



Contribution à la réalisation des études techniques détaillées
de la réhabilitation du barrage de Goinré dans la commune de
Ouahigouya (Burkina Faso).

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : Infrastructures et Réseaux Hydrauliques

Présenté et soutenu publiquement le 30 juin 2018 par

Terlè Léticia PODA

Travaux dirigés par :

M. Césaire HEMA,
Assistant de l'enseignement et de la recherche en Génie Civil à 2iE
Département Génie Civil et Hydraulique

Et

M. Aley SAOUTO
Ingénieur du Génie Rural,
Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques

Jury d'évaluation du stage :

Président : Abdou LAWANE

Membres et correcteurs : Dr. Lawani MOUNIROU
M. Moussa FAYE
M. Césaire HEMA
M. Aley SAOUTO

Promotion [2017/2018]

DEDICACES

*Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis jours et nuits, nous mènera vers le bonheur fleuri,
Je dédie ce modeste travail*

A ma très chère mère

A mon très cher père

A mon fils chéri

A mes chères sœurs, frère.

REMERCIEMENTS

Notre gratitude va à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre ont œuvré pour l'aboutissement de ce travail et de notre formation. Plus particulièrement à :

- Toute ma famille, pour son accompagnement et son soutien sans faille ;
- Monsieur Patrice O. GUISSOU, Directeur Général des infrastructures hydrauliques pour m'avoir accueillie dans sa structure ;
- M. SAOUTO Aley, mon maître de stage pour ses conseils, l'effort et le temps consacrés pour ce travail ;
- M. HEMA Césaire, mon directeur de mémoire pour son suivi et ses directives pour la consistance de ce mémoire ;
- A l'ensemble du personnel de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH), pour l'accueil et le soutien témoignés à notre égard ;
- Tous le corps professoral de 2iE pour tous les efforts pour nous transmettre le savoir ;
- Tous nos amis et camarades de 2iE.

RESUME

Le présent document porte sur la réhabilitation du barrage de Goinré dans la commune de Ouahigouya, région du Nord au Burkina Faso. La retenue d'eau, créée en 1966 permet l'alimentation en eau de la population de Ouahigouya. Elle est également utilisée pour les besoins agricoles et pastoraux. Du fait de son âge, et aussi des actions anthropiques, le barrage subit des dégradations diverses sur tous ses éléments constitutifs. Les études diagnostiques montrent que la plupart des dégradations relevées sont dues non seulement au manque d'entretien, mais également à la mauvaise gestion du barrage de la part des exploitants. A l'image de la plupart des vieux barrages (réalisés avant les années 1970), le barrage de Goinré connaît un fort taux d'ensablement, causant ainsi la baisse du volume d'eau retenue.

Du fait de cette baisse considérable de volume, soit 19 800 000 m³ à sa réalisation et près de 11 580 000 m³ en 2017, une simulation a été faite, afin de voir si l'eau de la retenue couvre toujours les besoins de la population. La réhabilitation proposée consiste à remettre en état la protection sur le corps de digue ; à mettre en place un évacuateur de crue. Les différentes propositions à prendre pourront contribuer à permettre aux usagers de l'eau du barrage de Goinré, d'avoir un ouvrage qui fonctionne mieux.

Après étude du projet, il faudra mobiliser la somme de six cent soixante-dix millions (670 000 000) de francs CFA, pour remettre en état l'ouvrage.

Mots Clés :

- 1 - Barrage**
- 2 - Réhabilitation**
- 3 - Envasement/ensablement**
- 4 - Goinré**
- 5 - Ouahigouya**

ABSTRACT

This paper focuses on the rehabilitation of the Goinré dam in Ouahigouya, a commune of the northern region of Burkina Faso. The reservoir of water, created in 1966 allows the population of Ouahigouya to supply water. This dam is also used for agricultural and pastoral needs. And, it is damaged from its age, and also anthropic activities. The Goinré dam undergoes various degradations on all its organs. Diagnostic studies shoes that most of the damages are caused by the lack of maintenance from the benefiteres.

Like almost ancient dams (created in the years 1970), the Goinré dam is now very silty, causing the decrease of the volume of retained water. The proposed rehabilitation consists of rehabilitating the protection on the dike; to set up a spillway. The various proposals to be made may help to allow water users of the Goinré dam to have a work that works better.

After studying the project, six hundred seventy million (670 000 000) CFA should be mobilized to restore the dam.

Keywords :

- 1 - Dam**
- 2 – Rehabilitation**
- 3 – Siltation**
- 4 - Goinré**
- 5 – Ouahigouya**

LISTE DES ABREVIATIONS

AEN	:	Agence de l'Eau du Nakanbé
AEP	:	Alimentation en eau potable
CAMEPAG	:	Coopérative Agricole et Maraîchère du Périmètre Aménagé de Goinré
CIEH	:	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CLE	:	Comité Local de l'Eau
DGIH	:	Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques
DRAAH	:	Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques
DREA-N	:	Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Nord
DRRAH	:	Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques
FAO	:	Fonds des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation
MEA	:	Ministère de l'Eau et de l'Assainissement
ONEA	:	Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement
ORSTOM	:	Office de Recherche en Sciences et Techniques Outre-Mer
PEN	:	Plan d'Eau Normal
PGES	:	Plan de Gestion Environnementale et Sociale
PHE	:	Plus Hautes Eaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Détermination de la période de retour par la méthode de Degoutte.....	10
Tableau 2: Estimation de la revanche par l'approche simplifiée	15
Tableau 3: Paramètres pour la vérification de la stabilité externe du déversoir	18
Tableau 4 : Méthode de dimensionnement du mur bajoyer	24
Tableau 5: Fiche technique du barrage de Goinré.....	26
Tableau 6: Description du barrage de Goinré	28
Tableau 7: Dégradations observées sur le barrage de Goinré	29
Tableau 8: Caractéristiques du bassin versant.....	32
Tableau 9: Pluviométries annuelles et journalières pour différentes périodes de retour	33
Tableau 11: Vérification de la stabilité du déversoir	40
Tableau 12: paramètres pour le dimensionnement du bassin de dissipation.....	41
Tableau 13: Caractéristiques du chenal d'écoulement.....	41
Tableau 14: Vérification de la stabilité du mur bajoyer.....	42
Tableau 15: Proposition de réhabilitation du barrage de Goinré	44
Tableau 16: Plan de gestion du barrage de Goinré.....	45
Tableau 17: Paramètres climatiques recueillies à Ouahigouya	57
Tableau 18: Données pluviométriques	58
Tableau 19: Synthèse des données recueillies à Ouahigouya	60
Tableau 20: Ajustement des pluies annuelles	73
Tableau 21: Ajustement des pluies journalières maximales	74
Tableau 22: Besoins en eau de la tomate	78
Tableau 23: Estimation des besoins en eau des populations	80
Tableau 24: Estimation des besoins en eau du cheptel	80
Tableau 25: Estimation des pertes par infiltration	81
Tableau 26: Estimation des pertes par évaporation.....	81
Tableau 27: Matrice de Léopold	97
Tableau 28: Matrice de Fecteau	99
Tableau 29: Plan de Gestion Environnementale et Sociale.....	101
Tableau 30: Devis estimatif.....	102

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Présentation de la zone d'étude	4
Figure 2: paramètres de la digue	16
Figure 3: Stabilité externe	19
Figure 4: Stabilité interne	19
Figure 5: Caractéristiques du bassin de dissipation	21
Figure 6: Caractéristiques du mur bajoyer	23
Figure 7: Forces agissantes sur le bajoyer.....	23
Figure 8: dégradation de la passerelle d'accès à la prise d'eau	30
Figure 9: prélèvement de l'eau à l'aide de motopompes	30
Figure 10: griffe d'érosion sur talus aval	31
Figure 11: présence d'arbustes sur talus aval	31
Figure 12: désorganisation du perré sec sur talus amont	31
Figure 13: dégradation de la crête de digue	31
Figure 14: Caractérisation du bassin versant.....	33
Figure 16: Plan de ferrailage du mur bajoyer.....	95
Figure 17: Profil en travers de la digue	104
Figure 18: Ecoulement dans la digue	105
Figure 19: Bassin de dissipation.....	106
Figure 20: Profil en travers de l'évacuateur de crue	107

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1: Courbe d'exploitation de la retenue	37
Graphique 2: Vérification de la stabilité des talus de digue.....	39
Graphique 3: Hydrogramme des crues	40
Graphique 4: Courbe hypsométrique	72
Graphique 5: Ajustement des pluies annuelles selon la loi de Gauss	73
Graphique 6: Ajustement des pluies journalières selon la loi de Gumbel	74
Graphique 7: Stabilité de la digue pour un facteur de sécurité de 7,5.....	85
Graphique 8: Détermination des caractéristiques du bassin de dissipation	92

TABLE DE MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des graphiques.....	vii
Table de matières	vii
Introduction	1
I. Présentation générale de l'étude	3
I.1. Objectifs	3
I.1.1 Objectif Général	3
I.1.2 Objectifs spécifiques	3
I.2. Présentation de la zone d'étude.....	3
I.2.1 Localisation et accès.....	3
I.2.2 Population.....	4
I.2.3 Climat.....	4
I.2.4 Relief et sol.....	5
II. Matériels et méthodes	6
II.1 Matériels.....	6
II.2 Méthodes	6
II.2.1 Revue documentaire	6
II.2.2 Collecte des données	7
II.2.3 Etudes hydrologiques	8
II.2.4 Etude des ouvrages.....	14
III. RESULTATS	26

III.1	Fiche synoptique du barrage de Goinré	26
III.2	Etudes diagnostiques	27
III.2.1	Description générale du barrage	28
III.2.2	Les usages actuels du barrage	28
III.2.3	Dégradations observées sur le barrage	29
III.3	Etudes de base	32
III.3.1.	Etudes hydrologiques	32
III.3.2.	Vérification de la digue	37
III.4	Proposition de réhabilitation	39
III.4.1	Dimensionnement du déversoir	39
III.4.2	Bassin de dissipation	41
III.4.3	Murs bajoyers	42
III.4.4	Ouvrage de prise et temps de vidange	42
III.4.5	Proposition de réhabilitation des dégradations observées	43
III.5	Plan de surveillance et d'entretien du barrage	45
III.6	Devis estimatif des travaux	46
III.7	Notice d'impact environnemental	47
IV.	Discussion	48
IV.1.	Etudes de base	48
IV.1.1.	Etudes hydrologiques	48
IV.1.2.	Adéquation entre usage et disponibilité de l'eau	48
IV.1.3.	Crue de projet	49
IV.1.4.	Vérification des caractéristiques de la digue	49
IV.2.	Proposition de réhabilitation	50
IV.2.1.	Réhabilitation de la digue	50
IV.2.2.	Conception du déversoir et des ouvrages annexes	50
IV.3.	Gestion du barrage	51
IV.4.	Notice d'impact environnemental	51
V.	Recommandations - Perspectives	52
Conclusion		53

Bibliographie.....	54
Annexes	56

INTRODUCTION

L'eau est une ressource importante, mais rare dans les pays sahéliens, confrontant les acteurs de la gestion de l'eau à de nombreux défis tels que la croissance démographique, le développement industriel, l'urbanisation, et les changements climatiques. En effet, relever ces défis nécessite des besoins en eau importants.

Au Burkina Faso, le gouvernement et ses partenaires ont entrepris des actions diverses pour la maîtrise de l'eau à travers la construction de nouveaux barrages et l'entretien du parc existant, constitué d'environ un millier de petits barrages. Ces opérations ont pour but de sécuriser les ouvrages existants dont environ 47% sont fortement dégradés (DGRE, 2011) et d'accroître les capacités de mobilisation des ressources en eau afin de pallier au problème récurrent d'eau qui limite les efforts de lutte contre la pauvreté et la sécurité alimentaire.

Face à la dégradation des infrastructures hydrauliques qui s'accroît au fil des années, un document de stratégie nationale d'entretien et de sécurité des barrages élaboré en 2014 est en cours d'opérationnalisation et met l'accent sur les études et travaux de réhabilitation dans son plan d'actions.

C'est dans ce cadre que le Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA) conformément à la politique nationale du gouvernement, envisage la réhabilitation de barrages dans toutes les régions du Burkina Faso.

Ainsi, le barrage de Goinré dans la province du Yatenga, réalisé en 1966 à vocation hydroagricole, fait partie des sites retenus en 2017 pour une étude de réhabilitation. Le choix de ce barrage se justifie par sa vulnérabilité induite par son vieillissement et des crues récurrentes ces dernières années, alors qu'il constitue depuis quelques temps la principale source d'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya. Des menaces sur l'ouvrage suite à une forte pluie en 2016, ont occasionné des interventions d'urgence sur la digue par le comité local de l'eau de Goinré sans que cela n'ait pu véritablement éloigner le doute sur une rupture prochaine de l'ouvrage. De même, le barrage semble avoir perdu une grande partie de sa capacité dû à l'ensablement. Ces dépôts de terre sont causés non seulement par l'érosion hydrique et éolienne mais aussi par les pratiques culturales aux alentours du plan d'eau et plus en amont dans le bassin versant.

Les investigations pour la réhabilitation du barrage de Goinré ont été confiées par la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) au groupement de bureaux d'études

GID/CAFI-B. Mais les bureaux d'études n'avaient pas encore terminé les investigations au moment du stage. Cela justifie le thème de notre étude : « Contribution à l'élaboration des études techniques détaillées de réhabilitation du barrage de Goinré dans la commune de Ouahigouya (Burkina Faso) ». Pour traiter de ce sujet, nous ferons dans un premier temps un diagnostic du barrage, puis nous ferons les études de base. Pour finir, nous ferons une proposition de la réhabilitation du barrage de Goinré.

Pour traiter de ce thème, nous avons été reçus par la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH), à travers la Direction de Maintenance des Ouvrages Hydrauliques.

I. PRESENTATION GENERALE DE L'ETUDE

I.1. OBJECTIFS

I.1.1 Objectif Général

L'objectif général est de contribuer à l'amélioration du fonctionnement du barrage de Goinré.

I.1.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- réaliser un diagnostic des ouvrages du barrage afin de déceler d'éventuelles anomalies, leurs causes et les besoins en termes de travaux de réhabilitation ;
- caractériser le bassin versant du barrage et réévaluer la crue de projet ;
- évaluer la capacité d'évacuation des crues par l'ouvrage ;
- évaluer le devis des travaux à réaliser.

I.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.2.1 Localisation et accès

Anciennement village du département de Ouahigouya, Goinré fait actuellement partie du secteur N° 14 de la commune de Ouahigouya.

Le barrage objet de la présente étude, en raison de sa situation géographique relève du fonds foncier du terroir « villageois » de Goinré.

L'accès au site se fait de Ouagadougou par la route n° 2 jusqu'à Ouahigouya sur 182 km puis à 3 km au nord-ouest de Ouahigouya par la route en terre Ouahigouya-Mopti ; soit 185 km à partir de Ouagadougou.

Les coordonnées géographiques du site relevées au GPS sont :

- Latitude : 13° 37' 20,6'' Nord
- Longitude : 02° 26' 28'' Ouest

La localisation de la zone d'étude est matérialisée sur la figure 1.

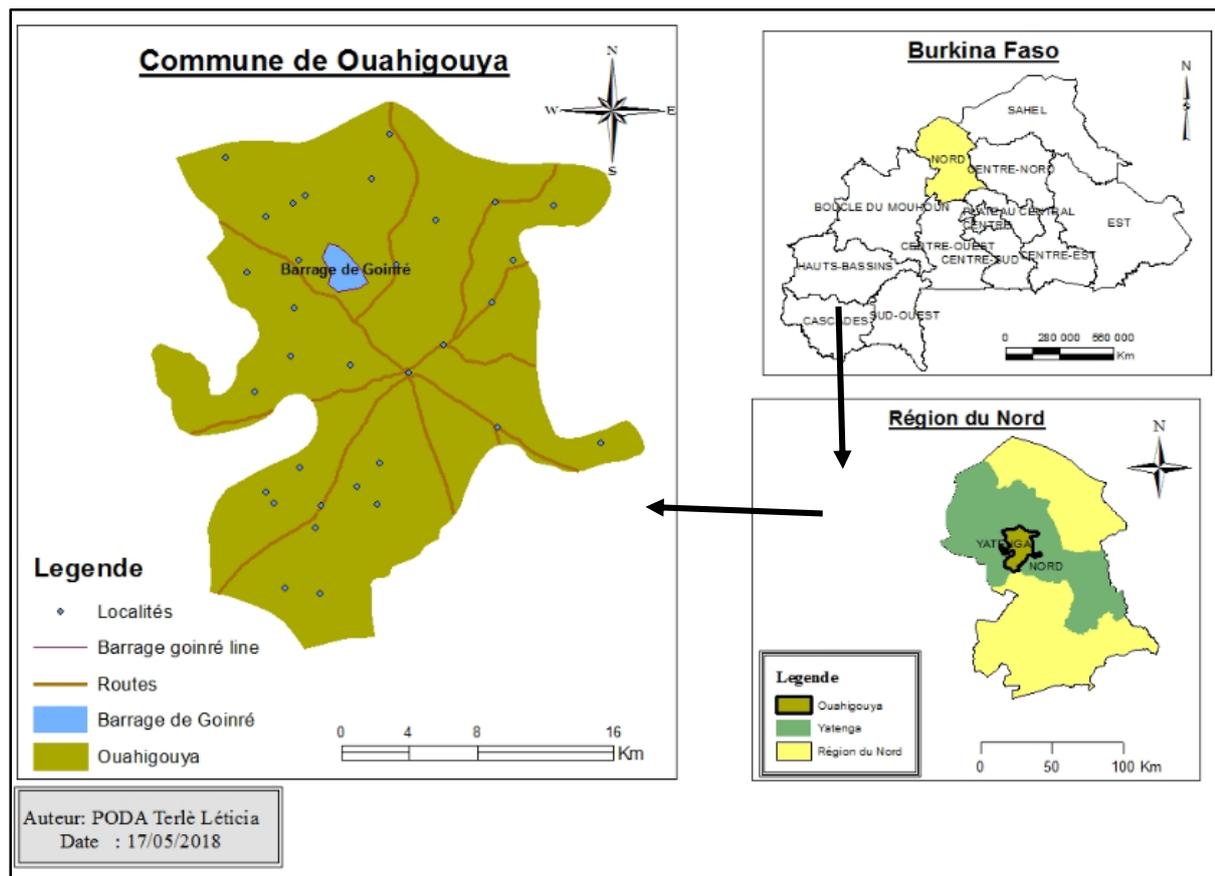


Figure 1: Présentation de la zone d'étude

I.2.2 Population

La population de la commune de Ouahigouya est estimée à 158 686 en 2017 (Mairie, 2017) avec une projection de 162 709 habitants en fin 2018. Selon la même source, cette population compte 52.8% de femmes et 47,2 % d'hommes. Avec un total de 15 secteurs, les plus peuplés sont respectivement les secteurs 2, 13, et 7 qui regroupent plus du tiers de la population de la ville de Ouahigouya. Goinré est situé dans le secteur 14 de la ville. Le taux d'accès à l'eau potable est de 93%.

I.2.3 Climat

La plaine de Goinré se trouve dans la zone sahélienne. Elle subit l'influence du climat sahélien avec deux saisons bien distinctes, à savoir :

- une saison pluvieuse, communément appelée mousson allant de juin à octobre et caractérisée par la présence d'un vent chaud et humide de direction Sud-Ouest, Nord-Est et qui engendre des précipitations liquides ;

- une saison sèche communément appelée harmattan qui est un vent froid et sec soufflant de direction Nord-Est, Sud-Ouest avec deux variantes : une période sèche et froide de novembre à janvier et une période sèche et chaude qui va de février à mai.

La quasi-totalité de la pluviométrie est concentrée sur ces quatre mois d'hivernage, et le maximum se situe au mois d'août. La pluviométrie moyenne annuelle relevée sur les 34 années d'observations est de 656 mm.

I.2.4 Relief et sol

La zone de Goinré est située sur un relief relativement plat avec des altitudes variant entre 310 à 390 mètres. Le relief se caractérise par une inclinaison moyenne du terrain. On note la présence de plaines et de plateaux, avec par endroit des élévations collinaires. C'est un relief qui nécessite des moyens techniques appropriés pour le drainage des eaux pluviales.

Par ailleurs, les sols de Goinré sont ceux de la commune de Ouahigouya. Ils sont de type ferrugineux lessivés. Localisés le long des axes de drainage du Nakanbé et de ses affluents, ils sont propices à la riziculture et au maraîchage, mais peu aptes à la construction d'habitation.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 MATERIELS/ LOGICIELS

❖ Matériel

Pour mener à bien l'étude, du matériel et un certain nombre d'outils ont été utilisés en fonction des objectifs à atteindre :

- **un GPS** : pour relever les coordonnées sur le site ;
- **un appareil photo** : pour illustrer les pathologies observées sur le terrain ;
- **un questionnaire** : pour la collecte de données auprès des producteurs exploitant le barrage de Goinré ;
- **un guide d'entretien** : soumis aux différentes structures intervenant dans la gestion de l'eau (ONEA, DREA, DRAAH, DRRAH, Mairie de Ouahigouya, CLE de Goinré) afin de comprendre la problématique de l'eau dans la commune de Ouahigouya et la contribution du barrage à la satisfaction des besoins en eau des différents usagers.

❖ Logiciels

- **ArcGIS** : pour la caractérisation du bassin versant et l'élaboration des cartes ;
- **Geoslope** : pour l'étude de la stabilité des talus de la digue ;
- **Autocad** : pour l'élaboration des pièces dessinées du projet ;
- **Hyfran** : pour l'ajustement de la pluviométrie annuelle et maximale journalière respectivement à la loi de Gauss et à celle de Gumbel ;
- **Cype** : pour la réalisation du plan de ferrailage du mur bajoyer.

II.2 METHODES

II.2.1 Revue documentaire

La revue documentaire a consisté à rechercher d'une part, des ouvrages sur l'historique du barrage et les usages faits sur la retenue. D'autre part, nous avons collecter des revues permettant de dimensionner les ouvrages nécessaires, ainsi que des notes permettant de faire face à certaines pathologies similaires ayant fait état de réflexion, et se manifestant sur le barrage de Goinré.

II.2.2 Collecte des données

Diagnostic des ouvrages

La collecte des données de terrain a été faite sur base de visite du site du barrage et d'entretien avec les services techniques déconcentrés en charge de la gestion de l'eau dans la commune de Ouahigouya, de même qu'avec les exploitants du périmètre irrigué à l'aval du barrage.

L'inspection des différents ouvrages du barrage a été faite en vue d'identifier et de décrire les dégradations et anomalies constatées ainsi que leurs causes. Les structures rencontrées sont la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement (DREA), la Direction Régionale de l'Agriculture et des Aménagements Hydrauliques (DRAAH), la Direction Régionale des Ressources Animales et Halieutiques (DRRAH), l'Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA), la mairie et le Comité Local de l'Eau de Goinré. Les outils qui ont servi de base pour la collecte des données sont en **Annexe II.2 : Outils de collecte de données, page 60**.

Les usages de l'eau du barrage de Goinré

Les entretiens menés avec les exploitants des périmètres irrigués, l'ONEA et la DRAAH ont permis de recueillir des informations sur le cheptel, les superficies aménagées à l'aval du barrage et autour du plan d'eau, les prélèvements d'eau pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya. Ces informations ont permis d'évaluer les besoins en eau actuels des usagers. Une synthèse des informations recueillies est présentée en **Annexe II.1 : Synthèse des données recueillies à Ouahigouya, page 57**.

Collecte des données morphométriques et topographiques

Ces données sont composées d'images satellitaires (Digital Elevation Model) de la zone, téléchargées à partir du site web de la NASA¹ et de levés topographiques de la cuvette du barrage.

Le modèle numérique de terrain de la zone a servi pour la délimitation du bassin versant. Le calcul des paramètres physiographiques et morphométriques ont été réalisés à partir de ces images et à l'aide de ArcGIS.

Quant au levé topographique, il a été fourni par le bureau d'études AC3E qui l'a réalisé en 2005. Le groupement de bureau d'études GID/CAFI-B en charges des études de réhabilitation

¹ www.earthexplorer.usgs.gov

du barrage n'avait pas encore réalisé les études bathymétriques au cours de notre stage. N'ayant pas de moyens pour réaliser nous-même une étude bathymétrique, les données de AC3E ont été considérées pour la réévaluation du calage des différents ouvrages du barrage (digue, déversoir, prise d'eau), la capacité de stockage du barrage et l'établissement des différents plans.

Collecte des données hydro climatiques

Ces données sont composées de la pluviométrie journalière observée sur la période 1981-2014 à la station de Ouahigouya et du niveau de remplissage du barrage de Goinré sur la période 2016-2017. La pluviométrie, les températures, l'humidité relative, ont été fournies par l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso et le niveau de remplissage du barrage par la DREA-N. L'étude statistique de la pluviométrie maximale journalière par la loi de Gumbel et de la pluie annuelle sur la période par la loi normale ont permis d'estimer les différents quantiles (pluie moyenne, pluies décennales, quinquennale, centennales, etc.) et de calculer la crue de projet.

Les données climatiques ont été complétées par l'évapotranspiration, obtenues à partir de l'outil CropWat développé par la FAO. Ces données ont permis d'évaluer les besoins en eau des cultures.

II.2.3 Etudes hydrologiques

Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant

Le périmètre P (Km) et la surface S (Km²) du bassin versant : ces paramètres interviennent dans le calcul des crues. Il est important de les déterminer avec précision au risque de sous-évaluer ou surestimer la crue de projet. Ils ont été obtenus à partir du logiciel ArcGIS.

La pente longitudinale I : elle influe de manière notable sur les débits de crues en augmentant ou en diminuant les vitesses de ruissellement suivant que la pente est forte ou faible. Elle est obtenue à partir de la formule de GRESILLON :

$I = \frac{0,026}{\sqrt{S}}$	S : l'aire du bassin versant en Km ² ; I : pente longitudinale du bassin versant en ‰
------------------------------	---

L'Indice de compacité de Gravélius (K_G) : il renseigne sur la forme du bassin et est donné par la formule suivante :

$K_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$	<p>K_G sans unité</p> <p>P : le périmètre du bassin versant en Km</p> <p>S : l'aire du bassin versant en Km^2</p>
-----------------------------------	---

La longueur du rectangle équivalent (Leq) : C'est la longueur d'un rectangle de même superficie, même indice de compacité et même distribution hypsométrique que le bassin versant. Son expression est donnée par :

$Leq = \frac{KG * \sqrt{S}}{1.128} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{KG} \right)^2} \right]$	<p>Leq en Km</p> <p>KG : indice de compacité (sans unité)</p> <p>S : l'aire du bassin versant en Km^2</p>
---	--

Indice global (Ig) de pente : il caractérise le relief du bassin versant. Il est défini par la formule suivante :

$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}}$	<p>Leq: longueur du rectangle équivalent</p> <p>Ig en m/Km</p> <p>$H_{5\%}$: altitude à un pourcentage de surface de 5%</p> <p>$H_{95\%}$: altitude à un pourcentage de surface de 95%</p>
---	--

Lorsque les pentes transversales du bassin versant sont peu différentes de I_g (différence de moins de 20%), ce dernier représente assez bien la pente du bassin. Dans le cas contraire, on calcule un indice de pente global corrigé (I_{gcor}) :

$I_{gcor} = \frac{(n - 1) * I_g + I_t}{n}$	<p>n : coefficient fonction de la longueur du rectangle équivalent</p> <p>Ig : indice globale de pente en m/Km</p> <p>I_t : pente transversale en m/Km</p>
--	---

Dénivelée spécifique D_s : elle est fonction de l'indice global de pente et de la racine carrée de la superficie du bassin versant. Une valeur de dénivelle spécifique inférieure à 50 m traduit un relief faible. Le relief est modéré lorsque la dénivelée est comprise entre 50 et 100 m, et fort au-delà de 100 m. La dénivelée spécifique est donnée par la formule suivante :

$D_s = I_g * \sqrt{S}$	<p>Ig : indice globale de pente en m/Km</p> <p>S : l'aire du bassin versant en Km^2</p>
------------------------	--

La densité de drainage (D_d): elle se définit comme étant la longueur de réseau hydrographique par unité de surface :

$D_d = \frac{L_t}{S}$	L_t : longueur totale des cours d'eau Km S : l'aire du bassin versant en Km^2
-----------------------	--

Estimation des quantiles pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées proviennent de la station la plus proche du bassin, celle de Ouahigouya. Ces données s'étalent sur 34 années (1981 à 2014) d'observation. Les pluies maximales journalières ont été ajustées à la loi de Gumbel et les pluies annuelles à la loi normale. Ces ajustements ont été réalisés à partir du Logiciel Hyfran.

- ❖ La période de retour du débit de sécurité est déterminée par la méthode de DEGOUTTE en comparant le rapport suivant : H^2/\sqrt{V}

H : hauteur du barrage

V : volume en hectomètre cube du barrage

Tableau 1: Détermination de la période de retour par la méthode de Degoutte

H^2/\sqrt{V}	< 5	5 à 30	30 à 100	100 à 700	≥ 700
Ts (ans)	100	500	1 000	5 000	10 000

Source : (DEGOUTTE, 1997)

Estimation de la crue de projet

La crue de projet est nécessaire pour le dimensionnement de l'évacuateur de crue. Deux méthodes ont été essentiellement utilisées : la méthode ORSTOM et la méthode CIEH-EIER.

- **Calcul de la crue décennale par la méthode ORSTOM**

La méthode ORSTOM pour le calcul du débit décennal s'appuie sur la superficie du bassin versant, le temps de base, le coefficient de ruissellement et la pluie maximale journalière décennale. La méthode s'applique pour des bassins de superficie allant de quelques dizaines d'hectares à 1500 Km^2 en zone sahélienne et en zone tropicale sèche (FAO, 1998). En zone sahélienne et pour un bassin versant relativement imperméable, la formule est la suivante :

$Q_{10} = 1,05 * A * P_{10} * K_{r10} * \alpha_{10} * \frac{S}{T_{b10}}$	α_{10} : coefficient de pointe décennal
	P_{10} : précipitation décennale journalière, en mm
	S : superficie du bassin versant en km ²
	T_{b10} : temps de base en min
	K_{r10} : coefficient de ruissellement
	A : coefficient d'abattement
	Q_{10} : débit de pointe décennal en m ³ /s

Le coefficient de ruissellement décennal

L'estimation du coefficient de ruissellement Kr10 est faite par interpolation linéaire entre les valeurs Kr70 et Kr100. Ces valeurs sont déterminées graphiquement à l'aide de courbes empiriques ou à partir de formules analytiques de forme générale :

$$Kr70 \text{ ou } Kr100 = \frac{a}{(S+b)^c} + c$$

Le coefficient d'abattement A

$$A = 1 - ((161 - 0.042 * Pan)/1000) * \log_{10}(S)$$

Les temps de base (Tb), temps de montée (Tm)

D'après le manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports pour les petits bassins versant non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale, les temps de base et de montée des eaux à l'exutoire du barrage en zone sahélienne sont :

- pour $I_g = 3 \text{ m/km}$ et $S > 6 \text{ km}^2$, $T_{b10} = a * S^{0,35} + b$;
- pour $I_g = 3 \text{ m/km}$ et $S > 11 \text{ km}^2$, $T_{m10} = a * S^{0,35} + b$.

• Calcul de la crue décennale par la méthode CIEH-EIER

Le manuel pour l'estimation des crues et des apports pour les petits bassins versant non jaugés en Afrique sahélienne et tropicale sèche, présente deux formules adaptées pour le calcul pour le Burkina Faso. Ce sont des formules basées sur des méthodes de régression permettant d'estimer les débits de crues décennale. La formule du CIEH est donnée par :

$Q_{10} = a * S^s * P_{an}^p * I_g^i * K_{r10}^k * D_d^d$	S : superficie du bassin versant en km ²
	I_g : Indice globale de pente en m/km
	P_{an} : Pluie annuelle moyenne en mm
	D_d : densité de drainage en km ⁻¹
	K_{r10} : coefficient de ruissèlement
a, s, p, i, k, d : coefficients	

✚ Calcul de la crue de projet par la méthode du GRADEX

La crue du projet est la crue contre laquelle l'on choisit de protéger les ouvrages projetés sur le site (COMPAORE, 2016). Il s'agit donc de la crue qui servira de base au dimensionnement de tous les ouvrages hydrauliques. La plupart des études concernant le passage de la crue décennale à la crue du projet propose une relation linéaire. Cette relation vient de la théorie du Gradex. Elle permet de maximiser la sécurité de l'ouvrage.

$Q_{100} = C * Q_{10}$	C = coefficient de majoration Q_{10} : débit de crue décennal
------------------------	--

$C = \left[1 + \left(\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \right) \times \frac{\left(\frac{Tb}{24} \right)^{0,12}}{Kr_{10}} \right]$	Tb_{10} = Temps de base (h)
	Kr_{10} = coefficient de ruissèlement
	P_{10} : pluie décennale (mm)
	P_{100} : pluie centennale (mm)

✚ Estimation des apports et pertes

Les apports représentent l'ensemble des écoulements superficiels susceptibles de passer par l'exutoire du bassin versant. Les pertes sont constituées des pertes par infiltration dans la cuvette et par évaporation.

- **Apports liquide**

Les volumes des apports liquides annuels du bassin-versant au droit du barrage sont estimés de la manière suivante :

$V = Ke \times S \times P$	P : Pluviométrie annuelle(mm) S : Superficie du bassin versant (Km ²)
----------------------------	--

Ke : Coefficient d'écoulement.

Détermination de la pluie médiane P_{med} (mm)

$$P_{med} = 0,98 * \overline{P_{an}} - 6,8 \quad \overline{P_{an}} : \text{pluie moyenne annuelle}$$

- Estimation des pertes

- ✓ Evaporation E_{ret} (mm/j)

Selon POUYAUD (1985) l'évaporation obtenue à partir du BAC A doit être corrigée par la formule suivante :

$$E_{ret} = 1.664 E_{bac}^{0.602} \quad E_{bacA} : \text{évaporation BAC A (mm/j)}$$

- ✓ Dépôts solides

Les pertes par sédimentation sont estimées par plusieurs formules empiriques, celles de GOTTSCALK et du GRESILLON :

Formule de GOTTSCALK (USA)	$D = 260 * S^{-0.1}$	S : la superficie du bassin versant (km ²)
Formule de EIER - CIEH (GRESILLON)	$D = 700 * \left(\frac{P}{500}\right)^{-2.2} * S^{-0.1}$	P : le périmètre du bassin versant (km) D : la dégradation spécifique annuelle (m ³ /km ² /an).

Le volume annuel des dépôts solides est obtenu par la relation $V \text{ (m}^3\text{/an)} = D * S$

✚ Estimation des besoins

L'estimation des besoins a été faite en tenant compte des besoins en eau pour l'AEP, les besoins en eau des cultures, et les besoins pastoraux.

- Besoin en eau pour la population

Ces besoins ont été estimés à partir des données recueillies auprès des services de l'ONEA.

- **Besoin en eau pour le bétail**

Ces besoins ont été estimés à partir des données recueillies auprès des services de la DRAAH. Les espèces répertoriées sont les bovins, les ovins et les caprins.

Les consommations spécifiques de chaque espèce sont présentées comme suit :

Bovins : 40 l/j

Ovins : 5 l/j

Caprins : 40 l/j

- **Besoin en eau pour les cultures**

Ces besoins ont été estimés à l'aide de CropWat, un outil d'aide à l'irrigation développé par la FAO et disponible sur son site web². La culture considérée est la tomate.

II.2.4 Etude des ouvrages

Dimensionnement de la digue

– La largeur en crête de la digue

La vérification de la largeur en crête se fera par les formules empiriques suivantes :

Formule de KNAPPEN $l_c = 1,65 * \sqrt{H}$

Formule de PREECE $l_c = 1,1 * \sqrt{H} + 1$

– La revanche libre

La revanche libre est la tranche comprise entre le PHE et la crête de la digue du barrage. Cette hauteur tient compte du risque de débordement pouvant aboutir à la surverse de la digue, phénomène causant son dommage. Deux formules ont été utilisées, celles de Gaillard et du CIEH :

Formule de Gaillard

La revanche libre, selon Gaillard est obtenu par la relation ci-dessous :

$$R = 0.75 * h_{\text{vague}} + \frac{V^2}{2 * g}$$

h_{vague} : hauteur des vagues

V : vitesse des vagues

g : accélération de la pesanteur

² www.fao.org

Approche simplifiée

Les chercheurs du comité des Grands Barrages proposent des recommandations sur l'estimation de la revanche en fonction du volume de la retenue et la hauteur de la digue (H) pour les petits barrages. Les valeurs proposées sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2: Estimation de la revanche par l'approche simplifiée

$H^2 \sqrt{V}$	5	30	100	700	1500
R min (m)	0,4	0,6	0,8	1,05	1,3

La revanche retenue est obtenue en faisant la moyenne des deux approches.

- **Largeur en base de la digue** l_f (m): elle est donnée par la formule :

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

- **Autres paramètres de la digue**

La parabole de Kozény : C (A ; C ; M)

$M(0 ; y_0)$ <p>avec $Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$</p>	Y_0 : Point d'intersection de l'axe des ordonnées et de la parabole de Kozeny h : tirant d'eau à l'amont (m) d : largeur en base du barrage diminuée de b
--	---

A (d ; Hr)

B (d; $l_f - b$)

Ligne phréatique : C (B ; D)

La figure 2 présente les différentes caractéristiques de la digue.

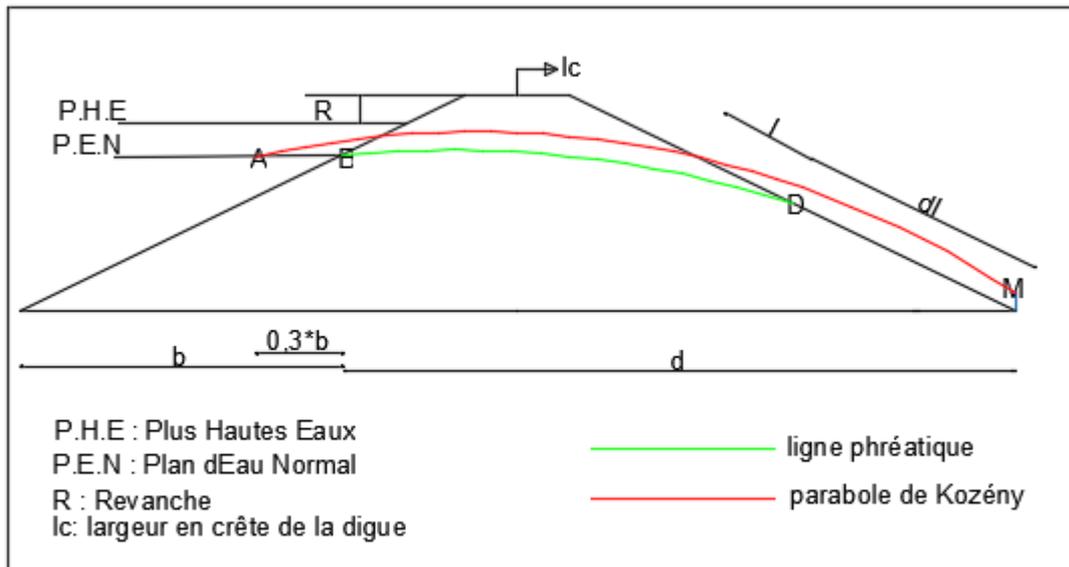


Figure 2: paramètres de la digue

✚ Dimensionnement du déversoir

– Le débit de projet :

$Q_{\text{projet}} = m * L * \sqrt{2g} * h^{3/2}$	m : coefficient de débit de l'évacuateur (0,48)
	L : longueur du déversoir (m)
	g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s ²)
	h : hauteur du déversoir

- **Longueur et hauteur de la lame d'eau** : elles sont obtenues à partir de la méthode de 'Xo'.

$X_o = \frac{m^2 * g * L_1^2 * Q_{c \max} * t_m^3}{S^3}$ <p>avec</p> $Q_{e \max} = \beta * Q_{c \max}$	<p>m : coefficient de débit de l'évacuateur (0,48)</p> <p>g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)</p> <p>L₁ : longueur approchée du déversoir (m)</p> <p>t_m : temps de montée des eaux (s)</p> <p>s : superficie de la retenue</p> <p>Q_{c max} : Débit maximum entrant</p> <p>Q_{e max} : Débit maximum à évacuer</p>
--	--

– Crue de rupture du barrage

La crue de rupture du barrage est donnée par :

$Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,2)^{1,5} + 0,15 * L$	<p>Q_{rupt} : crue de rupture du barrage en m³/s</p> <p>L : longueur de la digue sans déversoir (m) ;</p> <p>l : longueur du déversoir (m)</p> <p>a : revanche totale (m)</p>
---	--

– Stabilité du déversoir

➤ Vérification à la stabilité externe

La vérification de la stabilité externe passe par la vérification de la stabilité au non glissement et de la stabilité au non renversement.

Vérification de la stabilité au non glissement

La vérification de la stabilité au non glissement passe par la vérification de l'inéquation suivante : $(W - U) \times \tan\varphi - (P_{e \text{ amont}} - P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$

Pour la vérification du non glissement, il faut que $\alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{(P_{e \text{ amont}} - P_{e \text{ aval}} + P_t)}{\tan\varphi * \left(\frac{H}{2} * (H * \gamma_b + H * \gamma_w - \gamma_w * h) \right)} \right)$

Le tableau 3 résume la méthode de calculs adoptée pour la vérification de la stabilité externe du déversoir, et les forces en présence sont matérialisées par les figures 3 et 4.

Tableau 3: Paramètres pour la vérification de la stabilité externe du déversoir

Poussée hydrostatique externe amont ($P_{e\text{ amont}}$)	$P_{e\text{ amont}} = \frac{1}{2}\gamma_w * H^2 + \gamma_w * H * h$	γ_w : Poids volumique de l'eau = 10 KN/ m ³ $\gamma_{\text{sédiment}}$: Poids volumique des sédiments = 18 KN/ m ³ γ_b : Poids volumique du béton = 25 KN/ m ³ a : crête du déversoir H : hauteur du déversoir h : hauteur de la lame d'eau sur le déversoir $h_{\text{sédiment}}$: hauteur des sédiments
Poussée hydrostatique externe aval ($P_{e\text{ aval}}$)	$P_{e\text{ aval}} = \frac{1}{2}\gamma_w * h^2$	
Poussée des terres (P_t)	$P_t = \frac{1}{2}\gamma_{\text{sédiment}} * H_{\text{sédiment}}^2 * K_a$	
Le poids propre(W)	$W = \gamma_b * \left(a * H + \frac{1}{2} * H^2 * \tan\alpha \right)$	
La poussée hydrostatique interne(U)	$U = \frac{1}{2} * \gamma_w * (H + h) * (a + H * \tan\alpha)$	
Moment induit par le poids de l'ouvrage $m_{j/B}$ (W)	$m_{j/B} (W) = \frac{\gamma_b}{2} (2 * a * H^2 * \tan\alpha + \frac{2}{3} * H^3 * \tan^2\alpha + a^2 * H)$	
Moment induit par la pression interstitielle $m_{j/B}$ (U)	$m_{j/B} (U) = \frac{1}{3} * \gamma_w [\tan^2\alpha (H^3 + H^2 * h) + \tan\alpha(2H^2 * a + 2 * H * h) + a^2 * H + a^2 * h]$	
Moment induit par la poussée de l'eau amont $m_{j/B}$ ($P_{e\text{ amont}}$)	$m_{j/B} (P_{e\text{ amont}}) = \left(\frac{1}{2}\gamma_w * H^2 + \gamma_w * H * h \right) * \frac{1}{3}(H + h)$	

<p>Moment induit par la poussée de l'eau aval</p> <p>$m_{j/B} (P_{e\text{ aval}})$</p>	$m_{j/B} (P_{e\text{ aval}}) = \left(\frac{1}{2} \gamma_w * h^2\right) * \frac{1}{3} * h$	
<p>Moment induit par la poussée des terres $m_{j/B} (P_t)$</p>	$m_{j/B} (P_t) = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sédiment}} * h^2_{\text{sédiment}} * K_a \times \frac{1}{3} h_{\text{sédiment}}$	

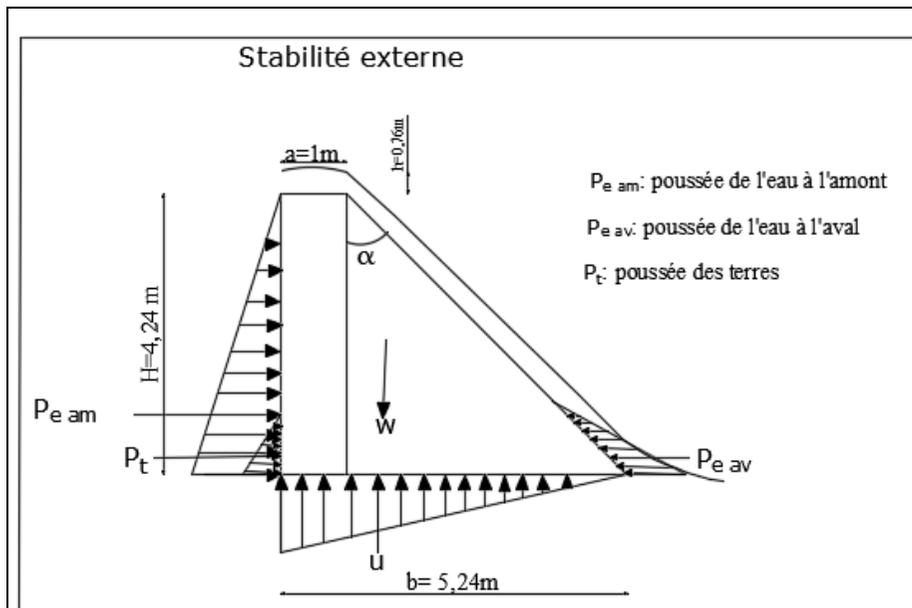


Figure 3: Stabilité externe

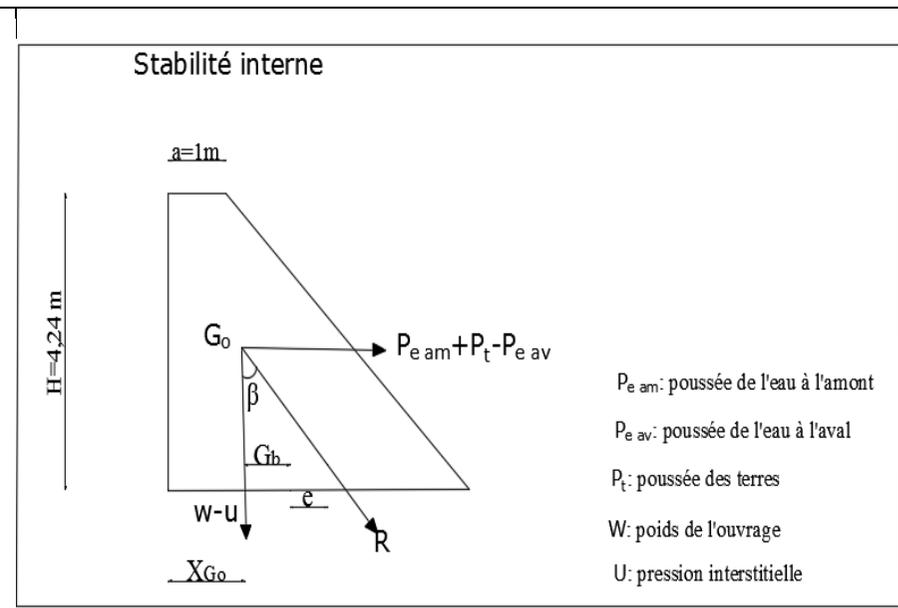


Figure 4: Stabilité interne

Vérification de la stabilité au non renversement

La vérification de la stabilité au non renversement passe par la vérification de l'inéquation suivante : $\eta_{\text{Forces résistante}} (W - U) - \eta_{\text{Forces de poussée}} (P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$

L'angle d'inclinaison est donné par l'inéquation : $\alpha \geq \text{Tan}^{-1} \left(\frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4 * k_1 * k_3}}{2 * k_1} \right)$.

➤ Vérification de la stabilité interne

La vérification de la stabilité interne passe par la vérification de la règle du tiers central et de la stabilité à la rupture

Règle du tiers central $\frac{-b}{6} \leq e \leq \frac{b}{6}$

Excentricité e	$e = (X_{\text{Gouv}} + X) - \frac{(a + H * \tan \alpha)}{2}$	X_{Gouv} : centre de gravité de l'ouvrage a : crête du déversoir H : hauteur du déversoir
----------------	---	--

Vérification de la stabilité à la rupture $\delta_{\text{max}} \leq \delta_{\text{lim}}$

Pour que le déversoir soit stable à la rupture, il faut que la contrainte maximale admissible soit inférieure à la contrainte limite du béton.

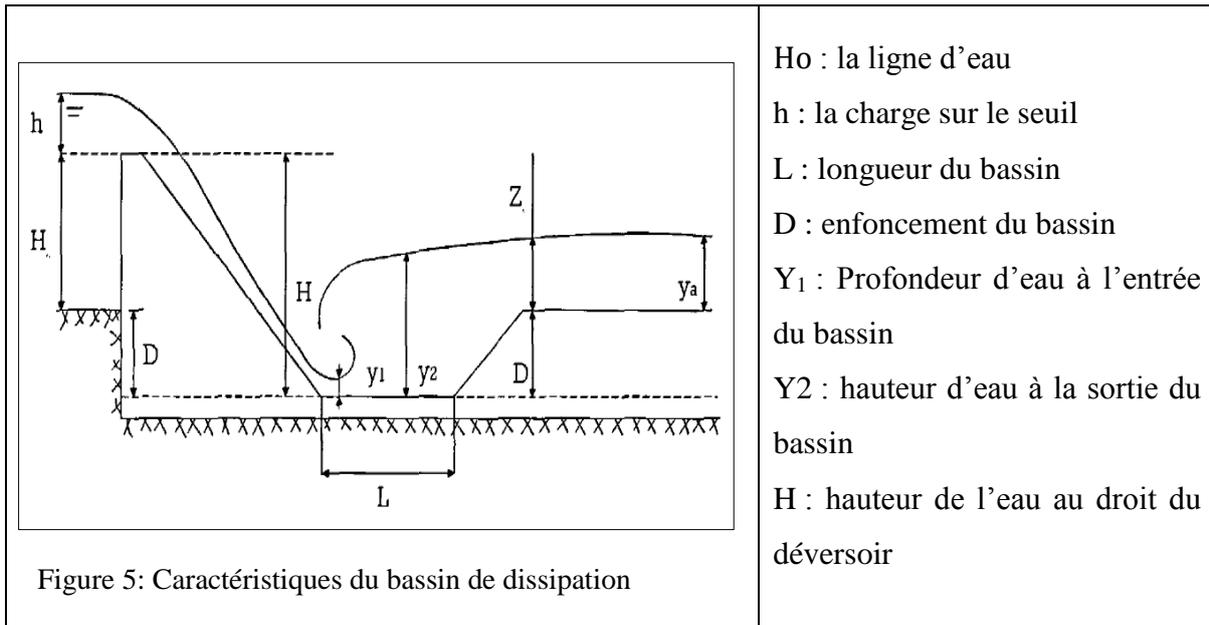
Contrainte maximale admissible δ_{max}	$\delta_{\text{max}} = \left(\frac{W - U}{b} \right) \left(1 + \frac{6e}{b} \right)$	e : excentricité W : poids du déversoir b : largeur en base du déversoir
Contrainte limite δ_{lim}	$\delta_{\text{lim}} = 0,3f_{c28}$	f_{c28} : force de compression du béton = 30 MPa

Poids linéaire du déversoir $W = \gamma_b * S$	γ_b : poids volumique du béton S : section du déversoir
---	---

✚ Bassin de dissipation

➤ Caractéristiques du bassin

Les paramètres pour le dimensionnement du bassin de dissipation sont donnés par la figure 5.



Enfoncement du bassin D lu sur abaque, à partir du tirant d'eau normal, dépend de la charge sur le seuil et de la hauteur d'eau au droit du déversoir.

A partir des différents paramètres, les caractéristiques du bassin de dissipation peuvent être exprimées par les relations ci-dessous :

Profondeur d'eau à l'entrée du bassin y_1 et la vitesse d'entrée v_1

$y_1 = \frac{q}{\sqrt{2 * g(z - y_1)}}$	q : le débit unitaire Z : la hauteur de chute
$v_1 = \frac{q}{y_1}$	y_1 est obtenu par itération

Le nombre de Froude

La forme du ressaut et ses caractéristiques dépendent directement du nombre de Froude :

$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{g * y_1}}$	v_1 : Vitesse de l'eau à l'entrée du bassin y_1 : Profondeur d'eau à l'entrée du bassin
-----------------------------------	--

La hauteur d'eau à la sortie du bassin

$y_2 = y_1 * \left[\left(\sqrt{8 * Fr^2 + 1} \right) - 1 \right] / 2$	y_1 : Profondeur d'eau à l'entrée du bassin Fr : le nombre de Froude
---	---

Par lecture sur graphique, nous obtenons la longueur du bassin de dissipation L , la hauteur des blocs chicanes h_2 et du seuil terminal h_4 .

– Chenal d'écoulement

Le dimensionnement du chenal d'écoulement passe par la détermination de la profondeur normale, du débit à évacuer, et la largeur du chenal. Pour cela, la formule de Manning Strickler est utilisée.

Formule de Manning Strickler

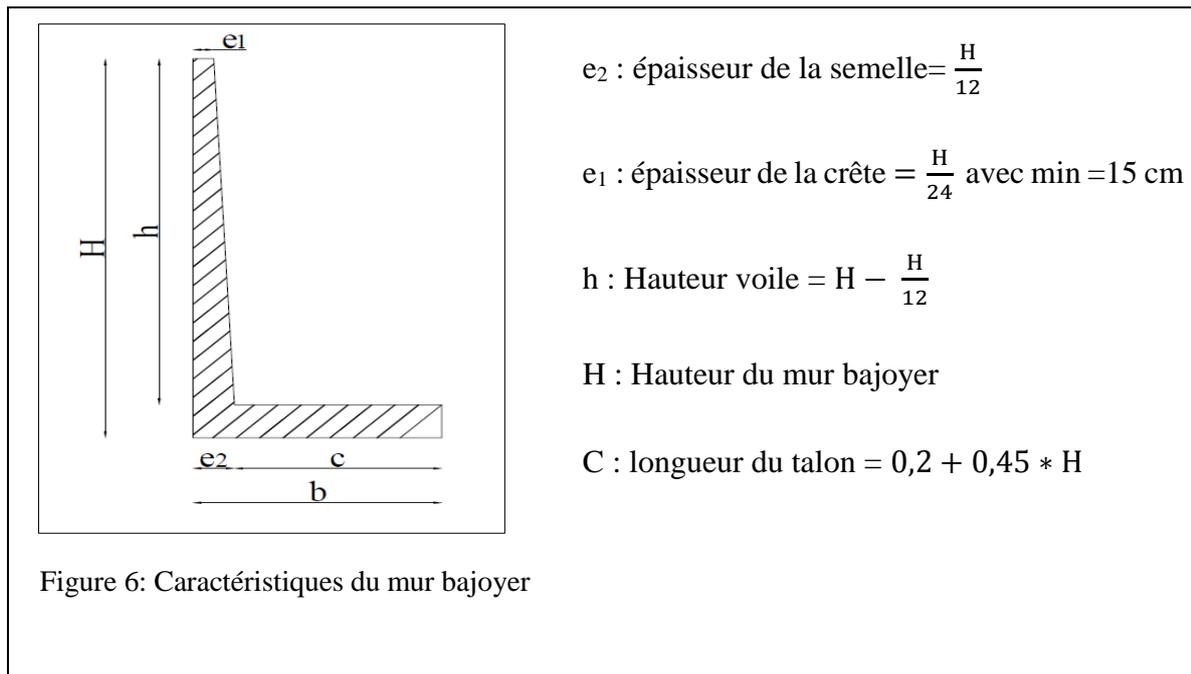
$Q = K * S * R^{\frac{2}{3}} * I^{1/2}$	Q : débit de projet
Ou	K : coefficient de Strickler = 40 (chenal rempli de cailloux) (GUEYE, 2012)
$Q = \frac{K * (L * y_n)^{5/3} * I^{1/2}}{(L + 2 * y_n)^{2/3}}$	S : section mouillée ; $S = L * y_n$
	I : pente du chenal
	L : largeur du chenal
	R_h : rayon hydraulique ; $R_h = \frac{S}{L+2*y_n}$

Murs bajoyers

Pour éviter des affouillements au niveau de la jonction de la digue en terre et du déversoir, des murs bajoyers sont indispensables.

– Pré dimensionnement

La figure 6 présente les caractéristiques du mur bajoyer.



– Stabilité du mur bajoyer

Pour la vérification de la stabilité du mur bajoyer, nous l'assimilerons à un mur de soutènement sans patin. La figure 7 présente les différentes forces s'exerçant sur le mur.

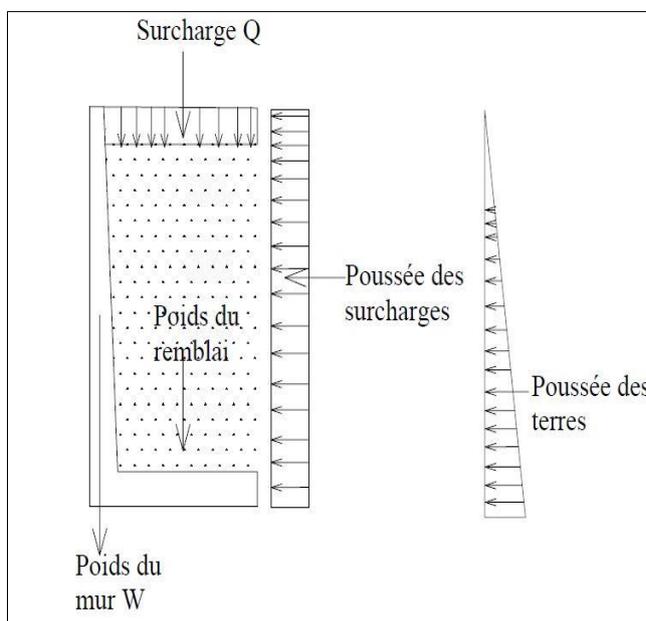


Figure 7: Forces agissantes sur le bajoyer

Stabilité au glissement : $F_G = \frac{F_v * \tan \phi}{F_h}$

Stabilité au renversement : $F_R = \frac{M_{S/A}}{M_{R/A}}$

La méthode de calcul des forces agissantes sur le mur bajoyer est résumé dans le tableau 4.

Tableau 4 : Méthode de dimensionnement du mur bajoyer

Parties de l'ouvrage		Sections	Bras de levier/O	Bras de levier/D	Efforts stabilisants
Semelle		$S_S = b * e_2$	$d_{S/O} = \frac{b}{2}$	$d_{S/D} = \frac{b}{2} - \frac{b}{2}$	$P_S = \gamma_b * S_S$
Voile	Partie triangulaire	$S_{v1} = (e_2 - e_1) * h/2$	$d_{v1/O} = e_1 + \left(\frac{1}{3}\right) * (e_2 - e_1)$	$d_{v1/D} = \frac{b}{2} - (e_1 + \left(\frac{1}{3}\right) * (e_2 - e_1))$	$P_{v1} = \gamma_b * S_{v1}$
	Partie rectangulaire	$S_{v2} = e_1 * h$	$d_{v2/O} = \frac{e_1}{2}$	$d_{v2/D} = \frac{b}{2} - \frac{e_1}{2}$	$P_{v2} = \gamma_b * S_{v2}$
Remblai	Partie triangulaire	$S_{R1} = (e_2 - e_1) * h/2$	$d_{R1/O} = e_2 - \left(\frac{1}{3}\right) * (e_2 - e_1)$	$d_{R1/D} = \frac{b}{2} - (e_2 - \left(\frac{1}{3}\right) * (e_2 - e_1))$	$P_{R1} = \gamma_b * S_{R1}$
	Partie rectangulaire	$S_{R2} = c * h$	$d_{R2/O} = e_1 + \frac{c}{2}$	$d_{R2/D} = \frac{b}{2} - \frac{c}{2}$	$P_{R2} = \gamma_b * S_{R2}$
Surcharges		$S_Q = c * 1$	$d_{Q/O} = e_1 + (c + (e_2 - e_1))/2$	$d_{Q/D} = \frac{b}{2} - (c + (e_2 - e_1))/2$	$Q = q * S_q$
					Effort renversants
Poussée des terres			$\frac{H}{3}$		$P_t = K_a * \gamma_R * H^2/2$
Poussée dues à la surcharge			$\frac{H}{2}$		$P_q = K_a * H * q$

Ouvrages de prise et temps de vidange

– Ouvrage de prise

Pour la vérification de la conduite qui sert à la fois d'ouvrage de prise et de vidange, nous

utiliserons la loi de Torricelli. On a : $U_B = \sqrt{2gh}$ et $D = \sqrt{\frac{4Q}{c \cdot \pi \cdot U_B}}$

– Temps de vidange

Le temps de vidange pour passer de la hauteur initiale (h_0) à la hauteur (h) est :

$$t = \frac{S}{s} * \sqrt{\frac{2}{g}} * (\sqrt{h_0} - \sqrt{h})$$

A l'instant étudié : temps (t) et hauteur (h)

A l'instant initial : temps (0) et hauteur (h_0)

S : surface du plan d'eau (à lire sur la courbe hauteur-surface)

s : section de sortie du réservoir

Le temps pour la vidange totale du barrage est, le temps pour lequel on passe de la hauteur initiale (h_0), à la hauteur ($h=0$).

$$t = \frac{S}{s} * \sqrt{\frac{2}{g}} * (\sqrt{h_0})$$

III. RESULTATS

III.1 FICHE SYNOPTIQUE DU BARRAGE DE GOINRE

Le tableau 5 présente la fiche technique du barrage de Goinré après réhabilitation.

Tableau 5: Fiche technique du barrage de Goinré

Localisation		
Pays	Burkina Faso	
Village	Goinré	
Département	Ouahigouya	
Province	Yatenga	
Région	Nord	
Coordonnées	Longitude	02°26'28'' Ouest
	Latitude	13°37'20,6'' Nord
Bassin versant		
Superficie	153	Km ²
Périmètre	73	Km
Hypsométrie	H5%	370
	H95%	325
Densité de drainage	1,27	Km/Km ²
Infiltrabilité du sol	RI (P2)	
Hydrologie du bassin versant		
Débit de crue décennal	39,81	m ³ /s
Débit de crue centennal	167,13	m ³ /s
Pluviométrie moyenne annuelle	656	mm
Evaluation des besoins et des pertes		
AEP	54 360	m ³
Pastorale	431 785	m ³
Agricole	1 815 783	m ³

Infiltration	424	mm
Evaporation	1521	mm
Dépôts solides	35 634	m ³ /an
Digue		
Nature	Homogène en terre	
Longueur	731	m
Hauteur maximale	5,75	m
Déversoir		
Débit à évacuer (m ³ /s)	131	m ³ /s
Charge au dessus du déversoir (m)	0,76	m
Longueur (m)	93	m
Position	Latérale, en rive gauche	

III.2 ETUDES DIAGNOSTIQUES

Les investigations n'ont pas permis d'accéder à l'étude d'avant-projet initiale sur la réalisation du barrage de Goinré. Néanmoins les entretiens avec la Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement du Nord (DREA-Nord) ont permis de dresser l'historique du barrage. En effet le barrage de Goinré est un barrage en terre construit durant la période 1966-1967 (DREA-N, 2018) sur financement du budget de l'Etat. Sa capacité était de 19 888 000 m³, pour une superficie de plan d'eau égale à 975 ha. Initialement, Goinré était un barrage à vocation agricole. Mais avec le temps, l'eau du barrage est devenue l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya en plus des autres usages (agricole, cheptel, pêche, BTP). Cependant, le barrage subit un envasement, réduisant sa capacité. En effet, en 2017, sa capacité passait à 11 580 000 m³, soit une baisse de 42%. En 2006, un projet de reboisement a été lancé pour réduire l'ensablement, mais il a échoué, du fait de la résistance des populations exploitants la partie amont du barrage. Ensuite, entre les années 2012 et 2013, le barrage aurait complètement tari suite à des déficits pluviométriques.

En outre, le barrage a subi divers travaux de réfection notamment au niveau de la digue. En 2016, au cours d'une forte pluie, des vents violents ont soulevé des vagues qui ont créé un désordre sur la digue. Des travaux d'urgence consistant à colmater les parties fortement érodées

avaient donc été réalisés. Par la suite, au cours de la saison sèche de 2017, la direction régionale en charge de l'eau a engagé un tâcheron local qui a procédé à la remise en place du perré sec sur les parties fortement dégradées du talus amont.

Mais faute d'étude diagnostique clairement établie, les actions engagées pendant les interventions pour conforter l'ouvrage sont restées vaines.

III.2.1 Description générale du barrage

Les caractéristiques du barrage de Goinré sont regroupées dans le tableau 6.

Tableau 6: Description du barrage de Goinré

Ouvrages		Caractéristiques
Digue	Crête	Couche de couronnement latéritique Largeur de 3,5m
	Talus amont	Pente 1V/2H Protection : perré sec
	Talus aval	Pente 1V/2H Protégé par une couche de grave latéritique
La digue a une longueur totale de 826,5m avec une hauteur de 5,75 m.		
Déversoir	Seuil naturel situé en rive gauche, calé à la côte 330.5 m	
Ouvrage de prise	Position centrale ; munit d'une vanne amont avec passerelle d'accès. Elle est placée à la côte 328,25	
Echelle limnimétrique	Fixée au droit de la tour amont de l'ouvrage	

III.2.2 Les usages actuels du barrage

Le barrage contribue à satisfaire divers besoins en eau, dont les principaux sont :

- L'alimentation des animaux : des échanges avec les agents de la DRRAH du nord, il ressort que l'eau du barrage de Goinré alimente non seulement les animaux des villages environnants, mais aussi d'autres venus du Mali.

- Usages pour l'agriculture : deux campagnes agricoles (pluviale et de contre-saison) sont pratiquées sur le périmètre aménagé et dans les jardins annexes. La culture maraîchère est la principale activité pratiquée par les producteurs. 62,18 ha de périmètres sont aménagés et attribués à près de 254 producteurs, à raison de 0,2 à 0,25 ha par producteur. En saison pluvieuse, les spéculations cultivées sont le riz, le maïs et la patate, tandis qu'en saison sèche,

on y cultive la tomate, l'oignon, la pomme de terre, le chou, le poivron, le haricot vert. L'eau arrive dans les parcelles de manière gravitaire. Par ailleurs, outre le périmètre de 51 ha, il existe à l'aval du barrage, et autour du plan d'eau, des exploitations en dehors du périmètre conventionnel. Ces terres s'étendent sur près de 50 ha. Sur ces exploitations, les motos pompes et les puits constituent les moyens d'exhaure.

- Alimentation en eau de la ville de Ouahigouya : elle est assurée par l'ONEA. Le volume d'eau prélevé du barrage de Goinré par an est de l'ordre de 113 080 m³, à partir d'une pompe d'exhaure de 20 m³/h qui fonctionne en moyenne 16h/j et renvoie l'eau à une unité compacte de 30 m³/h. L'eau du barrage contribue à 14% de la production totale de l'ONEA. La production journalière de l'ONEA est de 4200 m³/j, ce qui est loin de satisfaire les besoins de la population qui s'élèvent à 7000 m³/j. Pour alimenter la ville, une distribution alternée est pratiquée (en privant une zone 1 fois tous les 2 jours).

Pour venir à bout de la demande en eau, il est prévu à court terme, l'installation d'une seconde unité compacte sur le barrage de Goinré devant permettre de produire 50 m³/h.

III.2.3 Dégradations observées sur le barrage

Comme indiqué plus haut, le barrage a connu de nombreux travaux de réfection depuis sa réalisation. La visite de terrain a permis de constater les désordres sur l'ouvrage. Les anomalies observées sur le barrage, ainsi que leur cause sont résumées dans le tableau 7.

Tableau 7: Dégradations observées sur le barrage de Goinré

	Anomalies	Causes probables
Crête de digue	Largeur irrégulière	érosion
	Affaissement	Passage des véhicules
	Couronnement latéritique lessivé	Submersion de la crête par les eaux
	Absence de muret de crête amont	Défaut de conception
	Muret de crête aval dégradé	Passage des véhicules
Talus amont	Présence d'arbustes	Naturel ; manque d'entretien régulier
	Talus partiellement affaissé	Vieillissement ; effet des vibrations de la conduite de l'ONEA placé le long du talus
	Présence de fissures	Vieillissement du barrage (50 ans)

	Butée de pied obstrué	Exploitation anarchique au pied de la digue
	Désorganisation du perré sec	Effet des vibrations de la conduite de l'ONEA
Talus aval	Importantes griffes d'érosion	Pluies ; passage sur le parement (humains et animaux)
	Drain de pied obstrué	Cultures au niveau du drain de pied
	Présence d'arbustes	Naturel ; manque d'entretien régulier
Déversoir	Comblé	Exploitation anarchique à l'emplacement du déversoir naturel
Passerelle d'accès à la prise	Rampe gauche inexistante	Vieillesse de la passerelle qui s'est corrodé au contact de l'eau et n'a pas tenu
Digue	submersion en cas de fortes pluies	Mauvais fonctionnement du déversoir naturel

Les images ci-après illustrent l'état actuel de dégradation de quelques ouvrages du barrage de Goinré, et une vue du mode d'exploitation illégale.



Figure 8: dégradation de la passerelle d'accès à la prise d'eau



Figure 9: prélèvement de l'eau à l'aide de motopompes



Figure 10: griffe d'érosion sur talus aval



Figure 11: présence d'arbustes sur talus aval



Figure 12: désorganisation du perré sec sur talus amont



Figure 13: dégradation de la crête de digue

III.3 ETUDES DE BASE

III.3.1. Etudes hydrologiques

Les différentes caractéristiques du bassin versant sont résumées dans le tableau 8.

Tableau 8: Caractéristiques du bassin versant

Désignation	Symboles	Valeurs	Unités
Surface	S	153	Km ²
Périmètre	P	73	Km
Longueur du rectangle équivalent	Leq	31,67	Km
Indice de Gravelius	K _G	1,66	
Indice globale de pente	I _g	1,4	m/Km
Pente transversale	I _t	5,28	m/Km
Indice globale de pente corrigée	I _{gcor}	3	m/Km
Dénivelée spécifique	D _s	37,1	m
Densité de drainage	D _d	1,27	Km ⁻¹
Pente longitudinale	I	2,1	‰
Hypsométrie	H (5%)	370	m
	H (95%)	325	m

Les caractéristiques du bassin versant sont détaillées en **Annexe III.1 : Etudes Hydrologiques, page 68.**

La figure 14 présente les réseaux hypsométriques, et hydrographiques du bassin versant de Goinré. Les données ont été obtenues à partir de la Base Nationale de Données du Territoire (BNDDT) 2014.

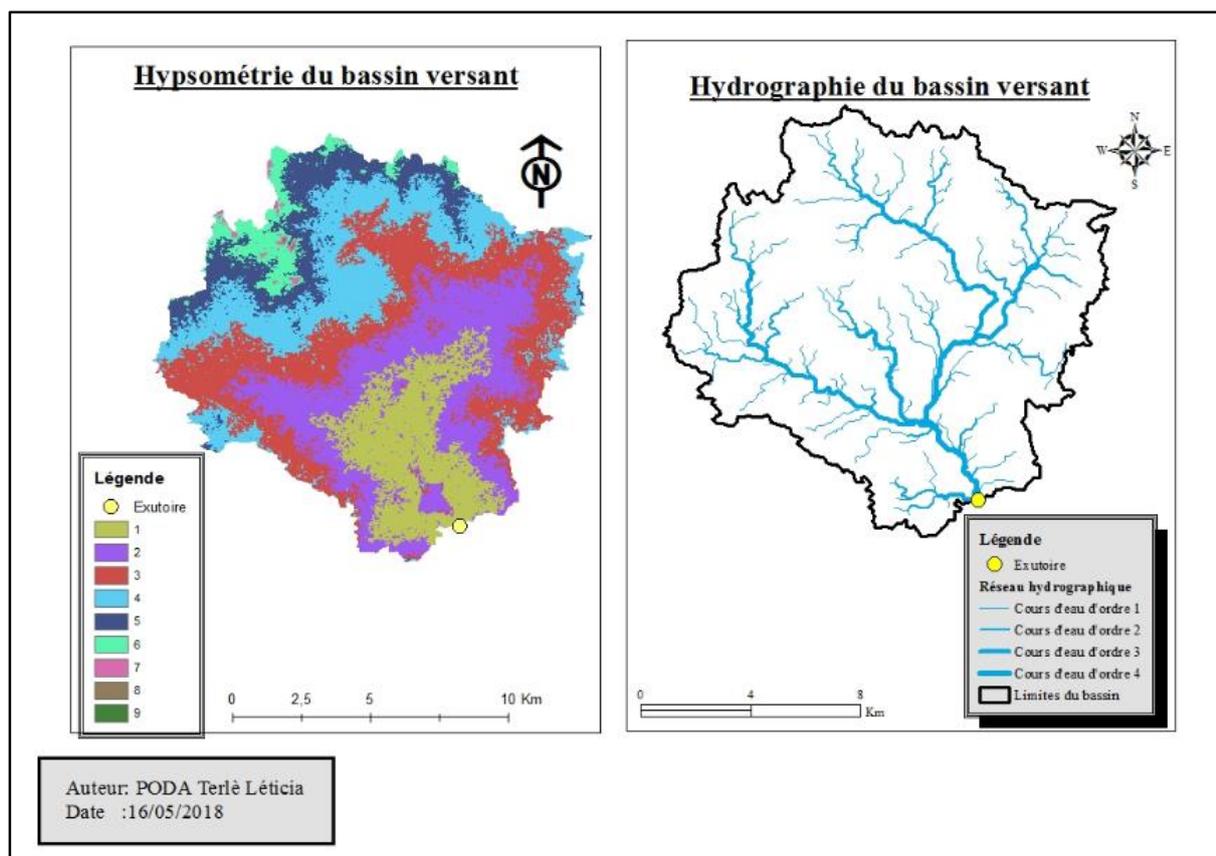


Figure 14: Caractérisation du bassin versant

✚ La pluviométrie

• Analyse des données pluviométriques

La série de données des pluies annuelles moyennes a été ajustée suivant la loi de GAUSS, sur un échantillon de 34 valeurs de 1981 à 2014, et les maximales journalières ont été ajustées suivant la loi de GUMBEL sur la même période, à l'aide du logiciel Hyfran (voir **Annexe III.1 : Etudes Hydrologiques page 70**).

L'ajustement ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs de la pluviométrie pour différentes périodes de retour, donné par le tableau 9.

Tableau 9: Pluviométries annuelles et journalières pour différentes périodes de retour

	Période humide	Période sèche
--	----------------	---------------

Période de retour (année)	1000	100	50	20	10	2	10	20	50	100	1000
Quantiles annuelles (mm)	1170	1040	997	929	868	656	443	382	314	269	142
Quantiles journalières (mm)	152	119	109	95,9	85,6	58,5	41,3	37,5	33,7	31,4	25,5

Etude des crues

Pour l'étude des crues, deux formules ont été utilisés, afin de trouver le débit décennal. Puis, par la méthode de Gradex, nous avons déterminé la crue de projet. Les paramètres entrant dans le calcul de la crue sont donnés ci-dessous :

Le coefficient d'abattement A	:	A=0,71
Le coefficient de ruissellement décennal Kr10	:	Kr10= 12,5%
Temps de base (Tb)	:	$T_{b10} = 1754.06$ mn
temps de montée (Tm)	:	$T_{m10} = 656.624$ mn
Le coefficient de pointe α_{10}	:	$\alpha_{10} = 2.6$
Le coefficient majorateur C	:	C = 4.2
Pluie décennale médiane	:	$P_{med} = 72,6$ mm

• Débit décennal Q_{10}

Méthode de Orstom	:	$Q_{10} = 36,01$ m ³ /s
Méthode CIEH	:	$Q_{10} = 39,81$ m ³ /s

La valeur maximale est choisie comme débit décennal, soit le débit obtenu par la méthode CIEH.

• Crue de projet

La période de retour obtenue par la méthode de Degoutte est de 5000 ans, mais nous convenons de prendre une période de retour de 100 ans pour le calcul de la crue de projet. Ainsi, le débit de projet calculé par la méthode de Gradex est : $Q_{100} = 167,13$ m³/s .

Estimation des pertes et des besoins

- **Dépôts solides**

Les apports solides du bassin versant contribuent à l'envasement de la cuvette du barrage. La capacité du barrage est réduite à près de sa moitié depuis sa création. En faisant le rapport entre le volume de la retenue et les dépôts solides, la durée d'envasement de la totalité du barrage est environ 66 ans. La quantité de dépôt solide est de 1 250 832 m³ par la formule de GOTTSCHALK, et 1 852 974 m³ par la formule de GRESILLON. La valeur obtenue par la formule de GRESILLON a été retenue, car elle donne un résultat proche de ce qui se trouve sur le terrain. (KARAMBIRI, 1998) (Voir **Annexe III.1 : Etudes Hydrologiques page 75**).

- **Pertes**

Pertes par infiltration

L'infiltration moyenne au Burkina Faso est comprise entre 1 et 5 mm (GUEYE, 2012), et diminue avec le temps. Compte tenu du fait que le barrage de Goinré est vieux de plus de 50 ans, l'infiltration moyenne journalière sera prise égale à 2 mm/j.

Pour la période de simulation, les pertes par infiltration valent 424 mm (Voir **Tableau 24 page 77**).

Pertes par évaporation

Les données d'évaporation utilisées sont celles de la station synoptique de Ouahigouya. A partir des valeurs d'évaporation d'un bac, il est possible d'établir une corrélation avec les valeurs d'évaporation du lac.

L'évaporation au niveau du barrage de Goinré est estimée à 1521mm pour la période allant de Novembre à Mai (Voir **Tableau 25 page 77**).

 **Besoins en eau**

L'eau du barrage de Goinré est utilisée pour l'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya, l'abreuvement du cheptel et l'irrigation.

➤ **Besoin pour l'alimentation en eau potable**

L'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya est assurée par l'ONEA. L'eau du barrage y contribue à 14%, et le taux d'accès à l'eau potable est de 93%. La consommation spécifique est prise égale à 50l/j/habitant. Le volume d'eau prélevé pendant la campagne sèche vaut 76 320 m³ (Voir **Tableau 22 page 76**).

➤ **Besoin en eau agricole**

A l'aval du barrage se trouve un périmètre de 112 ha irrigable. Le barrage étant à vocation hydro-agricole et pastorale, il est nécessaire de réévaluer les besoins en eau de la population pour voir si la capacité de stockage du barrage actuel est suffisante pour couvrir les besoins en eau agricole.

L'arrêt effectif des pluies se situe en fin octobre et à cette date on considère que le barrage est rempli. On suppose que les prélèvements d'eau dans la retenue commencent de façon sensible le 1^{er} novembre, date de début des cultures de contre saison (maraîchage), jusqu'en fin mai.

Pour plus de sécurité, il sera considéré les besoins en eau de la plante la plus contraignante c'est-à-dire la tomate, sur les 112 ha pour l'évaluation des besoins en eau.

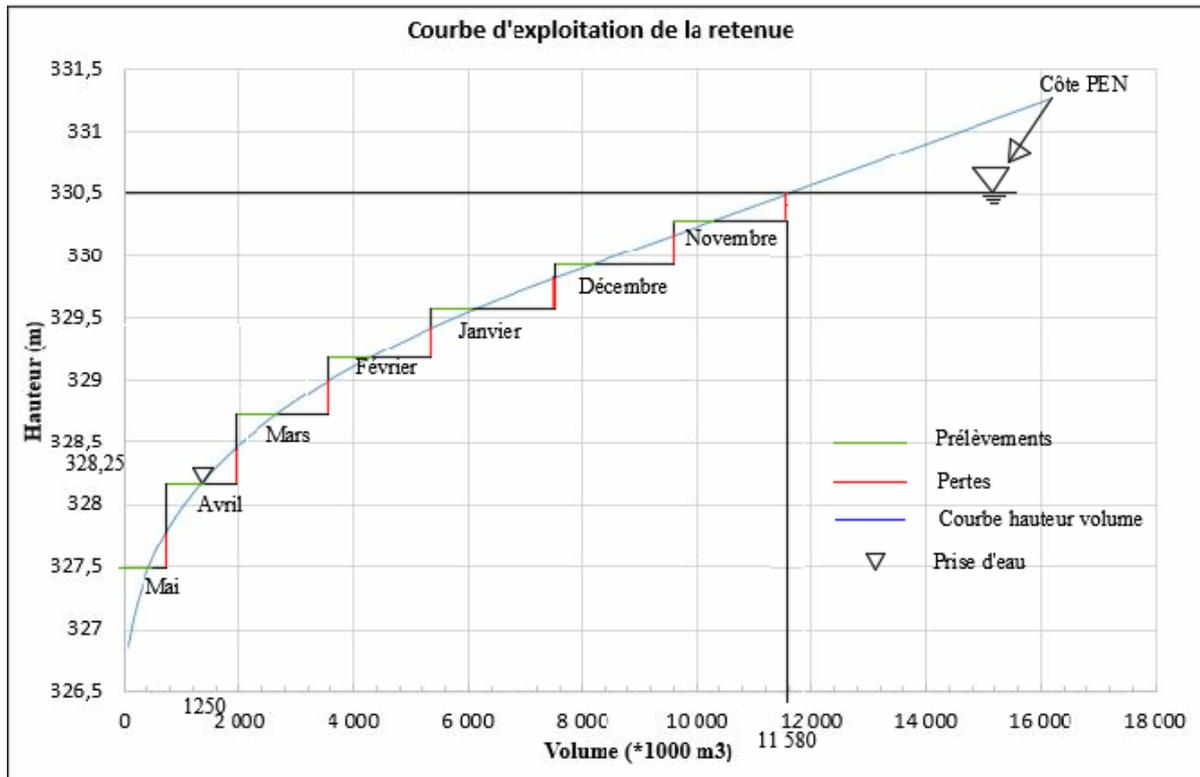
Ces besoins valent 1 815 783 m³ (Voir **Tableau 21 page 75**).

➤ **La consommation du bétail**

Le cheptel est constitué de bovins (6 000 têtes), d'ovins (12 000 têtes) et de caprins (15 000 têtes) (DRRAH-N, 2018). Pour l'estimation de leurs besoins, nous avons considéré un taux d'accroissement de 2% pour les bovins, et 3% pour les ovins et les caprins sur 30 ans. Les besoins en eau du bétail atteignent 431 785 m³ (Voir **Tableau 23 page 76**).

✚ **Courbe d'exploitation de la retenue**

La simulation a été faite sur les besoins en eau des usagers pendant la campagne sèche sur 30 ans. Le graphique 1 montre que l'eau de la retenue ne pourra pas satisfaire les besoins de la population d'ici 30 ans.



Graphique 1: Courbe d'exploitation de la retenue

III.3.2. Vérification de la digue

✚ Caractéristiques de la digue

- **Revanche libre**

La tranche comprise entre le PHE et la crête de digue est donnée par :

Formule de Gaillard : $R=0,81$ m

Approche simplifié : $R=0,8$ m

Revanche retenue : $R= 0,8$ m

Avec la digue fixée à la côte 332, le PHE à la côte 331,26 m, la revanche libre actuelle est

$R = \text{côte digue} - \text{côte PHE}$.

$R = 332 - 331,26$

$R = 0,74\text{m}$

- **Largeur de la crête**

Formule de KNAPPEN : $L_c = 3,96 \text{ m}$

Formule de PREECE : $L_c = 3,63 \text{ m}$

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

- **Largeur au fond de la digue**

La largeur en base de la digue est de 26,5 m

- **Autres paramètres de la digue**

b	AB	d	y_0	DC	OC
8,48m	2,54m	18m	0,5m	2,6m	9,25m

Parabole de Kozény : $C (A ; C ; M)$

$M(0 ; y_0) \Rightarrow M(0 ; 0,5)$

Ligne phréatique : $C (B ; D)$

- **Pente des talus**

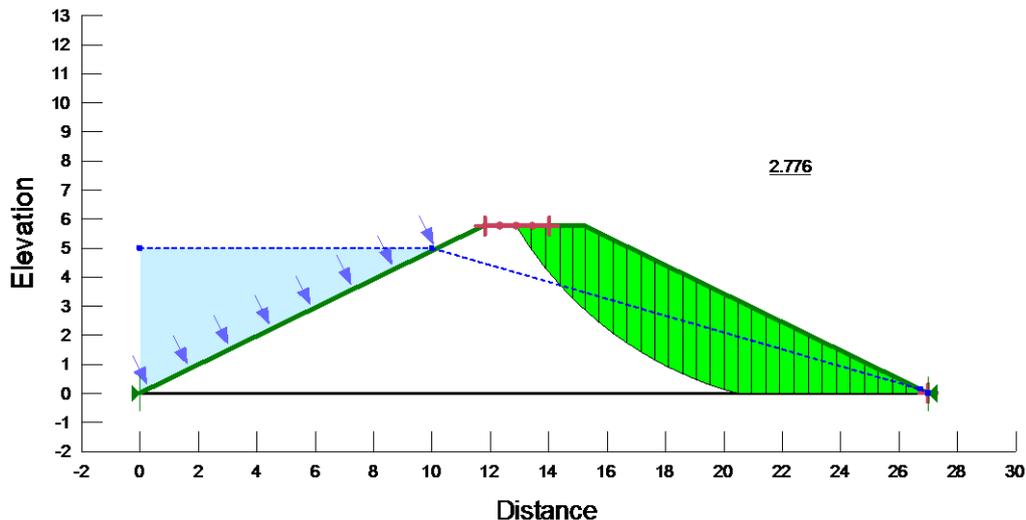
La hauteur totale du barrage est de 5,75 m, pour un barrage homogène. Cela donne une pente avec des fruits de talus de 2 à l'amont et 2 à l'aval (COMPAORE, 2016) (Voir **Annexe III.2 : Vérification de la digue**).

- **Protection des taus**

Les protections qui peuvent être trouvées sur les talus amont et aval sont de plusieurs types. Elles sont détaillées en **Annexe III.2 : Vérification de la digue page 80**.

Stabilité de la digue

La stabilité de la digue a été vérifiée à partir de geoslope. Nous obtenons un facteur de sécurité allant de 2,78 à 7,5 ; donc supérieur à 1,5. Ce qui permet de dire que les talus de la digue 2H/1V sont stables. Le graphique 2 présente la courbe de rupture obtenue pour un facteur de sécurité de 2,78.



Graphique 2: Vérification de la stabilité des talus de digue

III.4 PROPOSITION DE REHABILITATION

Lors des échanges avec les exploitants du barrage de Goinré, il en ressort que la digue subit des submersions d'eau lors des périodes de crues, ce qui est dangereux pour les exploitants et leurs cultures. Très souvent, les ruptures de barrages sont dues aux fréquentes submersions provenant des crues que le dispositif d'évacuation n'arrivait pas à évacuer. Il est donc nécessaire de prévoir sur cet ouvrage, un dispositif d'évacuation des crues, afin d'éviter les risques de submersion de la digue. Le type d'évacuateur retenu est le déversoir poids.

III.4.1 Dimensionnement du déversoir

✚ Caractéristiques du nouveau déversoir

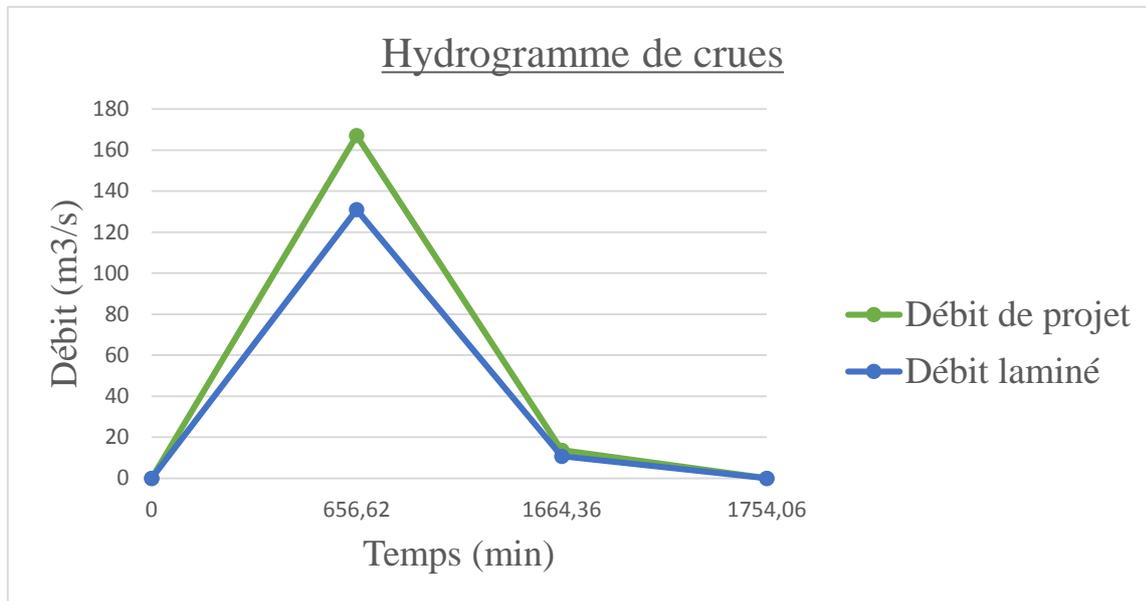
– Laminage des crues

Les itérations successives pour tenir compte du laminage de la retenue ont permis d'obtenir une longueur déversant de 93 m, avec une charge de 0,76 m. Le débit laminé est de $131 \text{ m}^3/\text{s}$ (Voir **Annexe III.3 : Conception du déversoir**).

La crue de rupture du barrage est de $522 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondant à une crue de période de retour supérieure à 10 000 ans, égale à $418,71 \text{ m}^3/\text{s}$.

– **Hydrogramme de crues**

L'hydrogramme de crue des deux débits est donné par le graphique 3.



Graphique 3: Hydrogramme des crues

L'hydrogramme de crue présente les valeurs de débit de projet et celles du débit laminé. Le laminage a donc permis de réduire le débit à évacuer. Voir **Annexe III.1 : Etudes Hydrologiques page 74**, pour le calcul des paramètres de l'hydrogramme de crue.

✚ **Détermination de l'angle α pour que le déversoir soit à l'équilibre.**

La vérification de l'équilibre du déversoir passe par la vérification de la stabilité externe et de la stabilité interne.

Le tableau 11 donne les valeurs obtenues pour la vérification de la stabilité du déversoir.

Tableau 10: Vérification de la stabilité du déversoir

Stabilité externe	Stabilité au glissement	$\alpha \geq 38,67^\circ$	Prenons $\alpha = 45^\circ$
	Stabilité au renversement	$\alpha \geq 20,8^\circ$	Prenons $\alpha = 30$
Stabilité interne	Règle du tiers central	$e = 0,13m$	$-0,87 < e < 0,87$
	Stabilité à la rupture	$\delta_{\max} = 1,2 \text{ Mpa}$	$\delta_{\max} < \delta_{\lim} = 6 \text{ Mpa}$

Avec l'angle d'inclinaison $\alpha = 45^\circ$, la règle du tiers central est aussi vérifiée.

Egalement, la contrainte admissible $\delta_{\max} = 1,2 \text{ Mpa}$, est supérieure à la contrainte limite δ_{\lim}

du béton, qui vaut 6 Mpa. Cela permet de dire que le déversoir est stable à la rupture.
Au regard des résultats trouvés, nous maintenons l'angle d'inclinaison $\alpha = 45^\circ$, car les stabilités internes et externes sont vérifiées. Ainsi, le poids linéaire du déversoir $W = 330,72 \text{ KN/ml}$.
Le déversoir sera coulé par plots de 5 m de longueur, séparés par des joints bitumineux.

III.4.2 Bassin de dissipation

Dimensionnement du bassin de dissipation

Les caractéristiques du bassin à ressaut, présentées dans le tableau 12, donne la profondeur d'enfoncement du bassin D , la hauteur de l'eau à l'entrée du seuil y_1 , et sa vitesse v_1 , le nombre de Froude Fr et la hauteur d'eau à la sortie du bassin y_2 .

Tableau 11: paramètres pour le dimensionnement du bassin de dissipation

TN	D(m)	q(m ³ /s)	V ₀ (m/s)	y ₁ (m)	v ₁ (m/s)	Fr	y ₂
327	1	1,19	1,55	0,12	9,9	9,12	1,5 m

Par lecture sur graphique, nous obtenons la longueur du bassin de dissipation L , la hauteur des blocs chicanes h_2 et du seuil terminal h_4 .

$$h_2 = 0,25 \text{ m} ; \quad h_4 = 0,18 \text{ m} \quad ; \quad L = 4 \text{ m} \quad ; \quad \frac{y_2}{y_1} = 12,41$$

Le nombre de Froude est de 9,12 supérieur à 4,5 et la vitesse de l'eau à l'entrée du bassin est de 9,9 m/s, inférieur à 15 m/s. Il a donc été retenu un bassin à ressaut de type II.

Pour la mise en œuvre, il faudra une couche de sable filtrante de 10 cm d'épaisseur sous le béton cyclopéen et des barbacanes traversant le béton (voir **Annexe VI.3 : Bassin de dissipation page 101**).

Le chenal d'écoulement

Le chenal d'écoulement permettra de restituer les eaux de déversement des crues à l'aval. Les calculs ont été menés de telle sorte que le ressaut ne quitte pas le bassin.

Les caractéristiques du chenal d'écoulement ont été obtenus à partir de la formule de Manning Strickler, et présentées dans le tableau 13.

Tableau 12: Caractéristiques du chenal d'écoulement

Débit Q (m ³ /s)	Ks	Pente I	Largeur (m)	Tirant normal Yn (m)	Q calculé (m ³ /s)
131	40	0,002	93	0,9	137,8

Le chenal, en maçonnerie de moellons aura une largeur égale à celle du bassin de dissipation et une longueur d'environ 30 m afin d'avoir un parcours d'écoulement assez long. Il aura une pente non érosive de $2^0/100$. La profondeur adoptée est de 1,5m. Voir le profil en travers de l'évacuateur de crue en **Annexe VI.4 : Profil en travers de l'évacuateur de crue page 102**.

III.4.3 Murs bajoyers

✚ Pré dimensionnement

Le prédimensionnement a permis de déterminer la hauteur du bajoyer H, la hauteur du voile h, l'épaisseur de la crête e_1 , l'épaisseur de la semelle e_2 et sa longueur b, la longueur du talon c. Les caractéristiques du mur bajoyer sont présentés comme suit :

H	e_1	e_2	b	h	c
5,75 m	0,25 m	0,5 m	3 m	5,25 m	2,5m

✚ Vérification de la stabilité du mur bajoyer

La vérification de la stabilité du mur passe par la vérification de la stabilité interne et de la stabilité externe.

Tableau 13: Vérification de la stabilité du mur bajoyer

Stabilité externe	Stabilité au glissement	$F_G = 2$	$F_G = 2 > 1,2$
	Stabilité au renversement	$F_R = 2,18$	$F_R > 1,5$
Stabilité interne	Règle du tiers central	$e = 0,28m$	$-0,5 < e < 0,5$
	Stabilité à la rupture	$\delta_{\max} = 0,045 \text{ Mpa}$	$\delta_{\max} < \delta_{\lim} = 6\text{Mpa}$

Le tableau 14 montre que les stabilités externes et internes du mur bajoyer sont vérifiées. Les valeurs du prédimensionnement peuvent donc être retenues.

Le plan de ferrailage, obtenu à partir du logiciel Cype, est donné par la **Figure 15, page 91**.

III.4.4 Ouvrage de prise et temps de vidange

Un ouvrage de prise situé au niveau du lit mineur est adopté pour le prélèvement d'eau pour l'irrigation des terrains en aval par gravité. Cet ouvrage permettra l'irrigation des cultures en cas de poches de sécheresse en saison pluvieuse et le maraichage en contre saison. L'ouvrage de prise sera calé à la cote 328,25 m. Le diamètre de la conduite calculé est de 500 mm et le temps de vidange est de 39 jours (Voir Annexe III.6 : ouvrage de prise et de vidange page 96).

III.4.5 Proposition de réhabilitation des dégradations observées

Au regard des pathologies identifiées, il est nécessaire de procéder à une réhabilitation des ouvrages du barrage. Les travaux de réhabilitation visent à remettre en état les ouvrages dégradés et la confortation des ouvrages existants. Les différentes propositions sont regroupées dans le tableau 15.

Tableau 14: Proposition de réhabilitation du barrage de Goinré

Parties du barrage	Anomalies	Proposition de réhabilitation
Crête	Largeur irrégulière	<ul style="list-style-type: none"> • Reconstitution de la protection par une couche de protection en matériaux latéritiques • Réparation de la bordure de crête • Mise en place d'un mur parapet du côté amont • Reconstitution des murets de crête aval et amont
	Affaissement	
	Couronnement latéritique lessivé	
	Absence de muret de crête amont	
	Muret de crête aval dégradé	
Talus amont	Présence d'arbres	<ul style="list-style-type: none"> • Désherbage et dessouchage des arbustes • Remise en place du drain de pied • Reconstitution du talus³
	Talus partiellement affaissé	
	Butée de pied obstrué	
	Désorganisation du perré sec	
Talus aval	Importantes griffes d'érosion	<ul style="list-style-type: none"> • Reconstitution du talus érodé⁴ • Remise en place du drain de pied • Désherbage et dessouchage des arbustes
	Drain de pied obstrué	
	Présence d'arbres	
Déversoir	Bouché	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'un déversoir poids latéral
Passerelle d'accès à la prise	Rampe gauche inexistante	<ul style="list-style-type: none"> • Réparation de la passerelle
Digue	submersion en cas de fortes pluies	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement du déversoir latéral

³ La protection du talus amont se fera par une nouvelle couche de pose en matériaux latéritiques de 10 cm d'épaisseur, suivi d'un renforcement maçonnerie de moellons de 30 cm.

⁴ La reconstitution du talus aval consiste mettre une nouvelle couche de pose en matériaux latéritiques de 30 cm d'épaisseur.

Lutte contre l'envasement/ensablement

Le comblement par transport de solides représente la menace prépondérante pour les plans d'eau dans les zones sahéliennes très marquées par des phénomènes d'érosion intensive dans leur bassin versant. Pour réduire l'intensité de l'envasement, nous proposons de :

- délimiter les berges de la cuvette afin d'éviter l'installation des exploitants à ces endroits ;
- combler les ravines en amont du barrage ;
- faire le reboisement autour de la cuvette.

III.5 PLAN DE SURVEILLANCE ET D'ENTRETIEN DU BARRAGE

La réhabilitation est une étape importante dans la vie des ouvrages hydrauliques, par ailleurs, la surveillance constitue un pilier de sécurité et de durabilité de ces ouvrages. Elle permet d'identifier les anomalies avant qu'elles ne se développent jusqu'à entraîner la ruine de l'ouvrage.

Au niveau du barrage de Goinré, la gestion du barrage est assurée par les producteurs eux même à travers le CAMEPAG, et le CLE, ainsi que la DREA-N.

Comme appareil d'auscultation, nous constatons la présence d'une l'échelle limnimétrique permettant de suivre le niveau de l'eau.

Cependant, des insuffisances sont encore relevées sur ce plan.

Une proposition de gestion est faite dans le tableau 16

Tableau 15: Plan de gestion du barrage de Goinré

	Acteurs	Rôles
Surveillance	Exploitants	<ul style="list-style-type: none">○ Observation de routine⁵○ Suivre les exploitations d'eau conformément au calendrier établi
	CLE	<ul style="list-style-type: none">○ Elaboration d'un cahier de suivi du barrage (registre du barrage)○ Observation de routine

⁵ Elle consiste en une observation visuelle du barrage parcourue à pied, et à consigner tout ce peut être considéré comme détériorations ou mauvais fonctionnement d'un organe du barrage dans le registre du barrage. Sa fréquence est d'une fois par mois pendant la saison des pluies et une fois tous les 2 mois en saison sèche.

		<ul style="list-style-type: none"> ○ Assurer un ratissage complet du barrage ○ Mise en place d'une ou plusieurs équipes de ratissage de la zone de servitude pour vérifier le respect des règles d'exploitation
	DREA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Observation particulière⁶ ○ Appui aux activités de surveillance du CLE
Entretien	Exploitants	<ul style="list-style-type: none"> ○ Payer les redevances ○ Participer à l'entretien en début de campagne ○ Aménager des diguettes anti-érosives pour ralentir le phénomène de l'envasement ; ○ Arracher les arbustes dès leur apparition sur la digue ; ○ Remettre en place tout caillou déplacé ; ○ Elaborer des règles de gestion du barrage
	CLE	<ul style="list-style-type: none"> ○ Participer à l'entretien en début de campagne ○ Participer à l'élaboration des règles de gestion du barrage.
	Mairie	<ul style="list-style-type: none"> ○ percevoir des taxes sur l'exploitation afin de financer les entretiens périodiques
	DREA	<ul style="list-style-type: none"> ○ Elaborer les plans d'exploitation et de gestion ○ Apporter l'appui technique aux exploitants et au CLE

III.6 DEVIS ESTIMATIF DES TRAVAUX

Après estimation des quantités pour la réhabilitation du barrage de Goinré, le coût du projet s'élève à six cent soixante-sept millions trente-quatre mille sept cent soixante-neuf (667 034 769) F CFA. Les détails sont donnés en **Annexe V : Devis estimatif page 97**.

⁶ C'est l'inspection que l'on réalise lorsqu'un événement particulier se produit au barrage, les crues notamment.

III.7 NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

La législation en vigueur exige qu'une étude d'impact sur l'environnement soit entreprise afin d'apprécier l'incidence de la réalisation de certains ouvrages tels qu'un barrage, un aménagement de bas-fond sur l'environnement physique, social et économique dans la zone d'influence du projet. Ainsi, l'étude menée peut être classée dans la catégorie B (hauteur de digue comprise entre 3 et 10 m), selon le décret 2001-342/PRES/PM/MEE portant champ d'application, contenu et procédure de l'étude et de la notice d'impact sur l'environnement.

La présente notice d'impact sur l'environnement s'inscrit dans ce cadre et complète un ensemble d'études de base.

Le projet de réhabilitation du barrage de Goinré se réalisera à travers la réfection de la digue du barrage, la mise en place d'un déversoir poids latéral et le reboisement autour de la cuvette. Les travaux pourront durer plusieurs mois en saison sèche et de gros engins de chantier seront utilisés notamment des compacteurs et des niveleuses.

La conduite de la notice d'impact environnementale du projet de réhabilitation du barrage de Goinré a permis suite à l'analyse de l'interaction projet environnement, de déceler des impacts positives et négatives sur le projet et les composantes en présence dans la zone de projet. Des mesures compensatrices et correctrices ont été formulées pour atténuer les conséquences négatives. Voir **Annexe IV : Notice d'impact environnemental, page 92** pour les détails sur la notice d'impact environnementale.

IV. DISCUSSION

IV.1. ETUDES DE BASE

IV.1.1. Etudes hydrologiques

Ce travail a d'abord constitué une réactualisation des connaissances générales sur le régime hydrologique du bassin versant de Goinré. N'ayant pas les études de base du dimensionnement, une comparaison exhaustive ne peut pas être faite, cependant, des résultats obtenus, permettent de caractériser le bassin.

Dans le cas du barrage de Goinré, la pente du bassin versant est égale à 2,1‰ ; donc comprise entre 2‰ et 5‰ ; ce qui permet de classer le bassin versant en classe R2 (FAO, 1998). Selon la catégorisation de l'ORSTOM, la classe de perméabilité adoptée pour caractériser les sols du bassin-versant du barrage de Goinré est la classe P3 (RI) qui correspond à un bassin relativement imperméable, car constitué de sols ferrugineux lessivés plus ou moins gravillonnaires, de vertisols et de sols bruns sur roche basaltique. Par conséquent, suivant la classification de RODIER et AUVRAY (FAO, 1998), le bassin-versant du barrage de Goinré est donc du type R2P3. Sa densité spécifique est inférieure à 50 m, ce qui donne un relief faible. Son indice de compacité est de 1,664 légèrement supérieur 1, donc c'est un bassin de forme arrondie. Ce type de bassin génère des fortes crues car le temps de montée des eaux est relativement faible à ceux des bassins de forme allongée (KARAMBIRI & NIANG, 2011)

IV.1.2. Adéquation entre usage et disponibilité de l'eau

Les usages du barrage sont l'alimentation en eau potable de la ville de Ouahigouya, les usages agricoles pour le périmètre aménagé de 62 ha à l'aval du barrage et 50 ha exploités autour de la cuvette et l'élevage. La somme de ces besoins s'élèvent à 2 323 887,14 m³ (pour le cycle de culture en saison sèche, de novembre à mai). Pour que ces besoins soient assurés, il faudra limiter l'exploitation de la retenue au mois de mars.

Le remplissage est assuré chaque année, soit 141,43% au 30 septembre 2017, et 115,18% au 30 septembre 2016 (MEA, 2017), sauf en 2012 où il y a eu un déficit pluviométrique. Cependant, le barrage de Goinré est soumis à l'envasement, causant ainsi la réduction du volume stocké. De ce fait, des travaux de curage sont à prévoir à long terme.

IV.1.3. Crue de projet

La période de retour calculée est de 5000 ans, cependant, nous avons opté de considérer la période de retour de 100 ans pour des raisons économiques. En effet, le Burkina Faso ne dispose pas d'assez de ressources financières pour faire face aux gros investissements pour la mobilisation des eaux de surface. L'essentiel de la mise en œuvre de la politique nationale de l'eau est assurée par l'aide extérieure. D'où la nécessité de minimiser les coûts car pour une période de retour de 5000 ans, le coût du projet serait plus élevé que celui de 100 ans. Par ailleurs, la période de retour est comprise entre 100 et 10 000 ans, période recommandée par le CEMAGREF (DEGOUTTE, 2002).

La crue de projet de $167,13 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une période de retour de 100 ans utilisée est supérieure à celle utilisée dans les calculs de dimensionnement du barrage lors de sa conception qui est de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1966. On constate une hausse de 28,36 % entre la crue actuelle et celle de 1966. Cela peut se justifier par les effets du changement climatique en Afrique soudano-sahélienne et au changement des états de surface du sol de plus en plus importants dans le bassin lié à la pression anthropique (BEGOU, 2008). Aussi, la crue de rupture calculée correspond à une période de retour de plus de 10 000 ans, qui est une crue exceptionnelle.

IV.1.4. Vérification des caractéristiques de la digue

La vérification des caractéristiques de la section actuelle de la digue de Goinré donne des résultats acceptables par rapport à la norme utilisée pour le dimensionnement. Après plus de 50 ans d'existence, il n'y a pas de phénomène de renard au niveau de la digue, ce qui confirme que la digue a été bien réalisée. Les pentes des talus 2H/1V sont acceptables pour un barrage en matériau homogène de plus de 5m de hauteur (COMPAORE, 2016). Par ailleurs, la vérification de la largeur en crête donne suivant les formules de Preece et Knappen (Gueye, 2014), respectivement 3,64 m et 3,95m, alors que la crête actuelle est de 3,5m.

D'autre part, la vérification de la stabilité des talus de la digue dans le modèle Geoslope donne des résultats satisfaisants, avec un facteur de sécurité minimal = 2,78, supérieur à 1,5. Au regard de tous ces résultats, nous jugeons l'état de la section de la digue satisfaisant, et proposons de maintenir la même section de la digue avec la mise en œuvre des protections des talus et de la crête.

IV.2. PROPOSITION DE REHABILITATION

IV.2.1. Réhabilitation de la digue

La réhabilitation proposée consiste à remettre en état les talus amont et aval, la crête de la digue, ainsi que la mise en œuvre d'un déversoir. La protection proposée consiste à revêtir le talus amont de couche latéritique de 10 cm, recouvert de perré maçonné. A l'amont, le choix de perré maçonné est dicté par la présence du raccordement de l'ONEA. Le perré maçonné étant plus résistant que le perré sec, le risque de désorganisation du perré est réduit, et cela peut se voir au niveau des barrages n°1 et 2 de Ouagadougou.

Sur le talus aval, la protection consiste à revêtir tout le talus de 30 cm de couche latéritique. La protection n'est pas renforcée car cette partie n'est pas en contact avec l'eau, mais aussi pour des raisons économiques.

La crête de la digue est revêtue de 20 cm de couche latéritique, remplaçant la couche lessivée. Il y'aura également la mise en place d'un mur parapet. En effet, pour la prise en compte du changement climatique avec l'avènement de crues exceptionnelles, nous proposons de mettre un mur parapet en béton cyclopéen de 0,5m de hauteur au niveau de la crête de digue, afin de renforcer la sécurité du barrage.

IV.2.2. Conception du déversoir et des ouvrages annexes

L'ancien déversoir ne fonctionnant plus du fait des actions anthropiques, il était nécessaire de refaire un ouvrage d'évacuation des crues, afin d'éviter la submersion de la digue. Le déversoir poids proposé est le plus utilisé au Burkina, et facile à mettre en œuvre. En plus, un tel déversoir obligerait les véhicules à emprunter la piste en terre, pour joindre les deux rives, permettant d'éviter la dégradation de la crête de digue. Le déversoir pourra évacuer une charge d'eau de 0,76 m à un débit de 131 m³/s. Sa longueur est de 93 m et les vérifications de sa stabilité ont été faites. Un projet similaire a été réalisé à Bissighin, dans la commune de Kossouka, province du Yatenga. Sur ce barrage, un déversoir radier a été réalisé en rive droite. De même, les études de réhabilitation du barrage de Doulou proposent la réalisation d'un déversoir poids type Creager en position latérale droite (BERE, 2016).

IV.3. GESTION DU BARRAGE

La gestion de l'allocation des ressources en eau du barrage de Goinré est assurée par le CLE au sein duquel siègent les exploitants des périmètres irrigués, l'ONEA, la mairie de Ouahigouya, les services techniques déconcentrés de l'Etat (DREA, DRAAH). Des entretiens avec ces différents acteurs, il ressort que cette structure a mené plusieurs actions consistant à sécuriser l'ouvrage et limiter l'ensablement de la cuvette. Le financement du CLE est assuré par l'Agence de l'Eau du Nakanbé (AEN) et les cotisations des membres. Or, les cotisations des exploitants ne sont pas régulières, si bien que certaines activités pour la gestion du barrage ne sont pas bien exécutées. Afin d'assurer davantage une meilleure gestion du barrage, nous proposons de dynamiser le comité local de l'eau de Goinré. Des actions de renforcement de capacité sur la lutte contre l'ensablement, la récupération des terres dégradées couplées à des sensibilisations sur le changement climatique, l'utilisation rationnelle de l'eau doivent être réalisées au profit des différents groupes.

IV.4. NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

La notice d'impact environnemental montre que le projet est accepté par toutes les parties prenantes. La réhabilitation du barrage de Goinré a été mis en projet suite aux menaces qui pèsent sur la sécurité de l'ouvrage, soutenue par une demande pressante des exploitants des périmètres irrigués. D'une part, le projet aura des répercussions positives sur les activités agricoles, à savoir la protection des périmètres irrigués lors des fortes crues. D'autres impacts, tels que la création d'emplois locaux lors des travaux de réhabilitation, et la protection des berges de la cuvette à travers les actions de reboisement sont attendus du projet. D'autre part, le projet va induire des impacts négatifs à moyen terme, tels que la perte de terres par les exploitants illégaux implantés aux abords immédiats de l'emplacement du déversoir actuel, la dégradation de la qualité de l'air et des sols pendant la période des travaux.

V. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Des recommandations pour améliorer la gestion du barrage de Goinré sont formulées ci-dessous :

- Pour un meilleur fonctionnement du CLE de Goinré : renforcer les capacités des membres du CLE sur la pathologie et l'entretien des barrages, la lutte contre l'ensablement, la récupération des terres dégradées, le changement climatique et l'utilisation rationnelle de l'eau. Cette recommandation est adressée principalement à l'AEN, dont le CLE constitue une instance de base pour la gestion de l'eau du barrage de Goinré et à la DREA-N qui représente le ministère en charge de l'eau dans la région ;
- au regard de l'affluence importante des troupeaux sur le barrage, il est recommandé à la Direction régionale en charge des ressources animales, d'aménager une zone d'accès pour le bétail à l'eau du barrage afin d'éviter les conflits entre agriculteurs et éleveurs ;
- les activités agricoles en amont et autour du plan d'eau du barrage contribuent à l'ensablement et à l'envasement du barrage ; aussi, il est fortement recommandé que le CLE travaille avec les producteurs pour la mise en application de mesures visant à atténuer ces effets ;
- il est aussi recommandé au CLE de concert avec les services de l'agriculture, d'identifier et sensibiliser les agriculteurs du bassin versant du barrage de Goinré sur les bonnes pratiques culturales consistant à la réalisation de diguettes de protection pour permettre de réduire les transports solides dans la retenue ;
- à l'endroit de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques, il est recommandé de ne pas dissocier la réhabilitation du barrage et celle du périmètre irrigué. Cela devra permettre une meilleure exploitation de ces ouvrages ;
- Au service technique en charge de l'agriculture, il est recommandé d'aménager un périmètre irrigué assez éloigné de la bande de servitude pour les exploitants « informels » afin de pallier à l'ensablement de la cuvette ;
- A l'endroit de l'ONEA, il est recommandé d'étudier la possibilité de déplacer les conduites de refoulement d'eau brute, actuellement placées contre le talus amont et dont les vibrations contribuent à la désorganisation du perré sec sur ce talus.

CONCLUSION

Le projet de réhabilitation de Goinré entre dans le cadre de la politique du gouvernement, et va contribuer à améliorer l'accès à l'eau dans la commune de Ouahigouya. Il a permis d'effectuer le diagnostic des dégradations survenues sur le barrage de Goinré et d'en recenser les causes. Ces anomalies, pour la plupart sont dues au manque d'entretien des ouvrages. Les actions anthropiques, telles que les cultures au pied du drain ; et le changement climatique à travers l'érosion éolienne contribuent à dégrader les ouvrages constitutifs du barrage. L'étude a aussi permis de proposer des solutions des dégradations observées, ainsi qu'un plan de gestion de l'ouvrage, afin que la réhabilitation du barrage de Goinré soit un projet entrant dans le cadre du développement durable. Pour la proposition de réhabilitation, il s'agira de reconstituer les protections des talus et la crête de la digue. Aussi, l'évacuateur des crues proposé consiste en la mise en place d'un déversoir latéral de type poids, et d'un bassin de dissipation de type II. Notons que la réhabilitation proposée permettra d'éviter certaines situations telles que la submersion de la digue ou l'avancée rapide de l'ensablement.

A long terme, au niveau des vieilles retenues comme Goinré, les autorités de gestion des barrages seront amenées à envisager le curage des retenues du fait de leur fort taux d'ensablement, malgré le coût élevé de cette mesure.

Le coût global de la réhabilitation proposée est de six cent soixante-sept millions trente-quatre mille sept cent soixante-neuf (667 034 769) F CFA.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

- BEGOU, J. (2009). Evolution recente des regimes hydrologiques dans le niger moyen et son implication dans la gestion integree des ressources en eau.
- BERE, C. C. (2016). Etudes techniques detaillees de la rehabilitation du barrage de doulou, dans la province du boulkienme, au burkina faso.
- DEGOUTTE, G. (2002). Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Cemagref.
- DGRE. (2011). Etat des lieux des barrages au burkina.
- DURAND, J. M. (1996, janvier). Petits barrages pour l'équipement rural en afrique.
- DURAND, J. M., ROYET, P., & MERIAUX, P. (1999). Technique des petits barrages en afrique sahélienne et équatoriale. Cemagref.
- FAO. (1998, mars). 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.
- GID/CAFI-B. (2017). Rehabilitation du barrage de goinre dans la commune de ouahigouya (province du yatenga, region du nord).
- KARAMBIRI, H., & RIBOLZI, O. (2003). Caractérisation des évènements averses-crues et de l'érosion hydrique à l'échelle d'un petit bassin versant pastoral sahélien (nord du burkina faso).
- MAIRIE. (2017). Plan communal de developpement de ouahigouya 2017-2021 (no. Rapport final). Ouahigouya.
- MEA. (2017). Situation de remplissage des retenues d'eau au 30 septembre 2017.
- MEDAH, I. (2015, octobre). Projet de reduction de la vulnerabilite des petits barrages au changementclimatique.
- NOMBRE, A. (2014). Elaboration d'un manuel de surveillance et d'entretien des barrages en terre au profit des usagers locaux (no. Rapport intermédiaire). Ziniaré : agence de l'eau du nakanbé (aen).
- OUEDRAOGO, S. M. (2002). Réalisation d'études de barrages et d'aménagements hydro-agricoles. Elaboration de notice d'impact sur l'environnement.

Cours

- ADEOSSI, G. (2016, 2017). L'étude d'impact environnemental et social ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- COMPAORE, M. L. (2016, novembre). Cours de barrages 2ème édition ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- GUEYE, I. (2012-2013). Cours de barrage l2&l3 ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- GUEYE, I. (2014-2015). Dimensionnement des barrages ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- KARAMBIRI, H. (1998). Etude de l'envasement des barrages au Burkina Faso : étude de cas ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- KARAMBIRI, H., & NIANG, D. (2011-2012). Chapitre iii le bassin versant et son complexe ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).
- LO, M. (2016, 2017). Cours barrage 2016 ; Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE).

Sites internet

www.earthexplorer.usgs.gov

www.fao.org

ANNEXES

Sommaire des annexes

Annexe I : Paramètres climatiques	57
Annexe I.1 : Données climatiques	57
Annexe I.2 : Données pluviométriques	58
Annexe II : collecte de données	60
Annexe II.1 : Synthèse des données recueillies à Ouahigouya	60
Annexe II.2 : Outils de collecte de données.....	63
Annexe III : Notes de calcul	71
Annexe III.1 : Etudes Hydrologiques	71
Annexe III.2 : Vérification de la digue	82
Annexe III.3 : Conception du déversoir	85
Annexe III.4 : Bassin de dissipation	90
Annexe III.5 : Mur bajoyer	93
Annexe III.6 : ouvrage de prise et de vidange	96
Annexe IV : Notice d'impact environnemental	97
Annexe IV.1 : Identification des impacts	97
Annexe IV.2 : Evaluation des impacts.....	98
Annexe V : Devis estimatif.....	102
Annexe VI : plans	104
Annexe VI.1 : profil en travers type de la digue.....	104
Annexe VI.2 : Type d'écoulement dans la digue	105
Annexe VI.3 : Bassin de dissipation.....	106
Annexe VI.4 : Profil en travers de l'évacuateur de crue	107

ANNEXE I : PARAMETRES CLIMATIQUES

ANNEXE I.1 : DONNEES CLIMATIQUES

Tableau 16: Paramètres climatiques recueillies à Ouahigouya

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. ou Total
Température mini. (°C)	17,7	20,1	23,9	27,3	27,8	25,7	23,7	23,0	23,3	24,1	21,0	18,5	23,0
Température max. (°C)	32,1	35,4	38,6	40,7	39,9	36,9	33,8	32,1	33,8	37,2	36,6	33,7	35,9
Vitesse moyenne du vent (m/s)	2,2	2,4	2,4	2,5	3,0	3,2	2,6	2,0	1,8	1,7	1,6	1,9	2,3
Insolation (heure)	8,8	9,2	8,5	8,4	8,8	8,4	8,3	7,8	8,3	9,1	9,5	9,2	8,7
Evaporation bac A (mm)	304	334	412	401	392	316	235	173	180	251	284	293	3576
ET*P Penman (mm)	169,6	172,2	198,5	197,3	212,3	188,1	165,5	147,0	151,6	174,7	165,3	167,8	2110
Humidité relative mini. (%)	12,6	9,65	9,4	14,8	23,4	34,9	48,1	57,1	49,65	28,25	14,2	13,05	26,3
Humidité relative maxi. (%)	37,4	32,75	32,35	45,25	64,45	77,9	90,2	95,5	93,1	77,25	47,3	39,9	61,25

ANNEXE I.2 : DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Tableau 17: Données pluviométriques

Pluies annuelles													
Année	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Pluies annuelles
1981	1	2	5,6	15,925	227,4	91,075	189	183,3	117,75	64,8	11	12	920,85
1982	1	2	5,7	6,8	47,5	83,825	73,6	137,1	43,225	25	11	12	448,75
1983	1	2	3,4	9,7	13	66	117,2	129,5	63,3	11	11	12	439,1
1984	1	2	3	4,5	37,8	32,675	140,1	89,5	107,775	28,8	12,7	12	471,85
1985	1	2	3	8,625	12,6	80,175	154,7	141,4	73,475	12,2	11	12	512,175
1986	1	2	3	5,2	44,8	110,675	134,8	179,7	153,775	18,1	11	12	676,05
1987	1	2	3	4	5	129,9	112,7	107,6	152,025	16,1	11	12	556,325
1988	1	2	3	47,2	5	15,2	213,2	302	162,6	10,9	11	12	785,1
1989	1	2	3	4	39,2	31,1	154	319,2	71,175	43,5	11	12	691,175
1990	1	2	3	7,25	24,9	30,25	161,2	105,4	84,8	39,5	11	12	482,3
1991	1	2	3	5,25	69,9	168,75	89,7	237,7	114,9	45,9	11	12	761,1
1992	1,2	2	3	4	33,1	85,85	190,9	263	146,525	15,6	41,2	12	798,375
1993	1	2	3,5	4	12,9	135,55	190,1	193	79,925	49	11	12	693,975
1994	1	2	6,8	4,7	67	118,025	206,7	289,4	182,85	144,6	11	12	1046,075
1995	1	2	3	39,8	25,9	152,95	83	201,1	146,45	22,7	11	12	700,9
1996	1	2	3	13,4	39,3	41,9	163,2	295,3	205,1	25,4	11	12	812,6
1997	1	2	3	5	34,3	133,225	169,8	169,8	88,5	44	11	12	673,625
1998	1	2	3	6,8	62,4	91,95	174,8	199,4	129,75	59,1	11	12	753,2
1999	1	2	3	13,25	38	48,225	261,4	194,5	149,975	19,7	11	12	754,05
2000	1	2	3	13,9	52,4	72,8	145,5	222	81,45	38,9	11	12	655,95
2001	1	2	3	6,4	48,1	102,5	224,4	292,2	68,4	47,9	11	12	818,9
2002	1	2	3	4	34,3	78,9	207,3	125,5	115,9	73,6	12,8	12	670,3
2003	1	2	28,2	30,5	24	183,2	159,8	239,2	94	28,2	11	12	813,1

Contribution à la réalisation des études techniques détaillées de la réhabilitation du barrage de Goinré dans la commune de Ouahigouya (Burkina Faso)

2004	1	2	3,6	11	21,7	123,25	133,6	263,8	81,8	11	11	12	675,75
2005	1	2	9,5	11,7	13,4	188	129,9	130,5	142,65	13,5	11	12	665,15
2006	1	2	3	5	42,9	127,25	173,2	180,6	149,675	31,4	11	12	739,025
2007	1	2	3	4,6	28,3	123,325	204,8	406,7	199,9	18,4	11	12	1015,025
2008	1	2	3	10,125	11,7	128,525	231,7	281,9	92	63,6	11	12	848,55
2009	1	2	3,2	4	69	72,975	230,8	200,9	198,8	30	11	12	835,675
2010	1	2	3	15,475	68,2	138,4	167,7	282,5	168,8	107,6	11	12	977,675
2011	1	3,1	3	4	17,7	100,4	138,5	198,2	81,575	13,2	11	12	583,675
2012	1	2	3	18,8	18,8	202,575	142,9	368	249,9	24,9	11	12	1054,875
2013													712,6
2014													766,6

ANNEXE II : COLLECTE DE DONNEES

ANNEXE II.1 : SYNTHESE DES DONNEES RECUEILLIES A OUAHIGOUYA

Tableau 18: Synthèse des données recueillies à Ouahigouya

Acteurs	Type d'entretien	Observations	Difficultés	Perspectives
Agriculteurs	Questionnaire	Les exploitants sont organisés en coopérative (CAMEPAG). Ils sont plus de 254. Au sein de leur organisation, les producteurs font des cotisations pour l'entretien du barrage et du périmètre irrigué avant chaque saison culturale (campagne sèche et humide).	<ul style="list-style-type: none"> - Certains producteurs refusent de payer les contributions en vue de l'entretien des ouvrages du barrage et des périmètres irrigués. - Désordre sur l'exploitation des terres autour du barrage - Utilisation de motopompe sur le barrage directement 	Amener les jeunes exploitants à adhérer à la coopérative et à faire les cotisations requises.

Comité local de l'eau (CLE)	Guide d'entretien	Le CLE participe à la gestion du barrage à travers la participation aux travaux d'entretien. Cette année, des travaux de comblement de ravines en amont du barrage sont au programme.	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillesse des membres - Manque de technique dans l'entretien des barrages 	<ul style="list-style-type: none"> - Suivre des formations sur l'entretien des ouvrages afin de mener les activités adéquates en cas de dégradation
Mairie	Guide d'entretien	La mairie n'intervient pas dans la gestion du barrage	Démission de la mairie face à la gestion des infrastructures publiques	<ul style="list-style-type: none"> - Confié la gestion du barrage à la mairie, et les doter de compétences nécessaires
ONEA	Guide d'entretien	L'ONEA exploite le barrage pour l'AEP. Elle produit 4200 m ³ /j, cependant le barrage contribue à hauteur de 600 m ³ /j. En plus du barrage de Goinré, 13 puits à grand diamètre, et 27 forages sont utilisés pour l'AEP de la ville. En fin 2017, 97962 personnes sont desservies, à travers 80 bornes fontaines actives, et 8218	<ul style="list-style-type: none"> - Plainte des exploitants par rapport à la position du raccordement, causant des désordres sur le perré sec. - Le besoin des populations en eau potable n'est pas satisfait. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place d'une deuxième unité compacte afin de satisfaire au mieux les besoins de la population en eau potable

		<p>branchements privés actifs.</p> <p>L'entretien ne fait pas partie des activités de l'ONEA, mais, en cas d'intervention d'urgence, peuvent participer en donnant une contribution qui relève de la direction centrale</p>		- Exploitation du barrage de Guitti.
DRRAH	Guide d'entretien	La structure n'est pas impliquée dans la gestion du barrage		
DRAAH	Guide d'entretien	Cette structure s'implique plus dans la gestion du périmètre irrigué.		
DREA	Guide d'entretien	Elle constitue l'autorité qui assure la gestion du barrage. C'est à travers elle que viennent les financements.		

ANNEXE II.2 : OUTILS DE COLLECTE DE DONNEES

Questionnaire

Questionnaire administré aux producteurs exploitants le barrage de Goinré

N^o fiche :

Date :/...../.....

1- Identité des enquêteurs		
	Nom et Prénom	Contact téléphonique
Enquêteur :		
Superviseur :		

2- Localisation du site d'enquête		
Village :		
Coordonnées géographiques	Latitude : ...° ...' ''	Longitude : ...° ...' ''

3- Identité de l'enquêté		
Nom :	Prénom(s) :	
Age :	Sexe :	M <input type="checkbox"/>
		F <input type="checkbox"/>

4- Exploitation du barrage	
L'eau du barrage de Goinré :	
- Est pérenne : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> - Tari Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	
Si oui, à partir de quel mois : Janvier <input type="checkbox"/> Février <input type="checkbox"/> Mars <input type="checkbox"/> Avril <input type="checkbox"/> Mai <input type="checkbox"/>	
Quels sont les conséquences de ce tarissement sur les activités.....	
Quel usage faites-vous de l'eau du barrage ?	Agriculture <input type="checkbox"/> Elevage <input type="checkbox"/> Pêche <input type="checkbox"/> Besoins domestiques (à préciser) <input type="checkbox"/>

<p>Si exploitation agricole :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Combien de personnes exploitent ce site ? - Quelle superficie exploite chacun de vous ? - A combien peut-on estimer la superficie totale du périmètre ? 		
<p>Combien de campagnes agricoles pratiquez-vous ?</p>	<p>Campagne humide : <input type="checkbox"/></p> <p>Quand commence la campagne humide.....</p> <p>.....</p> <p>Combien de temps dure la campagne humide.....</p> <p>.....</p>	
	<p>Campagne sèche: <input type="checkbox"/></p> <p>Quand commence la campagne humide.....</p> <p>.....</p> <p>Combien de temps dure la campagne humide.....</p> <p>.....</p>	
<p>Quelles spéculations produisez-vous ?</p>	<p>Riz <input type="checkbox"/></p> <p>Maïs <input type="checkbox"/></p> <p>Sorgho <input type="checkbox"/></p> <p>Mil <input type="checkbox"/></p> <p>Niébé <input type="checkbox"/></p> <p>Haricot vert <input type="checkbox"/></p>	<p>Banane <input type="checkbox"/></p> <p>Pomme de terre <input type="checkbox"/></p> <p>Patate <input type="checkbox"/></p> <p>Tomate <input type="checkbox"/></p> <p>Oignon <input type="checkbox"/></p> <p>Autres <input type="checkbox"/></p> <p>(à préciser)</p>
<p>Par quel moyen apportez-vous l'eau à la parcelle ?</p>	<p>motopompe : <input type="checkbox"/></p> <p>arrosoir: <input type="checkbox"/></p>	<p>Gravitaire : <input type="checkbox"/></p> <p>Autres (à préciser) :</p> <p>.....</p>
<p>Payez-vous des redevances pour assurer l'entretien du barrage ?</p>	<p>Oui <input type="checkbox"/></p>	<p>Non <input type="checkbox"/></p>
<p>Si oui, combien paie chaque usager ?</p>		
<p>Pour l'élevage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Quelle est la nature des animaux qui s'abreuvent au barrage ? - Combien d'animaux s'y désaltèrent par jour ? 		

Pour quels autres besoins l'eau du barrage est-elle utilisée ?	Travaux de construction <input type="checkbox"/>
	Autre (à préciser) <input type="checkbox"/>
Quel volume moyen est prélevé par jour pour ces besoins	V < 1000 l <input type="checkbox"/>
	1000 l < V < 5000 l <input type="checkbox"/>
	V > 5000 l <input type="checkbox"/>
Connaissez-vous le problème de l'envasement/ensablement ?	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Quels peuvent être les causes de l'ensablement/envasement ?	
.....	
Etes-vous prêts à suivre les instructions des services compétents pour lutter contre l'ensablement/envasement (à savoir ne plus cultiver sur les berges ; construction de cordons pierreux...) ?	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Que préconisez-vous pour lutter contre l'ensablement/envasement ?.....	
.....	
Quelles suggestions faites-vous pour améliorer vos conditions d'accès à l'eau du barrage ? :	
.....	
.....	

5- Entretien des ouvrages d'approvisionnement en eau potable			
Pensez-vous que l'entretien du barrage influence sur la disponibilité en eau ?			
Participez-vous à l'entretien du barrage ?			
Oui <input type="checkbox"/>		Non <input type="checkbox"/>	
Si oui dans quelle mesure ?.....			
.....			
Existe-t-il des organisations locales de gestion du barrage ?	Oui <input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>	Je ne sais pas <input type="checkbox"/>
Si oui, lesquels.....			
.....			
Quelle est votre appréciation de l'état de dégradation de l'ouvrage ?	Dégradé <input type="checkbox"/>	Moyennement dégradé <input type="checkbox"/>	Très dégradé <input type="checkbox"/>

Merci de votre collaboration !

Guide d'entretien sur l'exploitation et l'entretien du barrage de Goinré

Guide d'entretien avec les professionnels du secteur de l'eau potable (ONEA)

Lieu de l'entretien :

Date :/...../.....

1- Identification de l'organisation

NOM de l'ORGANISATION :	
Activités de l'organisation.....	

2- Identification de l'interlocuteur

NOM :	Prénom :	Tel :
Titre :		
Responsabilités :		

3- Exploitation du barrage

➤ Quelle exploitation faites-vous du barrage de Goinré
➤ Quelle quantité d'eau prélevez-vous en moyenne du barrage : <ul style="list-style-type: none">○ Chaque jour :○ Chaque mois :○ Chaque année :○ Autre (document sur les rapports d'activités et le niveau de remplissage du barrage ; caractéristiques techniques du barrage, des pompes...):
➤ Quelle est le nombre de personnes desservies par l'ONEA Ouahigouya
➤ Quel est le nombre de ménages que vous approvisionnez à travers le barrage, le nombre d'habitants par ménage, le nombre de borne fontaine et de branchements privés
➤ Quelles sont les localités desservies ?
➤ Existe-t-il d'autres sources d'approvisionnement en eau potable de la ville de Ouahigouya ? lesquels ?
➤ Quelle est la contribution du barrage dans l'approvisionnement en eau potable

➤ Quel est le débit de ces sources d'eau ? le mode d'adduction ? le nombre d'heure de pompage ?
➤ Quelle solution envisagez-vous au cas où l'eau du barrage, ainsi que les autres sources ne satisfont plus la demande de la population ?
➤ Quels problèmes rencontrés vous actuellement dans l'AEP
➤ Connaissez-vous le problème de l'ensablement/envasement ? quelles solutions proposez-vous pour y remédier ?
➤ A combien est estimé le prix du mètre cube d'eau ?

4- Entretien des ouvrages d'approvisionnement en eau potable

➤ Quel est l'historique du barrage de Goinré en matière de dégradation et d'entretien
➤ Dans quelles mesures contribuez-vous à l'entretien du barrage ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous par rapport à : <ul style="list-style-type: none">- L'accès à l'eau du barrage ?- L'entretien du barrage ?
➤ Quels sont les enjeux de la dégradation du barrage ?
➤ Que préconisez-vous pour lutter contre les différentes dégradations existantes

Merci de votre apport !

Guide d'entretien sur l'exploitation et l'entretien du barrage de Goinré

Guide d'entretien avec la Direction régionale de l'eau et de l'assainissement du Nord

Lieu de l'entretien :

Date :/...../.....

Identification de l'organisation

NOM de l'ORGANISATION :	
Activités de l'organisation	
Avez-vous des programmes dans la gestion des retenues d'eau	

Identification de l'interlocuteur

NOM :	Prénom :
Titre :	
Responsabilités :	

Exploitation et entretien du barrage de Goinré

➤ Quel est l'historique du barrage de Goinré ?
➤ Combien d'exploitant existe-t-il ? (agriculteur, éleveur, pêcheur, autre)
➤ Quelle est la superficie totale du périmètre irrigué ?
➤ Comment se fait l'entretien du barrage ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous par rapport à : – L'accès à l'eau du barrage ? – L'entretien du barrage ?
➤ Avez-vous connaissance du problème d'ensablement/envasement ? quelles solutions proposez-vous pour y remédier ?
➤ Quels sont les enjeux de la dégradation du barrage ?
➤ Que préconisez-vous pour lutter contre les différentes dégradations existantes

Merci de votre apport !

Guide d'entretien sur l'exploitation et l'entretien du barrage de Goinré

Guide d'entretien avec le Comité Local de l'Eau (CLE)

Lieu de l'entretien :

Date :/...../.....

1- Identification de l'organisation

NOM de l'ORGANISATION :	
Activités de l'organisation	
Avez-vous des programmes dans la gestion des retenues d'eau	

2- Identification de l'interlocuteur

NOM :	Prénom :
Titre :	Tel :
Responsabilités :	

3- Exploitation du barrage

➤ Quelle est la date de création de votre comité et son organisation ?
➤ Dans quelle mesure participez-vous à l'exploitation du barrage ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous ?
➤ Êtes-vous satisfait du fonctionnement du CLE ?
➤ Y'a-t-il des conflits entre producteurs dans l'usage de l'eau ?
➤ Que suggérez-vous pour le bon déroulement de vos missions ?
➤ Connaissez-vous le problème de l'ensablement/envasement ? quelles solutions proposez-vous pour y remédier ?
➤ Existe-t-il d'autres organismes de gestion du barrage ?

4- Entretien des ouvrages d'approvisionnement en eau potable

➤ L'entretien du barrage entre-t-il dans vos activités ? Dans quelles mesures ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous ?
➤ D'où proviennent le financement des activités d'entretien ?
➤ Quels sont les enjeux de la dégradation du barrage ?
➤ Que préconisez-vous pour lutter contre les différentes dégradations existantes ?

Merci de votre contribution !

Guide d'entretien sur l'exploitation et l'entretien du barrage de Goinré

Guide d'entretien avec les agents de la mairie

Lieu de l'entretien :

Date :/...../.....

1- Identification de l'organisation

NOM de la structure	
Activités de l'organisation	

2- Identification de l'interlocuteur

NOM :	Prénom :
Titre :	
Responsabilités :	

3- Information sur la zone

➤ A combien est estimée la population de Ouahigouya et ses environnants ?
➤ Quelle est la langue parlée ?
➤ Le nombre d'hommes et de femmes
➤ L'activité principale pratiquée

4- Exploitation du barrage

➤ Dans quelle mesure participez-vous à l'exploitation du barrage ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous ?
➤ Que suggérez-vous pour le bon déroulement de vos missions ?
➤ Connaissez-vous le problème de l'ensablement/envasement ? quelles solutions proposez-vous pour y remédier ?

5- Entretien des ouvrages d'approvisionnement en eau potable

➤ L'entretien du barrage entre-t-il dans vos activités ? Dans quelles mesures ?
➤ Quelles difficultés rencontrez-vous ?
➤ Quels sont les enjeux de la dégradation du barrage ?
➤ Que préconisez-vous pour lutter contre les différentes dégradations existantes

Merci de votre contribution !

ANNEXE III : NOTES DE CALCUL

ANNEXE III.1 : ETUDES HYDROLOGIQUES

Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant de Goinré couvre une superficie de 153 km² et possède un Périmètre de 73 km.

$$\text{Indice de Gravelius } K_G : KG = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \quad \Rightarrow \quad K_G = 0,28 * \frac{73}{\sqrt{153}}$$

$$K_G = 1,664 \text{ m/Km}^2$$

$$\text{La pente longitudinale } I : I = \frac{0,026}{\sqrt{S}} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{0,026}{\sqrt{153}}$$

$$I = 2,1^0/00$$

Le bassin versant est de classe R2

Rectangle équivalent Leq :

$$Leq = \frac{K_G * \sqrt{S}}{1,128} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right] \Rightarrow Leq = \frac{1,664 * \sqrt{153}}{1,128} * 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,664} \right)^2}$$

$$Leq = 31,669 \text{ Km}$$

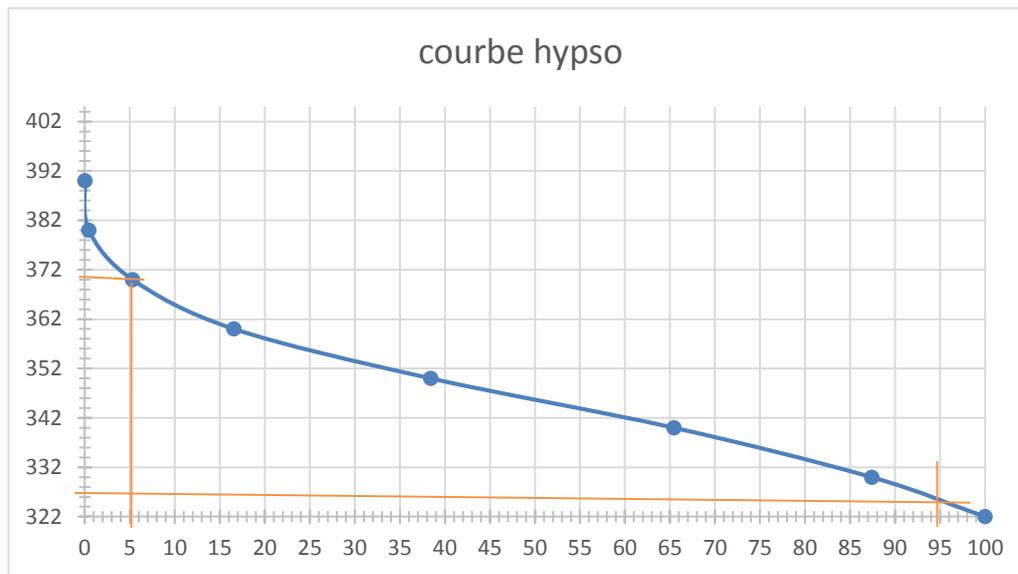
Hypsométrie :

Le relief joue un rôle primordial dans la détermination de la compétence de l'agent de transport des matériaux.

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

$$H (5\%) = 370 \text{ m.}$$

$$H (95\%) = 325 \text{ m.}$$



Graphique 4: Courbe hypsométrique

Indice global de pente I_g

$$I_g = \frac{H(5\%) - H(95\%)}{L_{eq}} \Rightarrow I_g = \frac{370 - 325}{31,669}$$

$$I_g = 1,421 \text{ m/Km}$$

Détermination des pentes transversales

Profils	H1	H2	L	pent
1	365	359	2,12	2,830
2	361	344	2,58	6,589
3	349	327	3,394	6,482
4	343	327	3,057	5,234
Moyenne				5,284

$$I_t = 5,284 \text{ m/km}$$

Correction de l'indice global de pente I_{gcor}

$$I_{gcor} = \frac{(n-1) \cdot I_g + I_t}{n} \text{ avec } n=4$$

$$I_{gcor} = \frac{(4-1) \cdot 1,421 + 5,28}{4} = 2,38 \text{ m/Km}$$

Prenons $I_{gcor} = 3 \text{ m/Km}$

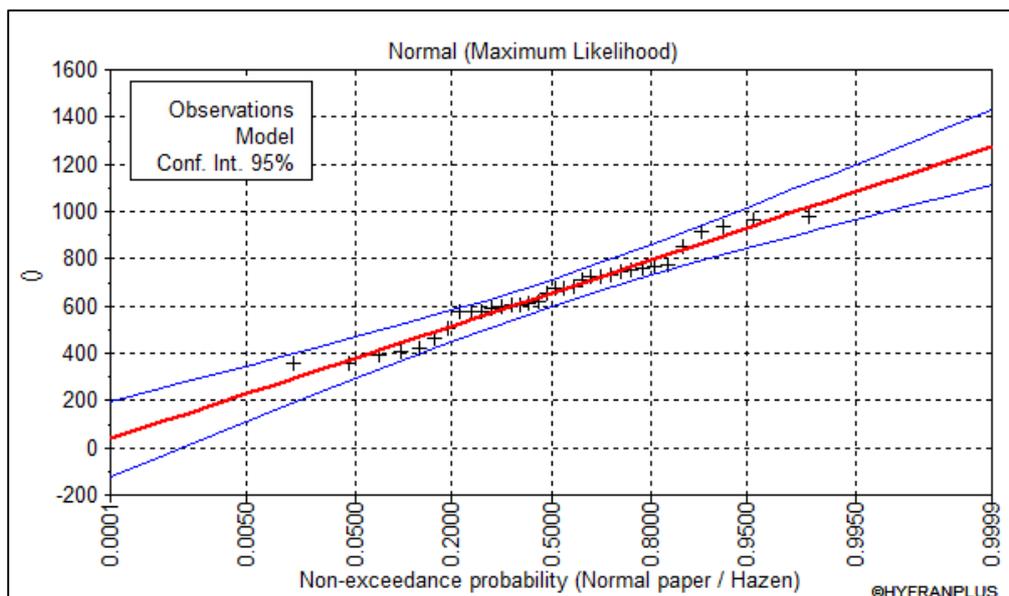
La densité de drainage

$$D_d = \frac{L_t}{S} \Rightarrow D_d = \frac{194,137}{153} = 1,269 \text{ Km/ km}^2$$

La pluviométrie

Pluies annuelles

La série de donnée des pluies annuelles moyennes a été faite par la loi de GAUSS, sur un échantillon de 34 valeurs de 1981 à 2014.



Graphique 5: Ajustement des pluies annuelles selon la loi de Gauss

L'ajustement ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs de la pluviométrie pour différentes fréquences de dépassement données dans le Tableau 19

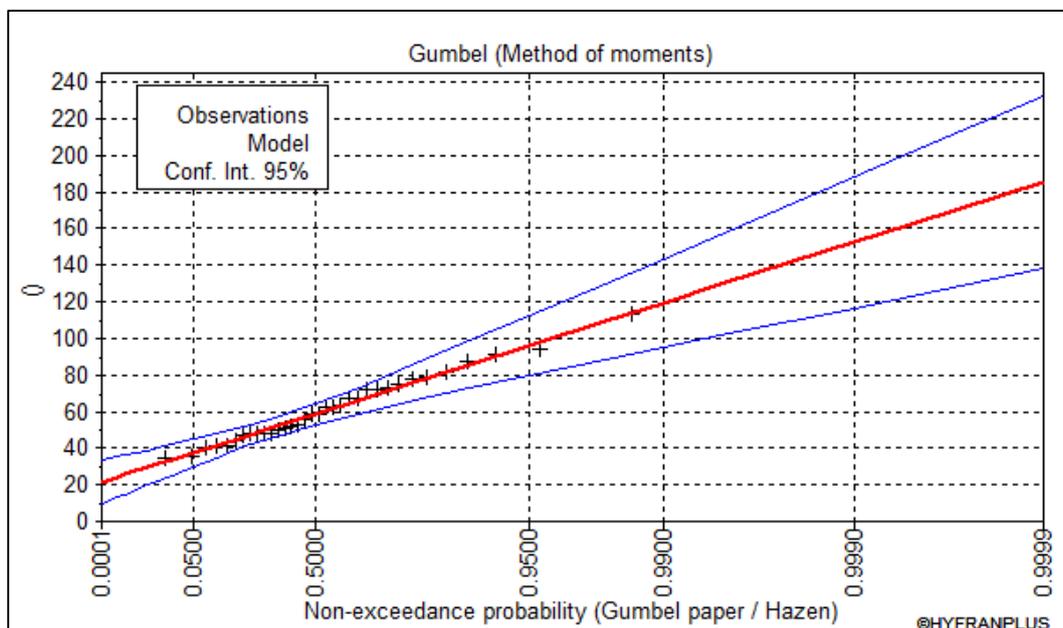
Tableau 19: Ajustement des pluies annuelles

Période de retour	Fréquence au dépassement	Fréquence au non dépassement	Pluies	Intervalle de confiance (95%)
10000	0,0001	0,9999	1270	1110 - 1430
2000	0,0005	0,9995	1200	1060 - 1350
1000	0,0010	0,999	1170	1030 - 1300
200	0,0050	0,995	1080	966 - 1200
100	0,0100	0,99	1040	933 - 1150
50	0,0200	0,98	997	897 - 1100
20	0,0500	0,95	929	842 - 1020
10	0,1000	0,9	868	793 - 944
5	0,2000	0,8	795	730 - 860
3	0,3333	0,6667	727	669 - 785
2	0,5000	0,5	656	600 - 711
1,4286	0,7000	0,3	569	509 - 628
1,25	0,8000	0,2	516	451 - 581

1,1111	0,9000	0,1	443	367 - 519
1,0526	0,9500	0,05	382	296 - 469
1,0204	0,9800	0,02	314	215 - 414
1,0101	0,9900	0,01	269	160 - 378
1,005	0,9950	0,005	228	110 - 345
1,001	0,9990	0,001	142	6,44 - 278
1,0005	0,9995	0,0005	109	-34,2 - 252
1,0001	0,9999	0,0001	37,9	-121 - 197

Pluies maximales journalières

La série de donnée des pluies maximales journalières a été faite suivant la loi de GUMBEL sur de 34 valeurs de 1981 à 2014



Graphique 6: Ajustement des pluies journalières selon la loi de Gumbel

L'ajustement ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs de la pluviométrie maximale journalière pour différentes fréquences de dépassement données dans le Tableau 20

Tableau 20: Ajustement des pluies journalières maximales

Période de retour	Fréquence	Pluies	Intervalle de confiance à 95%
10000	0,9999	185	138 - 233
2000	0,9995	162	123 - 202
1000	0,999	152	117 - 188
200	0,995	129	102 - 157
100	0,99	119	95,0 - 144

50	0,98	109	88,4 - 130
20	0,95	95,9	79,6 - 112
10	0,9	85,6	72,6 - 98,5
5	0,8	74,8	65,2 - 84,4
3	0,6667	66,2	59,0 - 73,4
2	0,5	58,5	52,9 - 64,2
1,4286	0,3	50,6	45,4 - 55,8
1,25	0,2	46,4	40,9 - 52,0
1,1111	0,1	41,3	34,9 - 47,7
1,0526	0,05	37,5	30,2 - 44,8
1,0204	0,02	33,7	25,4 - 42,0
1,0101	0,01	31,4	22,4 - 40,3
1,005	0,005	29,4	19,8 - 38,9
1,001	0,001	25,5	14,9 - 36,2
1,0005	0,0005	24,2	13,1 - 35,3
1,0001	0,0001	21,4	9,44 - 33,4

Etude des crues

Calcul du coefficient de ruissellement décennal

L'estimation du coefficient de ruissellement Kr10 est faite par interpolation linéaire entre les valeurs Kr70 et Kr100.

Les valeurs des paramètres a, b et c dépendent des caractéristiques physiques du bassin versant.

Pour un indice global de pente $I_g = 3$,

$$Kr70 = \frac{164}{(17+153)} + 10,5 = 11,46 \%$$

$$Kr100 = \frac{250}{(20+153)} + 12 = 13,45 \%$$

Par interpolation, $Kr10 = 12,5\%$

Le coefficient d'abattement A

$$A = 1 - ((161 - 0,042 * 656) / 1000) * \log_{10}(153) \Rightarrow A = 0,71$$

Temps de base (Tb), temps de montée (Tm)

Les temps de base et de montée des eaux à l'exutoire du barrage sont également déduits des abaques de la méthode d'Auvray-Rodier

$$T_{b10} = 250 * 153^{0,35} + 300 \Rightarrow T_{b10} = 1754,06 \text{ mn}$$

$$T_{m10} = 100 * 153^{0.35} + 75 \Rightarrow T_{m10} = 656,624 \text{ mn}$$

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

La pluie médiane

$$P_{med} = A * P_{10} = 0,71 * 85,6 = 60,6 \text{ mm}$$

Suivant les ajustements à la loi de Gumbel, l'intervalle de confiance pour la pluie décennale est : $72,6 \text{ mm} < P_{10} < 98,5 \text{ mm}$. Afin d'être dans les bonnes conditions pluviométriques, nous convenons de prendre $P_{med} = 72,6 \text{ mm}$.

– Débit de pointe

- **Méthode de Orstom**

$$Q_{10} = m * P_{med} * Kr_{10} * \alpha_{10} * \frac{S}{T_{b10}} \Rightarrow Q_{10} = 1,05 * 72,6 * 0,125 * 2,6 * \frac{153}{1754,06}$$

$$Q_{10} = 36,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Méthode CIEH**

$$Q_{10} = a * S^s * P_{an}^p * I g^i * K_{r10}^k * D_d^d$$

Méthode CIEH								
N°	n de la sélection FAO	a	S	lg	Kr10	Dd	Q10	Q10
39	61	0,41	0,43	0,00	0,92	0,00	35,77	39,81
10	116	0,08	0,70	0,95	0,53	0,00	30,31	
12	176	0,10	0,64	0,41	1,04	0,00	51,83	
40	60	0,25	0,46	0,10	0,98	0,00	34,10	
42	133	0,09	0,64	0,40	1,02	0,00	47,06	

$$Q_{10} \text{ retenu} = 39,81 \text{ m}^3/\text{s}$$

– Choix de la période de retour

Méthode de dégoutte

$H^2 * \sqrt{V} = 112,5$; ce qui correspond à une période de rupture de 5000 ans.

Pour le débit de projet, nous convenons de prendre un débit de projet pour une période de retour

de 100 ans.

H^2/\sqrt{V}	< 5	5 à 30	30 à 100	100 à 700	≥ 700
Ts (ans)	100	500	1 000	5 000	10 000

Source (J.M. DURAND, 1996)

– Débit de projet

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.

Débit de crue centennale

$$C_{100} = 1 + \frac{P_{100}-P_{10}}{P_{10}} * \frac{(T_{b10}/24)^{0.12}}{Kr_{10}} \Rightarrow C = 1 + \frac{119-85,6}{85,6} * \frac{(29.23/24)^{0.12}}{12,5}$$

$$C_{100} = 4,2$$

$$Q_{100} = C_{100} * Q_{10} ; \quad Q_{100} = 4,2 * 39,81$$

$$Q_{100} = 167,13 \text{ m}^3/\text{s}$$

Débit de crue de 10 000 ans :

$$C_{10\ 000} = 1 + \frac{P_{10\ 000}-P_{10}}{P_{10}} * \frac{(T_{b10}/24)^{0.12}}{Kr_{10}} \Rightarrow C = 1 + \frac{185-85,6}{85,6} * \frac{(29.23/24)^{0.12}}{12,5}$$

$$C_{10\ 000} = 10,52$$

$$Q_{10\ 000} = C_{10\ 000} * Q_{10} \Rightarrow Q_{10\ 000} = 10,52 * 39,81$$

$$Q_{10\ 000} = 418,71 \text{ m}^3/\text{s} .$$

– Hydrogramme de crue

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{2}{\alpha_{10}} * \frac{T_{b10}-\alpha_{10}*T_{m10}}{T_{b10}-2*T_{m10}} \Rightarrow \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{2}{2,6} * \frac{1754-2,6*656,6}{1754-2*656,6}$$

$$\frac{Q}{Q_{max}} = 0,082 ; \quad Q = 13,66 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour déterminer le temps de cassure, considérons la droite d'équation $y = ax + b$

$$y = Q_{max} ; \quad x = T_{m10} \quad \text{et} \quad ; \quad y = Q_0 \quad ; \quad x = T_{b10}$$

$$\begin{cases} 167,13 = a * 656,6 + b \\ 0 = a * 1754 + b \end{cases}$$

A partir du système d'équation, on obtient $a = -0,15$ et $b = 267,13$

Le temps de cassure $T_c = (Q - b)/a$

$$T_c = 1664,36 \text{ min.}$$

x	Y
Temps (min)	Débit de projet
0	0
656,62	167,13
1664,36	13,66
1754,06	0

Estimation des besoins et des pertes

- **Les dépôts solides**

Les dégradations spécifiques ont été estimés par les formules de GOTTSCHALK et de GRESILLON

Formule de GOTTSCHALK (USA) $D = 157,22 \text{ m}^3 / \text{Km}^2 / \text{an}$

Formule de EIER - CIEH (GRESILLON) $D = 232,9 \text{ m}^3 / \text{Km}^2 / \text{an}$

Le volume annuel de dépôts solides : $V = 35\,634,11 \text{ m}^3 / \text{an}$

- **Estimation des besoins**

Besoin en eau de la tomate

Avec une efficacité du système d'irrigation gravitaire prise égale à 0,6, les besoins totaux de la tomate pendant la période culturale sèche sont de $1936834,67 \text{ m}^3$

Tableau 21: Besoins en eau de la tomate

Tomate							
Mois	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
jours par mois	30	31	31	28	25	30	31
Kc par mois	0,6	0,88	1,07	1,05	0,98	0,6	0,88
ETO (mm/j)	4,97	4,73	5,16	5,89	6,47	4,97	4,73
ETO (mm/mois)	149,1	146,63	159,96	164,92	161,75	149,1	146,63
Pe (mm)	0	1	0	0	2	8,9	28,6
BMP (mm)	149,1	145,63	159,96	164,92	159,75	140,2	118,03
Besoin net (m3/ha)	1491	1456,3	1599,6	1649,2	1597,5	1402	1180,3
Besoins (m3)	166992	163105,6	179155,2	184710,4	178920	157024	132193,6
Efficacité du système	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Besoins nets	278320	271842,67	298592	307850,67	298200	261706,67	220322,67
Besoin de la campagne	1936834,67						

Besoins en eau de la population

Tableau 22: Estimation des besoins en eau des populations

Besoin en eau pour AEP (source ONEA)												
Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Durée	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Débit (m3/h)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Durée par jour (h/jour)	18	18	18	18	18	10	10	10	12	18	18	18
Volume m3/mois	11160	10080	11160	10800	11160	6000	6200	6200	7200	11160	10800	11160

Besoin en eau du cheptel

Tableau 23: Estimation des besoins en eau du cheptel

Besoin en eau du cheptel												
Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
durée	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Consommation	63138,32	57028,16	63138,32	61101,60	63138,32	61101,60	63138,32	63138,32	61101,60	63138,32	61101,60	63138,32

- **Estimation des pertes**

Pertes par infiltration

Tableau 24: Estimation des pertes par infiltration

Pertes par infiltration												
Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
durée	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Pertes par infiltration (par mois)	62	56	62	60	62	60	62	62	60	62	60	62

Pertes par évaporation

Tableau 25: Estimation des pertes par évaporation

Pertes par évaporation												
Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
Evaporation journalière bac A (mm/j)	9,82	11,92	13,30	13,37	12,66	10,54	7,58	5,58	6,00	8,10	9,15	9,46
Evaporation journalière lac (mm/j) formule de POUYAUD	6,58	7,40	7,90	7,93	7,67	6,87	5,63	4,68	4,89	5,86	6,31	6,44
Evaporation mensuelles lac (mm/mois)	204,04	207,09	244,99	237,80	237,79	206,02	174,62	145,22	146,76	181,73	189,30	199,52

ANNEXE III.2 : VERIFICATION DE LA DIGUE

- **Revanche libre**

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

Vitesse des vents pris à partir de l'aéroport de Ouagadougou : $U = 2,7\text{m/s}$, soit $9,72\text{ km/h}$

Le fetch f (longueur du plan d'eau exposée au vent) : $f = \frac{\text{hauteur barrage}}{\text{pente longitudinale}} = 2,7\text{ Km}$

$$h_{\text{vague}} = 0.76 + 0.032\sqrt{U * f} - 0.26 * \sqrt[4]{f} \Rightarrow h_{\text{vague}} = 0.76 + 0.032\sqrt{9,72 * 3} - 0.26 * \sqrt[4]{3}$$

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

Formule de Gaillard

Vitesse des vagues

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

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

La revanche

$$R = 0.75 * h_{\text{vague}} + \frac{V_{\text{vague}}^2}{2 * g} \Rightarrow R = 0,75 * 0,59 + \frac{2,68^2}{2 * 9,81}$$

$$R = 0,81\text{m}$$

Approche simplifié

Revanche libre	
$H^2 * \sqrt{V}$	112,5
100	0,8
112,5	0,804
700	1,05

H la hauteur de la digue = $5,75\text{ m}$

V le volume du plan d'eau = $11,58\text{ Hm}^3$

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

$$R = (0,81 + 0,08)/2 = 0,8\text{m}$$

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

- **Largeur de la crête**

Formule de KNAPPEN $Lc = 1,65 * \sqrt{H}$; $Lc = 1,65 * \sqrt{5,75} = 3,96\text{ m}$

Formule de PREECE $Lc = 1,1\sqrt{H} + 1$; $Lc = 1,1\sqrt{5,75} + 1 = 3,63\text{ m}$

La largeur en crête de la digue est de $3,5\text{m}$

• **La largeur de la fondation de la digue**

$$l_f = l_c + \frac{H_r}{\tan\alpha_1} + \frac{H_r}{\tan\alpha_2} \quad \Rightarrow \quad l_f = 3,5 + \frac{5,75}{0,5} + \frac{5,75}{0,5}$$

$$l_f = 26,46\text{m}$$

$$b = \frac{H_r}{\tan\alpha_1} \quad b = \frac{4,24}{0,5}$$

$$b = 8,48\text{m}$$

$$AB = 0,3 * b = 0,3 * 8,48$$

$$AB = 2,54\text{m}$$

$$d = l_f - b \quad d = 26,46 - 8,48$$

$$d = 18\text{ m}$$

Détermination de la ligne phréatique et de la parabole de Kozény

$$y_0 = \sqrt{H_r^2 + d^2} - d ; y_0 = \sqrt{4,24^2 + 18^2} - 18$$

$$y_0 = 0,5\text{m}$$

$$\text{On a } \alpha < 30^\circ, l = \sqrt{H_r^2 + d^2} - \sqrt{d^2 - H_r^2 * \cotg\alpha^2} = DC$$

$$DC = \sqrt{4,24^2 + 18^2} - \sqrt{18^2 - 4,24^2 * \cotg(26,56)^2}$$

$$DC = 2,6\text{m}$$

$$\frac{DC}{OC} = \frac{3}{8} * \cos \frac{\alpha}{2} \quad \Rightarrow \quad OC = \frac{DC}{\frac{3}{8} * \cos \frac{\alpha}{2}}$$

$$OC = \frac{2,6}{\frac{3}{8} * \cos \frac{26,56}{2}} \quad \Rightarrow \quad OC = 9,25\text{ m}$$

Parabole de Kozény : C (A ; C ; M)

$$M(0 ; y_0) \quad \Rightarrow \quad M(0 ; 0,5)$$

Ligne phréatique : C (B ; D)

• **Pente des talus**

La pente des talus est donnée est donné par le tableau ci-dessous :

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	Homogènes, granulométrie étendu	2	2
	Homogène à fort pourcentage d'argile	2,5	2,5
	A zone	2	2,5
10 à 15 m	Homogène, granulométrie étendu	2,5	2,5
	Homogène à fort pourcentage d'argile	3	2,5
	A zone	2	3

Source M.L. COMPAORE 1996, cours de barrage page 264.

• **Protection des talus**

Les différents types de protection :

Protection des talus amont {
 – Revêtement en béton
 – Perrés maçonnés
 – Enrochement

Protection des talus aval {
 – Enherbement (risberne)
 – couche latéritique

- Nous utiliserons le perré maçonné sur le talus amont et la couche latéritique pour la protection du talus aval de la digue.
- Le désherbage et dessouche des arbustes sur les différents talus

Epaisseur de la protection

$$e_p = 1.5 * D50$$

$$h_{vague} = 0.6m \Rightarrow D50 = 0.25m$$

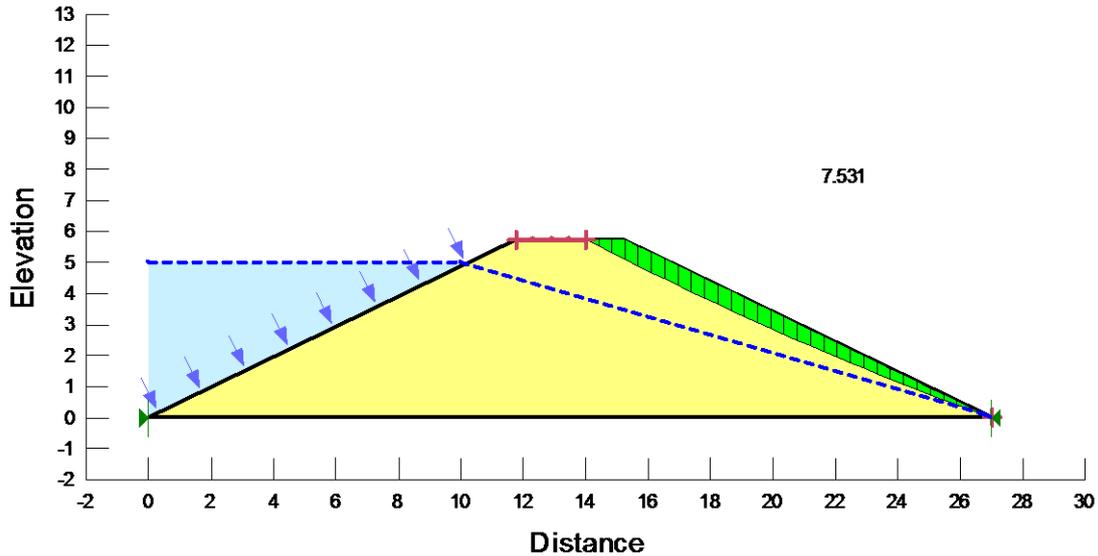
$$e_p = 1.5 * 0.25 = 0.4m \text{ soit } 40cm$$

L'épaisseur de la protection en amont et en aval est de 40 cm.

• **Stabilité de la digue**

La stabilité a été vérifiée par le logiciel geoslope.

Le graphique ci-dessous montre que la digue est stable pour un facteur de sécurité de 7,5.



Graphique 7: Stabilité de la digue pour un facteur de sécurité de 7,5

ANNEXE III.3 : CONCEPTION DU DEVERSOIR

✚ **Détermination de la longueur du déversoir**

Itérations	Qc max	h	β%	X ₀	L (m)	Qe max
1	167,13	0,53			118,642	
2		0,76	78,39	0,21	93	131,01
3		1,09	61,769	0,15028	73,284	103,23
4		1,1	61,266	0,13385	72,687	102,39
5		1,11	61,195	0,13168	72,603	102,27
6		1,11	61,185	0,13137	72,591	102,257
7		1,11	61,184	0,13133	72,589	102,255
8		1,11	61,183	0,13132	72,589	102,254

La longueur retenue est 93 m pour une charge au dessus du déversoir égale à 0,76 m.

Crue de rupture :

$$Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,2)^{1,5} + 0,15 * L$$

$$Q_{rupt} = 2 * 93 * (1,5 + 0,2)^{1,5} + 0,15 * 730,7 \Rightarrow Q_{rupt} = 521,88 \text{ m}^3/\text{s}$$

Stabilité du déversoir

Détermination de l'angle α pour que le déversoir soit à l'équilibre.

La vérification de l'équilibre du déversoir passe par la vérification de la stabilité externe et de la stabilité interne.

– Vérification à la stabilité externe

La vérification de la stabilité externe passe par la vérification de la stabilité au non glissement et de la stabilité au non renversement.

➤ Vérification de la stabilité au non glissement

La vérification de la stabilité au non glissement passe par la vérification de l'inéquation suivante :

$$(W - U) \times \tan\varphi - (P_{e \text{ amont}} - P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$$

Poussée hydrostatique externe amont ($P_{e \text{ amont}}$)

$$P_{e \text{ amont}} = \frac{1}{2} \gamma_w * H^2 + \gamma_w * H * h \Rightarrow P_{e \text{ amont}} = \frac{1}{2} * 10 * 4,24^2 + 10 * 4,24 * 0,76$$

$$P_{e \text{ amont}} = 122,112 \text{ KN}$$

Poussée hydrostatique externe aval ($P_{e \text{ aval}}$)

$$P_{e \text{ aval}} = \frac{1}{2} \gamma_w * h^2 \Rightarrow P_{e \text{ aval}} = \frac{1}{2} * 10 * 0,76^2$$

$$P_{e \text{ aval}} = 2,89 \text{ KN}$$

Poussée des terres (P_t)

$$P_t = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sédiment}} * H^2_{\text{sédiment}} * K_a \Rightarrow P_t = \frac{1}{2} * 18 * 0,2^2 * 0,33$$

$$P_t = 0,12 \text{ KN}$$

Le poids propre(W)

$$W = \gamma_b * S \quad \text{avec} \quad S = a * H + \frac{(b-a)}{2} * H \quad \text{et} \quad b = a + H * \tan\alpha$$

$$W = \gamma_b * \left(a * H + \frac{(b-a)}{2} * H \right) \Rightarrow W = 25 * \left(1 * 4,24 + \frac{1}{2} * 4,24^2 * \tan\alpha \right)$$

La poussée hydrostatique interne(U)

$$U = \frac{1}{2} * \gamma_w * (H + h) * b \Rightarrow U = \frac{1}{2} * 10 * (4,24 + 0,76) * (1 + 4,24 * \tan\alpha)$$

$$(W - U) \times \tan\varphi - P_e \geq 0 \Rightarrow \left(25 * \left(1 * 4,24 + \frac{1}{2} * 4,24^2 * \tan\alpha \right) - \frac{1}{2} * 10 * (4,24 + 0,76) * (1 + 4,24 * \tan\alpha) \right) * \tan\varphi - (P_{e \text{ amont}} - P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$$

$$\tan\alpha \geq \frac{(P_{e\text{ amont}} - P_{e\text{ aval}} + P_t)}{\tan\varphi * \left(\frac{H}{2} * (H * \gamma_b + H * \gamma_w - \gamma_w * h)\right)}$$

$$\alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{(P_{e\text{ amont}} - P_{e\text{ aval}} + P_t)}{\tan\varphi * \left(\frac{H}{2} * (H * \gamma_b + H * \gamma_w - \gamma_w * h)\right)} \right) \Rightarrow \alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{(122,112 - 2,89 + 0,12)}{0,65 * \left(\frac{4,24}{2} * (4,24 * 25 + 4,24 * 10 - 10 * 0,76)\right)} \right)$$

$$\alpha \geq 38,67^\circ.$$

$$\text{Prenons } \alpha = 45^\circ$$

➤ Vérification de la stabilité au non renversement

La vérification de la stabilité au non renversement passe par la vérification de l'inéquation suivante : $m_{\text{Forces résistante}} (W - U) - m_{\text{Forces de poussée}} (P_{e\text{ amont}} + P_{e\text{ aval}} + P_t) \geq 0$

Calcul du moment $m_{/B} (W)$

$$m_{/B} (W) = W(b - X_{\text{Gouv}}) \quad X_{\text{Gouv}} = \frac{\sum S_i X_{G_i}}{\sum S_i}$$

Soit S_1 la section rectangulaire et S_2 la section triangulaire

✓ Calcul de la section rectangulaire S_1

$$S_1 = a * H = 1 * 4,24 ; S_1 = 4,24 \quad \text{et } X_{G_1} = \frac{1}{2} * a = 0,5 * 1 = 0,5 \quad S_1 X_{G_1} = \frac{1}{2} a^2 * H = \frac{1}{2} * 1^2 * 4,24 = 2,12$$

✓ Calcul de la section triangulaire S_2

$$S_2 = \frac{H^2 * \tan\alpha}{2} \quad \text{et} \quad X_{G_2} = a + \frac{1}{3} H \tan\alpha$$

$$S_2 X_{G_2} = \left(\frac{H^2 \tan\alpha}{2} \right) * \left(a + \frac{1}{3} H \tan\alpha \right)$$

$$X_{\text{Gouv}} = \frac{\left(\frac{H^2 \tan\alpha}{2} \right) * \left(a + \frac{1}{3} H \tan\alpha \right) + \left(\frac{1}{2} a^2 * H \right)}{(a * H) + \left(\frac{H^2 \tan\alpha}{2} \right)} \Rightarrow X_{\text{Gouv}} = \frac{1^2 + 4,24 * \tan 45 * \left(1 + \frac{1}{3} * 4,24 * \tan 45 \right)}{2 * 1 + 4,24 * \tan 45}$$

Le moment $m_{/B} (W)$ devient alors :

$$m_{/B} (W) = \gamma_b * \left(a * H + \frac{1}{2} * H^2 * \tan\alpha \right) * \left(a + H * \tan\alpha - \frac{a^2 + H * \tan\alpha * \left(a + \frac{1}{3} H * \tan\alpha \right)}{2 * a + H * \tan\alpha} \right)$$

$$m_{/B} (W) = \frac{\gamma_b}{2} (2 * a * H^2 * \tan\alpha + \frac{2}{3} * H^3 * \tan^2\alpha + a^2 * H)$$

Calcul du moment $m_{/B} (U)$

$$m_{/B} (U) = U * \frac{2}{3} * b \quad \Rightarrow \quad U * \frac{2(a + H * \tan\alpha)}{3}$$

$$m_{/B} (U) = \frac{1}{2} * \gamma_w * (H + h) * (a + H * \tan\alpha) * \frac{2(a + H * \tan\alpha)}{3}$$

$$m_{j/B} (U) = \frac{1}{3} * \gamma_w [\tan^2 \alpha (H^3 + H^2 * h) + \tan \alpha (2H^2 * a + 2 * H * h) + a^2 * H + a^2 * h]$$

Calcul du moment $m_{j/B} (P_{e \text{ amont}})$

$$m_{j/B} (P_{e \text{ amont}}) = P_{e \text{ amont}} * \frac{1}{3} (H + h) \Rightarrow m_{j/B} (P_{e \text{ amont}}) = \left(\frac{1}{2} \gamma_w * H^2 + \gamma_w * H * h \right) * \frac{1}{3} (H + h) = 203,52 \text{ KN}$$

Calcul du moment $m_{j/B} (P_{e \text{ aval}})$

$$m_{j/B} (P_{e \text{ aval}}) = P_{e \text{ aval}} * \frac{1}{3} h \Rightarrow m_{j/B} (P_{e \text{ aval}}) = \left(\frac{1}{2} \gamma_w * h^2 \right) * \frac{1}{3} * h = 0,19 \text{ KN}$$

Calcul du moment $m_{j/B} (P_t)$

$$m_{j/B} (P_t) = P_t * \frac{1}{3} h_{\text{sédiment}} \Rightarrow m_{j/B} (P_t) = \frac{1}{2} \gamma_{\text{sédiment}} * H^2_{\text{sédiment}} * K_a * \frac{1}{3} h_{\text{sédiment}} = 0,0079 \text{ KN.}$$

$$m_{\text{Forces résistante}} (W - U) - m_{\text{Forces de poussée}} (P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$$

$$\Rightarrow \frac{\gamma_b}{2} \left(2 * C * H^2 * \tan \alpha + \frac{2}{3} * H^3 * \tan^2 \alpha + C^2 * H \right) - \frac{1}{3} * \gamma_w [\tan^2 \alpha (H^3 + H^2 * h) + \tan \alpha (2H^2 * C + 2 * H * h) + C^2 * H + C^2 * h] - m_{\text{Forces de poussée}} (P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$$

$$\tan^2 \alpha \left(\frac{1}{3} * \gamma_b * H^3 - \frac{1}{3} * \gamma_w * (H^3 + H^2 * h) \right) + \tan \alpha \left(\gamma_b * a * H^2 - \frac{1}{3} \gamma_w * (2 * H^2 * a + 2 * H * h * a) \right) + \frac{1}{2} * a^2 * \gamma_b * H - \frac{1}{3} * \gamma_w * (a^2 * H + a^2 * h) - m_{\text{Forces de poussée}} (P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t) \geq 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{1}{3} * \gamma_b * H^3 - \frac{1}{3} * \gamma_w * (H^3 + H^2 * h) \\ k_2 = \gamma_b * a * H^2 - \frac{1}{3} \gamma_w * (2 * H^2 * a + 2 * H * h * a) \\ k_3 = \frac{1}{2} * a^2 * \gamma_b * H - \frac{1}{3} * \gamma_w * (a^2 * H + a^2 * h) - m_{\text{Forces de poussée}} (P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t) \\ X = \tan \alpha \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow k_1 X^2 + k_2 X + k_3 \geq 0$$

$$k_1 = 335,58$$

$$k_2 = 308,1$$

$$k_3 = -167,39$$

$$\Delta = k_2^2 - 4 * k_1 * k_3$$

$$\tan \alpha \geq \left(\frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4 * k_1 * k_3}}{2 * k_1} \right); \tan \alpha \geq \left(\frac{-308,1 + \sqrt{308,1^2 - 4 * 335,58 * (-167,39)}}{2 * 335,58} \right) = 0,38$$

$$\alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 - 4 * k_1 * k_3}}{2 * k_1} \right) = 20,8^\circ$$

Prenons $\alpha = 30^\circ$

Pour que la stabilité externe du déversoir soit vérifiée, nous retenons un angle d'inclinaison $\alpha = 45^\circ$

– Vérification de la stabilité interne

La vérification de la stabilité interne passe par la vérification de la règle du tiers central et de la stabilité à la rupture

➤ Règle du tiers central

$$\frac{-b}{6} \leq e \leq \frac{b}{6} \quad \text{Avec } e = (X_{\text{Gouv}} + X) - \frac{b}{6}$$

$$\frac{b}{6} = \frac{5,24}{6} = 0,87$$

$$X_{\text{Gouv}} = \frac{a^2 + H \cdot \tan \alpha \cdot \left(a + \frac{1}{3} H \cdot \tan \alpha\right)}{2 \cdot a + H \cdot \tan \alpha} = \frac{1^2 + 4,24 \cdot \tan 45^\circ \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 4,24 \cdot \tan 45^\circ\right)}{2 \cdot 1 + 4,24 \cdot \tan 45^\circ} = 1,8$$

$$X_{\text{Gouv}} = 1,8$$

$$X = Y_{\text{Gouv}} \tan \beta \quad \text{Avec } \beta = \tan^{-1} \left(\frac{P_{e \text{ amont}} + P_{e \text{ aval}} + P_t}{W - U} \right)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} \gamma_w \cdot H^2}{\gamma_b \cdot \frac{(2a + H \cdot \tan \alpha)}{2} \cdot H - \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H \cdot (a + H \cdot \tan \alpha)} \right)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_w \cdot H}{(\gamma_b \cdot (2a + H \cdot \tan \alpha) - \gamma_w \cdot (a + H \cdot \tan \alpha))} \right);$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{10 \cdot 4,24}{(25 \cdot (2 \cdot 1 + 4,24 \cdot \tan 45^\circ) - 10 \cdot (1 + 4,24 \cdot \tan 45^\circ))} \right)$$

$\tan \beta = 0,6$; prenons $\beta = 30^\circ$

$$Y_{\text{Gouv}} = \frac{\sum S_i X_{G_i}}{\sum S_i}$$

Soit S_1 la section rectangulaire et S_2 la section triangulaire.

✓ Calcul de la section rectangulaire S_1

$$S_1 = a \cdot H \quad Y_{G1} = \frac{H}{2} \quad S_1 Y_{G1} = \frac{a}{2} H^2$$

✓ Calcul de la section triangulaire S_2

$$S_2 = \frac{H^2 \tan \alpha}{2}; \quad Y_{G2} = \frac{1}{3} H; \quad S_2 Y_{G2} = \frac{H^3 \tan \alpha}{6}$$

$$Y_{\text{Gouv}} = \frac{\frac{a \cdot H^2 + \frac{H^3 \tan \alpha}{6}}{a \cdot H + \frac{H^2 \tan \alpha}{2}}}{\frac{a \cdot H + \frac{H^2 \tan \alpha}{3}}{(2a + H \cdot \tan \alpha)}} = \frac{1 \cdot 4,24 + \frac{4,24^2 \tan 45}{6}}{(2 \cdot 1 + 4,24 \cdot \tan 45)} = 1,64$$

$$e = (X_{\text{Gouv}} + X) - \frac{(a + H \cdot \tan \alpha)}{2} = (1,8 + 0,95) - \frac{(1 + 4,24 \cdot \tan 45)}{2}$$

$$e = 0,13$$

on a : $-0,87 < 0,13 < 0,87$, la stabilité interne du déversoir est vérifiée.

Vérification de la stabilité à la rupture

$$\delta_{\text{max}} \leq \delta_{\text{lim}} = 0,3f_{c28}$$

$$\delta_{\text{lim}} = 0,3f_{c28} = 6 \text{ Mpa}$$

$$\delta_{\text{max}} = \left(\frac{W-U}{b} \right) \left(1 + \frac{6e}{b} \right) = \left(\frac{330,72-131}{5,24} \right) \left(1 + \frac{6 \cdot 0,13}{5,24} \right)$$

$\delta_{\text{max}} = 1,2 \text{ Mpa} < 6 \text{ Mpa}$. Le déversoir est stable à la rupture.

Poids linéaire du déversoir

$$W = \gamma_b \cdot S = \gamma_b \cdot H \left(a + \frac{1}{2} H \cdot \tan \alpha \right) = 25 \cdot 4,24 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot 4,24 \cdot \tan 45 \right)$$

$$W = 330,72 \text{ KN/ml}$$

ANNEXE III.4 : BASSIN DE DISSIPATION

- Le bassin à ressaut

Enfoncement du bassin D :

y2/y1	yn/Heau	h/Heau	D
12,411	0,257	0,219	13

$$\text{Débit unitaire } q = m \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$q = 0,4 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 93^{3/2} ; \quad q = 1,19 \text{ m}^3/\text{s}$$

Coefficient de débit $m=0.4$

$$\text{La vitesse de l'eau au-dessus du seuil } V_o = \frac{q}{h}, \quad V_o = \frac{1,19}{0,76}$$

$$V_o = 1,55 \text{ m/s}$$

$$\text{la ligne d'eau } H_o = h_o + \frac{V_o^2}{2 \times g} ; \quad H_o = 0,76 + \frac{1,55^2}{2 \times 9,81}$$

$$H_o = 0,89 \text{ m}$$

Hauteur de l'eau au droit du déversoir H

la hauteur de chute $Z = H_o + H + D$; $Z = 0,89 + 3,5 + 1$; $Z=5,39m$

Détermination de y_1 tirant d'eau en régime torrentiel avant le ressaut

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

profondeur d'eau à l' entrée du bassin de dissipation Y1				
Débit à l'entrée du bassin q (m ³ /s)	g (m/s ²)	Hauteur de chute z	Y1	Y1 calculé
1,19	9,81	5,4	0,12	0,12

Par itération, $y_1 = 0,12 m$

La vitesse de l'eau à l'entrée du bassin

$$v_1 = \frac{q}{y_1} \Rightarrow v_1 = \frac{1,19}{0,12}$$

$$v_1 = 9,9 m/s$$

La forme du ressaut et ses caractéristiques dépendent directement du nombre de Froude :

$$F = \frac{v_1}{\sqrt{g * y_1}} \Rightarrow F = \frac{9,9}{\sqrt{9,81 * 0,12}}$$

$$F = 9,12$$

La hauteur d'eau à la sortie du bassin

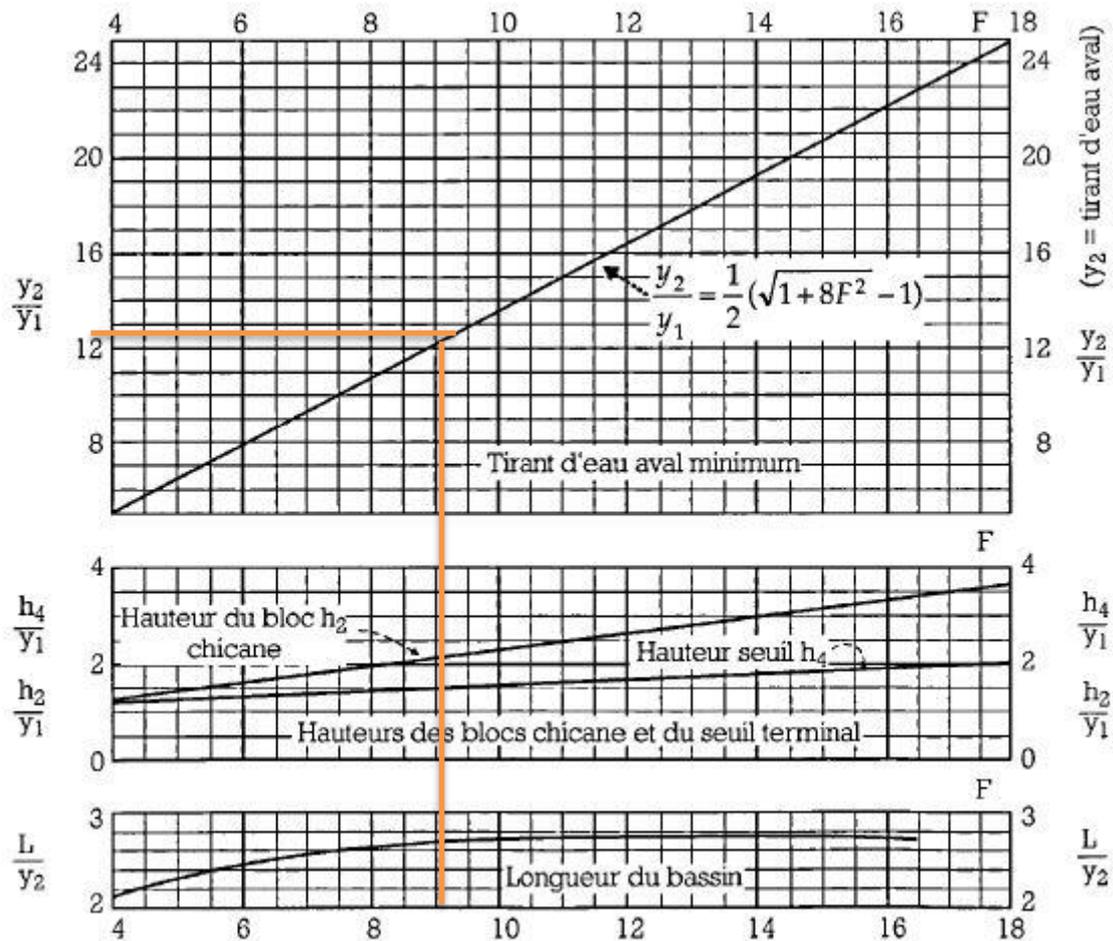
$$y_2 = y_1 * \left[\left(\sqrt{8 * Fr^2 + 1} \right) - 1 \right] / 2 \Rightarrow y_2 = 0,12 * \left[\left(\sqrt{8 * 9,12^2 + 1} \right) - 1 \right] / 2$$

$$y_2 = 1,5 m$$

$$y_n + D = 0,9 + 1 = 1,9m$$

$$y_n + D > y_2 .$$

Par lecture sur graphique, nous obtenons la longueur du bassin de dissipation, la hauteur des blocs chicanes h_2 et du seuil terminal h_4 .



Graphique 8: Détermination des caractéristiques du bassin de dissipation

h_4/y_1	=	1,5
h_2/y_1	=	2,1
L/y_2	=	2,7

- Le chenal d'écoulement

Détermination du tirant d'eau normal

$$K_s = 40$$

Pente I: $2^0/00$

Longueur déversoir : $L = 93 \text{ m}$

Après itération, nous obtenons $y_n = 0,9 \text{ m}$

Profondeur critique y_c

$$y_c = 0,47 * \left(\frac{Q}{L}\right)^{3/2} \Rightarrow y_c = 0,47 * \left(\frac{131}{93}\right)^{3/2}$$

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

ANNEXE III.5 : MUR BAJOYER

Stabilité du mur bajoyer

Efforts stabilisants

Poids de la semelle P_s	:	$P_s = \gamma_b * S = 25 * 0,5 * 3$	=	37,5	KN
Poids du voile P_v	:	$P_v = \gamma_b * S = 25 * 5,25 * (0,5 + 0,25) / 2$	=	49,22	KN
Poids du remblai	:	$P_R = 18 * 13,78$	=	248,06	KN
Charge variable	:	$Q = q * c = 10 * 3$	=	30	KN

Effort renversants (poussée des terres)

Poussée des terres

$$P_t = K_a * \gamma_R * H^2 / 2 = 0,33 * 18 * 5,25^2 / 2 = 81,86 \text{ KN}$$

Poids des surcharges

$$P_q = K_a * H * q = 0,33 * 5,25 * 10 = 17,32 \text{ KN}$$

Moments par rapport à O

$$\text{Bras de levier semelle : } d_s = \frac{b}{2} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Bras de levier voile : } d_v = \frac{e_2}{2} = 0,25 \text{ m}$$

$$\text{Bras de levier des terres : } d_t = e_2 + \frac{c}{2} = 1,75 \text{ m}$$

Moments stabilisants

Moment dû au mur

$$\text{Semelle : } P_s * d_s = 37,5 * 1,5$$

$$\text{Voile : } P_v * d_v = 49,22 * 0,25$$

$$\text{Terres : } P_R * d$$

$$\text{Surcharge : } P_q * d$$

Moment renversant

$$\text{Moment des terres} = \frac{P_t}{3}$$

$$\text{Moment de la surcharge} = \frac{P_q}{2}$$

$$\text{Poids de l'ouvrage} = P_v + P_s + P_R + Q$$

$$\text{Force de poussée : } P_t + P_q$$

$$\text{Stabilité au renversement } F_R = \frac{M_{S/A}}{M_{R/A}} = \frac{528,87}{242,76} = 2,18$$

Stabilité au glissement

$$F_G = \frac{F_v \cdot \tan \varphi}{F_h} = 2$$

Règle du tiers central

Calcul des moments par rapport à D

La règle du tiers central

$$-\frac{\text{longueur semelle}}{6} < e < \frac{\text{longueur semelle}}{6}$$

$$e = \frac{M/D}{N} = \frac{48,86}{362,28} = 0,13$$

La règle du tiers central est vérifiée

Contrainte max

$$\delta_{\max} = \left(\frac{W}{b}\right) \left(1 + \frac{6e}{b}\right) = 36,7 \text{ Kpa}$$

$$\delta_{\lim} = 0,3f_{c28} = 6 \text{ Mpa}$$

$\delta_{\max} < \delta_{\lim}$, le mur est stable à la rupture.

Stabilité au renversement $F_R = 2,18 > 1,5$; cela signifie que le bajoyer est stable au renversement

Stabilité au glissement $F_G = 2 > 1,2$; donc le mur est stable au glissement.

Le plan de ferrailage du mur est donné ci-dessous

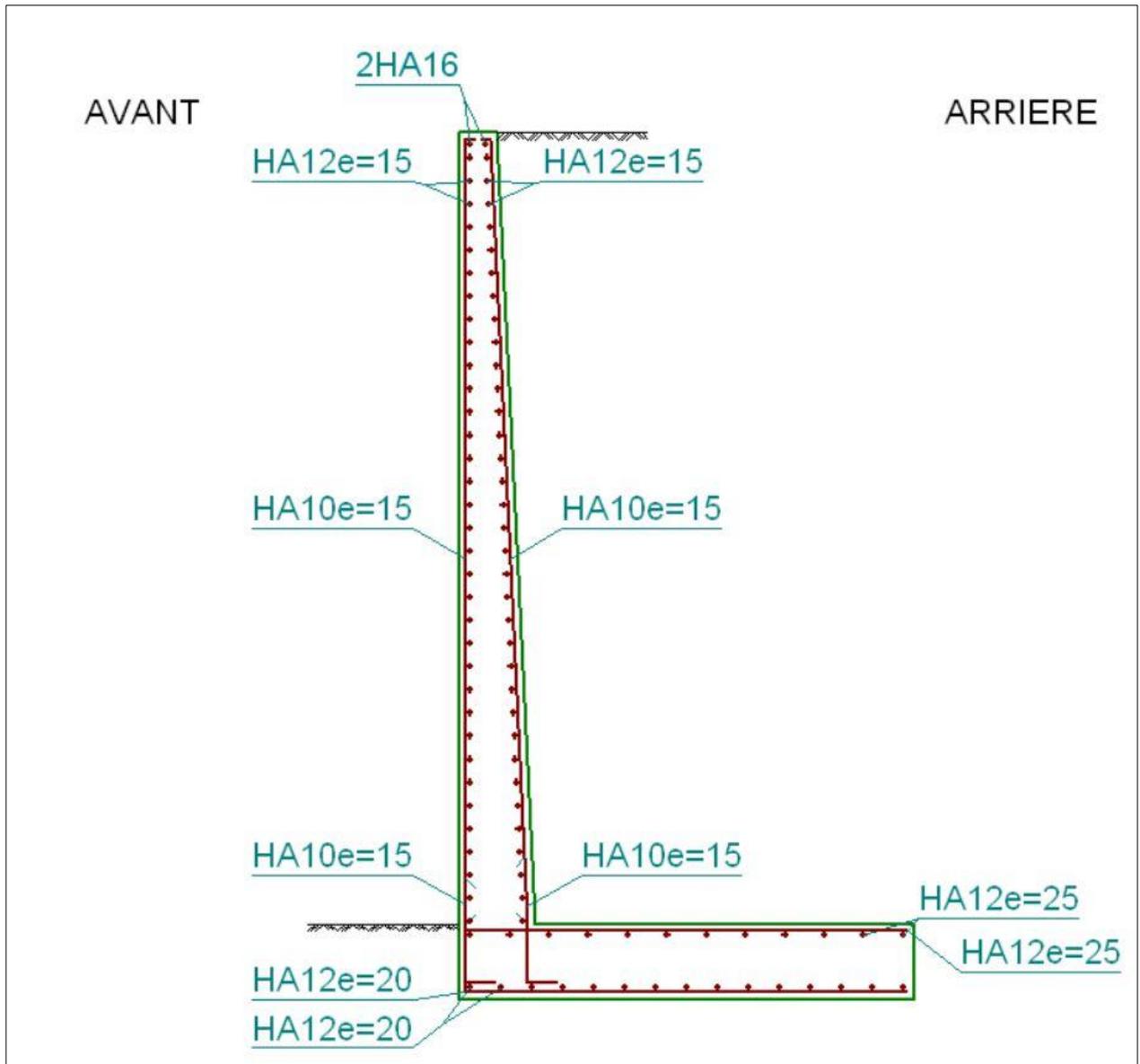


Figure 15: Plan de ferrailage du mur bajoyer

ANNEXE III.6 : OUVRAGE DE PRISE ET DE VIDANGE

$$Q = c * s \sqrt{(2 * g * \Delta H)} \Rightarrow Q = c * \frac{\pi * D^2}{4} \sqrt{(2 * g * \Delta H)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\sqrt{(2 * g * \Delta H)} * c * \pi}}$$

AN :

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,95 \text{ l/s/ha}}{\sqrt{(2 * 10 * 2,25)} * 0,8 * \pi}}$$

D= 475 mm, prenons D= 500 mm

Le temps de vidange

$$T = \frac{S}{s} * \sqrt{\frac{2}{g}} * \sqrt{h_0}$$

S : surface du plan d'eau

s : section de la conduite

h₀ : charge au-dessus de la prise

AN :

$$T = \frac{975000}{\frac{\pi * 0,5^2}{4}} * \sqrt{\frac{2}{10}} * \sqrt{2,25} = 38,5$$

T= 39 jours.

ANNEXE IV : NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

La législation en vigueur exige qu'une étude d'impact sur l'environnement soit entreprise afin d'apprécier l'incidence de la réalisation de certains ouvrages tels qu'un barrage, un aménagement de bas-fond sur l'environnement physique, social et économique dans la zone d'influence du projet. Aussi, la présente notice d'impact sur l'environnement s'inscrit dans ce cadre et complète un ensemble d'études de base.

Le projet de réhabilitation du barrage de Goinré se réalisera à travers la réfection de la digue du barrage, la mise en place d'un déversoir poids latéral et le reboisement autour de la cuvette. Les travaux pourront durer plusieurs mois en saison sèche et de gros engins de chantier seront utilisés notamment des compacteurs et des niveleuses.

La conduite de la notice d'impact environnementale du projet de réhabilitation du barrage de Goinré a permis suite à l'analyse de l'interaction projet environnement, de déceler des impacts positives et négatives sur le projet et les composantes en présence dans la zone de projet. Des mesures compensatrices et correctrices ont été formulées pour atténuer les conséquences négatives.

ANNEXE IV.1 : IDENTIFICATION DES IMPACTS

Nous ferons l'identification des impacts par la matrice de Léopold

Tableau 26: Matrice de Léopold

Phase	Construction de la retenue			Exploitation de la retenue		
	Effets négatifs	Effets positifs	Effets nul	Effets négatifs	Effets positifs	Effets nul
Activités sources d'impact						
Décapage de la digue	*				*	
Destruction des arbustes	*			*		
Reboisement autour de la cuvette		*			*	
Réalisation du déversoir	*				*	
Réfection de la digue	*				*	

ANNEXE IV.2 : EVALUATION DES IMPACTS

L'impact est l'effet immédiat, à moyen ou à long terme que l'aménagement, lorsqu'il est prévu, qu'il soit bénéfique ou néfaste, provoque sur son environnement d'accueil, sa périphérie immédiate ou éloignée. Pour évaluer les différents impacts auxquels seront soumis le projet de réhabilitation du barrage de Goinré, nous utiliserons la matrice de Fecteau.

Tableau 27: Matrice de Fecteau

Impacts		Origines	Importance	Intensité	Portée	Durée
Impacts négatifs	Dégradation des sols	Le passage des engins rendra le sol purulent et la présence de crevasses augmente l'érosion hydrique	Modérée	Moyenne	Goinré	Moyen terme
	Risque de transmission des IST et du VIH/SIDA	Partenaires multiples Rapports sexuels occasionnels non protégés Objets tranchants souillés	Modérée	Moyenne	Goinré	Moyen terme
	Dégradation de la qualité de l'air	Emission de poussière lors des travaux	Modérée	Moyenne	Goinré	Moyen terme
	Nuisances sonores liées aux vibrations et accidents de chantier	Fonctionnement des machines	Modérée	Moyenne	Goinré	Moyen terme
	encombrement du site	Présence des engins	Modérée	Moyenne	Goinré	Moyen terme
	Impact positif	Amélioration des écoulements	Présence du déversoir	Majeure	Forte	Goinré

positifs	Création d'emplois et de revenus	La création de nouveaux emplois sur le chantier et l'accroissement des activités marchandes avec la présence du personnel de l'entreprise	Majeure	Fort	Ouahigouya	Moyen terme
	Renforcement de l'élevage	En mettant en état les pistes d'accès à l'eau pour les animaux	Modérée	Moyenne	Ouahigouya et environs	Long terme
	Réduction de l'effet de l'ensablement/envasement	Le reboisement des berges ralentit l'ensablement	Majeure	Forte	Barrage de Goinré	Long terme

Annexe IV.3 : Proposition de PGES

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

Les mesures d'atténuation et de compensation sont des mesures et des dispositions prévues pour empêcher, prévenir, minimiser et compenser les impacts négatifs du projet. Ils peuvent se regrouper comme suit :

Tableau 28: Plan de Gestion Environnementale et Sociale

Impacts négatifs	Mesure d'atténuation	Responsables de la mise en œuvre des mesures	Période
Dégradation des sols	Restauration des sols après travaux	Entreprise	Pendant les travaux
Risque de transmission des IST et du VIH/SIDA	La sensibilisation sur le mode de transmission des maladies hydriques, les IST et le SIDA devra être effective sur le terrain.	DREA-N ; Mairie	
Nuisances sonores liées aux vibrations et accidents de chantier	utiliser les machines ayant des vibrations uniquement dans la journée	Entreprise	
encombrement du site	Créer une base vie où stocker le matériel et signaler la présence de travaux sur le site	Entreprise	
Dégradation de la qualité de l'air	Humidifier progressivement les zones concernées par les travaux	Entreprise	

ANNEXE V : DEVIS ESTIMATIF

Tableau 29: Devis estimatif

N°	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
I	Amenée et repli du matériel				
1	Amenée et repli du matériel	FF	1	10 000 000	10 000 000
2	Installation du chantier, plans d'exécution et de recollement	FF	1	5 000 000	5 000 000
sous total I					15 000 000
II	Digue				
1	Nettoyage, débroussaillage	FF			250 000
2	Déblai pour drain aval et butée amont	m3	618	5 000	3 088 875
3	mur parapet sur la crête amont		182,675	15 000	2 740 125
4	Couche de pose sur talus amont et aval	m3	1680,61	5 000	8 403 050
5	Perré maçonné sur talus amont	m2	1260,4575	15 000	18 906 863
6	Maçonnerie de moellons pour muret de crête amont	m3	182,675	15 000	2 740 125
7	couronnement crête	m3	511,49	5 000	2 557 450
8	Tuyau pvc D50 pour barbacanes pour muret parapet	ml	165,3	2 000	330 600
9	Passerelle d'accès à la prise	FF		20 000	20 000
Sous total II					39 037 088
III	Déversoir et ouvrage annexes				
1	Mise en place du déversoir, du mur bajoyer, du bassin de dissipation	ml	93	5 338 055	496 439 115
Sous total III					496 439 115
IV	Diguettes de protection				

1	Décapage de l'emprise de la diguette	m ³	270	5 000	1 350 000
2	Remblai pour corps de diguette	m ³	202,5	5 000	1 012 500
3	Couronnement de la crête	m ³	18	5 000	90 000
4	Couche de pose sur talus amont et aval	m ³	36	5 000	180 000
5	Perré maçonné de protection pour talus amont et aval (ép. 25 cm)	m ²	180	15 000	2 700 000
6	Déblai à la main pour butée et drain de pied	m ³	45	5 000	225 000
Sous total III					5 557 500
V	Cuvette				
1	Reboisement autour de la cuvette	Km	20	100 000	2 000 000
2	Matérialisation visuelle de la bande de protection (haie vive)	Km	20	250 000	5 000 000
Sous total IV					7 000 000
VI	Appui aux activités pastorales				
1	Réaménagement des pistes d'accès pour bétail	Km	5	450 000	2 250 000
Sous total V					2 250 000
TOTAL					565 283 703
TVA (18%)					101 751 066
TOTAL TTC					667 034 769

Le coût total du projet est de six cent soixante-sept millions trente-quatre mille sept cent soixante-neuf (667 034 769) F CFA.

ANNEXE VI : PLANS

ANNEXE VI.1 : PROFIL EN TRAVERS TYPE DE LA DIGUE

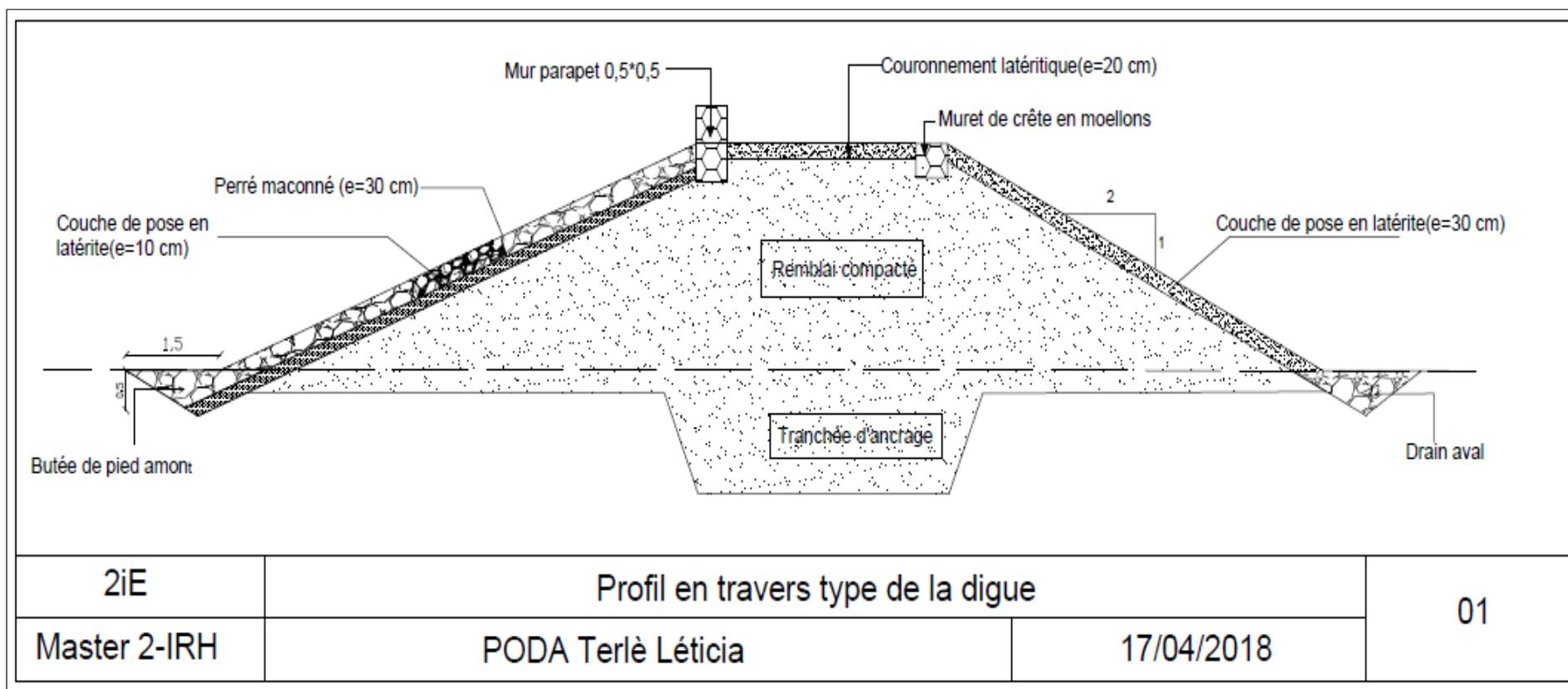


Figure 16: Profil en travers de la digue

ANNEXE VI.2 : TYPE D'ÉCOULEMENT DANS LA DIGUE

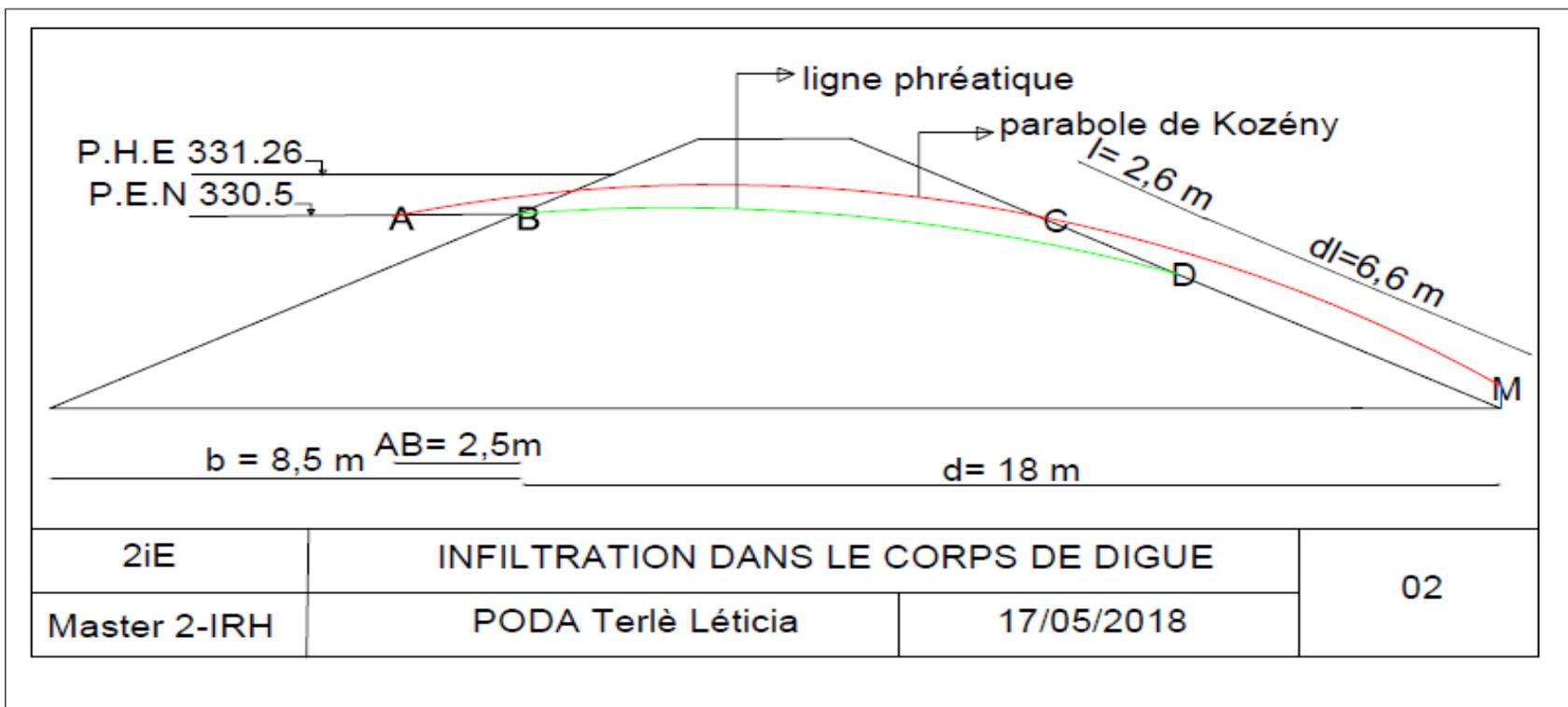


Figure 17: Ecoulement dans la digue

ANNEXE VI.3 : BASSIN DE DISSIPATION

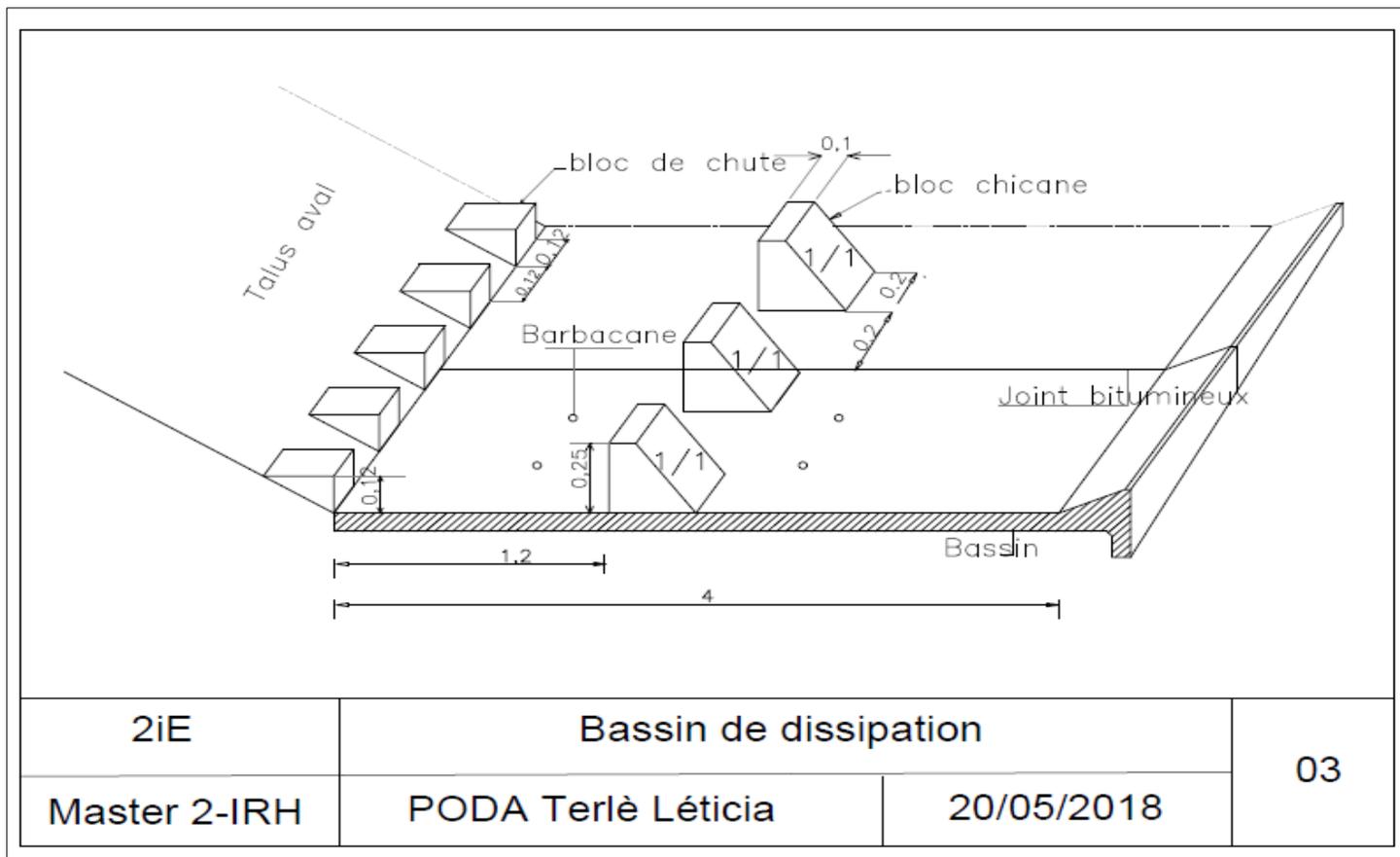


Figure 18: Bassin de dissipation

ANNEXE VI.4 : PROFIL EN TRAVERS DE L'EVACUATEUR DE CRUE

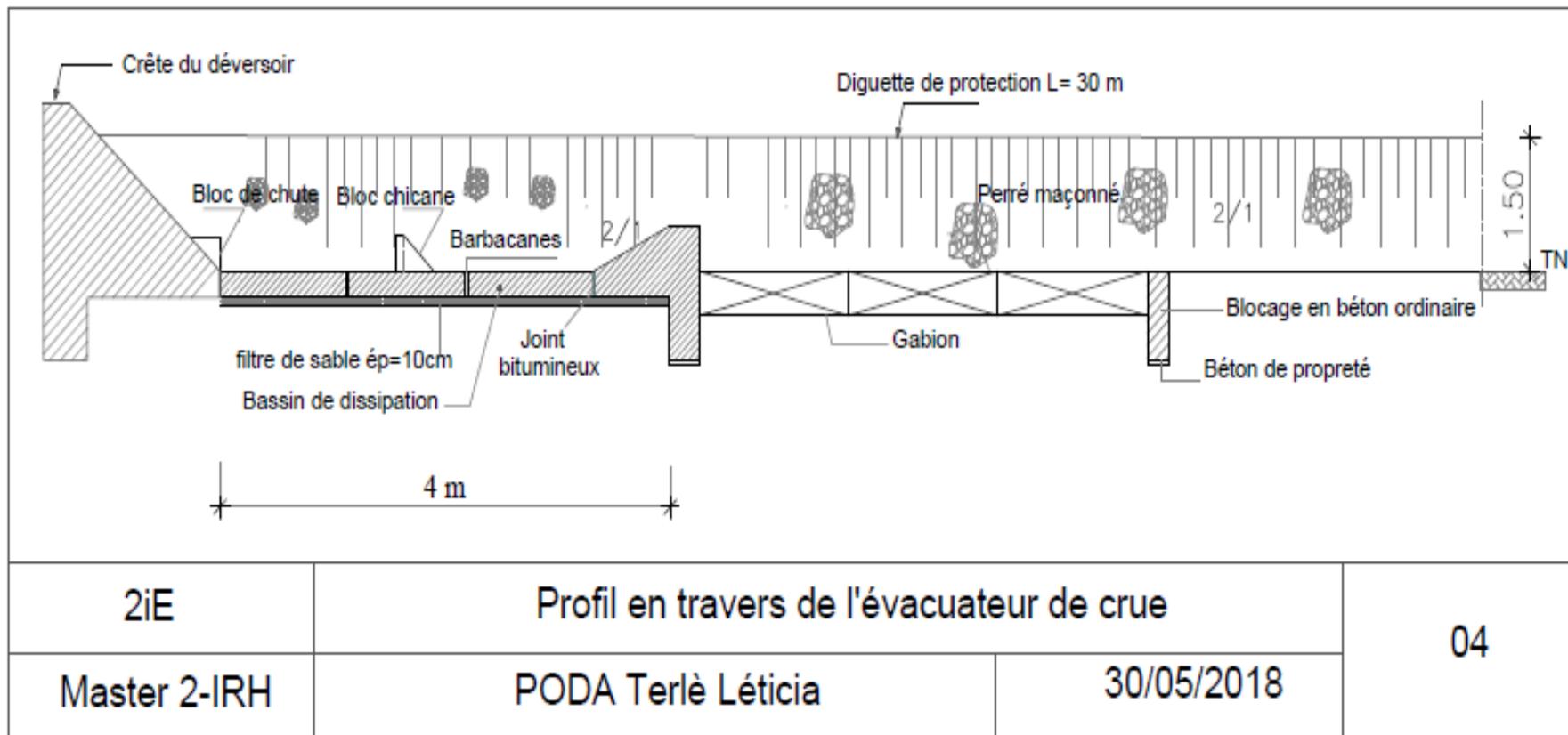


Figure 19: Profil en travers de l'évacuateur de crue