
- ZARE, S, 2016. Etudes comparatives de trois types de deversoirs (creager ; blocs fusibles ; piano keys weirs) : cas de la reconstruction du barrage de Bombore (v3), au Burkina Faso, 75p.

Sites internet

Contribution à la réalisation d'étude diagnostique pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central au Burkina Faso.

www.earthexplorer.usgs.gov consulté le 14/02/2019

www.insd.bf/n/index.php/pub consulté le 11/02/2019

IX. ANNEXES

5.1. Annexe 1 : Acquis de la mise en œuvre du programme national des aménagements hydrauliques (PNAH) depuis 2016

Depuis 2016, la mise en œuvre du programme national des aménagements hydrauliques a permis de réaliser neuf (09) nouveaux barrages et d'en réhabiliter 20 autres dégradés. Le tableau 29 donne la liste des ouvrages nouvellement réalisés ou réhabilités.

Tableau 29: Liste des barrages nouvellement réalisés ou réhabilités entre 2016 et 2018

Année	Site	Commune	Province	Commune	Site	Région	Nature de l'intervention
2016	Gourgou	Tenkodogo	Boulgou	Tenkodogo	Gourgou	Centre-Est	Nouvelle réalisation
	Lallé	Zam	Ganzourgou	Zam	Lallé	Plateau Central	Nouvelle réalisation
	Bogré	Zorgho	Ganzourgou	Zorgho	Bogré	Plateau Central	Nouvelle réalisation
	Tapoa	Diapaga	Tapoa	Diapaga	Tapoa	Est	Réhabilitation
	Bogandé Centre	Bogandé	Gnagna	Bogandé	Bogandé Centre	Est	Réhabilitation
	Koumbri	Koumbri	Yatenga	Koumbri	Koumbri	Nord	Réhabilitation
2017	Zourmakita	Gomboussou ou	Zoundwéog o	Gomboussou ou	Zourmakita	Centre-Sud	Réhabilitation
	Guitti	Seguénéga	Yatenga	Seguénéga	Guitti	Nord	Nouvelle réalisation
	Samendeni	Bama	Houet	Bama	Samendeni	Hauts-Bassins	Nouvelle réalisation
	Lindi	Ourgou- Manéga	Oubritenga	Ourgou- Manéga	Lindi	Plateau Central	Nouvelle réalisation

Contribution à la réalisation d'étude diagnostique pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central au Burkina Faso.

	Matourkou	Bobo-Dioulasso	Houet	Bobo-Dioulasso	Matourkou	Hauts-Bassins	Nouvelle réalisation
	Yaramoko	Bagassi	Balé	Bagassi	Yaramoko	Boucle du Mouhoun	Réhabilitation
	Dala	Loumana	Léraba	Loumana	Dala	Cascades	Réhabilitation
	Bani	Bani	Séno	Bani	Bani	Sahel	Réhabilitation
	Touro	Gorom-Gorom	Oudalan	Gorom-Gorom	Touro	Sahel	Réhabilitation
	Saria	Koudougou	Boulkiemdé	Koudougou	Saria	Centre-Ouest	Réhabilitation
2018	Loropéni	Loropéni	Poni	Loropéni	Loropéni	Sud-Ouest	Réhabilitation
	Barkoundba	Ziniaré	Oubritenga	Ziniaré	Barkoundba	Plateau Central	Réhabilitation
	Kossoghin	Pissila	Sanmatenga	Pissila	Kossoghin	Centre-Nord	Réhabilitation
	Bissighin	Kossouka	Yatenga	Kossouka	Bissighin	Nord	Réhabilitation
	Comoé	Mossodougou	Comoé	Mossodougou	Comoé	Cascades	Réhabilitation
	Tanvi/Nakamten ga	Koubri	Kadiogo	Koubri	Tanvi/Nakamten ga	Centre	Réhabilitation
	Kologonguessé	Ziniaré	Oubritenga	Ziniaré	Kologonguessé	Plateau Central	Réhabilitation
	Diapangou	Diapangou	Gourma	Diapangou	Diapangou	Est	Réhabilitation
	Béré	Béré	Zoundwéog	Béré	Béré	Centre-Sud	Réhabilitation

Contribution à la réalisation d'étude diagnostique pour la réhabilitation du barrage de Kabouda, commune de Méguet, province du Ganzourgou, région du Plateau Central au Burkina Faso.

			o				
	Biéha	Biéha	Sissili	Biéha	Biéha	Centre-Ouest	Nouvelle réalisation
	Niogo	Boussé	Kourweogo	Boussé	Niogo	Plateau Central	Réhabilitation
	Sandogo	Sourgoubila	Kourweogo	Sourgoubila	Sandogo	Plateau Central	Réhabilitation
	Koakin	Boudry	Ganzourgou	Boudry	Koakin	Plateau Central	Nouvelle réalisation

5.2. Annexe 2 : Paramètres climatiques

Tableau 30: Paramètres climatiques de la station de Ouagadougou

Mois	Temp Min	Temp Max	Humidité	Vent	Insolation	Ray,	ETo	Ev. Bac A
	°C	°C	%	m/s	heures	MJ/m ² /jour	mm/jour	(mm/j)
Janvier	16,1	33,3	32	2,3	8,2	18,9	5,77	6,1
Février	19,1	36,2	32	2,3	8,1	20,2	6,38	7,4
Mars	23,1	38,3	33	2,4	8	21,3	7,12	7,1
Avril	25,9	38,9	41	2,7	7,1	20,5	7,38	6,9
Mai	25,6	37,2	58	3,1	7,8	21,3	6,88	6,5
Juin	23,7	34,2	70	2,9	7,6	20,6	5,63	5,8
Juillet	22,4	31,8	87	2,6	6,8	19,6	4,29	4,8
Août	21,9	30,8	85	2,2	6,1	18,8	4,06	4,4
Septembre	21,9	32	79	1,9	6,5	19,1	4,33	5,1
Octobre	22,6	35,3	63	1,9	8,2	20,5	5,29	6,0
Novembre	19,3	35,8	47	1,8	8,6	19,6	5,38	6,1
Décembre	16,8	33,6	41	2	8,2	18,3	5,22	5,7
Moyenne	21,5	34,8	56	2,3	7,6	19,9	5,64	6,01

5.3. Annexe 3 : Données pluviométriques

Tableau 31: Données pluviométriques

Année	Pluies jour, Max (mm)	Pluies annuelles (mm)
1955	50,0	405,7
1956	99,7	1059
1957	80,7	1038, 2
1958	97,3	995,8
1959	63,4	793,3
1960	78,3	677,2
1961	67,7	825,7
1962	55,6	891,5
1963	89,1	814,7
1964	109,4	951,1
1965	88,4	1019, 8
1966	80,9	910,3
1967	50,2	916,6
1968	67,7	851,4
1969	62,3	846,2
1970	51,1	692,5
1971	70,6	869,7
1972	52,6	745,9
1973	49,4	627,4
1974	55,6	767,6
1975	52,8	673,5
1976	42,2	784,7

1977	126,9	817,7
1978	46,5	650,9
1979	49,1	821,3
1980	80,5	683,9
1981	47,0	627,7
1982	56,4	636,3
1983	54,4	672,1
1984	35,9	559,1
1985	37,2	516
1986	48,2	708,4
1987	51,7	566,9
1988	67,3	772,7
1989	55,7	660,6
1990	44,0	548,5
1991	56,2	744,7
1992	71,3	801,4
1993	50,8	729,4
1994	104,6	1200, 6
1995	56,3	766
1996	48,5	653,8
1997	78,8	615,2
1998	51,5	681,1
1999	44,9	802,4
2000	41,3	565,2
2001	36,8	632,5
2002	43,2	756,7
2003	58,0	736,4
2004	49,5	794,8

2005	63,0	743,6
2006	106,2	762,2
2007	80,5	886,7
2008	50,5	836,2
2009	100,8	823,1
2010	202,3	1150, 2

X. Annexe 4 : Note de calculs

6.1. Etudes hydrologiques

- ✚ Caractéristiques géométriques et hydro-morphologiques du bassin versant

Le bassin versant de Kabouda s'étend sur une superficie de 27 km² avec un périmètre de 32 km,

- **Indice de compacité I_{comp} ou de Gravelius K_G**

$$K_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \rightarrow \quad K_G = 0,28 * \frac{32}{\sqrt{27}} \quad \rightarrow \quad K_G = 1,74$$

- **La pente longitudinale**

$$I = \frac{0,026}{\sqrt{S}} \quad \rightarrow \quad I = \frac{0,026}{\sqrt{27}} \quad I = 5\text{‰}$$

- **Longueur du rectangle équivalent**

$$L_{eq} = \frac{K_G * \sqrt{S}}{1,128} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right] \quad \rightarrow \quad L_{eq}$$

$$= \frac{1,74 * \sqrt{27}}{1,128} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,74} \right)^2} \right]$$

$$L_{eq} = 14,08 \text{ Km}$$

- **Courbe hypsométrique**

Les différentes altitudes présentes dans un bassin versant ainsi que la pente moyenne sont essentielles à l'étude de la température et des précipitations, La courbe hypsométrique peint de façon plus précise les variations d'altitude de son bassin, Elle exprime le pourcentage de superficie du bassin au-delà d'une certaine altitude,

Tableau 32:Résultats obtenus pour la courbe hypsométrique

Tranches d'altitude (m)	Surfaces partielles (km ²)	Surfaces cumulées (km ²)	Surfaces partielles (%)	Surfaces cumulées (%)

288 - 299	4,48	4,48	16,54	100,00
299 - 306	6,30	10,78	23,23	83,46
306 - 312	5,62	16,40	20,72	60,23
312 - 319	4,06	20,46	14,97	39,51
319 - 325	3,73	24,19	13,77	24,54
325 - 331	2,16	26,36	7,97	10,77
331 - 342	0,70	27,06	2,58	2,80
342 - 365	0,06	27,12	0,22	0,22

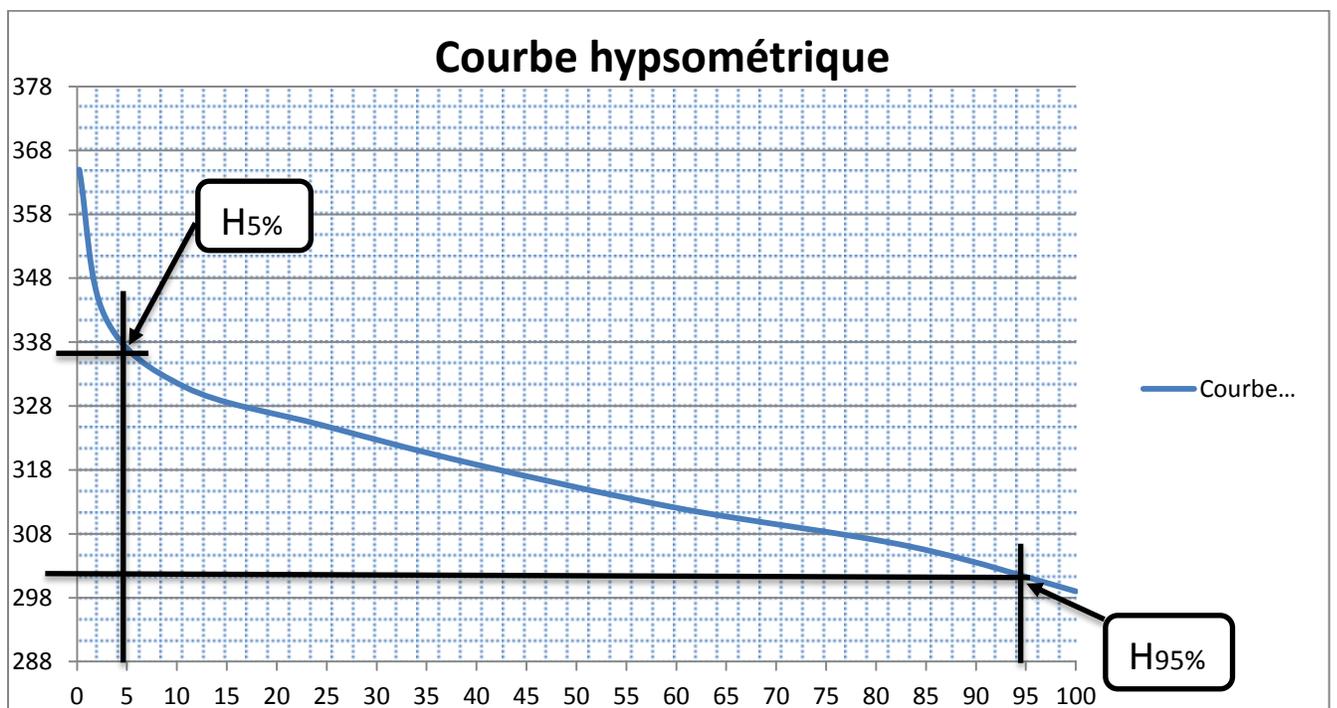


Figure 8: Courbe hypsométrique

Les paramètres altimétriques du bassin versant de Kabouda sont les suivants :

$$H_{5\%} = 337 \text{ m}$$

$$H_{95\%} = 301 \text{ m}$$

- Indice global de pente I_g

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}} \rightarrow I_g = \frac{337 - 301}{14,08} \rightarrow I_g = 2,56 \text{ m/km}$$

- **Détermination des pentes transversales**

Tableau 33: Résultats des pentes transversales

Profils	H ₁	H ₂	L (km)	Pentes (m/km)	Moyenne
1	302	297,5	0,2	22,5	19,25
	302	294	0,5	16	
2	306	294	1,55	7,74	12,93
	300	294	0,85	7,05	
	312	300	0,5	24	
3	312	300	1,3	9,23	9,74
	301	299	0,5	4	
	306	299	0,7	10	
	306	302	0,3	13	
	307	302	0,4	12,5	
4	315	303	1,15	10	9,56
	311	304	1,3	5,38	
	308,5	303	0,45	12,2	
	319	303	1,5	10,67	
5	314	308	0,55	10	14,61
	318	308	0,45	22	
	318	307	1,15	9,56	
	322	308	1	14	
	324	317	0,4	17,5	
Pente transversale moyenne					13,21 m/km

- **Rapport des pentes r**

$$r = \frac{I_t - I_g}{I_t} * 100 \rightarrow r = \frac{13,21 - 2,56}{13,21} * 100 \rightarrow r = 81\% > 20\%$$
 Donc il est nécessaire d'apporter une correction pour que la pente globale qui sera utilisée soit représentative de l'ensemble du bassin versant,

- **Indice global de pente corrigée**

$$I_{gcor} = \frac{(n - 1) * I_g + I_t}{n} \rightarrow I_{gcor} = \frac{(3 - 1) * 2,56 + 13,21}{3} \rightarrow I_{gcor} = 6 \text{ m/km}$$

Tableau 34: Valeurs du coefficient n

Valeurs de n	Conditions
2	L < 5 Km
3	5 Km < L < 25 Km
4	25 Km < L < 50 Km
5	L > 50 Km

- **Densité de drainage D_d**

$$D_d = \frac{L_t}{S} \rightarrow D_d = \frac{15}{27} \rightarrow D_d = 0,55 \text{ Km/Km}^2$$

- **Densité spécifique D_s**

$$D_s = I_g * \sqrt{S} \rightarrow D_s = 6 * \sqrt{27} \rightarrow D_s = 31,18 \text{ m}$$

Tableau 35: La classification des reliefs selon l'ORSTOM

	Relief	Ds
R1	très faible	<10m
R2	Faible	10<Ds<25m
R3	assez faible	25<Ds<50
R4	modéré	50<Ds<100 m
R5	assez fort	100<Ds<250 m
R6	Fort	250<Ds<500 m
R7	très fort	> 500 m

Le bassin versant est de classe R3 (relief assez faible),

- **Etude de la pluviométrie**

L'ajustement de la série de données des pluies annuelles moyennes a été fait selon la loi Normale encore appelée loi de GAUSS sur un échantillon de 56 valeurs allant de 1955 à 2010, Nous obtenons ainsi les valeurs de la pluviométrie pour différentes fréquences de dépassement,

Tableau 36 : Ajustement des pluies annuelles

Périodes de retour	Fréquences au dépassement	Fréquences au non dépassement	Pluies (mm)	Intervalle de confiance (95%)
10000		0,9999	1340	1230 - 1460
2000		0,9995	1280	1170 - 1380
1000		0,999	1250	1150 - 1350
200		0,995	1170	1080 - 1250
100		0,99	1130	1050 - 1210
50		0,9800	1090	1010 - 1160
20		0,9500	1020	961 - 1090
10		0,9000	967	912 - 1020
5		0,8000	899	852 - 946
3		0,6667	835	793 - 878
2		0,5000	769	728 - 809
1,4286		0,3000	688	644 - 731
1,25		0,2000	639	591 - 686
1,1111		0,1000	571	516 - 625
1,0526		0,0500	514	452 - 577
1,0204		0,0200	451	379 - 523
1,0101		0,0100	409	330 - 487
1,005		0,0050	370	285 - 455
1,001		0,0010	291	192 - 389
1,0005		0,0005	260	156 - 363
1,0001		0,0001	193	78,4- 308

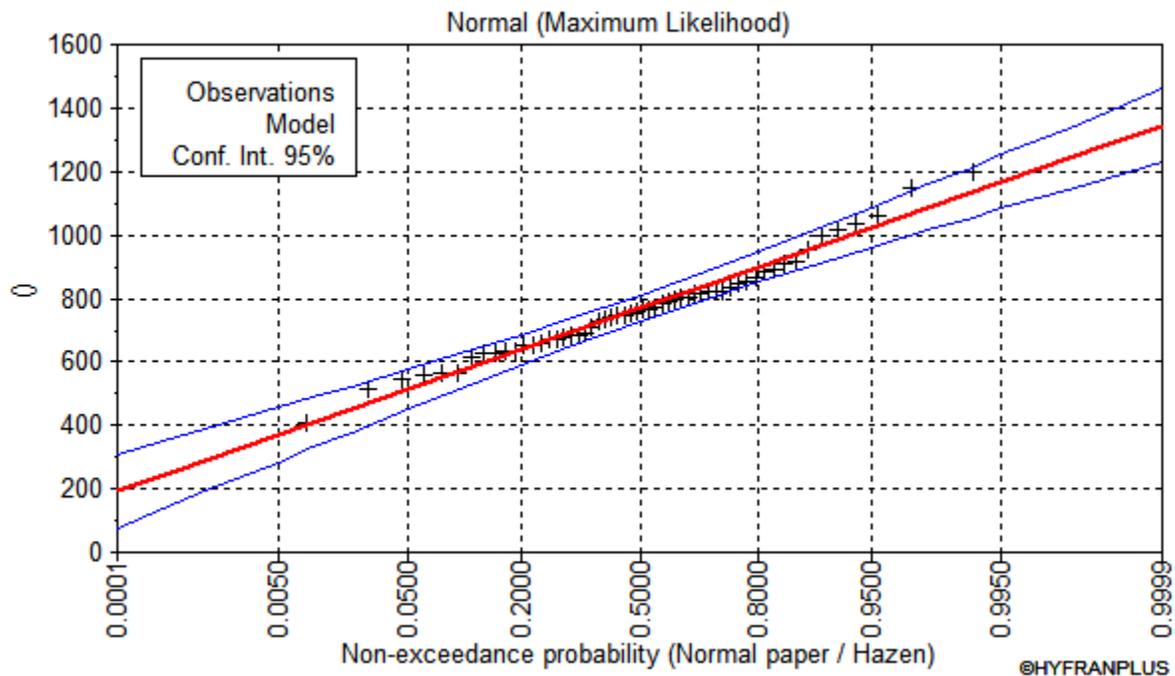


Figure 9: Ajustement des pluies annuelles

- L'ajustement de la série de données des pluies journalières maximales a été faite selon la loi de GUMBEL sur un échantillon de 56 valeurs allant de 1955 à 2010, Nous obtenons ainsi les valeurs de la pluviométrie pour différentes fréquences de dépassement,

Tableau 37: Ajustement des pluies maximales journalières

Période de retour	Fréquences au dépassement	Fréquences au non dépassement	Pluies (mm)	Intervalle de confiance (95%)
10000	0,0001	0,9999	254	198 - 310
2000	0,0005	0,9995	219	172 - 265
1000	0,0010	0,999	204	161 - 246
200	0,0050	0,995	169	136 - 202
100	0,0100	0,99	154	125 - 182
50	0,0200	0,98	138	114 - 163
20	0,0500	0,95	118	98,7 - 137
10	0,1000	0,9	102	87 - 118
5	0,2000	0,8	85,9	74,6 - 97,3

3	0,3333	0,6667	72,9	64,4 - 81,5
2	0,5000	0,5	61,2	54,5 - 68
1,4286	0,7000	0,3	49,2	43 - 55,4
1,25	0,8000	0,2	42,9	36,3 - 49,4
1,1111	0,9000	0,1	35,1	27,5 - 42,7
1,0526	0,9500	0,05	29,3	20,7 - 37,9
1,0204	0,9800	0,02	23,5	13,7 - 33,3
1,0101	0,9900	0,01	19,9	9,35 - 30,5
1,005	0,9950	0,005	16,9	5,6 - 28,2
1,001	0,9990	0,001	11,1	1,54 - 23,8
1,0005	0,9995	0,0005	9,02	4,13 - 22,2
1,0001	0,9999	0,0001	4,84	9,34 - 19

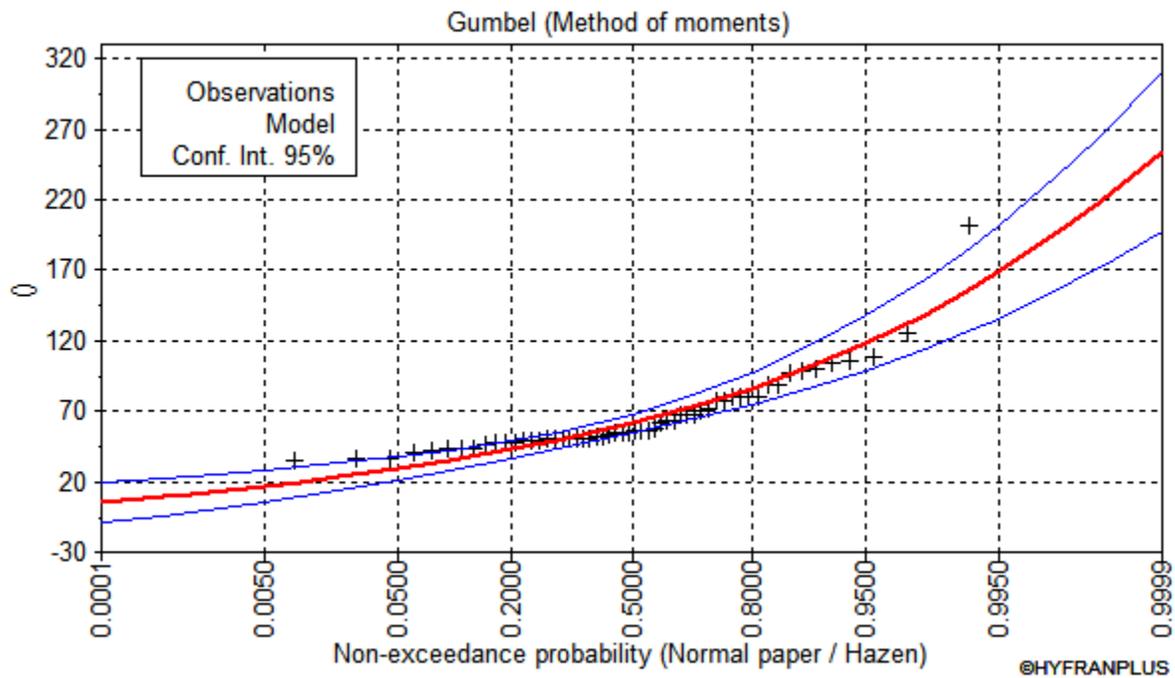


Figure 10: Ajustement des pluies maximales journalières

✚ Etude des crues

La valeur de la pluie moyenne annuelle étant de 769 mm, la zone d'étude se situe dans un climat de type tropical pur.

- **Calcul du coefficient de ruissellement décennal Kr10**

Le coefficient de ruissellement décennal est obtenu par interpolation linéaire entre les valeurs de pentes 7 m/Km et 3 m/km ainsi que les valeurs Kr70 et Kr100,

Tableau 38: Paramètres de détermination de Kr100 pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente et de la classe d'infiltrabilité

KR100				
Caractéristiques		A	b	c
Infiltrabilité	Pente			
RI	15	325	30	26
	7	240	30	22
	3	200	30	17

Source 3: Crues et apports, FAO 1996 page 41,

Tableau 39: Paramètres de détermination de Kr70 pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente et de la classe d'infiltrabilité

KR70				
Caractéristiques		A	b	c
Infiltrabilité	Pente			
	15	250	20	21,7
RI	7	200	20	18,5
	3	150	20	15

Source 4: Crues et apports, FAO 1996 page 41

$$Kr_{100} \text{ ou } Kr_{70} = \frac{a}{S + b} + c$$

$$Kr_{100,1} = \frac{240}{27 + 30} + 22 \rightarrow Kr_{100,1} = 26,2\%$$

$$Kr_{100,2} = \frac{200}{27 + 30} + 17 \rightarrow Kr_{100,2} = 20,5\%$$

$$Kr_{100} = \frac{3}{4} * (Kr_{100,1} - Kr_{100,2}) + Kr_{100,2} \rightarrow Kr_{100} = \frac{3}{4} * (26,2 - 20,5) + 20,5$$

$$Kr_{100} = 24,8\%$$

$$Kr_{70,1} = \frac{200}{27 + 20} + 18,5 \rightarrow Kr_{70,1} = 22,8\%$$

$$Kr_{70,2} = \frac{150}{27 + 20} + 15 \rightarrow Kr_{70,2} = 18,2\%$$

$$Kr_{70} = \frac{3}{4} * (Kr_{70,1} - Kr_{70,2}) + Kr_{70,2} \rightarrow Kr_{70} = \frac{3}{4} * (22,8 - 18,2) + 18,2$$

$$Kr_{70} = 21,6\%$$

$$Kr_{10} = \frac{32}{30} * (Kr_{100} - Kr_{70}) + Kr_{70} \rightarrow Kr_{10} = \frac{32}{30} * (24,8 - 21,6) + 21,$$

$$Kr_{10} = 25\%$$

- **Calcul du temps de base décennal Tb_{10}**

$$Tb_{10} = a * S^c + b$$

Tableau 40: Tableau 8: Paramètres de détermination de Tb_{10} pour la zone tropicale sèche en fonction de l'indice de pente

Temps de base			
Igcor (m/km)	A	B	c
3	325	315	0,36
7	163	142	0,36

Source 5: Crues et apports, FAO 1996 page 49,

$$Tb_{10,1} = 163 * 27^{0,36} + 142 \rightarrow Tb_{10,1} = 675,92 \text{ min}$$

$$Tb_{10,2} = 325 * 27^{0,36} + 315 \rightarrow Tb_{10,2} = 1379,6 \text{ min}$$

$$Tb_{10} = \frac{3}{4} * (Tb_{10,1} - Tb_{10,2}) + Tb_{10,2} \rightarrow Tb_{10} = \frac{3}{4} * (675,92 - 1379,6) + 1379,6$$

$$Tb_{10} = 851,8 \text{ min}$$

- **Temps de montée**

$$T_m = \frac{Tb_{10}}{3} \rightarrow T_m = \frac{851,8}{3} \rightarrow T_m = 283,94 \text{ min}$$

- **Le coefficient d'abattement**

$$A = 1 - \left(\frac{(161 - 0,042 * 769)}{1000} \right) * \log_{10}(27) \rightarrow A = 0,82$$

Le coefficient de pointe $\alpha_{10} = 2,6$

- **Débit décennal d'après la méthode ORSTOM**

$$Q_{10} = m \times A \times P_{10} \times K_{r10} \times \alpha_{10} \times \frac{S}{T_{b10}}$$

$$\rightarrow Q_{10} = 1,03 \times 0,82 \times 0,102 \times 0,25 \times 2,6 \times \frac{27 \times 1000000}{851,8 \times 60}$$

$$Q_{10} = 29,43 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Débit décennal d'après la méthode CIEH**

$$Q_{10} = a \times S^s \times \bar{P}_{an}^p \times I_g^i \times K_{r10}^k \times Dd^d$$

Tableau 41: Débits obtenus par la méthode CIEH

Méthode CIEH									
N°équation	N° echantillon	Corrélation (r ²)	Exposants des paramètres de l'équation					Q10 (m ³ /s)	Moyenne
			a	S	Ig	Kr10	Dd		
39	61	0,818	0,41	0,43	0,00	0,92	0,00	32,46	32,38
40	60	0,824	0,25	0,46	0,10	0,98	0,00	32,29	

$$Q_{10} \text{ retenu} = 32,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Choix de la période de retour**

Méthode de DEGOUTTE

$$\frac{H^2}{\sqrt{V}} = \frac{(0,041)^2}{\sqrt{1036491 \times 10^{-6}}} = 11,11 \text{ Qui correspond à une période de retour de 500 ans mais pour ce}$$

projet, nous retiendrons une période de retour de 100 ans,

- **Débit de pointe**

Pour le calcul de la crue de projet, nous utilisons le coefficient majorateur proposé par GRESILLON, HERTER et LAHAYE et basé sur la méthode du gradex de GUILLOT et DUBAND,

$$\rightarrow C_{100} = 1 + \frac{154 - 102}{102} * \frac{851,83^{0,12}}{25}$$

$$C_{100} = 2,88$$

$$Q_{100} = C_{100} * Q_{10} \rightarrow Q_{100} = 2,88 * 32,38$$

$$Q_{100} = 93,18 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Hydrogramme de crue**

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{2}{\alpha_{10}} * \frac{Tb_{10} - \alpha_{10} * Tm_{10}}{Tb_{10} - 2 * Tm_{10}} \rightarrow \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{2}{2,6} * \frac{851,8 - 2,6 * 283,94}{851,8 - 2 * 283,94}$$

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 0,308 \rightarrow Q = 28,67 \text{ m}^3/\text{s}$$

La détermination du temps de cassure se fait en considérant la droite d'équation

$$y = ax + b$$

Pour $y = Q_{\max}$, $x = Tm_{10}$ et pour $y = Q_0$, $x = Tb_{10}$

$$\begin{cases} 93,18 = a * 283,94 + b \\ 0 = a * 851,8 + b \end{cases}$$

La résolution du système d'équation nous donne $a = -0,328$ et $b = 186,36$

$$T_c = \frac{(Q - b)}{a} \rightarrow T_c = 480 \text{ min}$$

Tableau 42: Paramètres de l'hydrogramme de crue

X	Y
Temps (min)	Débit
	(m3/s)
0	0,00
284	93,18
480	28,67
852	0,00

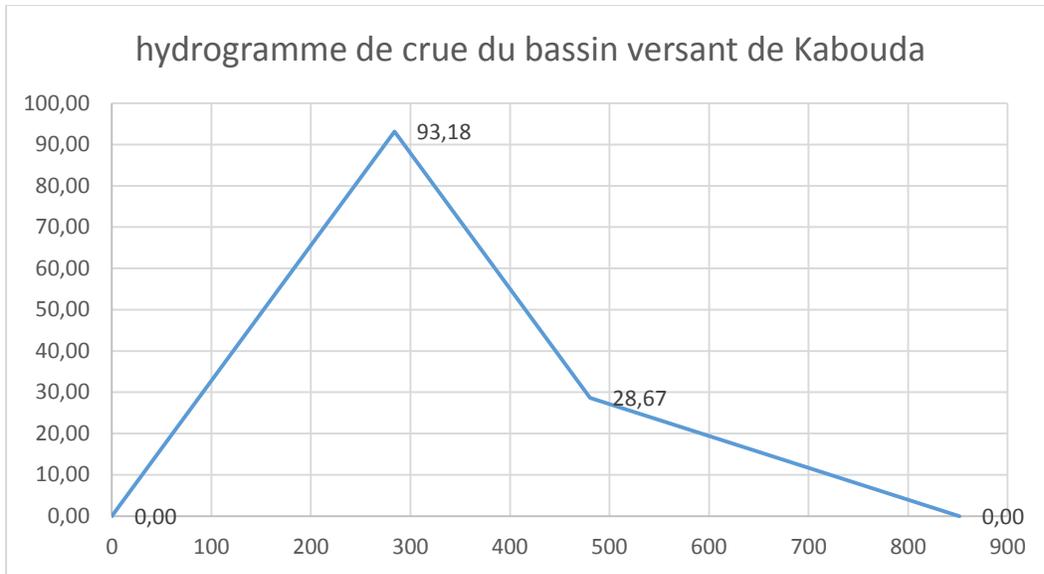


Figure 11: Hydrogramme de crue

Estimation des besoins et des pertes

• Pertes par dépôts solides

Les dépôts sont estimés à partir des formules de KARAMBIRI et GOTTSCHALK (USA)

Formule de KARAMBIRI : $D = 137 * \left(\frac{32}{700}\right)^{-2,02} * 27^{-0,05} * [0,25 + 1,13 * (0,55 + 0,25)]^{1,15}$

$$D = 163 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{an} \rightarrow V_S = 4401,05 \text{ m}^3/\text{an}$$

Formule de GOTTSCHALK : $D = 260 * S^{-0,1} \rightarrow D = 186,99 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{an}$

$$V_S = 5048,94 \text{ m}^3/\text{an}$$

Les apports solides sont en moyenne de $V_S = 4725 \text{ m}^3$ par an,

• Pertes par infiltration

Tableau 43: Estimation des pertes par infiltration

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov
durée (jours)	31	28	31	31	31	31	31	30	31	30	31
Pertes (mm/mois)	108,5	98	108,5	108,5	108,5	108,5	108,5	105	108,5	105	108,5

- **Pertes par évaporation**

Tableau 44: Estimation des pertes par évaporation

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
durée (jours)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Ev,Bac A (mm/j)	6,1	7,4	7,1	6,9	6,5	5,8	4,8	4,4	5,1	6	6,1	5,7
Ev,lac (mm/j)	4,9	5,6	5,4	5,3	5,1	4,8	4,3	4,1	4,4	4,9	4,9	4,7
Ev,lac (mm/mois)	153, 2	155, 4	167, 9	159, 7	159, 2	143, 8	132, 6	125, 9	133, 1	151, 7	148, 3	147, 1

- **Besoins en eau**

Tableau 45: Besoins en eau de la population et du cheptel

Besoins en eau de la population et du cheptel					
	Janvier	Février	Octobre	Novembre	Décembre
Nombre de jours	31	28	31	30	31
Consommation de la population (m3/mois)	1236	1116	1236	1196	1236
Consommation cheptel (m3/jour)	1779	1779	1779	1779	1779
Consommation cheptel (m3/mois)	55148	49811	55148	53369	55148

Tableau 46: Besoins en eau de l'oignon

Besoins en eau de l'oignon						
	Janvier	Février	Octobre	Novembre	Décembre	
Nombre de jours	31	28	31	30	31	
Pluviométrie (mm)	0	1	31	1	1	
Pluie efficace (mm)	0	0	29,35	0	0	
Eto (mm)	178,87	178,64	163,99	161,4	161,82	
Phases	Mi-	Arrière-		Initia	Croissan	Mi-saison

	Saison	saison			le	ce			
Nombre de jours	18	13	27		15	16	9	21	31
Kc par phase	1,05	0,8 5	0,8 5		0,5	0,75		1,05	
Kc par mois	0,97		0,85		0,63		0,96		1,05
ETM (mm)	172,81		151,844		103,15		154,94		169,91
Besoins Nets (mm)	172,81		151,844		73,80		154,94		169,91
Efficienc global	0,6		0,6		0,6		0,6		0,6
Besoins bruts(mm)	288,01		253,07		123,00		258,24		283,18
Besoins Bruts (m3/ha)	2880,19		2530,73		1230,08		2582,4		2831,8
Besoins Bruts pour la campagne (m3)	20161,34		17715,1		8610,58		18076,8		19822,9

- **Simulation de la retenue**

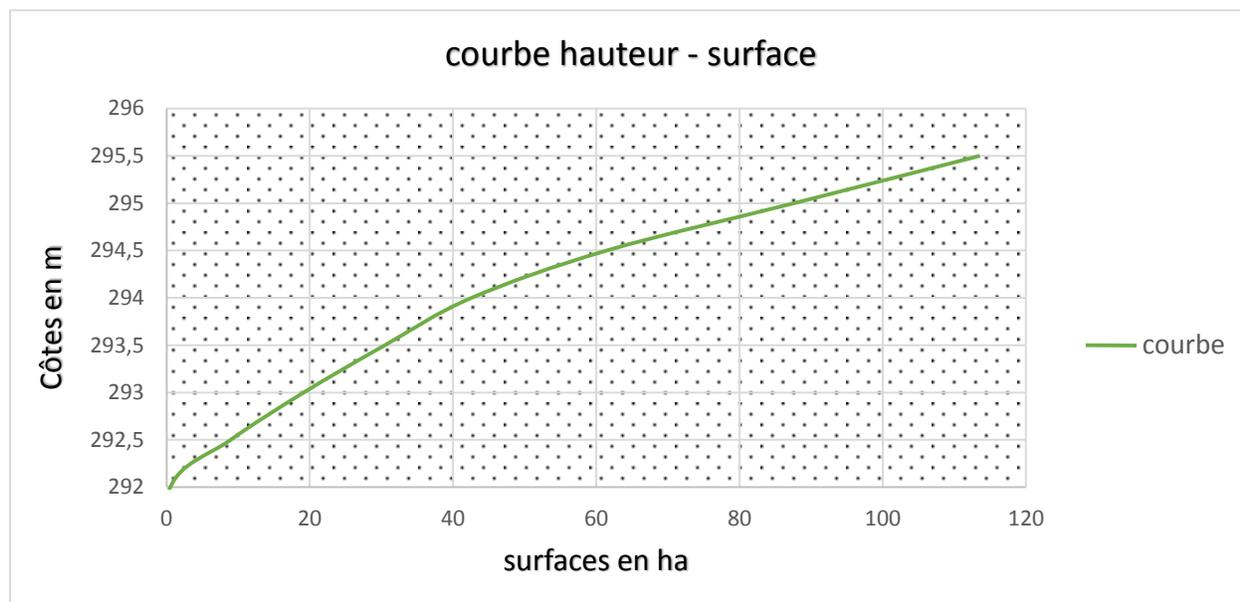


Figure 12: Courbe hauteur surface

6.2. Vérification de la digue

🚩 Revanche libre

- **Formule de Molitor pour le calcul de la hauteur des vagues h_{vague} :**

La vitesse des vents pris à partir de la station synoptique de Ouagadougou ;

$$U = 2,3 \text{ m/s Soit } 8,28 \text{ Km/h}$$

$$\text{Le fetch } f \text{ (longueur du plan d'eau exposé au vent) : } f = \frac{\text{hauteur barrage}}{\text{pente longitudinale}} = 0,6 \text{ Km}$$

$$h_{\text{vague}} = 0,76 + 0,032\sqrt{U * f} - 0,26 * \sqrt[4]{f}$$

$$\rightarrow h_{\text{vague}} = 0,76 + 0,032\sqrt{2,3 * 1} - 0,26 * \sqrt[4]{1}$$

$$\rightarrow h_{\text{vague}} = 0,59\text{m}$$

- **Formule de Gaillard**

Vitesse des vagues

$$V_{\text{vague}} = 1,5 + 2 * h_{\text{vague}} \rightarrow V_{\text{vague}} = 1,5 + 2 * 0,59$$

$$V_{\text{vague}} = 2,68 \text{ m/s}$$

La revanche

$$R = 0,75 * h_{\text{vague}} + \frac{V_{\text{vague}}^2}{2 * g} \rightarrow R = 0,75 * 0,59 + \frac{2,68^2}{2 * 9,81}$$

$$R = 0,8 \text{ m}$$

- **Approche simplifiée**

Tableau 47: Revanche libre par l'approche simplifiée

Revanche libre	
$H^2 * \sqrt{V}$	17,10
Rapport $H^2 * \sqrt{V}$	Revanche (m)
30	0,6
17,10	0,45
5	0,4

La revanche est obtenue en faisant la moyenne des deux approches :

$$R = \frac{0,8 + 0,43}{2} \rightarrow R = 0,60 \text{ m}$$

- **Largeur de la crête**

Formule de KNAPPEN : $l_c = 1,65 * \sqrt{4,1} \rightarrow l_c = 3,34 \text{ m} < 3,5 \text{ m}$

Formule de PREECE : $l_c = 1,1\sqrt{4,1} + 1 \rightarrow l_c = 3,22 \text{ m} < 3,5 \text{ m}$

La largeur en crête de la digue est de 3,5 m,

- **La largeur de la fondation de la digue**

$$l_f = l_c + \frac{H_r}{\tan \alpha_1} + \frac{H_r}{\tan \alpha_2} \rightarrow l_f = 3,5 + \frac{4,1}{0,5} + \frac{4,1}{0,5}$$

$$l_f = 20 \text{ m}$$

$$b = \frac{H_r}{\tan \alpha_1} \rightarrow \frac{4,1}{0,5}$$

$$b = 8,2 \text{ m}$$

$$L_d = \frac{L_f}{4} = \frac{20}{4} = 5 \text{ m}$$

$$x = l_f - L_d \rightarrow x = 15 \text{ m}$$

$$d = x - 0,7 * b \rightarrow d = 9 \text{ m}$$

Détermination de la ligne phréatique et de la parabole de Kozény

$$y_0 = \sqrt{H_r^2 + d^2} - d \rightarrow y_0 = \sqrt{4,1^2 + 8,36^2} - 8,36$$

$$y_0 = 0,4 \text{ m}$$

- **Le débit de fuite**

$$q = K_{ar} * y_0 = 10^{-9} * 0,89 \rightarrow q = 3,8 * 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

- **L'épaisseur du drain**

$$e = 2 * \sqrt{\frac{q * L_d}{K_d}} = 2 * \sqrt{\frac{3,8 * 10^{-10} * 4,5}{10^{-5}}} \rightarrow e = 0,02 \text{ m}$$

- **Pente des talus**

Nous allons nous référer sur le tableau 15 qui présente les fruits de talus en fonction du type de barrage et de sa hauteur pour trouver les pentes convenables,

Tableau 48: Fruits des selon le type et la hauteur du barrage

Hauteur du barrage	Type de barrage en terre	Fruit des talus	
		Amont	Aval

Inférieur à 5 m	Homogène	2,5	2
	A zones	2	2
5 à 10 m	Homogène, granulométrie étendue	2	2
	Homogène à fort pourcentage d'argile	2,5	2,5
	A zone	2	2,5
10 à 15 m	Homogène, granulométrie étendue	2,5	2,5
	Homogène à fort pourcentage d'argile	3	2,5
	A zone	2	3

Source 6: M,L, COMPAORE 1996, cours de barrage page 264,

- **Protection des talus**

Pour la protection des talus, nous utiliserons du perré maçonné à l'amont, et du perré sec à l'aval,

$$h_v = 0,59 \text{ m} \rightarrow D_{50} = 0,25 \text{ m}$$

$$e_p = 1,5 * 0,25 = 50 \text{ cm}$$

- **Stabilité**

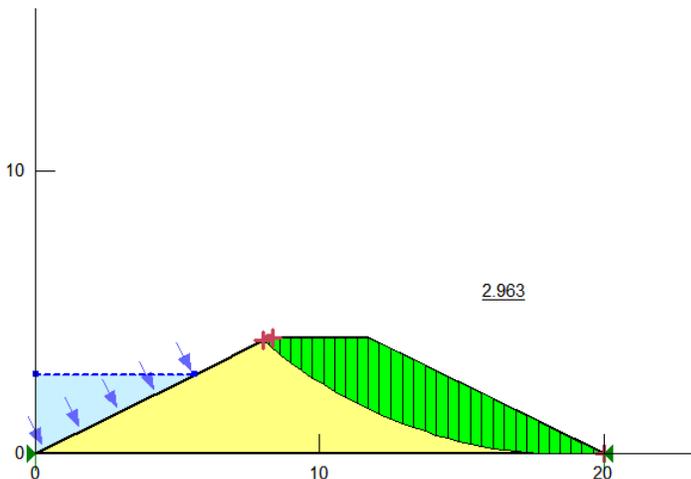


Figure 13: Stabilité de la digue pour un facteur de sécurité de 2,963

La stabilité des talus est vérifiée.

6.3. Conception du déversoir

- **Laminage de crues**

Tableau 49: Résultats du laminage de crues

L(m)	S(m ²)	M	tm(s)	Qcmax(m ³ /s)	g(m/s ²)	X0	log10 X0	Beta	Qemax
86,47	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	17	1,23	82,3%	76,6
71,12	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	11	1,04	80,6%	75,1
69,66	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	10,91	1,04	80,4%	74,9
69,48	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	10,86	1,04	80,4%	74,9
69,48	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	10,86	1,04	80,4%	74,9
69,48	270000	0,34	17036,69	93,18	9,81	10,86	1,04	80,4%	74,9

La longueur déversante est prise égale à 70 m avec un débit à évacuer de 75,43 m³/s,

✚ Crue de rupture

$$Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,2) + 0,15 * L$$

$$Q_{rupt} = 2 * 70 * (1,5 + 0,2) + 0,15 * 1156,18 \rightarrow Q_{rupt} = 430,62 \text{ m}^3/\text{s}$$

✚ Stabilité du déversoir

• Stabilité externe

Stabilité au non glissement

Le poids propre

$$W = \gamma_b * S \rightarrow W = 24 * \frac{2*b_1*H_r + H_r^2 * \tan \alpha}{2} \rightarrow W = 24(H_r + \frac{1}{2}H_r^2 \tan \alpha)$$

La poussée hydrostatique interne (Présence de parafouille)

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \left(h + \frac{2}{3} (H_r - h) \right) * (H_r \tan \alpha + b_1) \rightarrow U = \frac{16}{3} + \frac{16}{3} H_r + \frac{16}{3} H_r \tan \alpha + \frac{10}{3} H_r^2 \tan \alpha$$

La poussée hydrostatique externe

$$P_e = \frac{1}{2} \gamma_w H_r^2 + \gamma_w H_r h \rightarrow P_e = 8H_r + 5H_r^2$$

La poussée des terres

$$P_t = \frac{1}{2} \gamma_{sable} * h_{sed}^2 * K_a \text{ avec } K_a = 0,33 \rightarrow P_t = 2,97 \text{ KN/m}$$

$$\frac{(W - U) * \tan \phi}{(P_e + P_t)} \geq 1,2$$

$$W - U = \left[\frac{56}{3} + \frac{20}{3} H_r + \tan \alpha \left(\frac{26}{3} H_r^2 + \frac{56}{3} H_r \right) \right]$$

$$P_e + P_t = 8H_r + 5H_r^2 + 2,97$$

$$\frac{\left[\frac{56}{3} + \frac{20}{3}H_r + \tan \alpha \left(\frac{26}{3}H_r^2 - \frac{56}{3}H_r\right)\right] * \tan \phi}{8H_r + 5H_r^2 + 2,97} \geq 1,2$$

$$\rightarrow \left(\frac{26}{3}H_r^2 - \frac{56}{3}H_r\right) \tan \alpha * \tan \phi \geq 9,6H_r + 6H_r^2 + 3,56 - \tan \phi \left(\frac{56}{3} + \frac{20}{3}H_r\right)$$

$$\rightarrow \tan \alpha \geq \left(\frac{\frac{79}{15}H_r + 6H_r^2 + \frac{14}{3}}{\left(\frac{169}{30}H_r^2 - \frac{182}{15}H_r\right)}\right) \rightarrow \alpha_g \geq \tan^{-1}\left(\frac{\frac{79}{15}H_r + 6H_r^2 + \frac{14}{3}}{\left(\frac{169}{30}H_r^2 - \frac{182}{15}H_r\right)}\right)$$

$$\alpha_g \geq \tan^{-1}(0,84) \rightarrow \alpha_g \geq 40,06^\circ$$

Stabilité au non glissement

$$F_r = \frac{\sum M/B(W - U)}{\sum M/B(P_e + P_t)} \geq 1,5$$

$$M/B(W) = W * (b_2 - x_{Gouv})$$

$$x_{Gouv} = \frac{\sum x_i S_i}{S} = \frac{\frac{1}{2}H_r + \left[\left(\frac{1}{3}H_r \tan \alpha\right) + 1\right] * \frac{1}{2}H_r^2 \tan \alpha}{H_r + \frac{1}{2}H_r^2 \tan \alpha}$$

$$\rightarrow x_{Gouv} = \frac{0,5 + \frac{1}{6}H_r^2 \tan \alpha + 0,5H_r \tan \alpha}{1 + H_r \tan \alpha}$$

$$M/B(W) = 24\left(H_r + \frac{1}{2}H_r^2 \tan \alpha\right) * \left(1H_r \tan \alpha - \frac{0,5 + \frac{1}{6}H_r^2 \tan \alpha + 0,5H_r \tan \alpha}{1 + H_r \tan \alpha}\right)$$

$$M/B(W) = 12H_r - 0,3 + (24H_r^2 - 0,6H_r) \tan \alpha + (8H_r^3 - 0,6H_r^2) \tan^2 \alpha$$

$$M/B(U) = \frac{20}{9}H_r + \frac{40}{9}H_r \tan \alpha + \frac{40}{9}H_r^2 \tan \alpha + \frac{20}{9}H_r^2 \tan^2 \alpha + \frac{20}{9}H_r^3 \tan^2 \alpha + \frac{20}{9}$$

$$M/B(P_e) = \gamma_w h H_r * \frac{1}{2}H_r + \frac{1}{2}\gamma_w H_r^2 * \frac{1}{3}H_r \rightarrow M/B(P_e) = 4H_r^2 + \frac{5}{3}H_r^3$$

$$M/B(P_t) = P_t * \frac{1}{3}h_{sed} = 0,98KN, m$$

$$F_r = \frac{\sum M/B(W - U)}{\sum M/B(P_e + P_t)} \geq 1,5$$

$$\rightarrow \left(\frac{4}{3}H_r^3 - \frac{109}{15}H_r^2\right) \tan^2 \alpha \left(\frac{176}{9}H_r^2 - \frac{227}{45}H_r\right) \tan \alpha + \frac{88}{9}H_r + \frac{20}{9}$$

$$\geq 1,5 \left(4H_r^2 + \frac{1}{3}H_r^3 + 0,98\right)$$

$$\left(\frac{4}{3}H_r^3 - \frac{109}{15}H_r^2\right) \tan^2 \alpha \left(\frac{176}{9}H_r^2 - \frac{227}{45}H_r\right) \tan \alpha + \frac{88}{9}H_r + \frac{20}{9}$$

$$- 1,5 \left(4H_r^2 + \frac{1}{3}H_r^3 + 0,98\right) \geq 0$$

$$\left(\frac{4}{3}H_r^3 - \frac{109}{15}H_r^2\right) \tan^2 \alpha \left(\frac{176}{9}H_r^2 - \frac{227}{45}H_r\right) \tan \alpha + \frac{88}{9}H_r - 6H_r^2 - 2,5H_r^3 - \frac{45}{8} \geq 0$$

$$(-17,35)\tan^2 \alpha (62,40) - 26,66 \geq 0$$

La résolution de d'équation de degré 2 donne deux solutions $x_1 = 0,49$ et $x_2 = -3,15$

$$\tan \alpha = 0,49 \rightarrow \alpha = 26,10^\circ$$

Pour la vérification à la stabilité externe, nous prenons une valeur de l'angle égale à 45° ,

- **Stabilité interne**

Stabilité à la non fissuration

La condition de non fissuration est donnée par la condition :

$$\sigma_{min} \geq 0 \rightarrow |e| \leq \frac{b}{6} \text{ Avec } e = X_{Gouv} + Y_{Gouv} * \left(\frac{Pe+Pt}{W-U}\right) - \frac{b_2}{2}$$

$$b_2 = 1 + H_r \tan \alpha = 2,92 \text{ m}$$

$$x_{Gouv} = \frac{0,5 + \frac{1}{6}H_r^2 \tan \alpha + 0,5 H_r \tan \alpha}{1 + H_r \tan \alpha} = \frac{0,5 + \frac{1}{6}1,92^2 \tan 45 + 0,5 * 1,92 \tan 45}{1 + 1,92 \tan 45} = 0,90 \text{ m}$$

$$P_e + P_t = 8 * 1,92 + 5 * 1,92^2 + 2,97 = 36,76 \text{ KN/m}$$

$$W - U = \frac{56}{3} + \frac{20}{3} * 1,92_r + \tan 45 \left(\frac{26}{3}1,92^2 - \frac{56}{3}1,92\right) = 87,25 \text{ KN/m}$$

$$y_{Gouv} = \frac{\sum y_i S_i}{S} = \frac{H_r + \frac{1}{3}H_r^2 \tan \alpha}{2 H_r \tan \alpha} = \frac{1,92 + \frac{1}{3}1,92^2 \tan 45}{2 * 1,92 * \tan 45} = 0,50 \text{ m}$$

$$e = 0,90 + 0,5 * \left(\frac{36,76}{87,25}\right) - \frac{2,92}{2} = -0,34$$

$$\frac{b}{6} = 0,48 \text{ m} > |e|$$

La stabilité à la non fissuration est vérifiée,

Stabilité à la non rupture

La condition de non rupture est donnée par l'inéquation $\sigma_{max} \leq \sigma_{lim,beton}$

$$\sigma_{lim,beton} = 0,3 * f_{c28} = 0,3 * 20 = 6 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{max} = \left(\frac{W - U}{b_2} \right) \left[1 + \frac{6|e|}{b_2} \right] = \left(\frac{87,25}{2,92} \right) \left[1 + \frac{6|-0,34|}{2,92} \right]$$

$$\sigma_{max} = 0,11 \text{ Mpa}$$

La stabilité à la non rupture est vérifiée.

✚ Bassin de dissipation

Enfoncement du bassin D

Ho	yn/Ho	h/ho	D/Ho	D
1,77	0,3	0,5	0,51	0,90

Débit unitaire

$$q = \frac{Q}{L} = \frac{75,43}{70} = 1,07 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vitesse de l'eau au-dessus du seuil

$$V_0 = \frac{q}{h} = \frac{1,07}{0,8} = 1,34 \text{ m/s}$$

Détermination de y_1

$$y_1 = \frac{q}{\sqrt{2 * g - y_1}}$$

Par itération on obtient $y_1 = 0,15 \text{ m}$

La vitesse à l'entrée du bassin

$$V_1 = \frac{q}{y_1} = 7,18 \text{ m/s}$$

Le nombre de Froude

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * y_1}} = 5,91$$

La hauteur d'eau à la sortie du bassin

$$y_2 = y_1 * 0,5 * \left(\sqrt{1 + 8F^2} - 1 \right) = 1,3 \text{ m}$$

Les paramètres tels la longueur du bassin, la hauteur des blocs chicanes h_2 et du seuil terminal h_4 sont déterminés par lecture graphique.

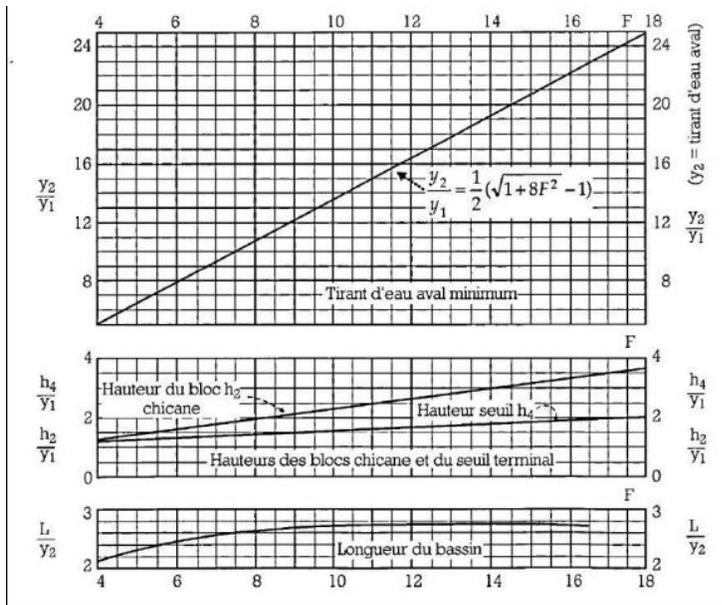


Figure 14: Abaque de détermination des caractéristiques du bassin de dissipation

$$h_2 = 0,25 \text{ m}$$

$$h_4 = 0,19 \text{ m}$$

$$L = 3,5 \text{ m}$$

✚ Murs bajoyers

Efforts stabilisants

$$\text{Poids de la semelle : } P_s = 25 * 1,95 * 0,4 = 19,5 \text{ KN}$$

$$\text{Poids du voile : } P_v = 25 * 0,28 + 25 * 0,25 * 3,75 = 30,43 \text{ KN}$$

$$\text{Poids du remblai : } P_R = 18 * 0,25 + 18 * 1,55 * 3,75 = 116,41 \text{ KN}$$

$$\text{Charge variable : } Q = 10 * 3,75 = 37,5 \text{ KN}$$

Efforts renversants

Poussée des terres

$$P_t = 0,33 * 9,24 * 18 = 54,91 \text{ KN}$$

Poids des surcharges

$$P_q = 0,33 * 4,3 * 10 = 14,19 \text{ KN}$$

Moments par rapport à A.

Moments stabilisants

$$\text{Moment dû à la semelle : } = 19,5 * 0,97 = 18,91 \text{ KN.m}$$

$$\text{Moment dû au voile : } = 7,78 + 2,92 = 10,70 \text{ KN.m}$$

Moment dû au poids des terres : $= 1,26 + 107,24 = 108,50 \text{ KN. m}$

Moment dû à la surcharge $= 2,12 \text{ KN. m}$

Moments renversants

Moment des terres $= 54,91 * 1,43 = 78,52 \text{ KN. m}$

Moment de la surcharge $= 14,12 * = 30.35 \text{ KN. m}$

Stabilité au renversement : $= \frac{225,26}{69,1} = 3,26$

Stabilité au glissement $= \frac{281,97}{108,87} = 2,59$

XI. Annexe 7 : Proposition de PGES

Le PGES consiste à énoncer des mesures d'atténuation, d'optimisation, de bonification et de compensation des impacts négatifs identifiés.

Ces mesures empêchent et minimisent les répercussions négatives du projet. Ils sont résumés comme suit :

Tableau 50: Plan de Gestion Environnemental et Social

Impacts négatifs	Mesure d'atténuation	Responsable de la mise en œuvre	Période
Dégradation des sols	Restauration des sols après travaux	Entreprise	Pendant les travaux
Nuisances sonores liées aux vibrations	Utilisation des machines bruyantes la journée	Entreprise	
Encombrement du site	Création d'une base vie et signalisation pour indiquer les travaux	Entreprise	
Dégradation de la qualité de l'air	Humidifier les zones avant toute activité	Entreprise	

XII. Annexe 8 : Devis estimatif et quantitatif

Tableau 51: Devis estimatif et quantitatif

DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF					
N°	DESIGNATION	UNITES	QUANTITES	PRIX UNITAIRES	PRIX TOTAUX
I INSTALLATIONS GENERALES DU CHANTIER					
1	AMENEE ET REPLI DU MATERIEL DE CHANTIER	FF	1	10 000 000	10 000 000
2	INSTALLATION ET IMPLANTATION DU CHANTIER	FF	1	5 000 000	5 000 000
II REHABILITATION DU BARRAGE					
II.1 DIGUE					
1	Nettoyage, débroussaillage	FF			250 000
2	Déblai aux engins pour tranchée d'ancrage	m ³	15 660	3 000	46 981 463
3	Déblai manuel pour mur parapet, butée et drain de pied	m ³	1 193	2 500	2 982 950
4	Remblai argileux compacté pour tranchée d'ancrage	m ³	15 660	5 000	78 302 438
5	Déblai en redans sur talus amont (20 cm)	m ³	476	5 000	2 380 000
	Déblai en redan sur talus aval (5m)	m ³	4 966	5 000	24 828 100
6	Drain horizontal	m ³	298	5 000	1 491 475
7	Remblai en redans sur talus amont et aval	m ³	20 185	5 000	100 924 350
8	Couche de pose pour perrés amont et aval	m ³	1 468	4 000	5 870 446

9	Perrés maçonnés pour talus aval	m ²	1 145	2 000	2 290 906
10	Perrés secs pour talus aval	m ²	489	3 000	1 467 611
11	Enrochements pour butée de pied et drain de pied	m ³	1 193	3 000	3 579 540
12	Béton cyclopéen pour murs parapet	m ³	298	15 000	4 474 425
13	Décapage de la crête (20 cm)	m ³	278	1 000	278 075
14	Revêtement latéritique compacté sur la crête	m ³	716	5 000	3 579 540
15	Tuyau PVC D50 pour barbacanes pour mur parapet	ml	170	2 000	340 000
Sous total Série II.1					280 021 318
II.2	DEVERSOIR ET OUVRAGES ANNEXES				
1	Mise en place du déversoir, du mur bajoyer, du bassin de dissipation	ml	70	5 338 055	373 663 850
Sous détails II.2					373 663 850
III	DIGUETTE DE PROTECTION				
1	Décapage de l'emprise de la diguette	m ³	144	5000	720 000
2	Remblai compacté pour corps de diguette	m ³	720	5000	3 600 000
3	Perré maçonné pour talus amont	m ²	16	2000	32 000
4	Perré sec pour talus aval	m ²	16	3000	48 000
Sous détails II.3					4 400 000
II.3	EQUIPEMENTS DU BARRAGE				
1	Echelle limnimétrique	ml	8	75 000	600 000
Sous total II.3					600 000
III	MESURES ENVIRONNEMENTALES				
1	Reboisement autour de la	Km	20	100 000	2 000 000

	cuvette				
	MONTANT TOTAL HT				675 685 168
	TVA (18%)				121 623 330
	MONTANT TOTAL TTC				797 308 498

XIII. Annexe 9 : Pièces dessinées
7.1. Profil en travers type de la digue

7.2. Infiltration dans la digue

7.3. Profil en travers du déversoir

7.4. Plan de ferrailage du mur bajoyer

7.5. Bilan d'application des forces sur le déversoir