



ETUDES TECHNIQUES DETAILLEES DU BARRAGE DE TOMBOLO, DANS LA PROVINCE DU NAHOURI, AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU

MASTER D'INGENIEURIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : « Infrastructures et Réseaux Hydrauliques_ Eaux Agricoles »

Présenté et soutenu publiquement le 29 septembre 2018 par :

Brice Marchal TRAORE

Travaux dirigés par :

M. Moussa LO, Enseignant à 2iE

Département Génie civil et
Hydraulique

Mme Nadine YAOLIRE,
Ingénieur du Génie Rural à la DGIH

Jury d'évaluation du Stage :

Président : Dr Babacar LEYE

Membres : Mr. Moussa Diagne FAYE

Mr. Césaire HEMA

Mr. Moussa LO

DEDICACE



A TOUTE MA FAMILLE

REMERCIEMENTS

J'aimerais présenter ma profonde gratitude aux personnes physiques ou morales qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document.

Mes remerciements vont tout d'abord au Directeur Général de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) Monsieur Patrice O. GUISSOU pour m'avoir accueilli dans sa structure pour mon stage.

Je remercie mon directeur de mémoire, Monsieur Moussa LO pour son encadrement, pour sa disponibilité et son accompagnement durant tout le stage.

J'adresse mes remerciements également à Madame YAOLIRE S. Nadine, mon maître de stage pour son encadrement et son suivi régulier tout au long de mon stage.

Je remercie également Monsieur Aley SAOUTO, Hydrologue à la DGIH pour ses précieux conseils.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Arsène DAMIBA pour ses aides au quotidien.

Je remercie tout le corps professoral de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) pour la qualité de la formation qui nous a été dispensée durant tout notre cursus ainsi que tout le personnel de la DGIH.

Je remercie tous mes amis et proches pour leur aide.

RESUME

Le présent mémoire traite des études techniques détaillées d'un barrage à vocation hydro-agricole au bénéfice de 31 entités dont 25 villages et 6 secteurs de la commune de Pô, dans la province du Nahouri au Burkina Faso. Le projet a été initié dans un contexte d'absence totale de barrage dans la commune en question, d'où la nécessité de remédier à cette situation dans le cadre du Plan National de Développement Economique et Social (PNDES) du Burkina.

La digue est un remblai homogène argileux, de 795 m de long pour 8,2 m de hauteur (côte de la crête : 264,2) avec une pente identique pour les talus amont et aval de 1V/2,5H. La cuvette se situe à l'exutoire d'un bassin versant de 26,88 km². Le déversoir en béton, long de 80 m, est central et conçu pour évacuer une crue centennale de 80,3 m³/s. Deux murs bajoyers de 8,2 m de hauteur servent de jonction entre le déversoir et la digue. Un ouvrage de prise (servant de vidange), calé à la côte 259 m permet l'irrigation d'un futur périmètre en aval.

L'ouvrage proposé permet de stocker 1 488 653 m³ au PEN. Au-delà de la satisfaction des besoins humains de 72 280 personnes (15l/jour/hab) et pastoraux (cheptel de 763 bovins et 1380 petits bétails pour une consommation respective de 40 et 5 l/jour/hab) à l'horizon de 30 ans ; la simulation de la retenue d'eau permet d'envisager une superficie irrigable de 46 ha pour la riziculture en saison pluvieuse et 43 ha pour le maraichage (l'oignon, la tomate et le haricot vert) en saison sèche.

Le coût de l'ouvrage est évalué à 866 407 329 FCFA soit 990 180 FCFA le mètre linéaire.

Mots clés :

- 1- Barrage
- 2- Remblai argileux
- 3- Déversoir
- 4- Hydro-agricole
- 5- Tombolo

ABSTRACT

The present report trémats results of a detailed technical study of a dam with hydro-agricultural vocation for the benefit of 31 entities including 25 villages and 6 sector of the commune of Pô in the province of Nahouri in Burkina Faso. The project is proposed in a context of total absence of dam in the whole commune, from where need for rectifying it this situation within the framework of the National Plan of Economic and Social Development (PNDES) of Burkina.

The dam is with homogeneous fill with strong percentage, 795 m length for 8,2 m height (finished level of Crete : 264,2) with an identical slope for the slopes downstream and upstream of 1V/2,5H. The basin is located at the discharge system of a catchment area of 26,88 km². The outfall in concrete, length of 80m is central out of concrete and conceived to evacuate a centennial rising of 80,3 m³ / S. Two walls chamber walls of 8,2m height are used as junction between the outfall and the dam. A work of catch (being used as draining), fixed the dimension 259m allow the irrigation of a future perimeter downstream.

The work suggestif make it possible to store 1 488 653 m³ with the PEN Beyond the human need satisfaction of 72 280 people (15l/jour/hab) and pastoral (live stock of 763 large and 1380 smaller live-stocks for a respective consumption of 40 and 5 l/jour/hab) at the 30 years horizon ; the simulation of the water reserve makes it possible to consider an irrigable surface of 46 ha for rice growing in rainy season and 43 ha for the maraichage (onion, tomato and bean) in season in dry season

The cost of the work is evaluated to 866 407 329 FCFA is 990 180 FCFA the linear meter.

Key words :

- 1- Dam
- 2- Clayey bank
- 3- Spillway
- 4- Hydroagricultural
- 5- Tombolo

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
EIES	Eude d'Impact Environnemental et Social
ETO	Evapotranspiration de Reference
ETM	Evapotranspiration Maximale
Pe	Pluie Efficace
CIEH	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
DGIH	Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques
DREA	Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement
DREEV	Direction Régionale de l'Environnement et de l'Economie Verte
DRS	Direction Régionale de la Santé
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GPS	Global Positioning System
Kc	Coefficient cultural
Ke	Coefficient d'écoulement
ha	Hectare
IGB	Institut Géographique du Burkina
INSD	Institut National de la Statistique et de la Démographie
IRD	Institut de Recherche et de Développement (Ex Orstom)
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
UBT	Unité de Bétail Tropical
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RD	Rive Droite
RG	Rive Gauche
TN	Terrain Naturel
PEN	Plan d'Eau Normal
PGES	Plan de Gestion Environnemental et Social
PNDES	Plan National de Développement Economique et Social
PHE	Plus Hautes Eaux

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	<i>i</i>
REMERCIEMENTS	<i>ii</i>
RESUME	<i>iii</i>
ABSTRACT	<i>iv</i>
LISTE DES ABRÉVIATIONS	<i>v</i>
TABLE DES MATIERES	<i>vi</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>x</i>
LISTE DES FIGURES	<i>xii</i>
I. INTRODUCTION	<i>1</i>
II. OBJECTIF DU PROJET	<i>2</i>
II.1 Objectif général	<i>2</i>
II.2 Objectifs spécifiques	<i>2</i>
II.3 Présentation de la structure d'accueil	<i>2</i>
III. GENERALITE SUR LE PROJET	<i>3</i>
III.1 Localisation et accessibilité	<i>3</i>
III.2 Climat	<i>4</i>
III.3 Sols	<i>4</i>
III.4 Végétation	<i>5</i>
III.5 Faune	<i>5</i>
III.6 Hydrographie	<i>5</i>
III.7 Les ressources en eau dans le village récepteur	<i>5</i>
III.8 Population bénéficiaire	<i>6</i>
IV. MATERIELS ET METHODES	<i>7</i>
IV.1 Matériels	<i>7</i>
IV.2 Méthodes	<i>7</i>

IV.2.1	Etudes hydrologiques	7
IV.2.1.1	Caractéristiques du bassin versant.....	7
IV.2.1.2	Analyse fréquentielle des pluies.....	9
IV.2.1.3	Débit de projet.....	9
IV.2.1.4	Etude des apports	12
IV.2.2	Etude de la Retenue.....	13
IV.2.2.1	Caractérisation de la cuvette.....	13
IV.2.2.2	Estimation des besoins et des pertes en eaux	13
IV.2.2.3	Bilan global et simulation de la retenue	16
IV.2.3	Etude de la digue et de ses ouvrages annexes	16
IV.2.3.1	La Digue.....	16
IV.2.3.2	Les Ouvrages Annexes.....	21
V.	<i>SYNTHESE DES ETUDES DE BASE</i>	26
V.1	Etudes Socio-Economiques.....	26
V.1.1	La Population	26
V.1.2	L’Agriculture.....	26
V.1.3	L’Elevage	26
V.1.4	Les Attentes des populations par rapport au projet	27
V.2	Études géotechniques	27
V.2.1	Phase terrain	27
V.2.2	Analyses physico-mécaniques au laboratoire	28
V.2.3	Zones d’emprunt identifiées.....	28
V.3	Etudes pédologiques.....	28
V.4	Etudes d’impacts environnementaux	29
V.4.1	Détermination de la zone d’influence du projet	29
V.4.2	Occupation actuelle du site	30
V.4.3	Impacts du projet sur les différents domaines	30
V.4.4	Méthode d’évaluation de la force d’un impact.....	30
V.5	Etudes Topographiques	31
VI.	<i>RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	33
VI.1	Etudes Hydrologiques	33

VI.1.1	Caractéristiques du bassin versant.....	33
VI.1.2	Analyse des données pluviométriques	35
VI.1.3	Crue de projet	37
VI.1.4	Hydrogramme des crues du projet	37
VI.1.5	Crue de rupture.....	38
VI.1.6	Etude des apports	38
VI.2	Etude de la cuvette	38
VI.2.1	Courbe hauteur-Volume/Hauteur-surface	38
VI.2.2	Caractéristiques de la cuvette au PEN et au PEH	39
VI.2.3	Revanche libre.....	40
VI.2.4	Lame d'eau déversant maximale	40
VI.2.5	Estimation des Besoins.....	41
VI.2.5.1	Humains et Pastoraux.....	41
VI.2.5.2	Agricole	41
VI.2.6	Estimation des Pertes	42
VI.2.6.1	Par infiltration	42
VI.2.6.2	Par dépôt solide	42
VI.2.6.3	Par évaporation.....	42
VI.2.7	Bilan Global et Simulation de la Retenue	43
VI.3	Etude de la Digue et de ses Ouvrages Annexes.....	45
VI.3.1	La Digue	45
VI.3.1.1	Protection des talus et de la crête	46
VI.3.1.2	Stabilité des talus de la Digue	47
VI.3.1.3	Tranchée d'encrage	49
VI.3.2	Les Ouvrages Annexes	50
VI.3.2.1	Le Déversoir	50
VI.3.2.2	Stabilité du déversoir.....	50
VI.3.2.3	Bassin de dissipation et chenal d'évacuation	51
VI.3.2.4	Murs Bajoyers	52
VI.3.2.5	Stabilité des murs Bajoyers	52
VI.3.2.6	Le tapis amont étanche	53
VI.3.2.7	Diguettes de protection.....	54
VI.3.2.8	Ouvrage de Prise et de vidange	54

VII. CONCLUSIONS.....	56
VIII. RECOMMANDATION-PERSPECTIVES	57
IX. BIBLIOGRAPHIE	59
X. Annexes.....	60
Annexe I : Etude d’Impact Environnemental et Social	60
Annexe II : Données météorologiques	65
Annexe III. Etudes Hydrologiques	70
Annexe IV : Données de tracées des courbes caractéristiques.....	75
Annexe V : Dimensionnement digue et Ouvrages Annexes.....	76
Annexe VI : Calcul de cubatures	87
Annexe VII : Devis quantitatif et estimatif des travaux	89
Annexe VIII : Plan de masse de la cuvette.....	92
Annexe IX : Profil en long de l’axe de la digue	93
Annexe X : Géométrie de la digue munie de la parabole de Kozeny.....	94
Annexe XI : Coupe en travers type de la digue	95
Annexe XII : Coupe en travers type de l’évacuateur de crue	96
Annexe XIII : Vue en plan de l’évacuateur de crue.....	97
.....	97
Annexe XIV : Vue en plan et coupe en travers de l’ouvrage de prise/vidange	98
Annexe XV : Plan de ferrailage des murs bajoyers	99

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Types de barrages en terre, (Source : LO, 2016), cours de barrage, page 161 ...</i>	17
<i>Tableau 2 : Cheptel moyen des ménages enquêtés</i>	27
<i>Tableau 3 : Zone d'emprunts des différents matériaux.....</i>	28
<i>Tableau 4 : Récapitulatif des corrélations des impacts</i>	31
<i>Tableau 5 : Période de retour de crue en fonction de la hauteur et de la capacité du barrage</i>	33
<i>Tableau 6 : Caractéristiques du bassin versant</i>	35
<i>Tableau 7 : Quantiles pluviométriques</i>	36
<i>Tableau 8 : Apports calculés par la méthode de Rodier</i>	38
<i>Tableau 9 : Apports calculés par la méthode de Turc</i>	38
<i>Tableau 11 : Simulation de la retenue d'eau</i>	43
<i>Tableau 12 : Caractéristiques de la digue</i>	45
<i>Tableau 13 : Protection des talus et de la crête du barrage</i>	46
<i>Tableau 14 : Coefficients de BISHOP et de FELLENIUS</i>	48
<i>Tableau 15 : Caractéristiques du déversoir.....</i>	50
<i>Tableau 16 : Vérification de la stabilité du déversoir</i>	50
<i>Tableau 17 : Caractéristiques du Bassin de dissipation et du chenal d'évacuation.....</i>	51
<i>Tableau 18 : Caractéristiques géométriques des murs Bajoyers.....</i>	52
<i>Tableau 19 : Vérification de la stabilité des murs Bajoyers</i>	52
<i>Tableau 20 : Caractéristiques du tapis amont</i>	54
<i>Tableau 21 : Caractéristiques des diguettes de protection.....</i>	54
<i>Tableau 22 : Caractéristiques de l'Ouvrage de prise et de vidange</i>	55
<i>Tableau 23 : Localisation de l'entité impactée par le projet.....</i>	60
<i>Tableau 24 : Synthèse des impacts du projet sur l'environnement.....</i>	61
<i>Tableau 25 : Plan de Gestion Environnemental et Social</i>	62
<i>Tableau 26 : Evaluation du coût du PGES</i>	63
<i>Tableau 27 : Données pluviométriques mensuelles (mm) de la station de Pô de 1942 à 2016.</i>	65
<i>Tableau 28 : Pluviométriques Maximales Journalière de la station de Pô de 1942-2016.....</i>	67
<i>Tableau 29: Caractéristiques du bassin versant de Tombolo.....</i>	70
<i>Tableau 30: Caractéristiques Hydrologiques du bassin versant de Tombolo.....</i>	71
<i>Tableau 31 : Calcul selon la méthode de Rodier</i>	73

<i>Tableau 32 : Calcul selon la méthode de Turc</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 33 ; Estimation des Infiltrations dans la digue</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 34 : Estimation de l'épaisseur du drain</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 35 : Etude de stabilité du déversoir</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 36 : Dimensionnement du Bassin de dissipation et du chenal d'évacuation</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 37 : Etude de Stabilité des Murs Bajoyers</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 38: Dimensionnement des ouvrages de prise et de vidange.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 39 : cubatures pour la tranchée d'encrage.....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 40 : Cubatures pour la digue</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 41 : Devis estimatif et quantitatif des travaux</i>	<i>89</i>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Situation géographique du Burkina Faso</i>	<i>3</i>
<i>Figure 2 : Situation de la zone de projet</i>	<i>4</i>
<i>Figure 3 : Glissement du talus</i>	<i>19</i>
<i>Figure 4 : Forces agissantes sur le déversoir</i>	<i>22</i>
<i>Figure 5 : model de calcul</i>	<i>25</i>
<i>Figure 6: Bassin versant de Tombolo (source : Global Mapper v 16)</i>	<i>34</i>
<i>Figure 7 : Courbe Hypsométrique du Barrage de Tombolo</i>	<i>34</i>
<i>Figure 8: Analyse statistique des données pluviométriques annuelles de Po</i>	<i>35</i>
<i>Figure 9 : Analyse statistique des données pluviométriques journalières de Po</i>	<i>36</i>
<i>Figure 10 : Courbe Hauteur-Surface</i>	<i>39</i>
<i>Figure 11: Courbe Hauteur-Volume</i>	<i>39</i>
<i>Figure 12 : Cercles de glissement des talus pour la retenue vide</i>	<i>48</i>
<i>Figure 13 : Seuil de décantation en gabions</i>	<i>57</i>
<i>Figure 14 : Enfoncement du bassin de dissipation en fonction du tirant d'eau avant et de la hauteur de la langue d'eau au-dessus du seuil</i>	<i>84</i>

FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE DE TOMBOLO

I. LOCALISATION		
Village	TOMBOLO	
Province	NAHOURI	
Région	CENTRE SUD	
Coordonnées géographiques	Latitude : 11°6'15.00" Nord Longitude : 1°7'59.10" Ouest. Altitude : 256 m	
Désignation	Unité	Caractéristiques
II. BASSIN VERSANT		
Superficie	km ²	26,884
Périmètre	km	33,588
Débit de projet	m ³ /s	80,3
Apports en année moyenne	m ³	1 493 419,4
III. CUVETTE		
Côte PHE	m	264,2
Côte PEN	m	262,5
Volume d'eau au PHE	m ³	2 213 997
Volume d'eau au PEN	m ³	1 488 653
Superficie de la retenue au PHE	m ²	829 000
Superficie de la retenue au PEN	m ²	620 000
IV. DIGUE		
Type	-	Homogène en argile
Côte de calage	m	264,2
Hauteur maximale par rapport au lit mineur	m	8,2
Largeur en crête	m	4
Longueur (déversoir + digue)	m	875
Pente du talus amont = Pente du talus aval	-	1V/2,5H
V. EVACUATEUR DE CRUE		
Nombre	-	01
Position	-	Centrale
Cote de calage	m	262,5
Hauteur maximale	m	6,5
Type	-	Déversoir poids trapézoïdale
Longueur totale	m	80
Largeur en crête	m	1
Type bassin de dissipation	-	Simple Bétonnage
Longueur bassin de dissipation	m	80
Largeur bassin de dissipation	m	3,4
VI. OUVRAGE DE PRISE		
Position	-	Rive gauche
Type de commande	-	Vanne aval
Nature de la conduite	-	Canal en fonte
Diamètre d la conduite	mm	Ø 300
VII. COUT DES TRAVAUX		
	FCFA	866 407 329 TTC

I. INTRODUCTION

La mobilisation des ressources en eau est d'une importance capitale pour le développement socio-économique d'un pays sahélien comme le Burkina Faso. La rareté de l'eau est aggravée par une pluviométrie mal répartie dans le temps et dans l'espace entraînant la raréfaction des ressources en eau. Cette situation constitue un frein pour l'essor des activités agropastorales et pour l'amélioration des conditions de vie des populations rurales qui constituent 84,1% de la population active.

Les points d'eau naturels (mares, lacs, cours d'eau permanents) et les ouvrages de captage que sont les puits et les forages, sont loin de pouvoir couvrir les besoins en eau de plus en plus importants et divers dû à une démographie galopante.

Face à ces limites, l'on tente de trouver une solution en créant des retenues d'eau permettant de stocker des volumes importants durant la saison pluvieuse et utilisables au cours de la longue période sèche.

C'est dans cette dynamique que le Gouvernement a initié la construction d'ouvrages de stockages de grand volume d'eau (barrages) et Tombolo fait partie de ces villages bénéficiaires; situé dans la commune de Pô, province du Nahouri.

C'est ainsi que dans le cadre du mémoire de fin de cycle, nous avons eu l'occasion de travailler sur le barrage de Tombolo dont le thème est : « **Etudes Techniques Détaillées du Barrage de Tombolo dans la province du Nahouri au Burkina Faso** ».

Ce document fait donc ressortir les différentes phases de l'étude du thème comme suit :

- **Phase de terrain** : l'identification d'un site potentiel et la collecte des données pour l'élaboration des études de base (études topographiques, socio-économiques, pédologiques, géotechniques et d'impact environnementaux) ;
- **Phase de travail au bureau** : le traitement des données, le dimensionnement de l'ouvrage et ses ouvrages annexes ; et l'estimation du coût global du projet.

Les missions qui nous ont été assignées ont été faites sous les directives de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH) qui est sous tutelle du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement.

II. OBJECTIF DU PROJET

II.1 Objectif général

L'objectif général est la résorption des déficits pluviométriques pour sécuriser les productions en disposant de l'eau pour les activités agrosylvopastorales, la pisciculture et les cultures de contre-saison afin de réduire la pauvreté et améliorer les conditions de vie des populations dans la zone de projet.

II.2 Objectifs spécifiques

- L'analyser et l'exploitation des études de bases ;
- La conception et le dimensionnement de la digue et des ouvrages annexes ;
- L'estimation du coût global du projet ;
- L'élaboration de la notice d'impact environnemental et social ;
- La vérification de la motivation et l'engouement de la population de chaque village ou entités, concerné à assurer l'entretien et le suivi d'exploitation du barrage.
- Vérifier la motivation et l'engouement de la population de chaque village ou groupe de villages, concerné à assurer l'entretien et le suivi d'exploitation du barrage.

II.3 Présentation de la structure d'accueil

Nous avons effectué notre stage au sein de la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (DGIH). La DGIH est un département du ministère de l'eau et de l'assainissement du Burkina Faso. Elle est chargée de Piloter les projets d'études, de construction et de réhabilitation des Barrages.

III. GENERALITE SUR LE PROJET

III.1 Localisation et accessibilité

Le présent projet sera réalisé au Burkina Faso, pays situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest dont la Capitale est Ouagadougou.

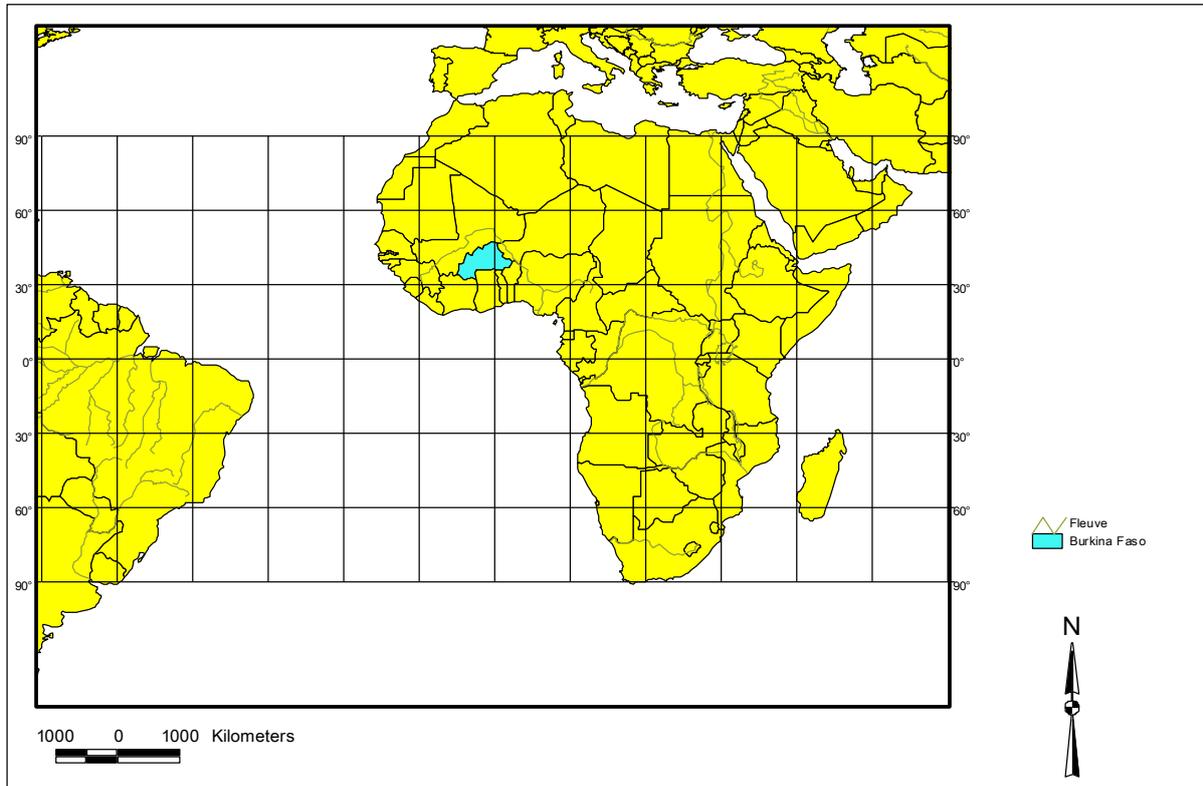


Figure 1 : Situation géographique du Burkina Faso

Le bénéficiaire du projet est le village de Tombolo qui se situe dans la commune de Pô, province du Nahouri. Il est limité à l'Est par le village de Songo 1, à l'ouest par le village de Adongo, au nord par le secteur n°3 de Pô et au sud par le village de Dakola. Pour accéder au site, on emprunte l'itinéraire suivant :

A partir de Ouagadougou, on emprunte la Route Nationale n°5 / RN5 (axe Ouagadougou-frontière du Ghana) sur laquelle on parcourt une distance de 145 km avant d'atteindre Pô. De là, on parcourt une distance de 6 km avant d'atteindre le site du projet. La distance totale parcourue à partir de Ouagadougou est alors de 151 km. La voie est de bonne praticabilité en toute saison (voie bitumée).

Les coordonnées géographiques du site (exutoire) prises au GPS sont les suivantes :

Latitude = 11°6'15.00" Nord; Longitude = 1°7'59.10" Ouest et Altitude 256 m.

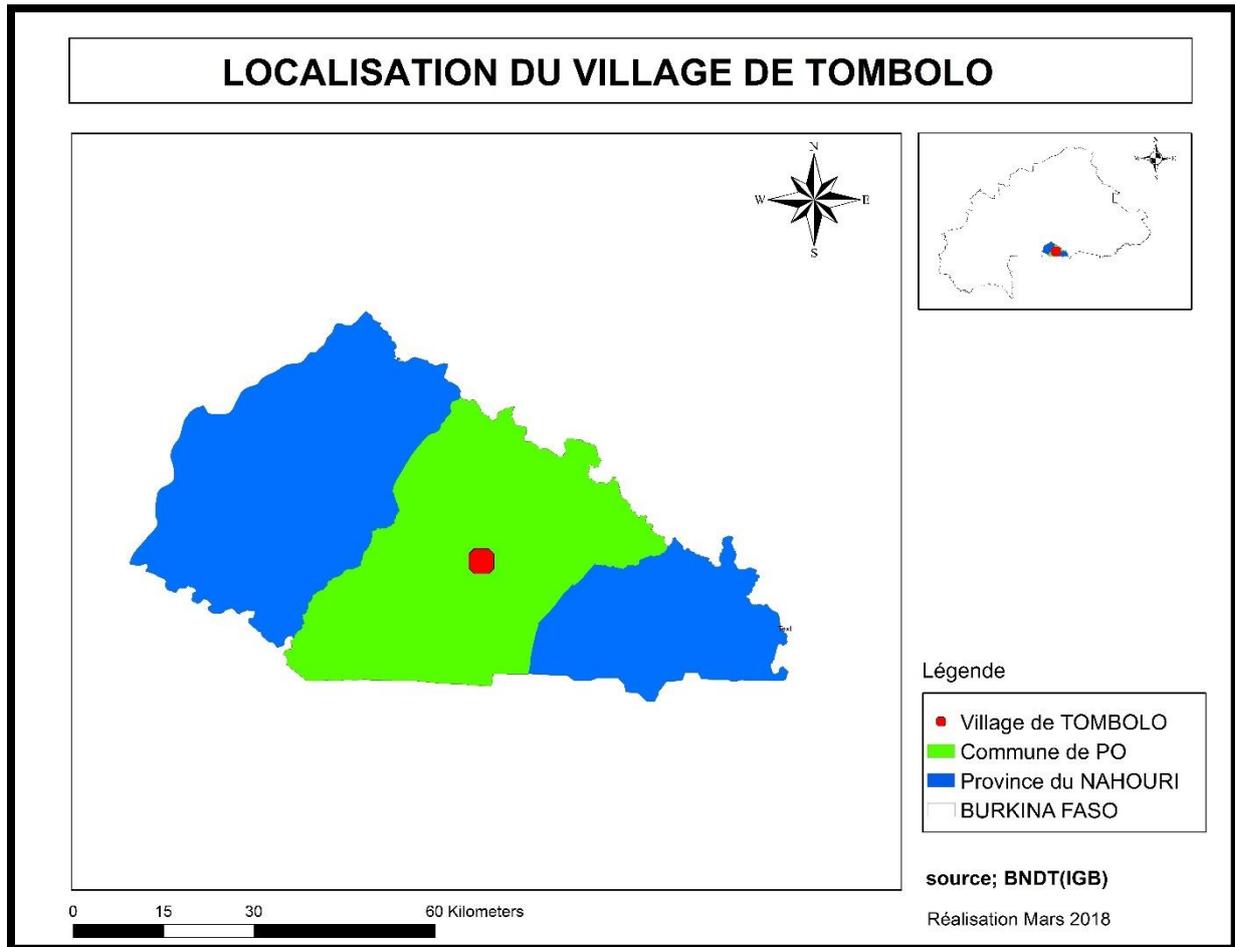


Figure 2 : Situation de la zone de projet

III.2 Climat

La zone du projet se situe dans le domaine climatique soudano sahélien marqué par deux saisons bien distinctes dans l'année. La saison sèche dure 8 mois (Octobre à mai) et une saison pluvieuse qui dure 4 mois (juin à septembre). Ces durées sont variables d'une année à l'autre et on note des variations spatiales assez importantes dans les hauteurs d'eau enregistrées annuellement. L'essentiel des précipitations sont enregistrées dans les mois de juillet et d'août. **La moyenne annuelle sur la période 1942 à 2016 est de 969 mm** Les températures journalières les plus élevées sont situées au mois d'avril et **la température moyenne annuelle sur la période de 1978 à 2009 est de 26,3 °C**. Les hauteurs d'eau sont généralement acceptables mais des techniques de mobilisation des quantités qui tombent annuellement peuvent contribuer de façon significative à l'amélioration des conditions de production agricole, objet du présent projet qui vise à retenir l'eau au niveau du barrage.

III.3 Sols

Les sols hydromorphes de la zone du projet appartiennent au groupe du pseudo gley

d'ensemble et sont les plus dominants sur l'ensemble de la région. Ils sont sur des **matériaux argilo-sableux bigarrés et sur matériaux alluviaux divers**. Ils évoluent sous l'influence d'un excès d'eau temporaire ou permanent. Le profil du sol est profond et le drainage y est déficient. **Ils sont propices aux cultures pluviales et irriguées (maraîchage)**.

III.4 Végétation

La végétation est plus ou moins importante et se compose pour l'ensemble du site d'espèces hydrophiles dont les plus importantes sont *Anogeissus leiocarpus* (**Bouleau d'Afrique**), *Danielia oliveri*, *Diospyros mespiliformis*, *Mitragyna inermis* (**ylga**), *Parkia Bigloboasa* (**roaga**), *Tamarindus Indica* (**pusga**) et *Piliostigma thonningii*.

L'espèce la plus rependue est le *Diospyros mespiliformis* qui se présente sous forme de régénération.

III.5 Faune

La faune de la zone du projet est principalement composée de petits gibiers. Les espèces que l'on trouve sont les porcs épics, les rats voleurs, des pintades sauvages, des lièvres, des hérissons. La grande faune a presque disparu à cause des activités agro-pastorales. Du fait de la richesse écologique du milieu, les zones non exploitées abritent une faune assez importante.

III.6 Hydrographie

Le réseau hydrographique du village de Tombolo se caractérise essentiellement par la présence du cours d'eau **AWEBOUGA** qui quitte la zone collinaire de Pô, traverse le village de Tombolo et continue sa course vers le Ghana.

III.7 Les ressources en eau dans le village récepteur

Au terme de l'inventaire, le village de Tombolo compte 10 forages tous fonctionnels et 2 puits à grand diamètre non fonctionnels comme infrastructures hydrauliques.

Sur le plan de la satisfaction des besoins en eau potable au moment de la présente enquête, on a une population de 3 735 personnes pour 10 forages, ce qui correspond à $3\ 735 : 10 = \mathbf{374}$ **personnes par forage**. Or la norme nationale est de 250 personnes par forage. Théoriquement le nombre de forage pour couvrir les besoins en eau potable de la population est $3\ 735 : 250 = 15$ forages soit un **manquant de 5 forages**. Ce nombre cache la réalité du vécu. Le village disposant d'un nombre important d'animaux estimé à 11 têtes de gros ruminants par ménage

et 20 têtes de petits ruminants par ménage, la pression animale est réelle et importante sur les forages du village. Ainsi **en intégrant tous les besoins, il y a une réelle insuffisance d'eau dans le village**. En plus de l'insuffisance, il y a l'accélération de la fréquence des pannes de forges existantes suite à la forte pression sur ceux-ci.

III.8 Population bénéficiaire

La zone du projet est constituée par l'ensemble des villages susceptibles d'utiliser l'infrastructure après sa réalisation. Ainsi, la zone d'influence diffuse du projet couvre **trente (31) entités** y compris le village récepteur qui est Tombolo. Aussi, pour estimer la population bénéficiaire ainsi définie, il a été utilisé les données du recensement général de la population du Burkina Faso réalisé en 2006 avec 25 525 hommes et 26 027 femmes. L'extrapolation au taux d'accroissement de la population dans la zone du projet qui est de **3,12% (RGPH, 2006, taux d'accroissement de la région du Centre Sud)**, dans l'intervalle de temps compris entre 1996 et 2006, nous obtenons une population de **72 280 habitants pour l'année 2017** comprenant 36 492 femmes et 35 788 hommes. La proportion des femmes dans la zone du projet (**50,49%**) **et est inférieur à la moyenne nationale qui est de 52,71%** (RGPH, 2006).

IV. MATERIELS ET METHODES

IV.1 Matériels

- **Un GPS** pour relever les coordonnées des points importants sur le site.
- **Google Earth et Global Mapper V.16** pour la délimitation du bassin versant.
- **Le logiciel ArcGIS** pour l'élaboration des différentes cartes.
- **Le logiciel HyfranPlus** pour l'analyse fréquentielle des données pluviométriques.
- **Le logiciel CROPWAT 8.0 de la FAO** pour la détermination des coefficients culturaux.
- **Le logiciel Géoslope v12** pour la vérification de la stabilité des talus de la digue.
- **Le logiciel CYPE** pour la vérification de la stabilité des murs bajoyers.
- **Le logiciel Auto Cad** pour l'élaboration des plans d'exécution.

IV.2 Méthodes

IV.2.1 Etudes hydrologiques

Au préalable nous allons établir un risque global en fonction de la projection souhaitée par le projet et statuer sur une période de retour convenable pour la crue de projet.

IV.2.1.1 Caractéristiques du bassin versant

- **Périmètre (P) et surface (S) du bassin versant**, ces deux paramètres du bassin ont été obtenus à partir du logiciel Global Mapper.
- **Indice de forme ou de compacité (K_G) du bassin versant** : Il correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie et permet de comparer entre eux les bassins de superficie identique. Le coefficient de compacité de GRAVELIUS est exprimé à partir de la relation suivante :

$K_G = 0,282 * P * S^{-0.5}$	S : superficie du bassin versant (km ²) P : périmètre (km) K _G : Indice de compacité (m)
------------------------------	---

- **Rectangle équivalent** : C'est le rectangle ayant même surface et même périmètre que le bassin versant, sa longueur, ainsi que sa largeur sont données par ces équations :

$Leq = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$ $leq = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$	S : superficie du bassin versant (km ²) P : périmètre (km) Leq : Longueur du rectangle équivalent (km) Leq : Longueur du rectangle équivalent (Km)
---	---

- **Densité de drainage** : La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant. Son expression est :

$D_d = \frac{\sum L_i}{S}$	S : superficie du bassin versant (km ²) Li : Longueur totale des cours d'eau (km) D _d : Densité de drainage (km ⁻¹)
----------------------------	--

- **Pente transversale moyenne** : Elle est déterminée en faisant la moyenne de quatre à six pentes transversales sur le bassin versant.
- **Répartition hypsométrique** : La courbe hypsométrique du bassin versant donnant le pourcentage de la superficie S du bassin versant située au-dessus d'une altitude donnée H, celle-ci permettra de déterminer l'Indice global de pente (Ig).
- **Indice global de pente (Ig)** Il est l'indice qui caractérise le relief du bassin :

$Ig = \frac{\Delta H}{L_{eq}}$	ΔH: est la dénivelée entre 5% et 95% de la superficie du Bassin versant (m) L _{eq} : Longueur du rectangle équivalent (km) Ig : Indice global de pente (m/Km)
--------------------------------	--

- **Indice global de pente corrigé (Igc_{orr})** : La pente transversale est trop différente de la pente longitudinale, on calcule alors un Indice global de pente corrigé (Igc_{orr}).

$Igc_{orr} = \frac{[(n-1)Ig + It]}{n}$	n : Coefficient fonction de la longueur du rectangle équivalent Ig : indice global de pente (m/Km) It : pente transversale (m/Km) Igc _{orr} : Indice global de pente corrigée (m/km)
--	--

IV.2.1.2 Analyse fréquentielle des pluies

L'analyse statistique de la série de pluie a été conduite sur deux échantillons de données pluviométriques recueillies à la station météorologique de Pô afin de déterminer les quantiles pour différentes périodes de retour.

- **Séries des pluies moyennes annuelles** : 1942-2016 ajustements à la loi normale de GAUSS
- **Séries des pluies maximales journalières** : 1942-2016 ajustements à la loi de GUMBEL

Nous avons effectué l'analyse à l'aide du logiciel **HyfranPlus** qui est un outil adapté pour l'analyse des données pluviométriques ayant une marge de confiance à 95%.

IV.2.1.3 Débit de projet

La détermination de la crue de projet consiste à déterminer le débit de crue pour lequel on souhaite protéger l'ouvrage (FAO, 1998). Le bassin versant n'ayant pas été jaugé, les méthodes empiriques mises en œuvre pour les petits bassins versants de l'Afrique occidentale et centrale sont celles utilisées pour la prédétermination des débits de crue. Les méthodes retenues sont celles de l'**ORSTOM**, du **CIEH** et du **GRADEX**.

- **Méthode ORSTOM** :

La première méthode de détermination de la crue décennale appelée "Méthode ORSTOM" a été publiée en 1965 par Rodier et Auvray. Face à certaines insuffisances et à l'accroissement du volume des données et des observations, il a fallu procéder à sa révision. C'est ainsi que les auteurs, et notamment Rodier, ont procédé à cette révision pour la zone sahélienne et la zone tropicale sèche pour des bassins pouvant aller de quelques hectares à 1 500 km².

La zone d'étude étant située en zone tropicale sèche (soudano-sahélienne), avec un bassin assez boisé d'une couverture assez abondante et une pente du terrain relativement faible on admet que le bassin versant appartient à la classe RI (P3) des catégories de perméabilité, le débit de crue décennal est déterminé par l'équation suivante :

$Q_{r10} = A * P_{10} * \alpha_{10} * \frac{S}{T_{b10}}$	<p>Q_{r10} : Débit de pointe du ruissellement superficiel décennal (m³/s)</p> <p>Q₁₀ : Débit de crue décennal par la méthode ORSTOM (m³/s)</p> <p>S : la superficie du bassin versant (km²)</p> <p>P₁₀ : pluie journalière maximale décennale (mm)</p> <p>K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal obtenu par interpolation entre Kr70 et Kr100</p>
--	---

$Q_{10} = m * Q_{r10}$	<p>T_b : temps de base de la crue décennale (mn)</p> <p>A : coefficient d'abattement de VILLAUME</p> <p>α_{10} : Coefficient de pointe pris égal à 2,6</p> <p>m : Coefficient majorateur égal à 1,03</p>
------------------------	---

▪ **Méthode CIEH :**

Cette méthode a été proposée par Puech et Chabi-Gonni en 1983. Elle s'est basée sur 162 bassins versants dont l'origine vient essentiellement du recueil de Dubreuil (1972) sur les bassins expérimentaux. Cette méthode repose principalement sur des équations de régression linéaire multiple entre paramètres corrélables. Elle est donnée par l'équation suivante :

$Q_{10} = a * S^s * Pan^p * Ig^i * Kr^k * Dd^d$	<p>Q10 : Débit de crue décennal par la méthode CIEH (m3/s)</p> <p>a : Constante de la régression</p> <p>S : la superficie du bassin versant (km²)</p> <p>Pan : Pluviométrie annuelle moyenne (mm)</p> <p>Ig : Indice global de pente corrigé (m/km)</p> <p>Kr10 : Coefficient de ruissellement décennal</p> <p>Dd : Densité de drainage (km⁻¹)</p>
---	--

Nous utiliserons alors les formules de régression linéaire suivantes, qui sont bien indiquées pour le Burkina Faso et pour la zone du projet :

Les équations sélectionnées pour l'application de la méthode CIEH sont les équations N^o 39, 40, 41, 42,43 et 44.

La valeur du débit est obtenue en faisant la moyenne des débits obtenus avec les deux méthodes.

▪ **Méthode du GRADEX :**

Cette méthode permet de passer du débit décennal au débit de crue centennale en multipliant le débit de crue décennale par un coefficient majorateur supérieur à 1, qui est fonction des précipitations de même temps de retour pour le temps de base caractéristique du bassin versant.

$Q_{100} = C \cdot Q_{10}$ $C_{100} = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} * \frac{\left(\frac{T_b}{24}\right)^{0.12}}{K r_{10}}$	<p>Q₁₀ : Débit de crue décennal par la méthode CIEH (m³/s)</p> <p>C : Coefficient majorateur</p> <p>P₁₀: Précipitation journalière maximale décennale (mm)</p> <p>P₁₀₀ : Précipitation journalière maximale centennale (mm)</p> <p>T_b : Temps de base de crue décennale (Heures)</p> <p>K_{r10} : Coefficient de ruissellement décennal (%)</p> <p>Ig : Indice global de pente corrigé (m/km)</p> <p>Q₁₀₀ : Débit centennal (m³/s)</p>
--	---

▪ **Hydrogramme des crues :**

Il donne l'évolution de la crue au cours du temps. L'hydrogramme de la crue du projet est schématisé en trois tronçons linéaires proposés par GRESILLON, HERTER, et LAHYAYE construit à l'aide des temps de base et de montée.

Le changement de pente de la décrue s'effectue à un débit dit débit de discontinuité et dont la valeur est fixée par la relation :

$Q_d = \frac{2 * Q_P * (T_{b10} - \alpha * T_{m10})}{\alpha_{10}(T_{b10} - 2 * T_{m10})}$	<p>Q_d : Débit de discontinuité (m³/s)</p> <p>T_b : Temps de base (min)</p> <p>T_m : temps de montée en heure (min)</p> <p>α₁₀ : Coefficient de pointe pris égal à 2,6</p>
---	--

▪ **La crue de rupture du Barrage :**

Selon le Comité International des Grands Barrages (CIGB), la crue de rupture d'un barrage peut être approchée par :

$Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,20)^{1,5} + 0.15 * L$	Q_{rupt} : crue de rupture du barrage en m ³ /s L : longueur de la digue sans déversoir (m) ; l : longueur du déversoir (m) a : revanche totale (m)
--	---

IV.2.1.4 Etude des apports

▪ Méthode de RODIER :

La détermination des apports consiste à évaluer les apports d'eau du bassin versant afin de s'assurer du remplissage de la retenue sur un cycle annuel (Puech et Chabi-Gonni, 1983). L'estimation des apports en eau se fera en appliquant la méthode de Rodier présentée dans « **Evaluation de l'écoulement annuel dans le sahel tropical africain** » paru en 1975. Cette méthode permet de déterminer les coefficients d'écoulement du bassin versant étudié par comparaison avec un bassin type étudié par Rodier et d'estimer les apports à travers la relation suivante :

$K_e = \frac{\text{Ecoulement}}{\text{Quantile}}$ <p style="text-align: center;"><i>Et</i></p> $V = K_e * P * S_{BV} * 1000$	V : Volume des apports (m ³) S _{BV} : Surface du bassin versant (km ²) P : Quantile pluviométrique considéré (mm) K _e : Coefficient d'écoulements obtenus par les abaques de RODIER
--	--

▪ Méthode de TRUC :

On évalue le déficit d'écoulement moyen annuel et on considère également que, l'eau non consommée par évapotranspiration contribue à l'écoulement au niveau du bassin versant. Cela revient à négliger en particulier les pertes par infiltration profonde qui percolent au-delà du bassin versant. Le déficit d'écoulement annuel est voisin de l'évapotranspiration annuelle, il est lié à la température moyenne du lieu et de la pluviométrie :

$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ avec}$ $L = 300 + 25T + 0,05T^3$ <p style="text-align: center;"><i>et</i></p> $K_e = \frac{(P - D)}{P} ; \text{ d'où}$ $V = (P - D) * S_{BV} * 1000$	P : Volume des apports (m ³) D : Déficit d'écoulement annuel (mm) T : Température moyenne annuelle (°C) K _e : Coefficient d'écoulement S _{BV} : Surface du bassin versant (km ²) V : Volume des apports (m ³)
---	--

IV.2.2 Etude de la Retenue

IV.2.2.1 Caractérisation de la cuvette

▪ Courbes Hauteur-Volume-Surface :

Les données topographiques, nous permettent de reconstituer les courbes Hauteur-Volume-Surface du barrage. Le volume partiel est obtenu par la relation suivante du cours de barrage Licence 2&3. (GUEYE, 2012).

$V_{i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} * h$	V_{i+1} : volume du bassin versant en m ³ S_i : surface du plan d'eau correspondant à la courbe n (ha) S_{i+1} : surface du plan d'eau correspondant à la courbe i+1 (ha) h : dénivelée entre deux courbes de niveau i et i+1 (m)
---	---

▪ Calage du plan d'eau normal (PEN) :

Le calage du Plan d'Eau Normal (PEN) permet de définir la capacité de stockage de la retenue. Ainsi donc, il doit tenir compte, des besoins en eau, des contraintes du site, des aménagements en amont de la digue.

Etant donné la forte demande en eau des futures bénéficiaires de l'ouvrage et la faiblesse des apports moyens annuels en eau de ruissellement par rapport à la capacité de stockage de la cuvette, le plan d'eau normal a été calé de sorte que le volume d'eau à stocker soit maximal.

▪ Calage des plus hautes eaux (PHE) :

Elle correspond au PEN augmenté de la charge au-dessus du seuil.

$PHE = PEN + h$	PEH : Plan des Hautes Eaux (m) PEN : Plan d'Eau Normal (m) h : hauteur d'eau au-dessus du seuil (m)
-----------------	---

IV.2.2.2 Estimation des besoins et des pertes en eaux

Pour cette étude, nous considérons les **hypothèses** suivantes :

- Les besoins en eau constituent l'ensemble des prélèvements de l'eau destinée à l'alimentation des animaux, à l'agriculture et aux divers usages des humains.
- Les pertes sont constituées de l'infiltration dans la retenue, de l'évaporation, des dépôts solides.
- Pour les besoins en eau de la population, on estime que ¼ de cette population utilisera directement l'eau du barrage. La tendance aujourd'hui étant l'utilisation de l'eau de forage

pour la boisson et les besoins domestiques (Source, rapport d'études socio-économiques).

- Durant la saison pluvieuse qui s'étend de juin à septembre :
 - ✓ Les pertes par infiltration sont négligées car la partie souterraine de la cuvette sera saturée en cette période (non compensée en saison sèche).
 - ✓ Pour les mois de juin, juillet et septembre, nous considérons que 30% de l'eau destinée à satisfaire les besoins humains et pastoraux par mois ; seront effectivement consommée et 10% pour le mois le plus pluvieux (Aout).

▪ **Besoins Humains et Pastoraux :**

Pour les besoins domestiques d'après les enquêtes faites sur le terrain, nous décidons d'allouer 15 litres/jour/habitant en considérant le taux d'accroissement régional qui est de 3,12% (**source RGPH 2006**) à l'horizon du projet.

Les besoins en eau pastoraux ont été estimés à partir du nombre de bétail à desservir et de la consommation qui est de 40 litres/jour/UBT pour le gros bétail et 5 litres/jour/Unité de Bétail Tropical pour le petit bétail. La population d'UBT a été actualisée à l'aide de l'équation suivante avec des taux d'accroissement qui sont respectivement de 1,5% et 2% (**Source : Statistiques du Secteur de l'élevage au Burkina Faso Animales, 2008**) :

$P_n = P_0 (1 + T_x)^n$	<p>P_n : population à l'échéance du projet</p> <p>P_0 : population initiale</p> <p>n : nombre d'année</p> <p>T_x : taux d'accroissement</p>
-------------------------	---

▪ **Besoins Agricoles :**

En saison sèche nous effectuons le maraichage. Pour cela nous déterminerons les besoins totaux de chaque culture maraichère que sont la tomate, l'oignon et le haricot vert. Pour plus de sécurité, il sera considéré **les besoins en eau de la plante la plus contraignante** (oignon). (**Dr KEITA 2009**).

En saison pluvieuse, nous produirons du riz pluvial en irrigation d'appoint du fait que les populations aient manifesté beaucoup d'intérêt pour la riziculture et la consommation importante en eau de cette dernière.

<ul style="list-style-type: none"> ➤ $P_e = 0,8 * P$ si $P > 75 \text{ mm/mois}$ ➤ $P_e = 0,6 * P$ si $P < 75 \text{ mm/mois}$ ➤ $B_n = K_c * ETo - P_e$ ➤ $B_b = \frac{B_n}{e}$ 	<p>P : pluviométrie moyenne mensuelles (mm) P_e: Pluie efficace (mm) K_c: Coefficient cultural de la plante ETo : Evapotranspiration de référence (mm) e : Efficience du système d'irrigation B_n: Besoins nets (mm) B_b: Besoins bruts (mm)</p>
--	--

▪ **Infiltration :**

Des pertes d'eau par infiltration dans le fond de la retenue sont susceptibles de se produire, notamment dans les premières années de fonctionnement du barrage. En général, les volumes annuels infiltrés ont tendance à diminuer graduellement au cours des années d'utilisation du barrage à cause de la sédimentation au fond de la retenue.

▪ **Dépôts solides :**

Durant la saison pluvieuse, les particules arrachées (terre, troncs d'arbres, branchage etc.) pendant le ruissellement aboutissent au barrage et s'y déposent ; ce qui entraîne à la longue le comblement de la retenue. La détermination des pertes par dépôts solides a donc pour but de déterminer la quantité de matériaux susceptibles d'arriver annuellement dans la retenue, correspondant à la dégradation spécifique annuelle.

Par ailleurs il existe plusieurs méthodes pour déterminer la dégradation spécifique. Nous utiliserons celle de GOTTSCALK et du CIEH-EIER qui s'expriment respectivement par :

$D = 260 * s^{-0,1}$ <p><i>Et</i></p> $D = 700 * (P/500)^{-2,2} * S^{-0,1}$	<p>P : la pluviométrie moyenne annuelle (mm) ; S : la superficie du bassin versant (km²) D : la dégradation spécifique annuelle (m³/km²/an) ;</p>
---	--

▪ **Evaporation :**

A partir des valeurs d'évaporation d'un bac, il est possible d'établir une corrélation avec les valeurs d'évaporation d'un lac par la formule de POUYAUD (**COMPARORE, 1996**).

$E_{lac} = 1,664 * E_{bac} A^{0,602}$	<p>E_{lac} : évaporation du plan d'eau (mm/j) E_{bac} A : évaporation au bac A (mm/j)</p>
---------------------------------------	--

IV.2.2.3 Bilan global et simulation de la retenue

Après avoir déterminé la consommation humaine, pastorale, les besoins en eau des cultures et les valeurs des différentes pertes par évaporation, infiltration et dépôt solide ; nous procédons à une simulation à partir de la retenue utile pour dégager la superficie irrigable par le barrage.

IV.2.3 Etude de la digue et de ses ouvrages annexes

IV.2.3.1 La Digue

- **Calage de la digue :**

La hauteur de la digue est la côte normale de la retenue des eaux majorée de la lame d'eau au-dessus du déversoir et de la revanche.

$H_D = H_r + h + R$	<p>H_r : hauteur de la retenue au PEN (m)</p> <p>h : lame d'eau au-dessus du seuil (m)</p> <p>R : revanche (m)</p> <p>H_D : Hauteur maximum de la digue (m)</p>
---------------------	---

- **Largeur en crête de la digue :**

La largeur de la crête est dimensionnée pour la circulation des engins et pour l'entretien de l'ouvrage (GUEYE, 2014b). Elle est calculée par la formule de KNAPPEN et de PREECE.

<p>Formule de KNAPPEN</p> $lc = 1,65 * \sqrt{H_D}$	<p>H_D : Hauteur de la digue en (m)</p> <p>lc : largeur en crête de la digue en (m)</p>
<p>Formule de PREECE</p> $lc = 1,1 * \sqrt{H_D} + 1$	<p>H_D : Hauteur maximum de la digue en (m)</p> <p>lc : largeur en crête de la digue en (m)</p>

- **Largeur de la fondation :**

La digue étant de forme trapézoïdale, la largeur en fondation se calcule comme suit :

$L_b = L_c + (m_{amont} + m_{aval}) * H_D$	<p>L_c : largeur en crête de la digue (m)</p> <p>m_{amont} : (Fruit de berge amont)</p> <p>m_{aval} : (Fruit de berge aval)</p> <p>H_D : Hauteur maximum de la digue (m)</p>
--	--

- **Revanche Libre :**

La revanche est une tranche d'eau comprise entre le PHE et la crête du barrage. Cette hauteur permet de protéger la digue des risques d'invasion, son calcul doit tenir compte de la hauteur

des vagues qui se forment sur le plan d'eau et vitesse du vent (**COMPAORE, 1996**). Elle est donnée par la formule de GAILLARD.

$R = 0,75 * [h_v + V^2 / (2 * g)]$ <p style="text-align: center;">avec $V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} * h_v$</p> <p style="text-align: center;">et $h_v = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} * \sqrt{f}$</p>	V : vitesse du vent en km/h h_v : hauteur des vagues (m) f : fetch en km R : Revanche (m)
---	--

▪ **Pente des Talus de la digue :**

Les pentes sont fixées en tenant compte des caractéristiques géotechniques et de la nature des matériaux de construction de la digue.

Pour un barrage en terre homogène à fort pourcentage d'argile, avec une hauteur de digue comprise entre 5 et 10 m ; la pente 2,5H/1V est admise aussi bien à l'aval qu'à l'amont.

Tableau 1 : Types de barrages en terre, (Source : LO, 2016), cours de barrage, page 161

Hauteur du barrage	Type de barrage en terre	Fruit des talus	
		Amont	Aval
Inférieur à 5 m	Homogène ou à zones	2	2
5 à 10 m	Homogènes, granulométrie étendu	2	2
	Homogène à fort pourcentage d'argile	2,5	2,5
	A noyau et recharges grossières	2	2,5
10 à 15 m	Homogène, granulométrie étendu	2,5	2,5
	Homogène à fort pourcentage d'argile	3	2,5
	A noyau et recharges grossières	2	2,3

▪ **Infiltration et Hydraulique interne :**

Cette étude consiste à analyser les conditions d'étanchéité du corps de remblai (**Puech et Chabi-Gonni, 1983**), tout en sachant que les infiltrations peuvent causer trois phénomènes:

- La ligne de saturation ou ligne phréatique
- Le débit de fuite
- La pression interstitielle de l'eau dans le massif (sous pression).

Le débit s'infiltrant à travers la digue peut être évalué à travers la parabole de KOZENY.

$q = k_r * Y_0$ $Y^2 - 2xY_0 - Y_0^2 = 0$ $Y_0 = \sqrt{(H_r^2 + d^2)} - d$	<p>Y_0 : Point d'intersection de l'axe des ordonnées et de la parabole de Kozeny</p> <p>h : tirant d'eau à l'amont (m)</p> <p>d : largeur en base du barrage diminuée de 0.7 b et de la longueur du drain (m)</p> <p>q : débit de fuite par mètre linéaire (m³/s/ml)</p>
--	---

▪ **Drains et Filtres :**

Disposés horizontalement, les drains doivent permettre la collecte des infiltrations dans la digue et une partie des débits d'infiltration dans la fondation et de les acheminer hors de la digue dans le fossé de pied aval.

Les filtres constituent la transition entre le remblai de la digue et les drains afin d'éviter l'entraînement des particules fines du remblai par l'eau.

$e = 2 * \sqrt{\left(\frac{q * l_d}{k_d}\right)}$ $l_d = \frac{L_f}{3}$	<p>e : épaisseur (m)</p> <p>l_d : longueur (m)</p> <p>L_f : largeur en base de la digue (m)</p> <p>k_d : (perméabilité du drain en m/s)</p>
<p>La valeur minimale recommandée est de 0,5 m (Source : Techniques des petits barrages en Afrique Sahélienne et Equatoriale page 193)</p>	

▪ **Stabilité des talus de la digue :**

Un barrage mal dimensionné et instable porte, d'une part, préjudice à la sécurité des populations, des exploitations agricoles et aménagements situés à son aval. (Source Techniques des petits barrages en Afrique Sahélienne et Equatoriale page 149).

La digue étant homogène, en terre, les sollicitations extérieures ne sont pas susceptibles d'entraîner un renversement ou un glissement d'ensemble. Le phénomène le plus à craindre est le glissement des talus. L'étude de stabilité sera donc conduite sur la méthode des cercles de glissement FELLENIUS et de BISHOP. Elle sera également vérifiée à l'aide du logiciel Géoslope Version 2012 afin de conforter les valeurs forfaitaires choisies dans le **tableau1 page17**. Il existe trois types de vérifications que l'on peut effectuer à ce niveau :

- la vérification à la retenue vide ;
- la vérification à la retenue pleine ;

- la vérification en cas de vidange rapide.

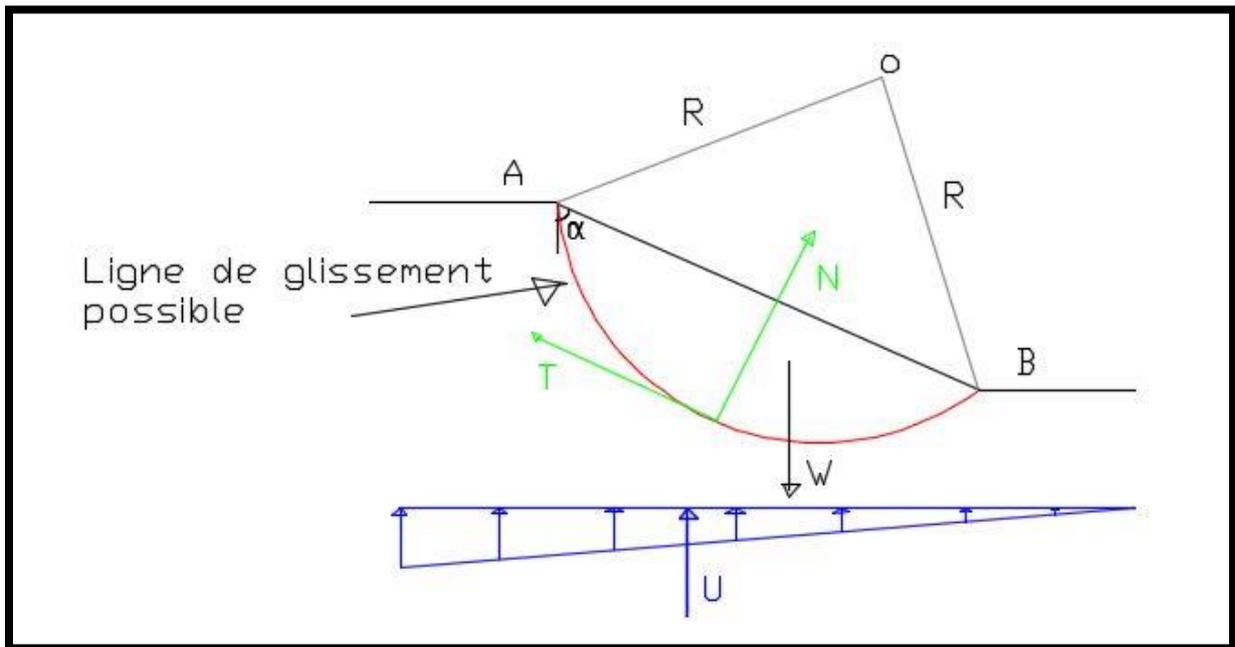


Figure 3 : Glissement du talus

Les talus amont et aval sont identiques : $1V/2,5H$. L'étude de stabilité se mènera sur le talus aval.

Pour ce projet, la vérification en cas de vidange rapide n'est pas nécessaire. En effet, il s'agit d'une situation pendant laquelle la charge d'eau sur le talus amont descend plus vite que le niveau piézométrique de l'eau infiltrée dans la digue. Il se produit alors un phénomène particulier : l'eau infiltrée revient alors dans la cuvette sous l'effet de la pression hydrostatique interne. Il y a ici risque d'entraînement des fines.

Méthode de FELLENIUS :

$F_s = \frac{\Sigma(W * \cos\alpha * \tan\varphi + C * b)}{\Sigma(W \sin\alpha)}$	<p>C : cohésion du matériau de remblai b: hauteur de la digue W : Poids propre du talus délimité par la ligne de glissement possible (KN/ml) P : Poussées exercées sur le talus (KN/ml) α : angle du talus par rapport à la verticale φ: angle de frottement interne du matériau</p>
---	---

Méthode de BISHOP :

$F_G = \frac{\Sigma (W - Pb) * \tan\varphi + C * b}{\cos\alpha * (1 + \frac{\tan\alpha * \tan\varphi}{Fs})}$ $F_G = \frac{\Sigma (wsin\varphi)}$	<p>C : cohésion du matériau de remblai</p> <p>b: hauteur de la digue</p> <p>W : Poids propre du talus délimité par la ligne de glissement possible (KN/ml)</p> <p>P : Poussées exercées sur le talus (KN/ml)</p> <p>α : angle du talus par rapport à la verticale</p> <p>φ: angle de frottement interne du matériau</p>
--	--

▪ **Protection des talus**

Pour la protection des talus des barrages, les principaux types sont les enrochements, les revêtements en béton, les perrés secs et maçonnés. Les épaisseurs des protections sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$e = 1,5 * D_{50}$	<p>D_{50} : fonction de la hauteur des vagues (m)</p> <p>e : épaisseur de protection (m)</p>
--------------------	---

▪ **Tranchée d'encrage :**

La tranchée d'ancrage a pour objectif de prévenir la formation de renards en allongeant les lignes de fuite. Le renardage est un phénomène d'érosion interne régressive qui s'auto accélère au fur et à mesure de l'augmentation du gradient hydraulique H/L . La hauteur d'eau H à l'amont du barrage étant imposée, on déterminera la longueur L des lignes de fuite dans la fondation. Pour ce faire, on utilise souvent la règle de LANE qui s'écrit :

$L_v + \frac{1}{3} * L_h \geq CH$	<p>L_v : Longueur des cheminements verticaux en (m)</p> <p>L_h : Longueur des cheminements horizontaux en (m)</p> <p>H : Hauteur d'eau en amont du barrage en (m)</p> <p>C : Coefficient de Lane qui dépend de la nature du terrain</p>
-----------------------------------	---

IV.2.3.2 Les Ouvrages Annexes

- **Le Déversoir :**
 - **Longueur du seuil déversant :**

La longueur du seuil déversant a été déterminée avec la crue de projet.

$L = \frac{Q}{m \times (2 \times g)^{1/2} \times h^{3/2}}$	<p>Q : débit du projet (m³/s)</p> <p>L : longueur du seuil déversant (m)</p> <p>m : coefficient de débit du seuil déversant (profil trapézoïdal)</p> <p>g : Constante de gravitation g(m/s²)</p> <p>h : lame d'eau déversante (m)</p>
--	---

- **Stabilité du déversoir :**

L'étude de stabilité du barrage poids concerne l'équilibre de l'ensemble de l'ouvrage. L'ouvrage doit résister au glissement sur la fondation et au renversement. Les actions mises en jeu sur une tranche latérale de 1 m du déversoir font intervenir, le poids propre du déversoir, la poussée hydrostatique amont, les sous-pressions, éventuellement la poussée des sédiments accumulés à l'amont et la poussée hydrostatique aval.

Pour l'étude de la stabilité du déversoir, il existe trois cas de figures :

Cas1 : Nous supposons qu'il n'y a pas de déversement, d'où **h=0 (PEN)**

Cas2 : Il y a déversement à partir de la cote des plus hautes eaux (**PHE**) et **h=0,7 m**.

Nous considérons le cas de figure où la retenue est remplie au maximum c'est-à-dire le cas le **plus contraignant** ; le **Cas2**.

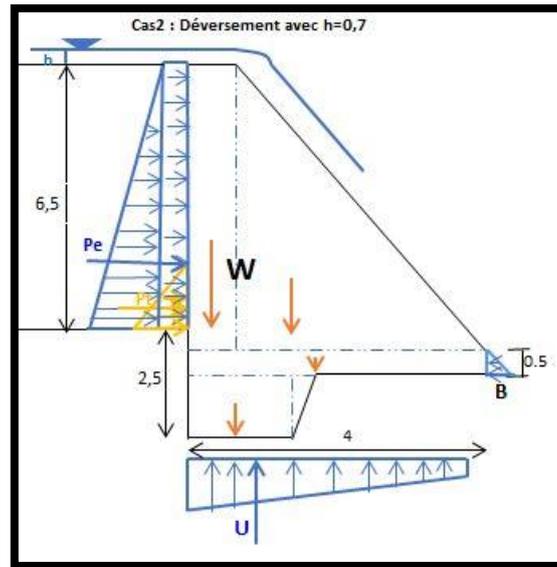


Figure 4 : Forces agissantes sur le déversoir

○ **Stabilité au glissement :**

La vérification de la stabilité au glissement revient à comparer la force tangentielle de glissement admissible sous le mur avec la composante tangentielle réellement appliquée. Le coefficient de sécurité doit être supérieur à 1,5 pour que la stabilité au glissement soit vérifiée.

$F_G = \frac{C + S + \sum(W - U) \tan \phi}{\sum(P_e)} \geq 1,5$	<p>F_G : coefficient de sécurité au glissement W : poids propre de l'ouvrage (kN/ml) U : sous pression (kN/ml) C : la cohésion du sol de fondation P_e : poussée hydrostatique</p>
--	---

○ **Stabilité au renversement :**

Dans un premier temps, on suppose que le mur pivote autour du point B (à l'aval) et on calcule les moments des forces motrices (poussée de l'eau et sous-pression) et forces résistantes (poids propre de l'ouvrage). Le rapport des deux moments est considéré comme le facteur de sécurité au renversement et doit être supérieur ou égal à 1,5.

$F_R = \frac{\sum M_{résistants}}{\sum M_{moteurs}} \geq 1,5$	<p>F_R = coefficient de sécurité au renversement</p>
---	---

○ **Stabilité au poinçonnement :**

La résistance au poinçonnement est assurée lorsque la pression normale sous le massif est toujours inférieure à la pression admissible du sol.

Les contraintes doivent être positives mais inférieures à la contrainte du sol (**σ_A et σ_B positives mais $< \sigma_{sol}$**).

La contrainte admissible du sol est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{adm.sol} = \frac{1}{2} * B * \gamma * N_y + C * N_c + \gamma * D * N_q$$

La contrainte maximale soumise au sol est donnée à l'équation ci-dessous :

<p style="text-align: center;">$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm.sol}$</p> <p><i>Avec</i></p> $\sigma_{max} = \left(\frac{\sum(W-U)}{B} \right) * \left(1 + 6 * \frac{ e }{B} \right)$	<p>γ : Poids Volumique du sol sous la base de la fondation (KN/m3)</p> <p>Φ : Angle de frottement interne du sol sous la base de la fondation (rad)</p> <p>N_y : Facteur de portance obtenu par interpolation</p> <p>C : Cohésion du sol sous la base de la fondation</p> <p>N_c : Facteur de portance obtenu par interpolation</p> <p>D : profondeur d'encastrement de la fondation (profondeur à laquelle se trouve la base de la fondation (m)</p> <p>N_q : Facteur de portance obtenu par interpolation</p> <p>σ_{max} : Contrainte maximale imposée au sol de fondation (MPa)</p>
--	---

▪ **Bassin de dissipation et chenal d'évacuation :**

Le bassin de dissipation est la partie de l'évacuateur qui sert à dissiper l'énergie de chute et son action érosive. Il doit pouvoir contenir le ressaut hydraulique à l'aval. Le choix du type de bassin de dissipation a été fait en fonction de la vitesse de l'eau à l'entrée du bassin et du nombre de Froude.

Les dimensions géométriques du bassin ont été estimées soit à partir des abaques proposés par GRESILLON et LAHAYE, soit à partir de formules de calcul.

A la suite du bassin de dissipation, délimité par des diguettes de protection. Il sera traité de manière à éloigner le plus possible les éventuelles érosions régressives. Ainsi, à la sortie du

bassin de dissipation, il sera disposé des perrés suivis d'un blocage en gabions.

Les caractéristiques du chenal ont été définies par les lois d'écoulement en surface libre (MAR, 2004).

$\frac{Q_{Projet}}{K_s * \sqrt{I}} = \frac{y_n * (b + m y_n)^{\frac{5}{3}}}{(b + 2 y_n * \sqrt{1 + m^2})^{\frac{2}{3}}}$ $Fr = \frac{V_1}{g * y_1}$ $V_1 = \frac{Q_s}{y_1}$	<p>Q_{Projet} : débit du projet (m³/s)</p> <p>K_s: coefficient de rugosité de Manning Strickler</p> <p>I : Pente longitudinale (m/km)</p> <p>y_n : Tirant d'eau normal (m)</p> <p>b : largeur en plafond (m)</p> <p>V_1 : vitesse à l'entrée du Bassin de dissipation (m/s)</p> <p>Y_1 : Tirant d'eau à l'entrée du Bassin de dissipation(m)</p> <p>Q_s : Débit spécifique (m³/s/ml)</p>
---	--

▪ **Murs Bajoyers :**

○ **Stabilité au glissement :**

La vérification de la stabilité au glissement revient à comparer la force tangentielle de glissement admissible sous le mur avec la composante tangentielle réellement appliquée. Le coefficient de sécurité doit être supérieur à 1,5 pour que la stabilité au glissement soit vérifiée.

$F_G = \frac{C * S + \sum(F_c + W - P_i) \tan \phi}{\sum(P)} \geq 1,5$	<p>F_G : coefficient de sécurité au glissement</p> <p>W : poids propre de l'ouvrage (kN/ml)</p> <p>F_c : Poids du remblai sur la semelle (kN/ml)</p> <p>P : Poussée sur le mur et le talon (kN/ml)</p> <p>P_i : sous pression (kN/ml)</p> <p>C : la cohésion du sol de fondation</p>
--	--

○ **Stabilité au renversement :**

Dans un premier temps, on suppose que le mur pivote autour du point B à l'aval et on calcule les moments des forces motrices (poussée de l'eau et sous- pression) et forces résistantes (poids propre de l'ouvrage). Le rapport des deux moments est considéré comme le facteur de sécurité au renversement et doit être supérieur ou égal à 1,5.

$F_R = \frac{\sum M_{résistants}}{\sum M_{moteurs}} \geq 1,5$	<p>F_R : coefficient de sécurité au renversement</p>
---	---

▪ **Ouvrage de Prise et de Vidange :**

Un ouvrage de prise sera réalisé et servira aussi bien pour l'irrigation future des terres situées en aval en rive gauche que pour la vidange de la retenue.

En se basant sur un modèle de vidange d'un réservoir, la loi de BERNOULLI permet de calculer la vitesse de l'eau à la sortie du réservoir, puis passer à la vérification de l'aptitude du diamètre choisi pour la conduite et déduire le temps de vidange de la retenue.

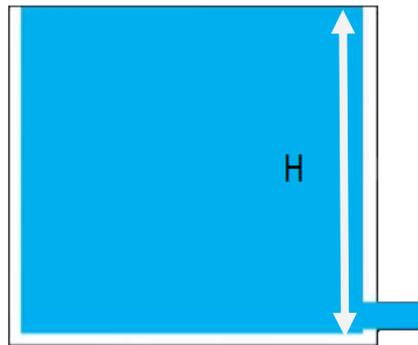


Figure 5 : model de calcul

Loi de BERNOULLI :

$\frac{P_{plan}}{\rho g} + Z_{plan} + \frac{V_{plan}^2}{2g} = \frac{P_{sortie}}{\rho g} + Z_{sortie} + \frac{V_{sortie}^2}{2g}$	P : Pression (bar) Z : Altitude (m) ρ: Masse volumique (Kg/m ³) g : Accélération de la pesanteur (m/s ²)
---	---

Débit de la conduite :

$Q = \pi * \frac{D^2}{4} * V_{sortie}$	Q : Débit transité par la conduite (m ³ /s) D : diamètre de la conduite choisie (mm) H : charge de l'eau (m)
--	---

Temps de Vidange:

$T = \frac{V_{total}}{Q}$	V _{total} : Volume total de la retenue (m ³) Q : Débit transité par la conduite (m ³ /s)
---------------------------	---

V. SYNTHÈSE DES ETUDES DE BASE

V.1 Etudes Socio-Economiques

V.1.1 La Population

La population de la zone du projet comptait **51 552 habitants en 2006 avec 25 525 hommes et 26 027 femmes.**

L'extrapolation au taux d'accroissement régional de la population dans la zone du projet qui est de **3,12% (RGPH, 2006, taux d'accroissement de la région du centre sud)** dans l'intervalle de temps compris entre 1996 et 2006, nous obtenons une population de **72 280 habitants pour l'année 2017** comprenant 36 492 femmes et 35 788 hommes. La proportion des femmes dans la zone du projet (**50,49%**) est inférieure à la moyenne nationale qui est de **52,71% (RGPH, 2006).**

L'estimation de la taille du ménage dans la zone du projet donne **5,09 personnes** pour les **14 200 ménages** que compte la zone du projet pour **l'année 2017.**

La zone **d'influence diffuse du projet** couvre **trente-une (31) entités (Annexe I)** y compris le village récepteur qui est Tombolo. L'ethnie majoritaire dans la zone de projet est l'ethnie **Gourounsi (90%)**. En outre, l'on retrouve des Bissa, Nakana, Peulhs et Mossi.

V.1.2 L'Agriculture

C'est une agriculture extensive essentiellement orientée vers la production céréalière et l'autoconsommation. La production agricole est basée essentiellement sur les principales spéculations suivantes : **le millet, le sorgho rouge, le sorgho blanc, le maïs et le riz. Le niébé** est produit en association avec les autres cultures en général et avec **le sorgho en particulier.** Les cultures de contre saison sont produites par les maraîchers qui conduisent cette activité prioritairement en saison des pluies suite à l'insuffisance d'eau pendant la saison morte. **Les méthodes culturales** restent **semi traditionnelles dans l'ensemble.** Il s'agit d'une agriculture de transition avec des outils de production améliorés. Au vu de la baisse de fertilité des sols, on note un début de mécanisation avec l'usage des charrues, de quelques tracteurs et l'adoption des techniques de CES/DRS (fosses fumières, cordons pierreux).

V.1.3 L'Elevage

Dans la zone de projet, l'élevage est pratiqué par des agro pasteurs. L'alimentation du bétail est basée sur le fourrage naturel. Les résidus de récolte sont exploités directement au sol en

saison sèche. En saison sèche, les animaux se nourrissent des Sous-Produits Agricoles et reçoivent des compléments alimentaires (sous-produits agro-industriels). Les enquêtes auprès des ménages ont permis de déterminer le cheptel moyen par ménage au sein de la communauté de Tombolo comme le montre le tableau suivant.

Tableau 2 : Cheptel moyen des ménages enquêtés

	Gros bétail : Bovins, Arsins, Equidés, Autres	Petit bétail : Ovins, Caprins, Autres
Totaux	763	1380
Cheptel moyen /ménage	11	20

Source : Enquêtes ménages zone de projet, août 2017.

Il a été considéré deux catégories d'animaux au regard de la nature du projet. Le gros bétail comprend les bœufs, les ânes, les chevaux et autres tandis que le petit bétail comprend les chèvres, moutons et autres. Au regard de ces résultats, on s'aperçoit que la moyenne pour le gros bétail est de 11 animaux et de 20 pour le petit bétail, ce qui représente une grande charge en termes d'abreuvement surtout quand on sait que l'ensemble des **infrastructures hydrauliques du village sont constituées de forges**.

V.1.4 Les Attentes des populations par rapport au projet

Les populations adhèrent complètement au projet de construction du barrage de Tombolo. En effet ce projet, s'il venait à être réalisé, sera **le premier barrage et de la localité et de la commune de Po**. Cela permettra aux populations de passer d'une agriculture de transition à une **agriculture extensive** à travers le maraîchage en saison sèche et de contribuer à la sédentarisation des jeunes afin de réduire fortement l'exode rural.

V.2 Études géotechniques

V.2.1 Phase terrain

Elle a consisté à :

- Etudier les caractéristiques des sols de fondation du barrage en réalisant des puits à ciel ouvert le long de l'axe de la digue ;
- Identifier et étudier les zones pour les emprunts argileux ;
- Rechercher des zones pour les emprunts latéritiques, les moellons, le sable et l'eau.

V.2.2 Analyses physico-mécaniques au laboratoire

Pour cette phase, huit échantillons ont été prélevés. Les échantillons E01, E02 et E03 pour les zones d'emprunts argileux et les échantillons E04, E05, E06, E07 et E08 pour l'axe de la digue à une profondeur maximum de 5m. Les résultats d'analyses donnent les résultats suivant pour les échantillons prélevés :

- ❖ Argile très plastique, non sableuse, imperméable pour les zones d'emprunts argileux
- ❖ Argile peu plastique, peu sableuse, peu perméable pour le sol de fondation du barrage

V.2.3 Zones d'emprunt identifiées

Tableau 3 : Zone d'emprunts des différents matériaux

Remblai argileux	3 sites d'emprunt d'argile dont A1 dans la cuvette, A2 à 600 m et A3 à 1000 m de la digue du futur barrage.
Remblai latéritique	La latérite existe en grande quantité sur ce terroir à texture graveleuse.
Gravier et moellons	Ces matériaux sont disponibles en grande quantité à proximité du site au bas des collines.
Sable	On en trouve directement dans le lit mineur du cours d'eau principal et ne posera pas de problème en raison du faible volume de béton.
Drain filtre	Les zones d'emprunt de sable-gravier pour drain filtre sont disponibles à proximité mais à l'exécution des travaux il faut les analyser pour s'assurer du fuseau afin que le matériau joue le rôle de filtre et de drain.

V.3 Etudes pédologiques

Ces études avaient pour objectifs essentiels :

- L'identification des différentes unités de sols du site ;
- La détermination des aptitudes culturales de ces unités de sols pour les cultures irriguées suivantes :
 - ❖ Culture de riz irrigué ;
 - ❖ Céréales (sorgho, maïs, petit mil etc.) ;

- ❖ Maraîchage (tomates, oignons, choux, haricot vert, pomme de terre)
- ❖ Arboriculture (bananier, papayer, agrumes etc.).

Deux (2) classes de sols ont été identifiées avec deux (2) sous-groupes :

- La classe des sols peu évolués : sous-groupe des sols peu évolué d'apport colluvial hydromorphe.
- La classe des sols hydromorphes : sous-groupe des sols hydromorphes peu humifère à pseudogley d'ensemble.

Les conclusions pédologiques révèlent que ces unités de sols présentent :

- ❖ Pour le riz : une aptitude culturale apte dans les sols hydromorphes et moyennement apte dans les sols peu évolués.
- ❖ Pour les cultures maraîchères : une aptitude culturale moyenne dans les sols hydromorphes ainsi que dans les sols peu évolués.
- ❖ Pour les cultures fruitières : une aptitude culturale moyenne dans les deux (2) unités de sols.
- ❖ Pour la culture du maïs : une aptitude culturale moyennement apte dans le cadre d'une culture irriguée dans les sols peu évolués.

Les contraintes de mise en valeur des sols sont surtout d'ordres pédologiques et se résument :

- ❖ A la texture moyenne à fine (limono-argilo-sableuse, limono-argileuse, voire argileuse) ;
- ❖ Aux difficultés de pénétration racinaire liées à la structure faiblement développée en éléments moyens et grossiers et parfois massive ;
- ❖ Aux risques d'inondation.

A cela s'ajoutent la très faible quantité de matière organique dans ces unités de sols, la faible disponibilité en éléments nutritifs et la faible capacité de rétention en éléments nutritifs. Pour pallier à cela nous recommandons :

- Le sous-solage et le labour profond
- L'apport de matière organique supplémentaire, d'engrais minéraux (complexe NPK)
- Le drainage des excès d'eau (caractéristique qui conduit à rejeter les céréales comme le mil et le maïs).

V.4 Etudes d'impacts environnementaux

V.4.1 Détermination de la zone d'influence du projet

Sur le plan des ressources naturelles, il est considéré une **zone d'influence directe** établie sur un rayon de **200 mètres** tout autour de la cuvette.

Sur le plan économique, en prenant en compte les impacts (positifs) qu'engendrera le projet dans le milieu récepteur, la détermination d'une **zone d'influence diffuse** a été établie avec pleine implication des populations bénéficiaires (**31 entités**).

V.4.2 Occupation actuelle du site

Les activités suivantes sont menées autour du site : la petite chasse, la pêche, l'agriculture à l'aval et à l'amont de l'axe identifiée pour la future digue, le prélèvement du bois de cuisine par les femmes et la pâture d'animaux.

Dans le domaine agricole, des champs sont exploités aussi bien dans la cuvette que sur les futures berges à l'aval du futur barrage. Ces champs ont été répertoriés avec l'appui des accompagnants villageois sur le site.

Tous les exploitants qui utilisent les terres situées dans la cuvette du barrage à réaliser sont du village de Tombolo. Ils cultivent tous soit du sorgho, du mil, du riz, du sésame et de l'arachide. L'inventaire des champs a été fait avec celui de l'habitat, les deux occupant le même espace.

V.4.3 Impacts du projet sur les différents domaines

Les impacts du projet de construction du barrage de Tombolo seront caractérisés par les sources d'impacts et les récepteurs d'impacts.

Les sources d'impacts potentiels sont définies comme l'ensemble des activités prévues lors des travaux en période de construction, d'exploitation et d'entretien du barrage.

En période de construction, les sources d'impacts potentiels sont : l'installation du chantier, le déchaussage dans l'aire du barrage, la construction du seuil, l'approvisionnement en agrégats de maçonnerie et la présence de la main d'œuvre sur le chantier.

En période d'exploitation et d'entretien, les sources d'impacts sont liées à la présence de la retenue d'eau, son exploitation, les travaux d'entretien et de réfection.

Les récepteurs d'impacts sont les composantes du milieu susceptible d'être affectées par le projet et correspondant aux éléments sensibles de la zone, c'est-à-dire ceux susceptibles d'être modifiés de façon significative par les activités (ou sources d'impacts) liées au projet que sont : **les sols, l'eau de surface ainsi que souterraine, la végétation, l'habitat, la faune, les environnements sonore et climatique.**

V.4.4 Méthode d'évaluation de la force d'un impact

L'évaluation des impacts est basée sur une approche matricielle d'interrelations entre les

activités du projet, les sources d'impacts et les éléments des milieux récepteurs en l'occurrence les milieux physiques, biologiques et humains.

Tableau 4 : Récapitulatif des corrélations des impacts

Critère	Appréciation	Hypothèse d'appréciation
Portée de l'impact (influence spatiale de l'impact)	Locale	Sur le site d'activité à moins de 100m
	Zonale	Dans un rayon d'environ 500m du site du projet
Intensité de l'impact	Faible	Fonctions naturelles et/ou sociales sont faiblement altérées
	Moyenne	Fonctions naturelles et/ou sociales sont manifestement altérées
	Forte	Les fonctions naturelles et/ou sociales sont sévèrement altérées
Durée de l'impact	Courte	Moins d'une semaine
	Moyenne	Moins d'un mois
	Longue	Plus d'un mois

Sur la base des critères et hypothèses d'appréciation, un niveau d'importance : mineure, moyenne et majeure a permis d'établir en **Annexe I, page 61**:

- Synthèse des impacts du projet sur l'environnement
- Plan de gestion environnemental et social pour la réalisation et l'exploitation du projet
- Cout de mise en œuvre des actions identifiées qui se chiffrent à **75 496 500 FCFA**. Ces coûts sont détaillés **en Annexe I, page 63**.

V.5 Etudes Topographiques

Selon les données fournies par « PROFIL DE LA REGION DU CENTRE SUD » élaboré en 2010 par la Direction Régionale de l'Economie et de la Planification du centre (DREP/Centre) avec l'appui technique et financier du projet d'Appui à la Décentralisation et à la Participation Citoyenne (ADEPAC), le site du projet se situe dans une zone où le relief se caractérise par **la présence de plaines, de plateaux et de bas-fonds. Cet ensemble présente des altitudes oscillantes entre 200 m minimum et 400 m maximum**. L'altitude prise au GPS sur le site de

projet est de 256 mètres.

Les études topographiques complètes du site ont été effectuées par une équipe topographique d'AC3E en 2017.

Réalisées à l'aide d'une station totale TC 442, elles ont permis :

- De placer des bornes de références, en rives gauche et droite, qui ont servi de base au levé
- De faire des levés longitudinaux et transversaux de vérification des axes possibles de la digue.

L'axe de la digue a été implanté de manière à offrir un meilleur compromis entre les impératifs techniques, financiers, environnementaux ; humains, et socio-culturelles.

Pour cela le barrage a été implanté dans la partie la plus encaissée de la vallée afin de mobiliser le maximum de volume d'eau en quantité suffisante et en présentant des courbes de niveaux délimitant une cuvette fermée. Par ailleurs la proximité du lieu d'utilisation de l'eau est une réalité en constatant la présence de multiple production agricole de part et d'autre de l'axe de la digue.

- De produire le plan de masse sur une superficie de 125 hectares.

VI. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La durée de vie souhaitée pour le présent projet est de 30 ans soit l'horizon 2050.

Pour un dimensionnement allant dans le sens de la sécurité, G DEGOUTTE 1997 recommande la période de retour selon les cas suivants :

Tableau 5 : Période de retour de crue en fonction de la hauteur et de la capacité du barrage

$\frac{(H(m))^2}{\sqrt{V(hm^3)}}$	< 5	5-30	30-100	100-700	> 700
Période de retour (ans)	100	500	1000	5000	10 000

Nous définissons un volume prévisionnel maximal de 2 000 000 m³, pour une hauteur de digue maximum de 10m. Soit un ratio de H^2/\sqrt{V} égal à 70. Une crue d'une période de 1000 ans est ainsi recommandée.

Mais de façon pratique une crue de 100 ans est plus judicieuse, pour des questions de couts et surtout du fait de la durée de vie souhaitée pour le barrage.

VI.1 Etudes Hydrologiques

VI.1.1 Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant se définit comme étant la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire à partir duquel nous pouvons le délimiter (**Dr NIANG, 2013**). Celui de Tombolo est situé entre deux grands bassins versants du Burkina : le Nazinon et la Sissilli.

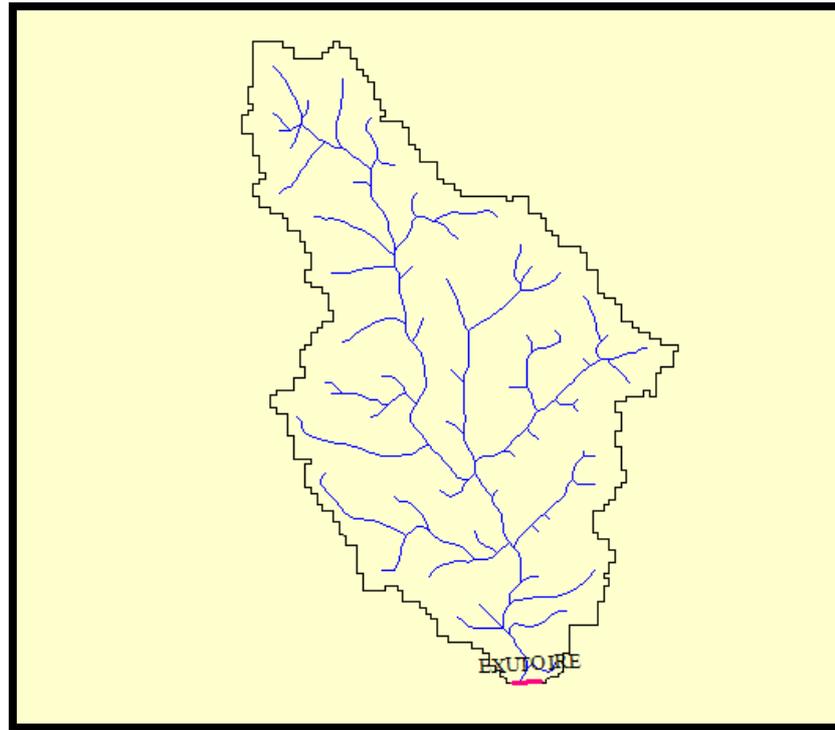


Figure 6: Bassin versant de Tombolo (source : Global Mapper v 16)

▪ **Courbe hypsométrique**

C'est la répartition de la superficie du bassin versant en fonction de l'altitude. Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin versant, donc du relief.

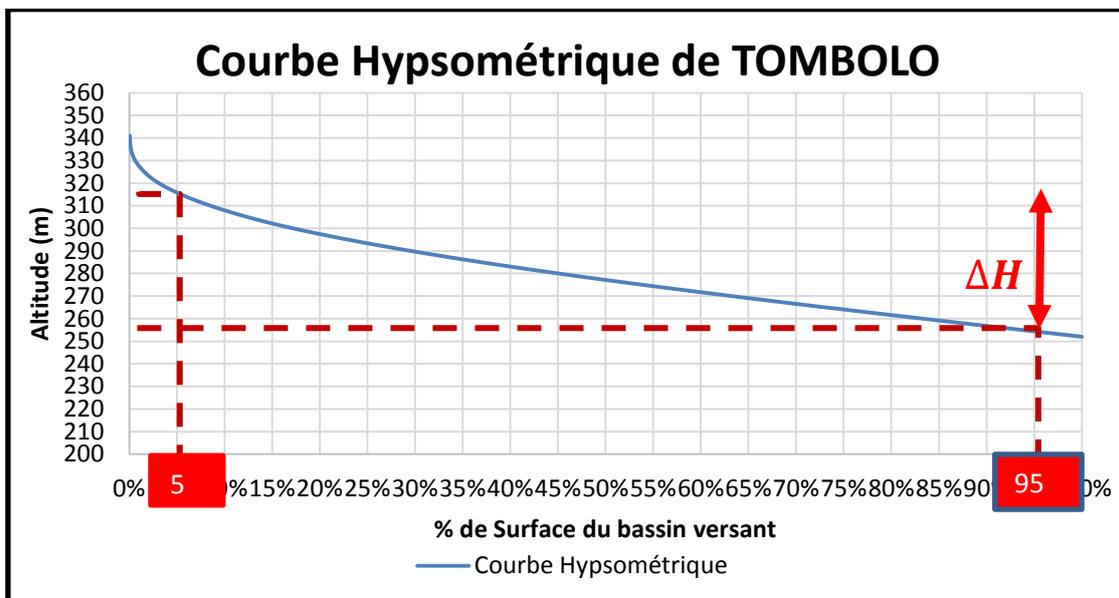


Figure 7 : Courbe Hypsométrique du Barrage de Tombolo

Les détails de calcul pour l'étude hydrologique sont présentés en **Annexe III, page 71.**

Tableau 6 : Caractéristiques du bassin versant

Climat	Tropical sèche (soudano-sahélien)
Classe de perméabilité	RI (P3)
Surface (km ²)	26,88
Périmètre (km)	33,59
Typologie du bassin suivant la taille	Petit Bassin versant
Typologie du réseau hydrographique	Arête de Poisson
Coefficient de compacité de GRAVELIUS	1,89
Longueur du rectangle équivalent (km)	15
Largeur du rectangle équivalent (km)	1,79
Indice global de pente (m/ km)	4,07
Indice de pente transversale (m/km)	9,02
Indice global de pente corrigé (m/km)	5,72
Densité de drainage (km ⁻¹)	1,75
Densité spécifique (m)	29,64
Typologie du relief	Faible

VI.1.2 Analyse des données pluviométriques

L'analyse fréquentielle menée à l'aide du logiciel **HyfranPlus** donne les résultats suivants :

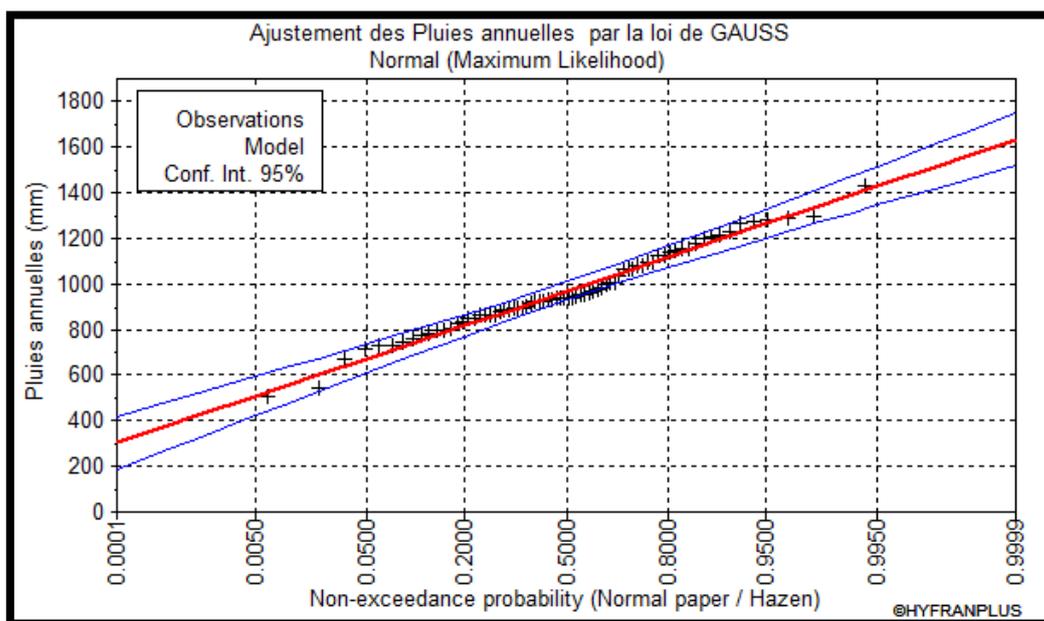


Figure 8: Analyse statistique des données pluviométriques annuelles de Po

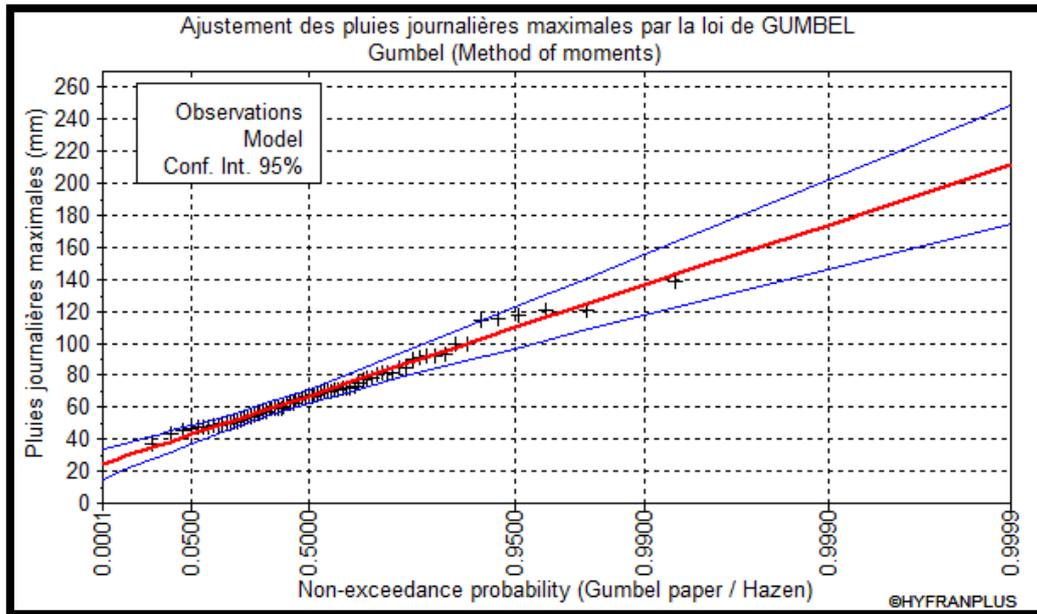


Figure 9 : Analyse statistique des données pluviométriques journalières de Po

L'analyse a été faite avec un niveau de confiance de 95% et les coefficients de variation des deux échantillons sont compris entre 0 et 3.

Nous déduisons que ces données sont représentatives et peuvent donc être utilisées.

Les données météorologiques ayant servies à l'analyse pluviométrique sont joints en **Annexe II, page 66**.

Tableau 7 : Quantiles pluviométriques

Période de retour (années)	Période Humide						2	Période sèche				
	1000	100	50	20	10	10		20	50	100	1000	
Quantiles annuelles(mm)	1523	1386	1336	1264	1199	969	739	674	601	552	415	
Quantiles journalières (mm)	174	136	124	110	98	67	47	43	38	36	30	

:

L'analyse pluviométrique montre que la pluviométrie annuelle moyenne est de **969 mm**

VI.1.3 Crue de projet

La crue du projet est la crue contre laquelle l'on choisit de protéger les ouvrages projetés sur le site (Compaoré.M.L.1996). Il s'agit donc de la crue qui servira de base au dimensionnement de tous les ouvrages hydrauliques.

L'expérience a montré que sauf dans certains cas particuliers, prévoir un temps de retour de 10 ans n'est pas suffisant pour un projet. Par ailleurs, les changements climatiques observés de nos jours entraînent des pluies de plus en plus violentes qui ne respectent plus les lois établies. Ainsi, pour plus de sécurité, nous prendrons comme crue de projet la crue centennale.

Tableau 2 : Crues de projet

	DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR
Méthode ORSTOM	Crue décennale	m ³ /s	26,1
Méthode CIEH	Crue décennale	m ³ /s	37,7
Débit retenu	Crue décennale retenue	m ³ /s	31,9
	Coefficient majorateur		2,5
Méthode GRADEX	Crue centennale	m ³ /s	80,3
	Crue de projet	m ³ /s	80,3

VI.1.4 Hydrogramme des crues du projet

L'évolution de la crue au cours du temps se présente comme suit :

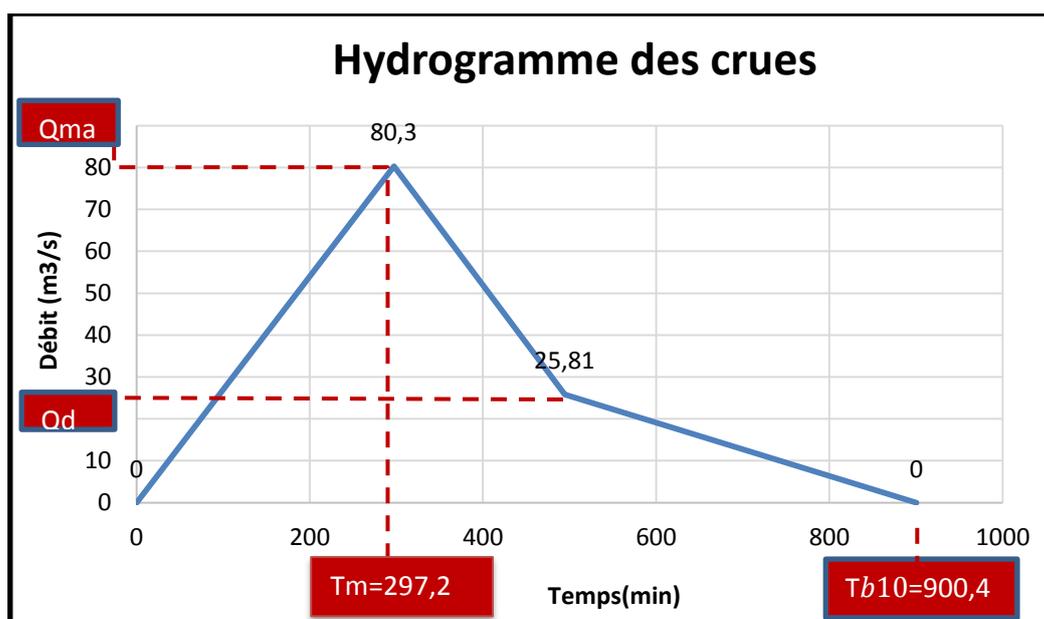


Figure 10 : Hydrogramme des crues

VI.1.5 Crue de rupture

La crue de rupture est la crue qui, lorsqu'elle arrive, peut entraîner la destruction de la digue. Elle est de **329,6 m³/s**.

VI.1.6 Etude des apports

▪ Méthode de Rodier

Nous retenons le bassin type de Bindé (Manga) comme étant le plus proche de notre bassin versant.

Tableau 8 : Apports calculés par la méthode de Rodier

	Année				
	Décennale Humide	Quinquennale Humide	Moyenne	Quinquennale Sèche	Décennale Sèche
Apports (m³)	1 933 747,2	1 505 280	1 041 868,8	659 635,2	496 608
Coefficients d'écoulement	6%	5%	4%	3%	2,5%

▪ Méthode de Turc

Tableau 9 : Apports calculés par la méthode de Turc

	Année				
	Décennale Humide	Quinquennale Humide	Moyenne	Quinquennale Sèche	Décennale Sèche
Apports (m³)	4 069 481	3 261 359	1 944 970	937 148	533 439
Coefficients d'écoulement	13%	11%	7%	4%	3%

En faisant la moyenne des deux méthodes, nous retenons en année moyenne comme volume d'apport **1 493 419,4 m³**.

VI.2 Etude de la cuvette

VI.2.1 Courbe hauteur-Volume/Hauteur-surface

Après l'implantation de l'axe de la digue, le tracé des courbes « hauteur – volume » et « hauteur-surface » a été obtenu en estimant les surfaces moyennes entre les plans définis par des pas de hauteur 0,25 m. cf. **Annexe IV, page 76**.

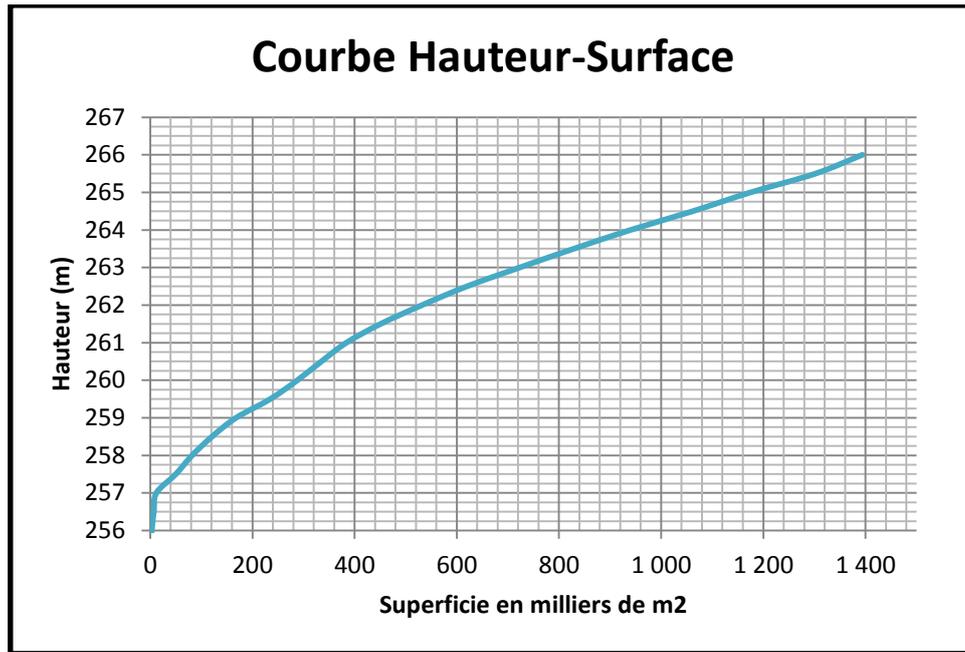


Figure 10 : Courbe Hauteur-Surface

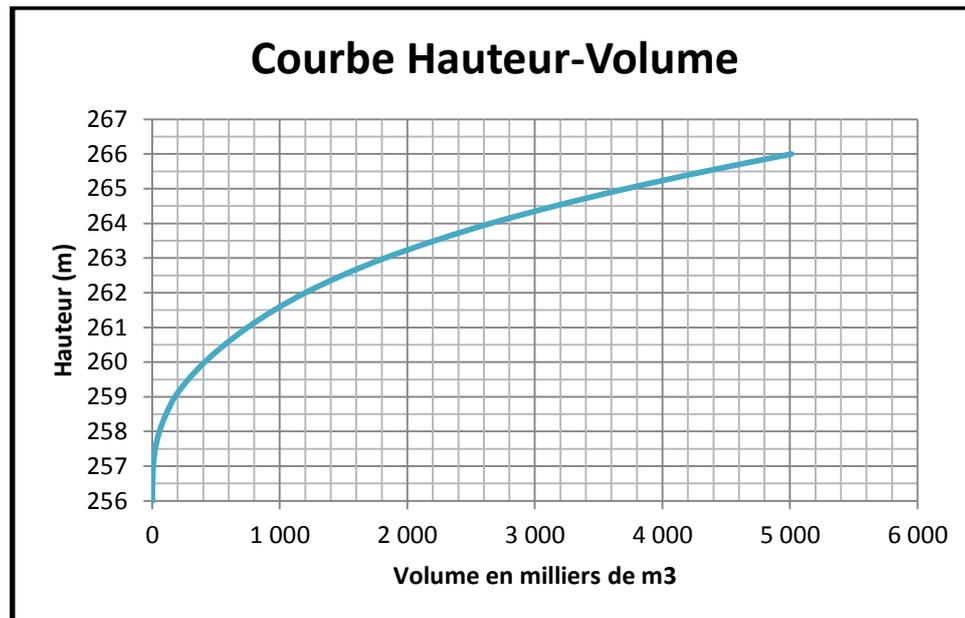


Figure 11: Courbe Hauteur-Volume

VI.2.2 Caractéristiques de la cuvette au PEN et au PEH

En considérant les apports en eau dans la retenue et les courbes hauteur-volume et hauteur-surface, nous optons de fixer la cote **PEN à 262,5 m** soit une capacité de **1 488 653 m³**.

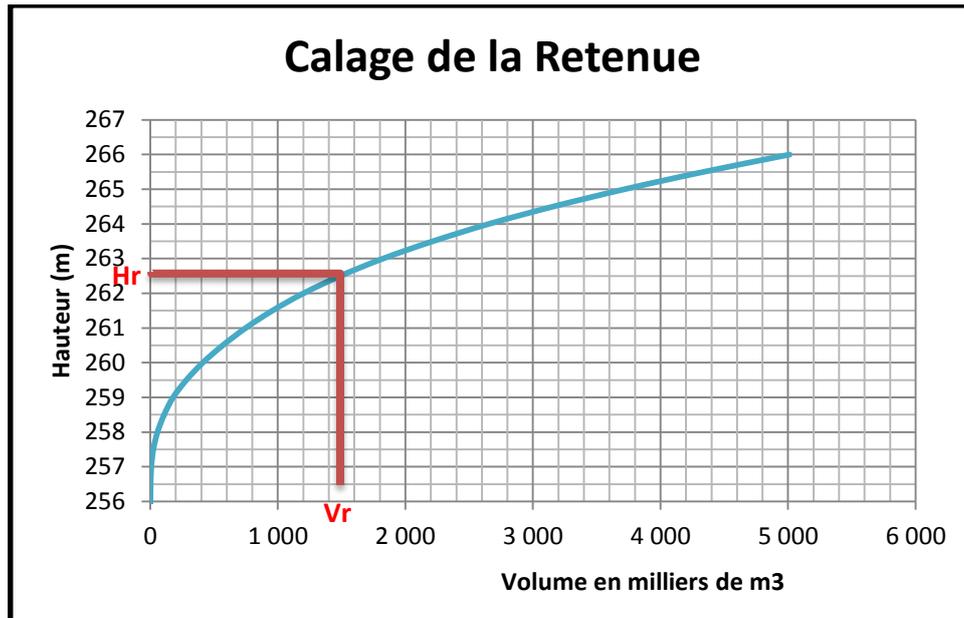


Figure 11 : Calage de la Retenue

Ainsi le Barrage de Tombolo se remplira et se déversera en année moyenne, en années quinquennale et décennale humides; mais aura des difficultés de remplissage en année quinquennale et décennale sèche.

Tableau 3 : Caractéristiques du PEN et du PEH

Cote Plan d'Eau Normal	262,5	m
Capacité de stockage de la cuvette	1 488 653	m ³
Superficie du plan d'eau normal	62,0	ha
Cote Plan des Hautes eaux (PHE)	264,2	m
Superficie du plan des hautes eaux	1 00,1	ha
Capacité de stockage au PHE	2 906 291	m ³
Apports moyens annuels	1 493 419,4	m ³

VI.2.3 Revanche libre

Elle a été définie par la relation de GAILLARD sur la base d'une hauteur de vagues obtenue par la relation de MOLITOR. Nous obtenons une revanche **R= 0,7m**.

VI.2.4 Lamme d'eau déversant maximale

Pour un petit barrage ($H_T < 15 m$) muni d'un évacuateur sans vanne, l'épaisseur de la lamme d'eau maximale est comprise entre 0,60 et 1 m. Nous retenons **h = 0,7m**.

VI.2.5 Estimation des Besoins

VI.2.5.1 Humains et Pastoraux

Tableau 4 : Hypothèses et Estimation des besoins (humains et pastoraux)

Hypothèses dévaluation	Domestiques					Pastoraux							
	Nombre d'habitants		181679			Petit bétail		Gros bétail					
	Cs (l/jr/habitant)		15			Nombre têtes		2157	1028				
						Cs (l/jr/tête)		5	40				
Besoins humains et pastoraux													
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Nbre de jours	31	28	30	31	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Besoins (m ³)	22730	20530	21997	22730	22730	6599	6819	2273	6599	22730	21997	22730	200462

VI.2.5.2 Agricole

Besoin en eau pour la riziculture :

Tableau 5 : Besoin en eau du riz en saison pluvieuse

Mois	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre
Durée	30	31	31	30	31
kc équivalent	1,2	1,09	1,09	1,2	1,05
ET0 (mm/j)	4,69	4,02	5,62	3,8	4,44
ETM (mm/j)	5,63	4,38	6,13	4,56	4,66
ETM (mm)	168,84	135,84	189,90	136,8	144,52
P (mm/j)	125	194	268	174	49
Pe(mm)	76	131,2	190,2	115,2	19,4
ETM-Pe (mm)	92,84	4,64	-0,3002	21,6	125,12
Besoin de la plante (mm/j)	3,1	0,1	0,0	0,72	4,04
Besoins nets (m ³ /ha)	928,4	46,36	0	216	1251,22

Besoins en eau pour le maraichage :

Tableau 6 : Besoins en eau de l'oignon en saison sèche

Mois	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril
Durée	31	31	28	30	31
kc équivalent	0,63	0,52	0,72	1,12	0,88

ET0 (mm/j)	4,18	4,72	5,32	5,71	5,79
ETM (mm/j)	2,6334	2,4544	3,8304	6,3952	5,0952
ETM (mm)	81,64	76,09	107,25	191,86	157,95
P (mm/j)	4	1	4	18	58
Pe(mm)	0	0	0	0,8	24,8
ETM-Pe (mm)	81,6354	76,0864	107,2512	191,056	133,1512
Besoin de la plante (mm/j)	2,63	2,45	3,83	6,37	4,30
Besoins nets (m ³ /ha)	816,354	760,864	1072,512	1910,56	1331,512

VI.2.6 Estimation des Pertes

VI.2.6.1 Par infiltration

Au Burkina Faso l'infiltration moyenne journalière est de 1 à 3 mm/jour. Nous retenons une infiltration journalière de 2 mm/jour durant toute la durée de vie de l'ouvrage.

Tableau 7 : Perte par infiltration

Mois	Jan	Fev	Mar	Avri	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Nbre de jour	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Infil (mm)	62	56	62	60	62					62	60	62	486

VI.2.6.2 Par dépôt solide

Nous avons retenu la valeur moyenne de la dégradation spécifique à partir des deux (02) méthodes **152,3 m³/km²/an** soit un volume annuel de dépôt solide de **4 093,824 m³**.

A l'horizon du projet, 30 ans et en faisant l'hypothèse que le barrage sera mis en eau au début du présent projet, le cumul de dépôt solide évalué est de **70 056 m³** ramené à la cote 258,2.

VI.2.6.3 Par évaporation

Tableau 8 : Perte par évaporation

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Durée (j)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<i>E_{bac}</i> (mm)	302	319	366	311	264	186	150	124	132	168	204	261	2790
<i>E_{lac}</i> (mm)	203	202	228	204	187	150	134	119	122	146	158	186	2039

VI.2.7 Bilan Global et Simulation de la Retenue

Tableau 10 : Simulation de la retenue d'eau

Besoins humains et pastoraux													
Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
Nombre de jours	31	28	30	31	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Besoins mensuels (m3)	22730	20530	21997	22730	22730	6599	6819	2273	6599	22730	21997	22730	200462
	Pertes												
Evaporation (mm)	203	202	228	204	187	150	134	119	122	146	158	186	2039
Infiltration (mm)	62	56	62	60	62					62	60	62	486
(BESOINS Humain +Pastoraux + PERTES) (m3)	722 246												
Volume Morte + Lame d'eau mini sur la Prise (m ³)	282 628												
Besoins en Irrigation (m³)	488 545												
SIMMULATION POUR DETERMINER LE NOMBRE D'HECTARE ENVISAGEABLE POUR L'IRRIGATION										Efficience d'irrigation		0,75	
Besoins agricoles pour la riziculture													
Besoins bruts (m3/ha)						1237,9	61,8	0	288	1668,29			3 256
Superficie irrigable (ha)	46												
Besoins agricoles pour la maraîchage													
Besoins bruts (m3/ha)	1014,485	1430,016	2547,41	1775,349								1088,472	7 856
Superficie irrigable (ha)	43												

A l'issue de la simulation nous constatons que la retenue d'eau est à mesure de satisfaire par irrigation 46 hectares de riz en saison pluvieuse par irrigation d'appoint et 43 hectares pour le maraichage. Nous considérons $E_a = 75\%$ (climat soudano sahélien donc modéré).

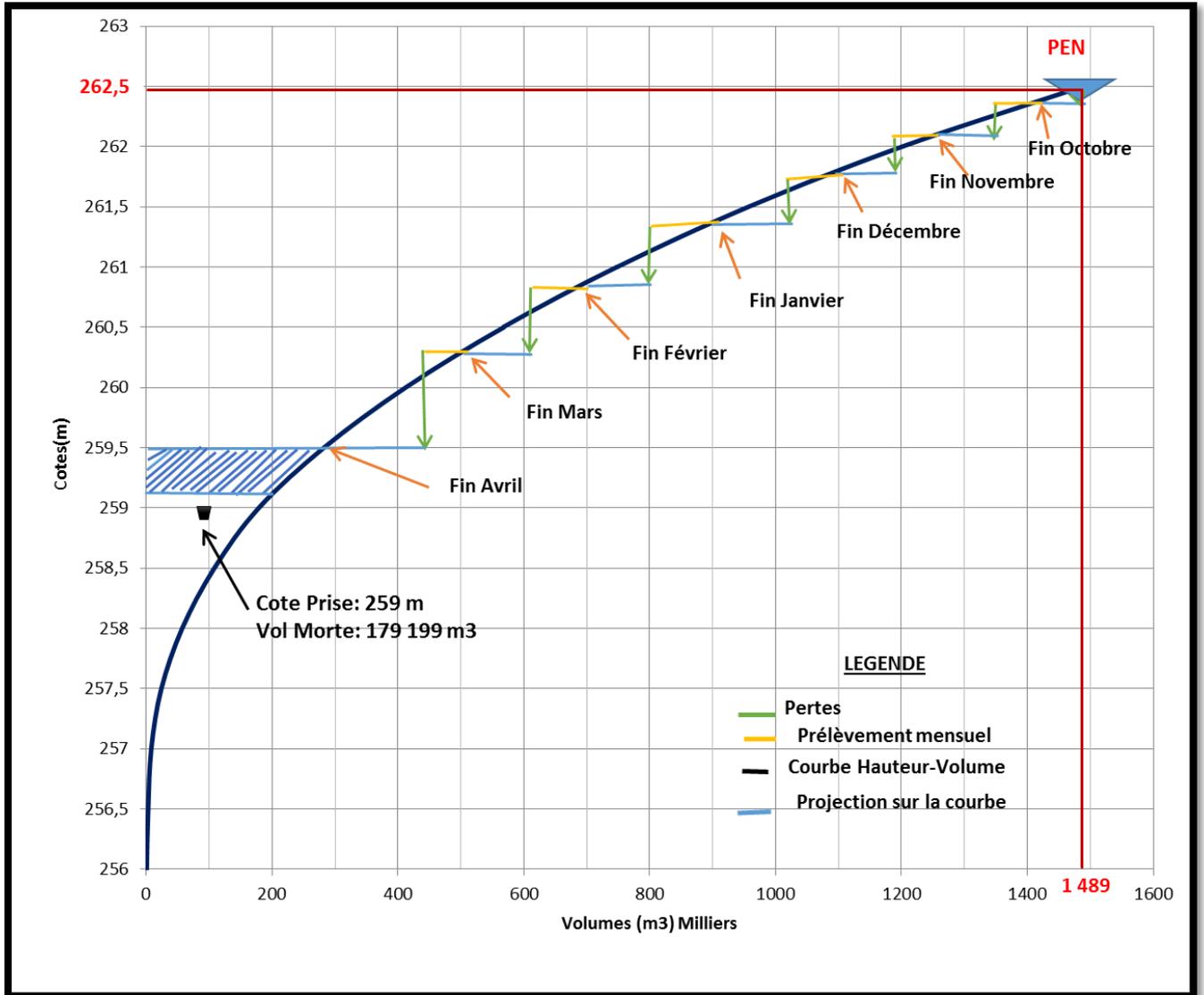


Figure 12 : Courbe d'utilisation de la retenue

VI.3 Etude de la Digue et de ses Ouvrages Annexes

VI.3.1 La Digue

Le site choisi pour le barrage de Tombolo présente un relief faible. On note également la présence de matériaux argileux de bonne qualité. Ces éléments nous permettent de réaliser une digue homogène en terre compactée à fort pourcentage d'argile. La disponibilité de matériaux facilitera l'exécution et permettra de réaliser des économies sur le projet. (Voir la géométrie de la digue en **Annexe X**).

Tableau 11 : Caractéristiques de la digue

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR	DISCUSSION
DIGUE			
Côte crête déversoir	m	262,5	Cette côte correspond à la côte au PEN.
Revanche	m	1	
Côte crête digue	m	264,2	
Côte crête mur parapet	m	264,7	Pour rester dans la sécurité, nous rehaussons la digue avec un mûr parapet
Hauteur digue	m	8,2	
Longueur digue	m	795	Longueur de la digue sans le déversoir
Largeur en crête digue	m	4	Cette valeur est suffisante pour faciliter le passage des engins.
Talus amont et aval	H/V	2,5/1	Les pentes des talus amont ont été déterminées en fonction du type et de la hauteur de barrage .
Largeur en base digue	m	46,5	
Drain horizontal			
Epaisseur	m	0,5	Longueur obtenue du profil 4 au profil 12 et du profil 18 au profil 26. Lorsque la hauteur de la digue est supérieure ou égale à la revanche libre le drain horizontal est nécessaire. Source La maîtrise des crues dans les bas-fonds p 136
Largeur du filtre	m	15,50	
Longueur du filtre	m	615	
Tranchée d'encrage			
Pente de talus de la tranchée d'ancrage	H/V	1/1	Cette valeur permet de faciliter la mise en œuvre de la tranchée par les engins.

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR	DISCUSSION
DIGUE			
Profondeur de la tranchée	m	0,25-3	La profondeur de la tranchée varie selon le profil donné
Largeur en gueule	m	3,5	
Débit de fuite par mètre linéaire	m ³ /s/ml	8. 10 ⁻¹²	Les fuites proviennent du corps de la digue et de la fondation Elles sont négligeables parce que les matériaux utilisés et le compactage entraînent des perméabilités faibles.
Débit de fuite	m ³ /s	7. 10 ⁻⁹	
Débit de fuite annuel	m ³ /an	0,221	

Le détail des calculs pour la digue est joint en **Annexe V, page 76**.

VI.3.1.1 Protection des talus et de la crête

Les protections sont proposées en **Annexe XI** sur la coupe en travers type de la digue.

Tableau 12 : Protection des talus et de la crête du barrage

Protection du talus amont	<p>Le talus amont sera protégé contre le batillage par une couche de perré sec en enrochement de moellons latéritiques ou granitiques de 0,25 m d'épaisseur, soigneusement rangés à la main et destinés à éviter que les matériaux terreux qui constituent le barrage ne soient érodés par les vagues.</p> <p>Les enrochements seront posés sur une couche de pose de grave latéritique d'une épaisseur de 0,10 m</p> <p>Le pied amont de la digue sera protégé par une butée de pied amont, ouvrage triangulaire en enrochements, de 1,50 m de largeur en gueule et 0,50 m de profondeur.</p> <p>De part et d'autre du déversoir, le perré sera maçonné sur une largeur de 5 m car ces zones sont les plus sensibles à l'action érosive des eaux.</p>
Protection du talus aval	<p>Afin de lutter contre l'action érosive de l'eau, celle des animaux et du vent et de tenir compte des changements climatiques, le talus aval sera également protégé par une couche de perré sec constituée d'enrochements latéritiques ou granitiques de 0,25 m d'épaisseur soigneusement posés à la main sur une couche de</p>

	<p>pose de grave latéritique d'une épaisseur de 0,10 m.</p> <p>Un fossé drain sera aménagé au pied du talus pour collecter les eaux pluviales et les eaux d'infiltration en provenance du corps de la digue. Il sera revêtu en enrochements soigneusement rangés à la main. C'est un ouvrage triangulaire comme la butée de 1,50 m de largeur en gueule et 0,80 m de profondeur.</p>
<p>Protection de la crête de la digue</p>	<p>Il est nécessaire de protéger la crête pour lutter contre la dessiccation mais aussi pour assurer la circulation éventuelle d'engins. La protection sera constituée d'une couche de couronnement en matériaux graveleux latéritique compacté d'une épaisseur de 20 cm. Elle aura une pente transversale de 3% vers l'amont pour éviter les stagnations d'eau sur la crête et permettre leur ruissellement vers la retenue.</p> <p>Du coté aval, il sera aménagé un mur de crête en maçonnerie de moellons de 0,50 m x 0,50 m, ancré dans la digue de 0,50 m. Le mur de crête dépassera la cote du couronnement de 10 cm pour éviter des amorces d'érosion sur le talus aval.</p> <p>Du coté amont, en lieu et place du mur de crête, il sera aménagé un mur parapet en maçonnerie de moellons de 0,50 m x 0,50 m, ancré dans la digue de 0,50 m. Le mur sera équipé de barbicanes de 40 mm de diamètre pour le drainage de la crête de la digue vers le plan d'eau. La longueur totale du mur parapet est de 851 m.</p>

VI.3.1.2 Stabilité des talus de la Digue

- **Coefficients de BISHOP et de FELLENIUS**

La méthode de Bishop est plus précise que celle de Fellenius mais elle nécessite 3 à 4 fois plus de calculs (obligation d'opérer 3 à 4 itérations). Les coefficients de sécurité obtenus sont en général un peu plus élevés.

Pour alléger les calculs, on détermine d'abord le cercle le plus critique par la méthode de Fellenius et on vérifie que la valeur du coefficient de sécurité calculé par la méthode de Bishop est supérieure à celle calculée par la méthode Fellenius. Si c'est le cas, la stabilité est vérifiée et nous retenons le facteur le plus faible, celui de Fellenius.

Tableau 13 : Coefficients de BISHOP et de FELLENIUS

	F_S : FELLENIUS	F_G : BISHOP	F_S minimal
Retenue vide	1,23	1,65	1,2
Retenue pleine	1,33	2,04	1,2

▪ **Vérification sur Geo-slope**

○ **Retenue Vide**

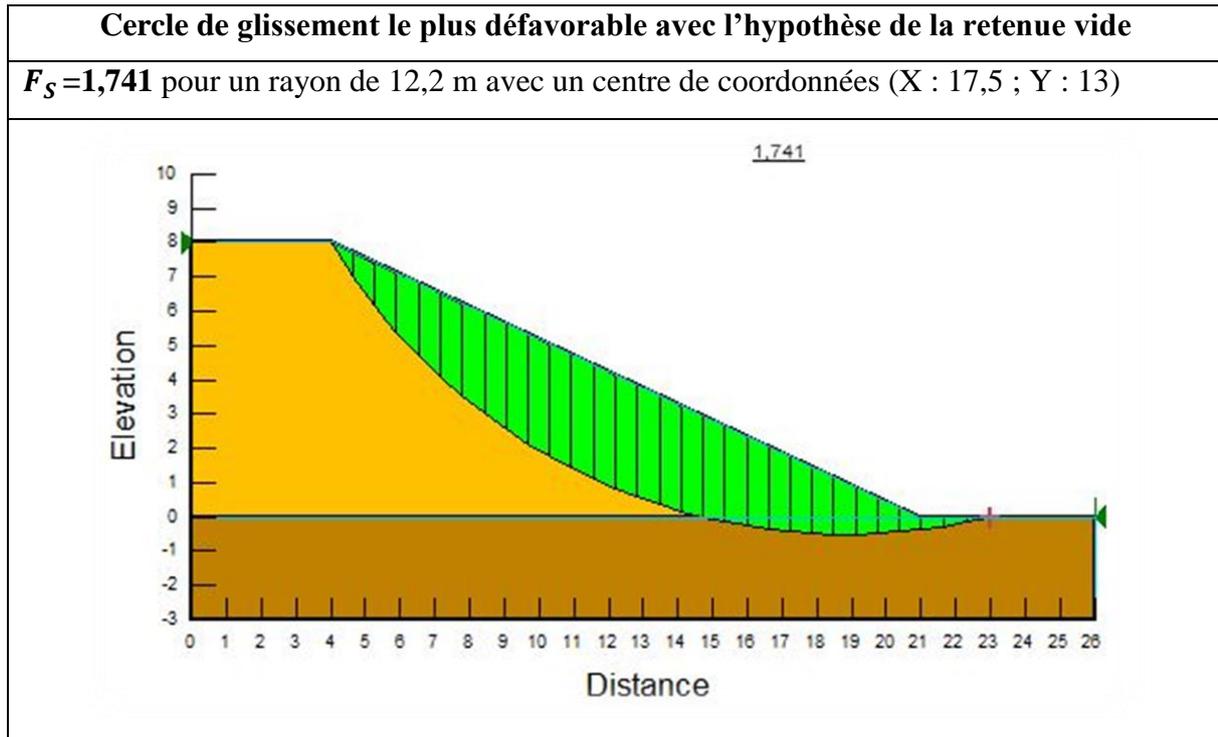


Figure 12 : Cercles de glissement des talus pour la retenue vide

○ **Retenue Pleine**

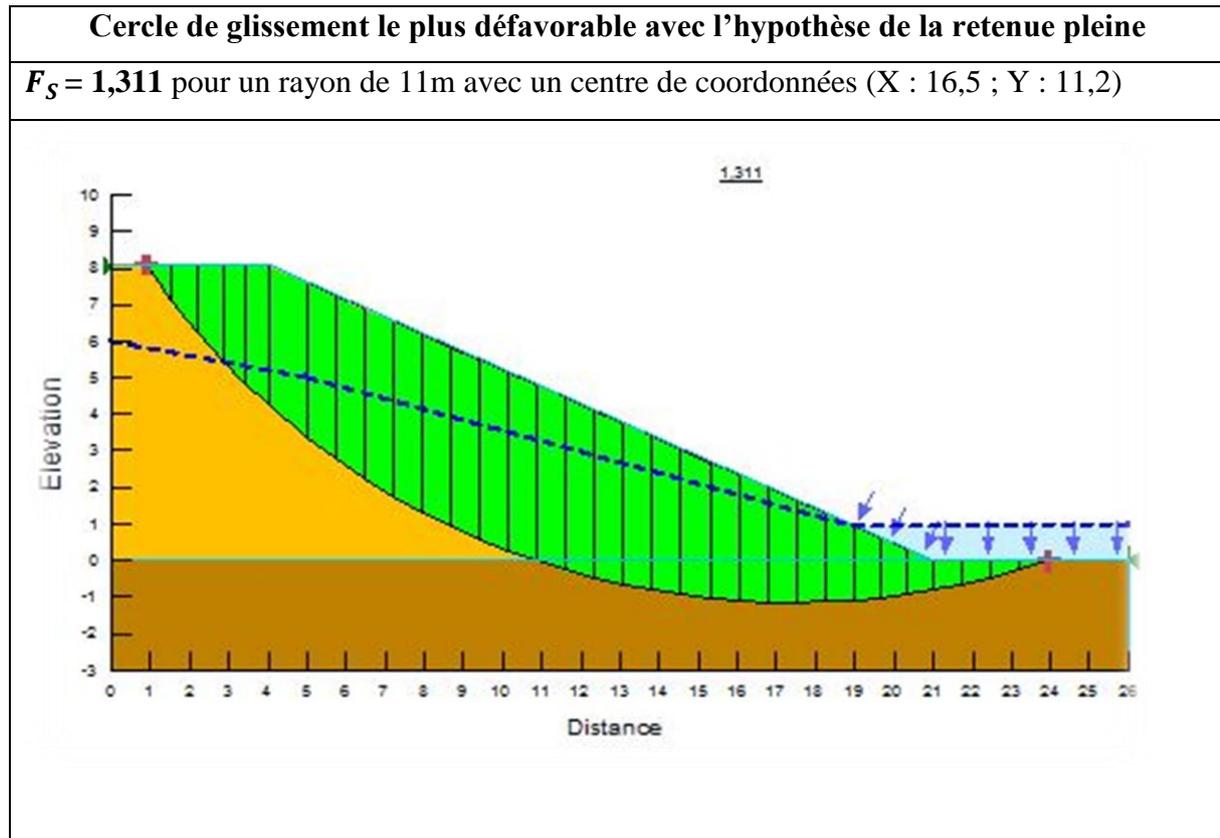


Figure 14 : Cercles de glissement des talus pour la retenue pleine

Toutes les deux méthodes aboutissent à un coefficient de sécurité supérieur à 1,2. Ainsi la stabilité des talus de la digue est vérifiée et nous gardons les pentes de **1V/2,5H** pour les talus amont et aval du barrage.

VI.3.1.3 Tranchée d'encrage

D'après les études géotechniques le matériau de fondation est de l'argile limoneuse dans le lit mineur et un mélange de gros gravier et de bloc en rives gauche et droite. Ainsi nous retenons comme coefficient de la règle de LANE $C = 3$ en lit mineur et $C = 2,5$ en rive gauche et droite.

Pour des raisons de facilité de mise en œuvre, la tranchée d'encrage sera de forme trapézoïdale avec une largeur au plafond de 3,5m et des pentes de talus de 1/1.

VI.3.2 Les Ouvrages Annexes

VI.3.2.1 Le Déversoir

Tableau 14 : Caractéristiques du déversoir

Déversoir			
Type de déversoir		Déversoir poids à Profil Trapézoïdale	Facilité de mise en œuvre et relativement abordable.
Position déversoir	-	Centrale	Pour restituer facilement l'eau dans le lit du cours d'eau.
Lame d'eau déversante	m	0,7	Cette valeur est acceptable pour un petit barrage
Longueur du seuil déversant	m	80	Cette longueur est obtenue avec la crue de projet.
Profondeur de la parafouille amont	m	2,5	Ces valeurs sont confortées par l'étude de stabilité du déversoir.
Profondeur de la parafouille aval	m	1,5	
Grande base de l'assise trapézoïdale	m	4	
Petite base de l'assise trapézoïdale	m	2	

VI.3.2.2 Stabilité du déversoir

Le tableau suivant présente les résultats de l'étude de la stabilité du déversoir poids pour le cas le **plus contraignant avec une lame d'eau déversante h = 0,7m**

Tableau 15 : Vérification de la stabilité du déversoir

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR
Stabilité au renversement		
Somme des moments renversants	kN.m	705,43
Somme des moments stabilisant	kN.m	1421,21
Coefficient de sécurité au renversement		2,17 > 1,5
Stabilité au glissement		
Résultante des forces horizontales	kN/ml	263,325

Résultante des forces verticales	kN/ml	619
Coefficient de sécurité au glissement		1,62 > 1,5
Règle du tiers central		
Excentricité	m	0,53
B/6	m	0,67 > 0,53
Stabilité au poinçonnement		
Capacité portant du sol	kN/m ²	279,82
Contrainte maximale imposée	kN/m ²	186,03
Coefficient de sécurité au poinçonnement		7,3 > 1,5
CONCLUSION : Toutes les stabilités au glissement, au renversement, au poinçonnement et la règle du tiers central ayant été vérifiées, alors nous pouvons conclure de la stabilité du déversoir.		

Le détail des calculs est joint en **Annexe V, page 79**.

VI.3.2.3 Bassin de dissipation et chenal d'évacuation

Les caractéristiques du bassin de dissipation et du chenal d'évacuation sont les suivantes :

Tableau 16 : Caractéristiques du Bassin de dissipation et du chenal d'évacuation

Bassin de Dissipation		
Hauteur du déversoir	m	6,5
Enfoncement du bassin, D	m	0,65
Débit de crue	m ³ /s	80,3
Débit unitaire	m ³ /s/ml	1,05
Lame d'eau déversante maximale	m	1,7
Hauteur de chute	m	7,15
Tirant d'eau avant ressaut	m	0,4
Vitesse d'eau à l'entrée du bassin	m/s	2,62
Nombre de Froude	Fr	1,31
1 < Fr < 1,7 et V = 2,62 m/s ; donc très faible. Le passage à une profondeur plus grande est graduel et ne se manifeste que par une agitation de surface.		
Bassin retenue	-	Un simple bétonnage du bassin en béton cyclopéen
Longueur de bétonnage du bassin	m	5

Longueur de protection du bassin en enrochement	m	10
Chenal d'évacuation		
Pente longitudinale	m/km	2,5
Pente des talus	H/V	1,8/1
Profondeur	m	1,5
Largeur en plafond	m	80
Longueur du chenal	m	50
Débit maximal	m ³ /s	80,3

Le détail des calculs est joint en **Annexe V, page 82**.

La coupe en travers type et la vue en plan de l'évacuateur de crue (déversoir + bassin de dissipation) sont joints respectivement en **Annexes XII et XIII**.

VI.3.2.4 Murs Bajoyers

Les bajoyers servent de jonction entre le déversoir et le remblai de la digue. Ils ont été dimensionnés comme un mur de soutènement à l'aide du logiciel Cype.

Tableau 17 : Caractéristiques géométriques des murs Bajoyers

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR
Hauteur maximale du bajoyer	m	8,2
Epaisseur du mur à la base bajoyer	m	0,75
Epaisseur crête du bajoyer	m	0,25
Epaisseur de la semelle	m	1,5
Largeur base du mur bajoyer	m	6,25
Hauteur de la bêche anti-renard	m	0,5
Epaisseur de la bêche anti-renard	m	1
Hauteur mur bajoyer au-dessus de la semelle	m	6,7

VI.3.2.5 Stabilité des murs Bajoyers

Le résultat des calculs de stabilité des murs bajoyers se présentent comme suit :

Tableau 18 : Vérification de la stabilité des murs Bajoyers

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR
Stabilité au renversement		
Somme des moments renversants	kN.m	383,38

Somme des moments stabilisants	kN.m	577,934
Coefficient de sécurité au renversement		1,6 > 1,5
Stabilité au glissement		
Résultante des forces horizontales	kN/ml	155,56
Résultante des forces verticales	kN/ml	236,392
Coefficient de sécurité au glissement		1,62 > 1,5
Règle du tiers central		
Excentricité	m	0,96
B/6	m	1,04 > 0,96
Après ces vérifications nous pouvons conclure à la stabilité du Bajoyer		

Le détail des calculs des murs bajoyers se trouve en **Annexe V, page 85** et le plan de ferrailage en **XV**.

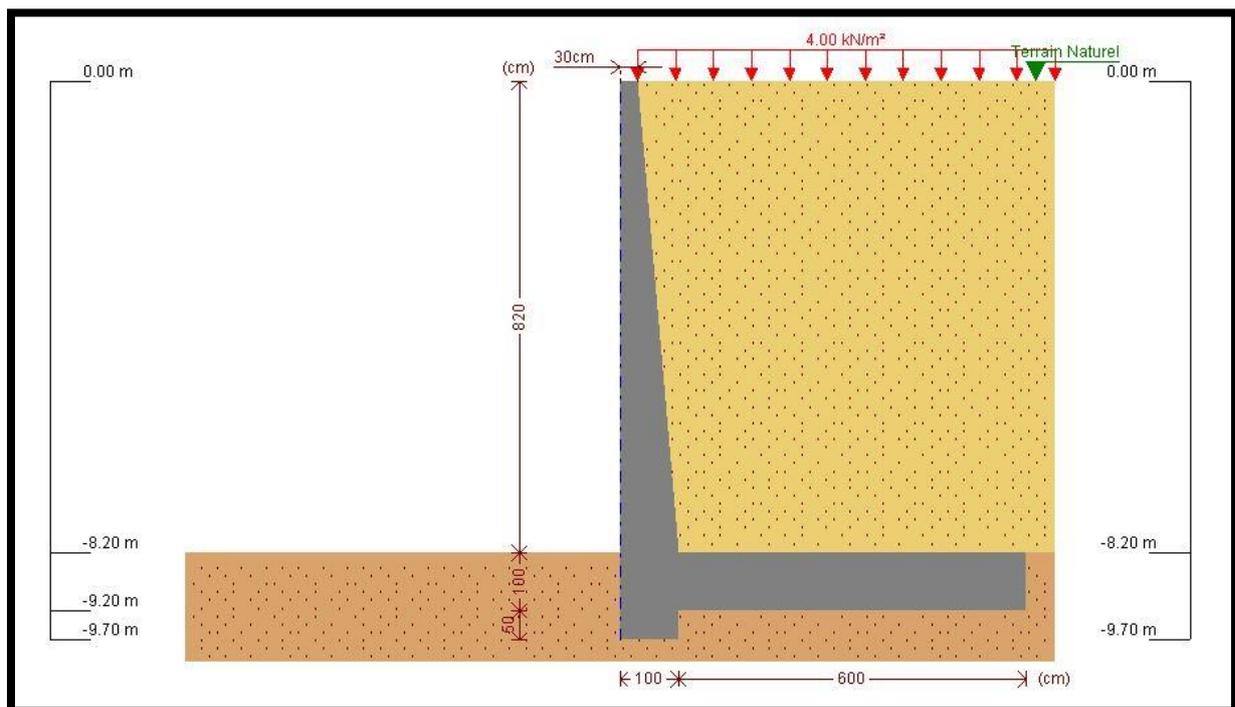


Figure 14 : Coupe transversale du mur bajoyer

VI.3.2.6 Le tapis amont étanche

Au regard des résultats des investigations géotechniques le long de l'axe présumé du barrage, il est jugé nécessaire de prévoir un tapis étanche au fond de la cuvette, dans la zone de hautes charges d'eau, notamment au droit du déversoir.

Tableau 19 : Caractéristiques du tapis amont

Matériau	Argile compactée (même matériau que celui du corps de la digue du barrage)
Longueur	60 m
Epaisseur	80 cm

VI.3.2.7 Diguettes de protection

Afin de drainer les eaux de déversement vers le talweg et empêcher l'érosion du pied de la digue, deux diguettes de protection seront construites de part et d'autre du déversoir.

Tableau 20 : Caractéristiques des diguettes de protection

Matériau	Argile compactée
Type	Homogène
Cote crête	257 m
Longueur	50,00 m
Hauteur des diguettes	1m
Largeur en crête	3,00 m
Pente talus amont/aval	1 H/1V
Protections talus amont	Perré maçonné
Protections talus aval	Revêtement latéritique
Protections crête	Revêtement latéritique

VI.3.2.8 Ouvrage de Prise et de vidange

Un ouvrage de prise sera réalisé et servira aussi bien pour l'irrigation future des terres situées en aval en rive gauche que pour la vidange de la retenue. Il est prévu en rive gauche. L'entrée de prise sera à la côte 259, m soit 3,5 m de charge d'eau au-dessus de la prise en début de campagne ; ce qui permet de conduire une double campagne. La sortie de prise sera calée à la côte 258,8 m en tenant compte des pertes de charges.

Une dérivation sera installée sur celle-ci et aboutira à des abreuvoirs aménagés spécialement pour le bétail.

Pour le dimensionnement, nous considérons le barrage au droit de la prise à un cas de vidange sous charge, assimilable au modèle que représente la vidange d'un réservoir simple.

Tableau 21 : Caractéristiques de l'Ouvrage de prise et de vidange

DÉSIGNATION	UNITÉ	VALEUR
Côte au PEN	m	262,5
Surface au PEN	m ²	620 000
Cote de l'ouvrage de Vidange	m	259,00
Pesanteur	m/s ²	9,81
Charge d'eau (PEN / Prise)	m	3,5
Temps de Vidange	jrs	31
Débit de Vidange	l/s	559
Nous considérons un temps de vidange de 31jours		

Le détail des calculs de l'ouvrage de prise est joint en **Annexe V, page 86**.

L'ouvrage de prise comprendra :

- Une conduite en fonte, de diamètre Ø 500 et de longueur $L = 51,5 \text{ m}$, traversant tout le corps de la digue et noyée dans un béton armé de $0,70 \text{ m}$ d'épaisseur et dosé à 350 kg/m^3 ;
- Deux écrans d'étanchéité anti-renards placés de part et d'autre de la tranchée pour limiter les infiltrations ;
- Un bac amont en béton armé protégé par une grille métallique pour la prise d'eau ;
- Un bac aval servant de bassin de réception et de tranquillisation équipé d'un robinet vanne de diamètre Ø 500.
- Une crépine.

Son diamètre est fixé pour assurer un débit suffisant pour l'exploitation en aval ou pour permettre une vidange de la retenue et aussi pour éviter l'obstruction de la conduite par les dépôts solides.

VII. CONCLUSIONS

Le présent projet porte sur les études techniques détaillées du barrage de Tombolo. Entrant dans le cadre précis du PNDES, **tranche 2017 volet eau et assainissement** ; pour la lutte contre l'insécurité alimentaire et l'amélioration des conditions de vie des populations en milieu rural initié par le gouvernement Burkinabé, il va permettre à court terme, l'essor socio-économique pour 31 entités y compris le village récepteur.

L'étude d'un barrage est faite d'un ensemble de choix qui concilient les possibilités qu'offre la nature, la viabilité de l'ouvrage et les moyens financiers. Pour ce faire, elle se base sur plusieurs disciplines telles que la topographie, l'hydrologie, la pédologie, la géotechnique, la sociologie, l'environnement. C'est dire donc que c'est le travail d'une équipe pluridisciplinaire. Grâce aux différentes recherches et aux collectes de données sur le terrain, nous concevons l'ouvrage qui nous semble le mieux adapté vu les conditions du site. Cela nous conduit à proposer une digue homogène en remblai argileux et un déversoir poids central de forme trapézoïdale en béton.

Notre étude a montré que l'ouvrage permet de stocker 1 488 653 de mètres cube. Cette capacité est suffisante pour satisfaire les besoins humains et pastoraux pendant 30 ans, puis assurer l'irrigation de 46 ha de riz en saison pluvieuse et 43 ha pour le maraichage en saison sèche.

Le coût des travaux de réalisation du barrage s'élève à huit cent soixante-six millions quatre cent sept mille trois cent vingt-neuf (**866 407 329**) francs CFA TTC soit **990 180** francs CFA le mètre linéaire.

A terme, ce projet nous a non seulement permis de mettre en application l'ensemble de nos connaissances en ingénierie mais aussi et surtout de faire face à un cas pratique.

VIII. RECOMMANDATION-PERSPECTIVES

La hauteur maximale du barrage étant de 8,2 m, il sera classé dans la catégorie des petits barrages. De ce fait, nous opterons pour un dispositif de sécurité, de surveillance et d'entretien assez léger.

En prévision de l'ensablement de la retenue, nous proposons un seuil de décantation en gabions sur les affluents qui alimentent la cuvette et un dispositif végétatif en amont pour délimiter la bande de servitude tout autour de la cuvette à un rayon de 100m.

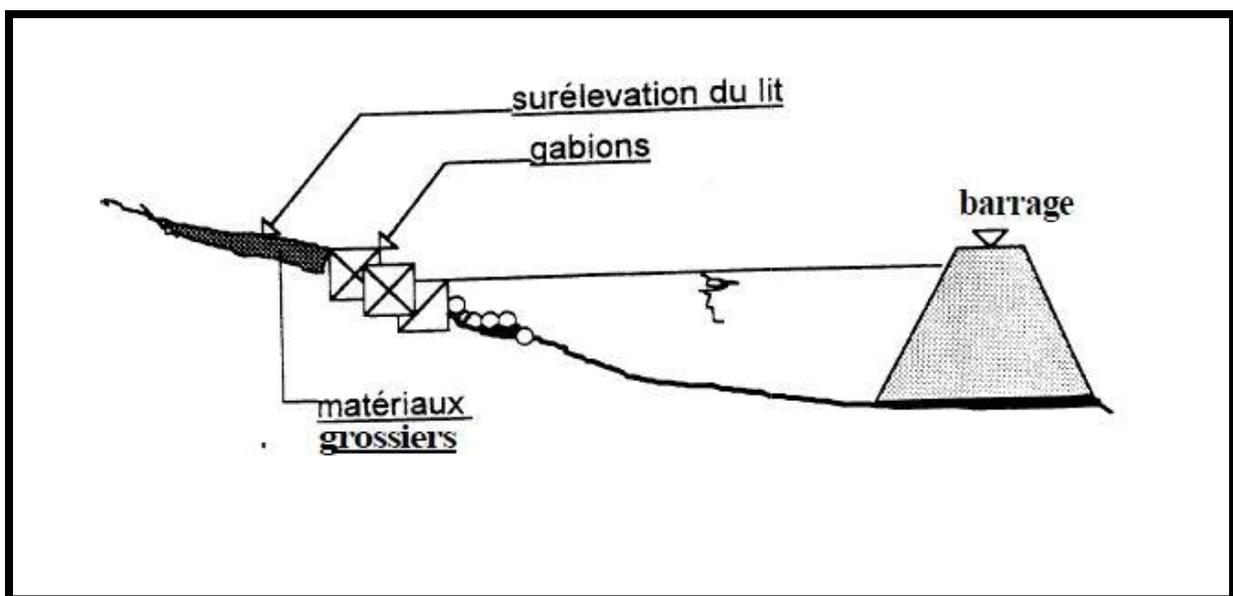


Figure 13 : Seuil de décantation en gabions

Pour la sécurité du barrage, il est prévu dans le corps de la digue un système de drainage (pour éviter les renards, etc.) constitué d'un tapis drain-filtres horizontal de 80 cm d'épaisseur dans les zones des plus hautes eaux.

Pour des raisons de maintenance, l'extérieur du barrage sera annuellement examiné. Tous les 10 ans, soit 3 phases pour la durée de vie souhaitée de l'ouvrage ; la retenue d'eau sera vidée pour permettre l'accès à la fois à la partie inférieure de l'ouvrage et aux équipements tels que la conduite, les vannes et les grilles de la prise d'eau pour procéder à une maintenance complète.

Pour le suivi du niveau de l'eau dans la retenue, il est prévu sur le talus amont une échelle limnimétrique de 9,00 m de longueur.

Les mesures de surveillance et d'entretien des barrages ont pour objectif essentiel, le maintien

de leur fonctionnalité. Les promoteurs et exploitants du barrage veilleront donc à constituer un comité local de l'eau (CLE) dont les activités consisteront :

- De façon générale, par la méthode de l'observation visuelle régulière, à repérer les défauts de fonctionnement ou les détériorations quelconques (fissures, inégalités de tassement, fuites, éboulements, érosion régressive, etc.) et à saisir les autorités régionales chargées de l'hydraulique au cas où il estimera que l'anomalie est préoccupante ;
- A amener les exploitants de la retenue, à aménager des diguettes antiérosives pour ralentir le phénomène de l'envasement ;
- A arracher les arbustes dès leur apparition sur la digue ;
- A remettre en place tout caillou déplacé ;
- A élaborer des règles de gestion du barrage.

Ce comité pourrait recevoir de la part des structures régionales chargées de l'hydraulique, une formation qui consistera d'une part à les informer plus amplement sur la panoplie de défauts ou de détériorations que peut connaître leur barrage et d'autre part, à leur apprendre les techniques sommaires de son entretien.

Aux vues du potentielle agricole exploitable en terre à l'aval, ainsi que les solutions à partir de la retenue : riziculture en semi-pluvial et maraichage en contre saison, nous recommandons à l'état d'envisager au plus tôt un avant-projet détaillé pour proposer un dimensionnement final du réseau d'irrigation à l'aval de la retenue.

IX. BIBLIOGRAPHIE

- ❖ ALONSO, BECUE, BOLLE, BRODIN (2000). *Les types de barrages en remblai, in : Barrages En Remblai.*
- ❖ BETTON (1988). *La maîtrise des crues dans les bas-fonds.*
- ❖ Banque Mondiale (2008). *Agriculture au service du développement. Ouagadougou.*
- ❖ COMPAORE (1996). *Cours de barrage, EIER.*
- ❖ DEGOUTTE (1997). *PETITS BARRAGE : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Cemagref.*
- ❖ DURAND (1996). *Cour de Petits barrages pour l'équipement rural en Afrique.*
- ❖ DURAND, ROYET, MERIAUX (1998). *Techniques de petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale.*
- ❖ DIENG (2007). *Cours d'hydrogéologie et ouvrages de captage.*
- ❖ DGIH (2015). *Situation des Barrages au Burkina Faso.*
- ❖ FAO 54. (1996). *Crues et apports : manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versant non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche.*
- ❖ LO (2016). *Cour de barrage1.*
- ❖ INSD-MEF (2010). *Annuaire statistique de l'environnement.*
- ❖ KARAMBIRI (2005). *Cour du cycle hydrologique du bassin versant.*
- ❖ KARAMBIRI, GUEYE (2006). *Cour de barrage.*
- ❖ PILOT, CARTIER (1964). *Digues et barrages en terre de faible hauteur.*
- ❖ PCD Kelbo (2009). *Plan communal de la commune de Kelbo.*
- ❖ PUECH et CHABI-GONNI du CIEH (1983). *Prédétermination des crues de fréquence décennale dans les régions sahéliennes et tropicales sèches.*
- ❖ ROYET, (1994). *La surveillance et l'entretien des petits barrages : guide pratique. CEMAGREF. : ISBN 978-2-85362-383-4*

X. ANNEXES

Annexe I : Etude d'Impact Environnemental et Social

Tableau 22 : Localisation de l'entité impactée par le projet

N°	Village / Secteur	Commune	Province	Région	Distance au site en km
1	ADONGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	6
2	BADONGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	30
3	BANON	Pô	Nahouri	Centre Sud	26
4	BOUROU	Pô	Nahouri	Centre Sud	20
5	DAKOLA	Pô	Nahouri	Centre Sud	11
6	DONGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	26
7	FANIAN	Pô	Nahouri	Centre Sud	25
8	GHO	Pô	Nahouri	Centre Sud	28
9	GOUGOGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	25
10	KAPONI	Pô	Nahouri	Centre Sud	12
11	LANGOUEROU	Pô	Nahouri	Centre Sud	12
12	MANTIONGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	25
13	NAHOURI	Pô	Nahouri	Centre Sud	9
14	NAKOUM	Pô	Nahouri	Centre Sud	17
15	PIGHYRI	Pô	Nahouri	Centre Sud	15
16	POUNKOUYAN	Pô	Nahouri	Centre Sud	12
17	SAPINA	Pô	Nahouri	Centre Sud	10
18	SONGO I	Pô	Nahouri	Centre Sud	3
19	SONGO II	Pô	Nahouri	Centre Sud	4
20	TAMBOLO	Pô	Nahouri	Centre Sud	0
21	TAMOANA	Pô	Nahouri	Centre Sud	1
22	TIAKANE	Pô	Nahouri	Centre Sud	9
23	TOREM	Pô	Nahouri	Centre Sud	10
24	YAGO	Pô	Nahouri	Centre Sud	16
25	YARO	Pô	Nahouri	Centre Sud	30
26	SECTEUR 1	Pô	Nahouri	Centre Sud	5
27	SECTEUR 2	Pô	Nahouri	Centre Sud	4
28	SECTEUR 3	Pô	Nahouri	Centre Sud	4
29	SECTEUR 4	Pô	Nahouri	Centre Sud	3
30	SECTEUR 5	Pô	Nahouri	Centre Sud	5
31	SECTEUR 6	Pô	Nahouri	Centre Sud	7
Total	31 entités	1 commune	1 province	1 région	Rayon maximal 30 km

Source : Enquêtes village Tambolo, Bureaux d'Etudes AC3E / GERTEC, Août 2017.

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

Tableau 23 : Synthèse des impacts du projet sur l'environnement

	Recepteurs	Composante	Impacts	Paramètre de caractérisation							Evaluation
				Nature	Interaction	Ampleur	Portée	Durée	Occurrence	Réversibilité	
Synthèse des impacts en phase de construction	Milieu Physique	Air	Pollution de l'air	Négatif	Directe	Moyenne	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Moyenne
		Climat sonore	Modification du climat sonore	Négatif	Directe	Moyenne	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Moyenne
		Sols	Pollution des sols	Négatif	Directe	Moyenne	Locale	Moyen Terme	Certaine	Réversible	Moyenne
		Eau de Surface	Risque de pollution des eaux de surface	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Temporaire	Probable	Réversible	Faible
		Eau Souterraine	Risque de pollution des eaux souterraines	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Moyen terme	Probable	Réversible	Faible
	Milieu Biologique	Flore	Dégradation Végétation brousse	Négatif	Directe	Importante	Locale	Permanente	Certaine	Irréversible	Importante
			Dégradation végétation sites d'emprunts	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Long terme	Certaine	Réversible	Faible
		Faune	Fuite/dégradation des gîtes	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Durable	Certaine	Irréversible	Mineure
			Recrudescence braconnage	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Mineure
	Milieu Humain	Santé	Risques d'affections respiratoires	Négatif	Directe	Moyenne	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Moyenne
			Risques de propagation IST/SIDA	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Long terme	Probable	Réversible	Mineure
		Emploi	Creation d'emploi	Positif	Directe	Moyenne	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Moyenne
		Sécurité routière	Risques d'accidents	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Temporaire	Certaine	Réversible	Mineure
		Vie communautaire	Risques de perturbation des coutumes	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Temporaire	Probable	Réversible	Mineure
	Habitat	Déplacement de ménages	Négatif	Directe	Moyenne	Locale	Permanente	Certaine	Irréversible	Moyenne	
Synthèse des impacts en phase d'exploitation et d'entretien.	Milieu Physique	Sols	Pollution des sols	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Durable	Certaine	Irréversible	Mineure
		Eau de Surface	Risque de pollution des eaux de surface	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Moyen terme	Probable	Irréversible	Mineure
		Eau Souterraine	Risque de pollution des eaux souterraines	Négatif	Indirecte	Mineure	Locale	Moyen terme	probable	Réversible	Mineure
	Milieu Biologique	Flore	Dégradation végétation sites d'emprunts	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Moyen terme	Certaine	Irréversible	Mineure
		Faune	Fuite/dégradation des gîtes	Négatif	Directe	Mineure	Locale	Durable	Certaine	Irréversible	Mineure
	Milieu Humain	Emploi	Creation d'emploi	Positif	Indirecte	Moyenne	Locale	Permanent	Certaine	Réversible	Moyenne
		Développement local	Dynamisation du développement local	Positif	Indirecte	Majeure	Locale	Permanent	Certaine	Réversible	Majeure
			Augmentation globale des revenus	Positif	Indirecte	Majeure	Locale	Permanent	Certaine	Réversible	Majeure
			Amélioration des conditions de vie	Positif	Indirecte	Majeure	Locale	Permanent	Certaine	Réversible	Majeure

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

Tableau 24 : Plan de Gestion Environnemental et Social

Impacts Identifiés	Actions Environnementales	Objectifs visés	Indicateurs de suivi	Lieu de mise en œuvre	Acteurs	Chronogramme	
						An1	An2
Dégradation de la qualité de l'air	Maintenance des engins, limitation de la vitesse	Minimiser les pollutions de l'air	Respect des clauses du chantier	Sur le chantier et les sites d'agrégats	Entreprise, AC3E et la DREA	X	
Pollutions des eaux et les risques d'accidents	Maintenance des engins, limitation de la vitesse	Minimiser les pollutions des eaux et limiter les risques d'accident	Respect des clauses du chantier	Sur le chantier et les sites d'agrégats	Entreprise, AC3E et DREA	X	
Risques sanitaires	Limitation de la vitesse et sensibilisations	Limiter les risques sanitaires	Respect des clauses du chantier et population touchée	Tambolo	Entreprise, AC3E, Comité de gestion, DRS et DREA du Centre Sud	X	
Dégradation physique des sols	Remise en état des lieux après les travaux,	Restaurer le capital productif du milieu	Réalisation de la remise en état des lieux	Site du barrage et d'emprunts	Entreprise, AC3E, comité de gestion, DPE du Nahouri et la DREA du Centre Sud	X	
Dégradation de la végétation	Reboisements compensatoires	Restaurer le couvert végétal	Superficie reboisée, nombre de plants mis en terre	Tambolo	Entreprise, AC3E, Comité de gestion, DPE du Nahouri et la DREA du Centre Sud	X	
Risque de l'accélération de la dégradation des berges du barrage	Protection des berges par plantation d'arbres	Protéger le barrage créé	Nombre de plants mis en terre	Berges du barrage	Population, Comité de gestion, DPE du Nahouri et la DREA	X	
Risques de conflits entre agriculteurs et éleveurs	Sensibilisations	Minimiser les risques de conflits entre agriculteurs et éleveurs	Nombre de producteurs sensibilisés	Tambolo	Comité de gestion, DPRA et DPA du Nahouri	X	
Insuffisance dans la gestion du barrage	Mise en place d'un comité de gestion	Améliorer les acquis du barrage	existence d'un comité de gestion du barrage	Tambolo	DREA du Centre Sud et le comité de Gestion	X	
	Appui à l'élaboration d'un règlement intérieur	Améliorer les compétences en gestion du plan d'eau	existence d'un règlement intérieur pour la gestion de l'infrastructure	Tambolo	DREA du Centre Sud et le Comité de gestion	X	
	Formation en techniques d'entretien des ouvrages hydrauliques	Renforcement des compétences en entretien des ouvrages	Nombre de producteurs formés	Tambolo	DREA du Centre Sud et le Comité de gestion		
	sensibilisation sur la gestion des ressources naturelles	Améliorer les connaissances en gestion des RN	Nombre de producteurs sensibilisés sur la gestion des ressources naturelles	Tambolo	DPE et la DREA du Centre Sud	X	
	Sensibilisation sur les maladies hydriques et les IST/SIDA	Améliorer les connaissances en lutte contre les IST/SIDA	nombre de producteurs sensibilisés sur les maladies hydriques et les IST/SIDA	Tambolo	DPS du Nahouri et la DREA du Centre Sud	X	

Tableau 25 : Evaluation du coût du PGES

Mesures	Unités	Quantité	PU (FCFA)	Montants (FCFA)
1. Mesures d'atténuation et de bonification				
Reboisement compensatoire	Plants	2 500	1 000	2 500 000
Animation/sensibilisation sur les maladies hydriques	Séances	1	500 000	500 000
Animation sensibilisation sur la gestion des ressources naturelles	Séances	2	500 000	1 000 000
Délimitation des berges du barrage avec des balises	Km	4	300 000	1 200 000
Couloir d'accès au barrage	Km	38	300 000	11 400 000
Sous-total 1				16 600 000
2. Appui à l'organisation des producteurs				
Mise en place du comité de Gestion de la retenue d'eau	Séances	2	300 000	600 000
Appui à l'élaboration des textes réglementaires de la gestion de l'infrastructure		2	300 000	600 000
Appui à la maîtrise des textes régissant la vie des structures d'éleveurs au Burkina Faso	Séances	2	300 000	600 000
Sous-total 2				1 800 000
3. Formation techniques				
Techniques d'entretien des Ouvrages hydrauliques	Session	1	300 000	300 000
Sous-total 3				300 000
4. Mesures d'accompagnement				
Réalisation d'un forage	Forage	1	8 000 000	8 000 000
Sous-total 4				8 000 000
5. Suivi et surveillance/Supervision BUNEE				

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

Surveillance/contrôle des travaux	Mois	4	500 000	2 000 000
Suivi des plantations d'arbres	Campagne	2	600 000	1 200 000
Supervision BUNEE	Missions	3	1 000 000	3 000 000
Sous-total 5				6 200 000
6. Dédommagements				
Champ, végétations et maison dans la cuvette			Variable	
Sous-Total 6				42 596 500
TOTAL GENERAL				75 496 500

Annexe II : Données météorologiques

Tableau 26 : Données pluviométriques mensuelles (mm) de la station de Pô de 1942 à 2016.

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
1942	0,0	0,0	0,0	49,7	115,2	112,4	87,2	272,7	167,3	27,1	0,0	0,0	831,6
1943	0,0	0,0	0,0	49,7	115,2	131,0	107,0	215,0	223,0	90,0	3,0	2,0	935,9
1944	0,0	0,0	3,0	25,0	61,0	223,0	114,0	189,0	180,0	79,0	0,0	11,0	885,0
1945	0,0	0,0	0,0	12,0	100,0	151,0	192,0	361,0	253,0	54,0	0,0	0,0	1 123,0
1946	0,0	0,0	6,0	42,0	180,5	113,5	176,0	300,0	215,5	32,0	0,0	0,0	1 065,5
1947	0,0	4,0	0,0	18,0	65,5	166,0	163,5	328,0	167,0	57,0	5,5	4,0	978,5
1948	0,0	0,0	3,0	75,0	162,0	63,0	153,0	304,0	144,5	37,0	0,0	0,0	941,5
1949	0,0	0,0	3,5	47,3	110,5	153,2	143,6	282,7	226,0	37,0	5,0	0,0	1 008,8
1950	0,0	14,0	0,0	42,0	101,0	125,0	236,0	568,0	309,0	34,0	0,0	0,0	1 429,0
1951	0,0	0,0	2,7	6,7	98,8	130,5	193,6	407,1	254,7	143,7	35,7	0,0	1 273,5
1952	0,0	0,0	21,8	8,0	135,0	137,9	203,9	238,7	236,3	84,0	0,0	0,0	1 065,6
1953	0,0	7,2	0,0	31,3	49,3	211,0	229,2	252,0	189,6	0,0	0,0	0,0	969,6
1954	0,0	0,0	63,5	29,9	133,8	95,6	94,3	315,8	139,9	61,1	11,0	0,0	944,9
1955	0,0	25,5	48,8	35,2	28,4	120,1	244,1	109,5	278,5	11,6	0,0	0,0	901,7
1956	0,0	3,0	3,0	91,4	34,4	172,5	157,4	290,0	132,5	43,6	0,0	0,0	927,8
1957	0,0	0,0	7,4	49,4	171,7	164,4	228,7	308,4	271,1	70,0	26,0	0,0	1 297,1
1958	0,0	0,0	11,0	84,3	209,4	158,5	100,2	286,1	154,0	35,0	0,0	0,0	1 038,5
1959	0,0	0,0	6,0	33,0	103,0	55,0	74,0	289,0	95,5	13,5	0,0	0,0	669,0
1960	0,0	0,0	25,0	119,0	45,0	49,8	109,9	217,2	263,2	38,0	0,0	0,0	867,1
1961	0,0	0,0	17,5	112,0	60,0	168,1	237,5	142,0	205,8	9,3	0,0	0,0	952,2
1962	0,0	0,0	0,0	102,4	101,2	218,4	169,4	267,0	239,0	75,3	27,7	0,0	1 200,4
1963	0,0	9,8	0,0	68,3	74,5	134,8	249,7	400,9	127,6	81,0	0,0	0,0	1 146,6
1964	0,0	0,0	8,0	4,8	48,8	198,1	223,4	182,3	226,5	12,7	0,0	22,3	926,9
1965	13,1	0,0	0,0	39,1	25,5	86,1	290,1	273,6	199,9	32,5	0,0	0,0	959,9
1966	0,0	0,0	17,4	92,3	65,8	143,7	159,6	244,2	100,3	56,0	17,6	0,0	896,9
1967	0,0	13,5	21,7	11,9	47,3	110,8	139,1	308,9	214,0	7,0	0,0	2,5	876,7
1968	0,0	64,0	46,8	48,9	166,1	279,6	199,1	178,0	106,1	32,5	0,0	6,5	1 127,6
1969	0,0	0,0	50,7	17,3	119,6	121,5	142,8	359,2	247,2	70,6	23,2	0,0	1 152,1
1970	0,0	0,0	6,3	10,3	29,1	78,0	233,8	304,3	178,2	28,5	0,0	0,0	868,5
1971	0,0	0,0	28,1	20,8	73,2	128,0	95,7	336,2	204,9	17,5	0,0	26,7	931,1

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

1972	0,0	0,0	3,0	53,8	90,8	222,3	200,6	122,5	184,8	61,1	0,0	0,0	938,9
1973	0,0	2,0	9,1	47,8	76,1	95,3	258,2	273,5	141,6	38,8	0,0	0,0	942,4
1974	0,0	0,0	31,2	23,3	35,5	59,9	227,5	225,2	141,9	54,7	0,0	0,0	799,2
1975	0,0	0,0	0,0	4,2	121,8	75,8	256,3	183,7	229,6	12,2	0,0	0,0	883,6
1976	13,5	0,0	1,0	11,3	131,4	76,6	148,9	86,8	102,0	176,1	0,0	0,0	747,6
1977	0,0	0,0	15,2	0,2	73,7	59,7	74,9	155,8	93,3	30,5	0,0	0,0	503,3
1978	0,0	0,0	39,0	138,8	119,0	**	157,7	158,2	124,2	64,4	0,0	0,0	801,3
1979	0,0	0,0	3,9	18,3	123,0	120,7	146,1	181,5	197,4	20,7	12,4	0,0	824,0
1980	0,0	0,0	0,0	57,3	50,2	97,2	111,3	319,0	81,9	66,4	0,0	0,0	783,3
1981	0,0	0,0	0,0	0,0	76,0	96,1	155,0	168,0	48,2	3,1	0,0	0,0	546,4
1982	0,0	0,4	30,9	61,5	128,5	124,3	137,5	238,4	74,1	109,7	9,1	0,0	914,4
1983	0,0	5,0	0,0	2,6	117,5	86,3	146,7	212,2	146,1	0,0	0,0	0,0	716,4
1984	0,0	0,0	27,9	98,2	106,2	51,5	98,3	171,3	161,6	33,0	27,4	0,0	775,4
1985	0,0	0,0	1,2	1,8	40,1	143,1	206,1	241,1	155,7	6,6	0,0	0,0	795,7
1986	0,0	0,0	12,6	44,8	64,2	107,3	274,0	170,8	366,9	45,9	6,3	0,0	1 092,8
1987	0,0	0,0	11,9	8,1	45,4	187,5	183,6	286,3	139,5	31,6	0,0	0,0	893,9
1988	0,0	0,0	2,2	65,1	37,9	176,0	158,6	244,6	131,0	21,0	13,9	0,0	850,3
1989	0,0	0,0	36,7	4,3	22,7	148,3	261,7	383,5	191,8	52,7	0,0	40,0	1 141,7
1990	0,0	0,0	0,0	53,5	124,0	33,0	229,2	161,2	93,1	22,1	17,7	23,6	757,4
1991	0,0	2,3	114,1	43,8	174,6	160,9	142,5	370,4	88,1	184,3	0,0	0,0	1 281,0
1992	0,0	0,0	0,2	69,7	113,7	108,9	172,4	221,9	148,2	48,5	10,8	0,0	894,3
1993	0,0	0,0	22,4	24,2	68,4	251,5	193,9	292,3	116,0	30,2	3,7	0,0	1 002,6
1994	0,0	0,0	23,3	54,5	185,4	44,2	306,8	439,5	138,1	76,6	0,0	0,0	1 268,4
1995	0,0	0,0	8,3	60,1	36,4	178,5	153,6	320,8	117,7	32,2	0,2	16,6	924,4
1996	0,0	0,0	8,1	15,2	111,1	306,9	115,8	363,6	215,0	17,3	0,0	0,0	1 153,0
1997	0,0	0,0	2,1	52,1	101,7	115,0	112,0	165,6	212,2	102,8	0,0	0,0	863,5
1998		9,0		87,9	138,5	121,9	161,9	217,3	272,3	59,6			1 068,4
1999			0,1	75,7	165,9	76,1	391,4	318,3	193,8	68,8			1 290,1
2000	0,1			52,1	73,5	191,7	120,3	224,7	143,9	55,8			862,1
2001				17,1	48,2	125,2	145,1	236,4	113,0	43,1			728,1
2002				62,9	73,2	111,6	201,9	214,0	148,6	36,6	4,1		852,9
2003		2,2	56,6	43,2	87,0	169,9	181,4	326,1	269,0	68,3	2,5		1 206,2
2004			10,3	43,0	48,2	196,9	0,0	275,9	130,8	24,2			729,3
2005		62,9		37,1	120,0	162,5	206,1	195,6	237,7	55,7			1 077,6

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

2006		1,3		80,0	56,5	194,4	192,1	209,4	306,7	52,5			1 092,9
2007				102,1	77,4	120,9	305,9	463,0	156,1	7,5			1 232,9
2008			5,4	61,1	37,3	73,5	252,9	350,6	133,0	68,9			982,7
2009		1,5	0,1	17,4	119,3	194,8	155,6	336,0	216,7	35,7			1 077,1
2010				37,0	205,5	175,8	157,0	384,9	177,2	38,7			1 176,1
2011													0,0
2012		1,2		87,0	50,0	200,0	192,1	1 027,0	316,7	58,5			1 009,0
2013				98,0	58,0	130,0	295,9	956,7	166,1	17,5			956,7
2014			5,1	75,0	85,0	72,5	232,9	951,0	153,0	78,9			941,0
2015		1,4	0,8	105,0	125,0	190,8	145,6	946,4	226,7	45,7			936,4
2016				95,0	130,0	172,2	167,0	1 227,3	167,2	48,7			1 217,3

Tableau 27 : Pluviométriques Maximales Journalière de la station de Pô de 1942-2016

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	
1942				24,0	50,0	42,4	24,3	48,0	59,0	18,5			59,0
1943						34,0	56,0	57,0	32,0	19,0	3,0	2,0	57,0
1944			3,0	25,0	43,0	56,0	32,0	69,0	70,0	38,0		3,0	70,0
1945				7,0	39,0	40,0	59,0	60,0	29,0	39,0			60,0
1946			6,0	39,0	66,0	32,0	71,0	100,0	67,5	10,0			100,0
1947		4,0		7,0	37,0	59,0	39,0	85,0	27,5	29,0	5,5	4,0	85,0
1948			3,0	25,0	63,0	30,0	45,0	53,0	82,0	19,0			63,0
1949			3,5	22,3	64,0	39,0	40,5	67,0	59,0	21,0	5,0		82,0
1950		14,0		37,0	28,0	28,0	100,0	139,0	32,5	16,0			139,0
1951			2,7	3,0	45,3	40,0	33,0	72,0	57,5	37,3	22,0		72,0
1952			19,2	8,0	33,5	40,7	48,0	37,6	65,1	22,0			57,5
1953		7,2		22,6	22,7	59,3	92,2	50,7	41,0				92,2
1954			56,8	16,5	41,0	23,5	47,0	67,5	62,3	14,0	11,0		67,5
1955		19,3	32,2	27,8	11,7	37,8	44,7	28,7	28,0	6,2			62,3
1956		3,0	3,0	46,5	13,0	39,3	86,0	90,7	45,0	30,4			90,7
1957			7,4	18,0	42,0	34,5	50,0	37,5	26,5	24,4	26,0		50,0
1958			7,3	33,5	65,5	33,5	45,0	63,0	29,0	12,5			65,5
1959			6,0	33,0	41,0	34,0	35,0	47,0	57,0	13,5			47,0
1960			11,0	55,0	34,0	13,0	26,0	68,2	58,0	19,0			68,2

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

1961			12,0	35,5	25,5	43,0	75,0	31,5	58,0	5,0			75,0
1962				35,8	40,6	31,8	67,7	46,7	28,3	49,2	26,3		67,7
1963		7,4		34,9	28,0	36,8	37,9	59,8	60,3	18,3			59,8
1964			8,0	4,1	15,8	45,5	82,1	32,3	33,1	3,1		14,0	82,1
1965	10,5			31,0	18,3	36,1	121,7	47,2	21,5	16,1			121,7
1966			17,4	29,7	28,7	28,6	46,5	49,2	30,8	19,8	14,7		49,2
1967		13,5	20,4	4,3	11,4	34,2	27,6	46,4	32,5	4,3		2,5	46,4
1968		59,2	46,8	19,0	47,5	52,6	39,6	43,0	46,6	24,0		6,5	59,2
1969			49,2	8,5	28,0	29,7	30,5	59,8	35,0	28,4	19,2		59,8
1970			6,3	5,9	14,0	25,7	32,3	53,6	35,4	17,0			53,6
1971			17,0	11,3	29,0	35,5	24,3	55,0	46,7	16,0		26,7	55,0
1972			2,0	42,3	37,3	72,8	36,8	33,4	51,0	21,0			72,8
1973		2,0	7,1	25,2	31,0	19,5	114,5	43,5		24,3			114,5
1974			31,2	20,5	16,0	16,2	54,7	115,8	32,6	21,5			115,8
1975				2,0	60,6	24,5	36,8	73,2	70,6	8,2			73,2
1976			1,0	5,2	59,3	23,5	36,4	24,9	28,2	52,5			59,2
1977				0,2	34,1	26,0	33,4	50,0	25,5	30,5			50,0
1978								48,6	13,0				
1979			3,9	11,4	50,9	26,5	39,8	39,0	49,5	19,6	7,3		50,9
1980				36,4	19,8	23,4	36,2	56,5	27,9	33,5			56,5
1981					37,9	35,6	30,0	37,8	15,3	3,1			37,9
1982		0,4	12,3	18,9	41,4	33,5	40,9	52,2	15,3	37,6	6,8		52,2
1983		4,5		1,6	46,6	31,1	38,8	49,0	30,4				49,0
1984			17,9	54,6	41,6	14,2	23,9	27,4	70,2	16,2	20,8		70,2
1985			1,2	1,8	15,3	28,7	40,0	54,5	18,9	6,5			54,5
1986			12,1	28,3	41,2	42,6	66,4	30,0	58,6	23,8	6,0		66,4
1987			11,6	8,1	27,9	43,2	35,9	43,8	30,2	15,9			43,8
1988			1,9	32,2	28,6	48,6	45,8	51,9	42,1	21,0	8,3		51,9
1989			18,7	3,5	9,8	40,0	100,4	80,9	30,8	25,1		36,4	100,4
1990				38,2	40,0	13,1	54,4	34,4	24,3	11,3	17,4	12,8	54,4
1991		2,3	91,0	17,9	49,6	40,1	33,8	89,1	53,0	41,9			91,0
1992			0,2	67,0	40,0	51,2	53,0	41,1	44,1	41,1	4,5		67,0
1993			18,8	20,8	59,7	71,7	37,9	58,4	29,3	12,6	3,7		71,7
1994			8,5	38,9	44,3	18,5	118,2	96,7	45,7	17,6			118,2
1995			7,5	47,6	16,0	60,4	31,9	72,8	28,9	15,1	0,2	16,6	72,8

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

1996			8,1	9,1	34,8	62,5	32,7	78,0	44,0	6,6			78,0
1997			1,5	24,4	47,5	31,6	30,7	66,4	70,8	33,3			70,8
1998		9,0		80,4	44,1	59,0	31,6	56,3	92,5	24,7			92,5
1999			0,1	28,5	77,6	21,7	72,3	43,5	26,4	20,9			77,6
2000	0,1			39,6	19,5	48,2	31,7	40,4	28,8	41,0			48,2
2001				13,0	25,7	43,1	46,3	65,1	34,9	23,8			65,1
2002				44,6	25,2	41,4	44,9	48,8	46,6	18,5	3,0		48,8
2003		1,1	54,5	19,2	23,8	31,3	50,4	63,5	61,4	17,1	2,3		63,5
2004			9,3	15,3	19,1	34,8	0,0	51,9	42,0	20,6			51,9
2005		62,9		12,7	35,1	43,8	71,6	32,6	48,4	29,2			71,6
2006		1,3		36,1	34,7	74,9	55,5	73,8	93,8	13,3			93,8
2007				29,8	46,0	38,4	66,2	53,3	69,0	2,2			69,0
2008			5,1	44,5	19,0	16,4	54,9	56,4	42,8	33,4			56,4
2009		1,5	0,1	12,5	41,4	48,2	46,4	47,3	46,8	14,3			48,2
2010				31,4	53,9	82,0	38,8	62,7	43,4	18,1			82,0
2011													0,0
2012		65,9		13,7	38,1	53,8	72,6	85,9	45,4	29,2			85,9
2013		4,3		46,1	32,7	74,9	65,5	81,3	73,8	13,3			81,3
2014				39,8	48,0	48,4	66,2	68,9	59,0	2,2			68,9
2015			10,1	54,5	25,0	36,4	64,9	78,2	41,8	30,4			78,2
2016			5,0	60,0	35,0	60,0	90,0	121,7	105,0	60,0			121,7

Annexe III. Etudes Hydrologiques

Tableau 28: Caractéristiques du bassin versant de Tombolo

Caractéristiques Physiques				
Périmètre		P =	33,59	km
Superficie		S =	26,88	km ²
Longueur totale des cours d'eau		Lte =	46,97	km
Pente transversale		It =	9,02	m/k m
Indice de compacité de Gravelius	$Ic = 0,282 \times P/S^{1/2}$	Ic =	1,83	
Longueur du rectangle équivalent	$Leq = S^{1/2} \times (Ic / 1,128) \times (1 + (1 - (1.128/Ic)^2)^{0,5})$	Leq =	15	km
Largeur du rectangle équivalent	$leq = S/Leq$	leq =	1,79	km
Longueur du thalweg		Lt =	46,97	km
Altitude à 5% de surface		Z5% =	315	m
Altitude à 95% de surface		Z95% =	254	m
Altitude médiane	$Zmed = Z_{50\%}$	Zmed =	277	
Indice globale de pente	$Ig = (Z5\% - Z95\%) / Leq$	Ig =	4,07	m/k m
<i>Correction de Ig</i>				
Valeur de "n" si	Leq < 5km	n =	2	
	5km < Leq < 25km		3	
	25km < Leq < 50km		4	
	Leq > 50km		5	
Indice globale de pente corrigé	$Ig_{norer} = [(n-1) \times Ig + It] / n$	$Ig_{norer} =$	5,72	m/km
Indice globale de pente retenu	$Ig_{ret} = Ig_{corr}$ si $(It - Ig) / It > 20\%$, sinon $Ig_{ret} = Ig$	$Ig_{ret} =$	5,72	m/km
Dénivelé spécifique	$Ds = Ig \times S^{1/2}$	Ds =	29,6 4	m
Densité de drainage	$Dd = Lt/S$	Dd =	1,7	km/km

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

				2
Type de relief	Si Ds < 50m ==> relief faible			
	Si 50m < Ds < 100m => relief modéré	relief faible		
	Si Ds > 100m ==> relief fort			
Type de réseau hydrographique		Arête de poisson		
Classe de relief		R =		
Infiltrabilité		I =	RI	
Pluie décennale journalière humide		P ₁₀ =	98	mm
Pluie centennale journalière humide		P ₁₀₀ =	174	mm
Pluie moyenne annuelle		P _{moy} =	969	mm
Type de climat		Tropical sèche		
Coefficient majorateur		m =	1,03	
Coefficient d'abattement	$A=1-[(161-0,042 \times P_{moy}) / 1000] \log(S)$	A =	0,83	

Tableau 29: Caractéristiques Hydrologiques du bassin versant de Tombolo

Calcul du coefficient de ruissellement décennal			
Pour Ig1 on a :	Ig1 =	3,00	m/km
Kr70 = 164/(S+17) +10,5	Kr70 =	18,2	%
Kr100 = 250/(S+20) +12	Kr100 =	20,52	%
Pour Ig2 on a :	Ig2 =	7,00	m/km
Kr70 = 239/(S+17,7) +14,5	Kr70 =	22,77	%
Kr100 = 300/(S+20) +15	Kr100 =	26,22	%
Pour Igret on aura par interpolation linéaire :	Igret =	5,72	m/km
Kr70 calculé	Kr70cal =	21,3	%
Kr100 calculé	Kr100cal =	24,39	%
$Kr10=(Kr100-Kr70)/ (100-70) \times (P10-P100) + Kr100$	Kr10 =	24,18	%

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

Calcul du temps de base				
Pour Ig1 on a :	Ig1 =	3,00	m/km	
Tb = 325xS ^{0.36} +315	Tb =	1377,86	mn	
Pour Ig2 on a :	Ig2 =	7,00	m/km	
Tb = 163xS ^{0.36} +142	Tb =	675,07	mn	
Pour Igret on aura par interpolation linéaire :	Igret =	5,72	m/km	
	Tbcal =	900,47	mn	
		15	h	
Calcul du temps de montée et du débit de discontinuité				
Pour T _m on a :				
T _{mcal} = 0,33*T _{bcal}	T _{mcal} =	297,2	mn	
	T _{mcal} =	5	h	
Pour Q _d on a :	T _m =	323,09	mn	
Q _d = 2*Q _c *(T _{b10} - α*T _{mcal}) / (α*(T _{bcal} - 2*T _{mcal}))	Q _d =	25,81	m ³ /s	
Calcul de la crue centennale				
Méthode ORSTOM				
Crue décennale	Q ₁₀ = m*A*α ₁₀ *P ₁₀ *K _{r10} *S/T _b	Q _{10ORST} =	26,1	m ³ /s
Méthode CIEH				
Crue décennale	Q ₁₀ = a*S ^S *P _{an} *I _g ¹ *K ₁₀ ^K *d ^d *D ^d *.....	Q _{10CIEH} =	37,7	m ³ /s
Crue décennale retenue				
	Q _{10projet} = (Q _{10ORSTOM} + Q _{10CIEH}) / 2	Q _{10projet} =	31,9	m ³ /s
Méthode du GRADEX				
	C=(1+((P100-P10)/P10)x((Tb10/24) ^{0,12})/Kr10)	C =	2,5	
Crue centennale	Q ₁₀₀ = C * Q ₁₀	Q ₁₀₀ =	80,3	m ³ /s
Crue de projet retenue		Q _{projet} =	80,3	m ³ /s
Crue de rupture				
Désignation		Crête du déversoir		
Charge (m)		0,7		
Longueur déversante : l (m)		80		
Longueur de la digue sans déversoir : L (m)		0,4		

Revanche : a(m)	1
Débit de rupture : Q (m ³ /s) = 2*1*(a*0,2) ^{1,5} +0,15*L	133,56

Calcul de la revanche				
h _v = hauteur des vagues en m				
f = fetch =1,2 km				
U= vitesse du vent = 2,1 m/s = 7,56 km/h				
V=vitesse de propagation des vagues en m/s				
Formule de MOLITOR pour le calcul de la hauteur des vagues				
Formules		f (km)	U (km/h)	h _v (m)
Pour le fetch <30km	$h = 0,76 + 0,032(U * \sqrt{f}) - 0,26^4 \sqrt{f} \text{ (m)}$	0,8	7,56	0,4
Formule de GAILLARD				
V=1,5+2*h (m/s)	3			
R=0,75*h+V ² /2*g (m)	1,02			
Calcul des épaisseurs de protection des talus				
e=1,5*D ₅₀	D ₅₀ est fonction de h _v ; ainsi D ₅₀ =0,25m D'où e=0,35m pour la protection des talus amont et aval			

▪ **Apports liquides**

- Méthode de Rodier

$$K_e = \frac{\text{Ecoulement}}{\text{Quantile}} \text{ Et } V_e = K_e * \text{Quantile} * S_{BV}$$

Le Bassin type choisi est celui de Kazanga (Manga, 1963-1965, Burkina Faso).

Tableau 30 : Calcul selon la méthode de Rodier

Sèche				T (ans)	Humide			
Fréq.	P (mm)	ke(%)	Volume (m3)		Volume (m3)	ke(%)	P (mm)	Fréq.
0,02	601	2,1	288 768,48	50	2 513 817,6	7	1336	0,98
0,1	739	2,5	496 608	10	1 933 747,2	6	1199	0,9
0,2	818	3	659 635,2	5	1 505 280	5	1120	0,8
0,5	969	4	1 041 868,8	2	1 041 868,8	4	969	0,5

- Méthode de Turc

Pluies P, Déficit Hydrique $D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2 \text{an}}{L^2}}}$, Module d'écoulement $Y = P - D$,

Apports $A = Y * S_{BV}$ et $k_e = \frac{(P-D)}{P}$.

Tableau 31 : Calcul selon la méthode de Turc

	Année				
	Décennale Humide	Quinquennale Humide	Moyenne	Quinquennale Sèche	Décennale Sèche
Pluies (mm)	1199	1120	969	818	739
Superficie (km ²)	26,884	26,884	26,884	26,884	26,884
T. moy annuelle (°C)	26,3	26,3	26,3	26,3	26,3
$L=300+25T+0,05T^3$	1871,7	1871,7	1871,7	1871,7	1 871,7
Déficit hydrique (mm)	1047	998	896	783	719
Module d'écoule. (mm)	151	121	72	35	20
Apports	4 069 481	3 261 359	1 944 970	937 148	533 439
Coefficients d'écoulement Ke	13%	11%	7%	4%	3%

▪ **Apports Solide**

Formule de GOTTSCHALK

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

$S = 26,88 \text{ km}^2 \Rightarrow D = 260 * (26,88)^{-0,1} = 187,1 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$

Formule du CIEH-EIER

$D = 700(P/500)^{-2,2}.S^{-0,1}$

$\begin{cases} S = 26,88 \text{ km}^2 \\ P = 969 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow D = 700 * (969/500)^{-2,2} * (26,88)^{-0,1} = 117,5 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$

Nous retenons la moyenne, soit **D = 152,3 m³/km²/an**

Le volume annuel des dépôts solides qui correspond au volume déposé dans la cuvette pendant la saison pluvieuse est : **V = D.S = 152,3 * 26,88 = 4 093,824 m³**

A l'horizon de 30 ans nous aurons **V = 70 056 m³**

Annexe IV : Données de tracées des courbes caractéristiques

Cotes(m)	Surface (m2)	Volume cumulée (m3)
256	0	0
256.25	4573	2128
256.5	6730	3570,
256.75	9320	5638,8
257	12170	8392,1
257.25	32610	14254,9
257.5	49960	24433,1
257.75	67200	38989,2
258	82200	57550,9
258.25	102800	80776,8
258.5	121100	108611,5
258.75	140600	141123,3
259	168500	179198,7
259.25	207700	227596,1
259.5	235400	282628,1
259.75	259900	344324,8
260	288100	412587,7
260.25	312200	487526,2
260.5	335100	568404,5
260.75	359400	655299,9
261	384600	748348,1
261.25	416000	848581,1
261.5	451000	957048,7
261.75	485700	1074201
262	532000	1201169
262.25	573000	1339648
262.5	620000	1488653
262.75	669000	1649841
263	723000	1823687
263.25	780000	2013024
263.5	829000	2213997
263.75	880000	2427599
264	940000	2654597
264.25	1007000	2899553
264.5	1062000	3157985
264.75	1118000	3430584
265	1175000	3716886
265.25	1241000	4018780
265.5	1302000	4336546
265.75	1354000	4668432
266	1394000	5011880

Annexe V : Dimensionnement digue et Ouvrages Annexes

1. La Digue

- Calage de la digue

La crête de la digue correspondant à sa hauteur H_d , est déterminée en fonction de :

- La cote du plan d'eau normale (CPEN) qui correspond à la hauteur effective de la retenue d'eau ou hauteur du déversoir; (Partant du CPEN à la cote de fond hors ravine)
- La hauteur d'eau (h) au-dessus du seuil lors du déversement de la crue de projet (compte tenu de l'effet de laminage) ;
- La revanche libre R qui est la tranche comprise entre le PHE et la crête du barrage.

La revanche sur les plus hautes eaux permet :

- de prévenir toute submersion du barrage dans des conditions de crues exceptionnelles et de tempête la plus défavorable.
- d'absorber l'excédent de débits sur la crue de projet et de faire passer la crue de sécurité ;
- et de compenser les tassements de la digue et des fondations pour éviter de réduire la réserve de Sécurité.

Côte PEN (m)	h (m)	Revanche (m)	Côte digue (m)	Côte parapet (m)	Côte TN (m)	Hauteur max (m)
262,5	0,7	1	264,2	264,7	256	8,2

- **Largeur en crête de la Digue**

Cette largeur doit être suffisante pour permettre la circulation des engins lors de des travaux de finitions et aussi pour l'entretien de l'ouvrage dans un avenir futur.

Les formules suivantes permettent de calculer la largeur en crête (l_c) de la digue :

Formule de KNAPPEN	$l_c = 1,65 * \sqrt{H_d} = 1,65 * \sqrt{8.5} = 4.81 \text{ m}$
Formule de PRECEE	$l_c = 1,1 * \sqrt{H_d} + 1 = 1,1 * \sqrt{8.5} + 1 = 4,2 \text{ m}$

Avec H_d : hauteur maximale de la digue (m)

Nous retenons **4m** comme largeur en crête de la digue.

- **Longueur de la digue**

Le calage du remblai de la digue à la cote 264,2 m a conduit à une longueur de la digue de **795 m** sans la longueur du déversoir.

▪ **Largeur de la fondation de la Digue**

La digue étant de forme trapézoïdale la largeur en base sera :

Formule	Valeur
$L_b = L_c + (m_{amont} + m_{aval}) * H_D$	46,5 m

Avec

<ul style="list-style-type: none"> • l_c = largeur en crête de la digue = 4 m • m_{amont} (Fruit de berge amont) = m_{aval} (Fruit de berge aval) = 2,5 m • H_d = hauteur de la digue = 8,5 m
--

▪ **Infiltration à travers la digue**

La méthode utilisée généralement pour les petits barrages est celle de KOZENY. Elle donne des résultats approchés.

Tableau 32 ; Estimation des Infiltrations dans la digue

Désignation	Formules	Valeurs
H : tirant d'eau à l'amont(m)		6,5
b : projection horizontale de la partie mouillée du parement amont(m)	$b = h * m_{amont}$	16,25
d : largeur en base du barrage diminuée de 0.7 b et de la longueur du drain (m)	$d = L_b - 0,7 * b - l_d$	19,625
l_d : longueur du drain (m)	$l_d = \frac{1}{3} * L_b$	15,5
Y_0 : Point d'intersection de l'axe des ordonnées et de la parabole de Kozeny	$Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$	1
L_b : largeur en base de la digue (m)		46,5
Kr : perméabilité du remblai		7E-9
q : débit de fuite (m3/s)	$q = Kr * Y_0$	7E-9

e : épaisseur du drain (m)	$e = 2 * \sqrt{\left(\frac{q * l_d}{k_d}\right)}$	0,03
Kd (perméabilité du drain en m/s)		1,00 E-4
La valeur minimale recommandée est de 0,5m (Source Techniques des petits barrages page 193)		0,5

▪ **Calcul de l'épaisseur du drain**

Tableau 33 : Estimation de l'épaisseur du drain

q : débit de fuite (m ³ /s)	$q = Kr * Y_0$	7E-9
e : épaisseur du drain (m)	$e = 2 * \sqrt{\left(\frac{q * l_d}{k_d}\right)}$	0,03
Kd (perméabilité du drain en m/s)		1,00 E-4
La valeur minimale recommandée est de 0,5m (Source Techniques des petits barrages page 193)		0,5

2. Ouvrages Annexes

- Le déversoir (Longueur déversant l = 80m)

Tableau 34 : Etude de stabilité du déversoir

Cas le plus contraignant avec une lame d'eau déversante maximale h=0,7m					
Résultats (stabilité par rapport au point B)					
Désignations	Force [kN/ml]		Bras de levier[m]	Moments [KN.m]	
	Verticale	Horizontale		stabilisants[+]	renversants[-]
Poids propre					
W1+W _{lame déversante}	187		3,5	654,5	
W2	270		2	540	
W3	48		2	96	
W4	6		2,33	14	
W5	36		3,25	117	
Poussées externes					
Pe1		45,5	3,25		147,88
Pe2		211,25	2,17		457,71
Pe3		1,25	0,17	0,21	
Sous pressions					
U _{par}	36		1,33		
U	72				96
Poussées des terres Amont					
Pt		5,325	0,72		3,85
Somme des forces verticales		612			
Somme des forces horizontales			263,325		
Somme des moments stabilisants				1421,71	
Somme des moments renversants					705,43
Stabilité au glissement					

Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

Coefficient de sécurité au glissement	1,62	Fg>1,3 : Condition vérifiée OK !
Stabilité au renversement		
M(W-U) / M(Pe+Pt)	2,17	Fg>1,3 : Condition vérifiée OK !
Les coefficients de sécurité étant supérieur à 1,3 les stabilités au renversement et au glissement sont vérifiées		
Vérification de la Stabilité interne		
Excentricité $e = Y_{ouv} * (Pe + Pt) / (W - U) - (B/2 - X_{ouv})$	0,53	$e < B/6$: Condition de non fissuration vérifiée OK!
Valeur de B/6		0,67
La valeur de l'excentricité étant inférieure à B/6 la règle du tiers centrale est vérifiée		
Calcul des contraintes		
Contrainte minimale $\sigma_{min} (MPa) = (w - u) / B * (1 - 6 * e / B)$		0
La valeur de la contrainte minimale étant >0 alors il n'ya pas de traction dans le béton		
$\sigma_{max} (\sigma_B) (MPa) = (W - U) / B * (1 + 6 * e / B)$		0,214
$\sigma_{admin} = 0,3 * f_{c28} (MPa)$	6	$\sigma_B < \sigma_{max}$: Condition de résistance vérifiée OK!
Vérification de la Stabilité au poinçonnement		
Contrainte admissible du sol $q_{adm} = 1/2 * \gamma * N_y + C * N_c + \gamma * D * N_q$		279,82
Poids Volumique du sol sous la base de la fondation γ		22
Angle de frottement interne du sol sous la base de la fondation Φ		20
Facteur de portance $N_y = K_p * \cos(\pi/4 - \Phi/2) / (2 \cos^2(\pi/4 + \Phi/2))$		1,02
Coefficient de butée $K_p = \tan^2(45 + \Phi/2)$		2,03
Cohésion du sol sous la base de la fondation C		17,5
Facteur de portance $N_c = (N_q - 1) \cotg \Phi$		14,8
D = profondeur d'encrage		1,5
Facteur de portance $N_q = e^{\pi \tan \Phi} * \tan^2(\pi/4 + \Phi/2)$		6,4
Contrainte maximale imposée au sol de fondation $\sigma_{max} (MPa)$	Si $0 < e < B/6 \Rightarrow$	$\sigma_{max} = (N/B) * (1 + 6 * e/B)$
	Si $B/6 < e < B/2 \Rightarrow$	$\sigma_{max} = (2 * N) / (3 * (B/2 - e))$
	$0 < e < B/6$	186,03

Valeur de q_{adm}/σ_{max}	7,2
La valeur de q_{adm}/σ_{max} étant supérieur à 1,5 alors la stabilité au poinçonnement est vérifiée	
CONCLUSION : Toutes les stabilités au glissement, au renversement, au poinçonnement et la règle du tiers centrale ayant été vérifiées alors nous pouvons conclure à la stabilité du déversoir pour une lame d'eau déversante $h = 0,7$ correspondant au PEH	

- Bassin de dissipation et du chenal d'évacuation

Tableau 35 : Dimensionnement du Bassin de dissipation et du chenal d'évacuation

Désignation	Unité	Valeur
Côte la plus basse du terrain naturel : Z_{TN}	m	256
Côte du plan d'eau normal : Z_{PEN}	m	262,5
Longueur déversant : L	m	77
Coefficient de débit : m	m	0,4
Intensité de la pesanteur : g	m/s^2	10
Lame d'eau déversante maximale: h	m	1,7
Débit maxi évacué : Q_{maxe}	m^3/s	80,3
Débit spécifique : $Q_s = Q_{maxe} / L$	$m^3/s/ml$	1,05
Pelle : $H_0 = Z_{PEN} - Z_{TN}$	m	6,5
1. Calcul de la profondeur nominale par la méthode de la débitance : Y_n		
Coefficient de Manning Strickler : K_s		30
Largeur au plafond : b	m	77
Fruit des berges : m'		1,8
Pente moyenne du chenal : $I \leq 5\text{‰}$		0,0025
Profondeur nominale : Y_n	m	0,8
Surface mouillée : $S(Y_n) = Y_n \cdot (b + m \cdot Y_n)$	m^2	62,49
Périmètre mouillé : $P(Y_n) = b + 2Y_n \cdot (1 + m^2)^{0,5}$	m	79,97
$D(Y_n) = K_s \cdot S^{5/3} \cdot P^{-2/3}$		1606,60
$Q_{maxe} / \text{Racine}(I)$		1606,6
Convergence = $D(Y_n) - Q_{maxe} / \text{Racine}(I)$		0,0
2. Calcul de la profondeur de la fosse de dissipation : D		
Grésillon et Lahaye proposent un abaque permettant de déterminer l'enfoncement de la fosse de dissipation (D) et de la hauteur de la lame d'eau au-dessus du seuil (h_0/H_0) :		
Y_n/H_0		0,123
h/H_0		0,108
La valeur de $D/H_0 = a$		0,1
Profondeur : $D = a \cdot H_0$	m	0,65

Nous retenons D	m	0,65
3. Les caractéristiques d'entrées du ressaut		
Vitesse au-dessus du seuil : $V_0 = Q_s/h$	m/s	1,50
Hauteur de chute : $H = D + H_0$	m	7,15
Profondeur d'eau à l'entrée du bassin :	m	0,40
Pour trouver la profondeur d'eau à l'entrée du bassin nous procédons par itération par la méthode de la valeur cible		
$Y_1 = Q_s / (2g(0,9*(H+h+V_0^2/2g) - Y_1))^{0,5}$	m	0,4
Convergence		0,0
Par itération on trouve Y_1	m	0,40
Vitesse à l'entrée du bassin : $V_1 = Q_s/Y_1$	m/s	2,62
Le nombre de Froude : $Fr = V_1 / (g*Y_1)^{0,5}$		1,31
4. Les caractéristiques de sortie du ressaut		
Profondeur d'eau conjuguée à la fin du ressaut (sortie du bassin): $Y_2 = (Y_1/2)*((1+8Fr^2)^{0,5}-1)$	m	0,57
Vitesse à la sortie du bassin : $V_2 = Q_s/Y_2$	m/s	1,85
La condition pour que le ressaut ne quitte pas le bassin de dissipation est la suivante: $Y_2 < Y_n + D$		
Dans notre cas: $Y_n + D$	m	1,45
La condition est donc vérifiée		
5. Choix du type de bassin de dissipation et des caractéristiques		
Il y a différents types de bassins suivant les valeurs du nombre de Froude Fr et de la vitesse v_1		
$Fr = 1,31$	$1 < Fr < 1,7$	
V_1 (m/s) = 2,62	≤ 15	
Le courant incident à une profondeur légèrement inférieur à la profondeur critique, Le passage à une profondeur plus grande est graduel et ne se manifeste que par une agitation de surface.		
Conclusion : Un bassin spécial de tranquillisation n'est pas nécessaire, un simple bétonnage du canal sur une longueur de 4 à 6Y₂ à partir de l'endroit où la profondeur commence à se modifier est suffisant, (Cf., Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et		

équatoriale).		
6. Longueur de bétonnage du canal		
Longueur = $6 \cdot Y_2$	m	5
5. Protection du canal à l'aval		
Vitesse de début d'entraînement :	m/s	1,85
Diamètre minimum des enrochements nécessaires (sur l'abaque) : $D_{\text{enrochement}}$	m	0,2
Epaisseur de la couche d'enrochement : $E_{\text{enrochement}} \geq 3 \cdot D_{\text{enrochement}}$ (Cf., cours de barrage de Dr KARAMBIRI)	m	0,6
Longueur de protection : $L_{\text{protection}} \geq 2 \cdot L$ (Cf., cours de barrage de Dr KARAMBIRI)	m	10

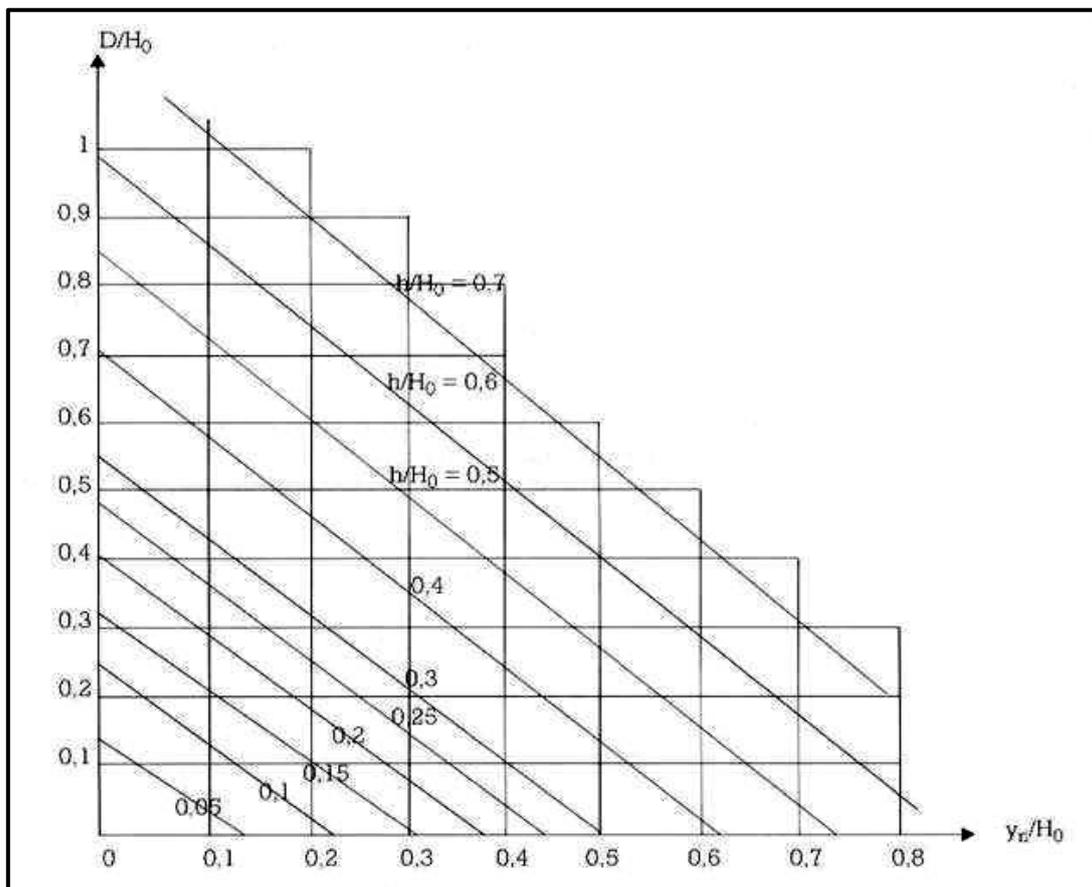


Figure 14 : Enfoncement du bassin de dissipation en fonction du tirant d'eau avant et de la hauteur de la langue d'eau au-dessus du seuil

▪ Murs Bajoyers

Tableau 36 : Etude de Stabilité des Murs Bajoyers

Résultats (stabilité par rapport au point extrême)				
Désignations	Force [kN/ml]		Moments [KN.m]	
	Verticale	Horizontale	stabilisants [+]	Renversants [-]
Poids propre				
Poids Volumique du béton pris égal à 24 kN/m ³				
Mur	89,4		312,9	
Semelle	90		180	
Jonction	13,5		27	
Talon	9		21	
Poussée des terres				
Répartition Charges Linéaires pris égal à 10 kN/m ²				
Coefficient de Poussée Ka pris égale à 0,33				
Poids Volumique γ pris égale à 20 kN/m ³				
Sur le mur		148,14		330,839
Sur le talon		7,425		3,713
Sur la semelle	11,055		37,03425	
Sous pressions				
Poids volumique de l'eau = 10 kN/m ³				
U	23,4375			48,828
Somme des forces verticales	236,3925			
Somme des forces Horizontales		155,56		
Somme des moments stabilisant			577,934	
Somme des moments renversant				383,380
Vérification de la stabilité au glissement				
Coefficient de sécurité au glissement	1,62		Fg > 1,5 : Condition vérifiée Ok !	
Vérification de la stabilité au renversement				
Fg = M (F _c + W - U) / M (Pe+Pt)	1,6		Fg > 1,5 : Condition vérifiée OK!	
Vérification de la Stabilité interne				
$e = \frac{M_{stabilisants} - M_{renversants}}{Poids\ propre}$	0,96			
B/6	1,04		e < B/6: Condition de non fissuration vérifiée OK!	
La valeur de l'excentricité étant inférieure à B/6 la règle du tiers centrale est vérifiée				
CONCLUSION: Toutes les stabilités au glissement, au renversement et la règle du tiers centrale ayant été vérifiées alors nous pouvons conclure à la stabilité des murs bajoyers.				

- Ouvrages de Prise et de Vidange

Tableau 37: Dimensionnement des ouvrages de prise et de vidange

Désignation	Unité	Valeurs
Détermination de la longueur (L) de la conduite		
Largeur en crête de la digue : L_c	m	4
Fruit du talus amont	H/V	2,5
Fruit du talus aval	H/V	2,5
Cote du terrain naturel : Z_{TN}	m	256
Cote crête de la digue : $Z_{crête}$	m	264,2
Côte au plan d'eau normale : Z_{PEN}	m	262,5
Largeur en base de la digue : $L_b = L_c + (m_1 + m_2) * (Z_{crête} - Z_{TN})$	m	46,5
Longueur des bassins amont et aval : d	m	5
Longueur de la conduite : $L = L_b + d$	m	51,5
Détermination du diamètre de la conduite : D		
Il doit permettre de satisfaire les besoins et ne pas générer de fortes pertes de charges.		
Débit maximum délivré par la conduite : $Q = S * (2gH)^{0,5}$	m ³ /s	0,559
	l/s	559
Cote PEN	m	262,5
Charge de l'eau sur la conduite : H	m	3,5
Vitesse maximale : $V_{max} = (2 * g * H)^{0,5}$	m/s	11,402
Diamètre de la conduite : D	mm	500
Détermination du temps de vidange		
Côte au PEN	m	262,5
Surface au PEN	m ²	620 000
Cote de l'ouvrage de Vidange	m	256
Section de la conduite	m ²	0,049
Pesanteur	m/s ²	9,81
Charge d'eau	m	6,5
Supposons une vidange totale du barrage		
Temps de Vidange $T = \left(\frac{S}{s}\right)^2 * \sqrt{\frac{2}{g}} * (\sqrt{h_0} - \sqrt{h})$	s	2661166,984
Temps de Vidange	jr	30,800
Nous considérons un temps de vidange de 31 jours		

Annexe VI : Calcul de cubatures

Tableau 38 : cubatures pour la tranchée d'encrage

Tranchée d'encrage								
Profil	Cote TN	Distances partielles(m)	m	Largeur en fond	Largeur en gueule	H encrage intermédiaire	Surface intermédiaire	Volume partiel(m3)
1	264,33	0		3,5	4,2	0,35	1,35	-
2	264,07	19,827	1	3,5	4,5	0,5	2,00	39,65
3	262,86	39,74	1	3,5	5	0,75	3,19	126,67
4	262,38	35,25	1	3,5	6	1,25	5,94	209,30
5	261,98	34,19	1	3,5	6,95	1,725	9,01	308,16
6	261,5	33,778	1	3,5	7,35	1,925	10,44	352,75
7	261,83	40,483	1	3,5	7,7	2,1	11,76	476,08
8	262,15	32,673	1	3,5	8,05	2,275	13,14	429,26
9	261,99	27,319	1	3,5	8,65	2,575	15,64	427,35
A2-11	261,31	28,5	1	3,5	9,2	2,85	18,10	515,78
12	259,8	35,776	1	3,5	9,4	2,95	19,03	680,73
13	258,15	35,4	1	3,5	9,5	3	19,5	690,3
A1-14	257,5	31,857	1	3,5	9,5	3	19,5	621,21
15	256,82	22,687	1	3,5	9,5	3	19,5	442,40
16	257	31,345	1	3,5	9,35	2,925	18,79	589,07
17	257,25	27,358	1	3,5	9	2,75	17,19	470,22
18	257,59	30,925	1	3,5	8,65	2,575	15,64	483,76
19	256	37,711	1	3,5	9	2,75	17,19	648,16
20	256,75	13,823	1	3,5	9,5	3	19,5	269,55
21	257,82	45,097	1	3,5	9,3	2,9	18,56	837,00
22	259,5	37,654	1	3,5	9	2,75	17,19	647,18
23	260,94	28,474	1	3,5	8,6	2,55	15,43	439,28
24	262,14	42,996	1	3,5	8,2	2,35	13,75	591,09
25	262,88	31,2	1	3,5	7,6	2,05	11,38	354,978
26	263,15	19,965	1	3,5	5,8	1,15	5,35	106,76
B1-27	263,95	44,684	1	3,5	4,3	0,4	1,56	69,70704
28	264,61	42,459	1	3,5	4	0,25	0,94	39,81
Total du volume de remblai de la tranchée d'encrage(m3)								10 866

Tableau 39 : Cubatures pour la digue

Digue									
Profil	Cote TN	Cote Digue	Distances partielles(m)	m	Lc	Hauteur Digue	Largeur en base(m)	Surface intermédiaire	Volume partiel(m3)
1	264,33	264,2	0	2,5	4	-0,13	3,35	-0,48	-
2	264,07	264,2	19,827	2,5	4	0,13	4,65	0,56225	11,15
3	262,86	264,2	39,74	2,5	4	0,73	7,675	4,29	170,51
4	262,38	264,2	35,25	2,5	4	1,58	11,9	12,56	442,78
5	261,98	264,2	34,19	2,5	4	2,02	14,1	18,28	625,03
6	261,5	264,2	33,778	2,5	4	2,46	16,3	24,97	843,40
7	261,83	264,2	40,483	2,5	4	2,54	16,675	26,21	1060,88
8	262,15	264,2	32,673	2,5	4	2,21	15,05	21,05	687,77
9	261,99	264,2	27,319	2,5	4	2,13	14,65	19,86	542,62
A2 11	261,31	264,2	28,5	2,5	4	2,55	146,5	191,89	5468,79
12	259,8	264,2	35,776	2,5	4	3,64	22,225	47,80	1709,92
13	258,15	264,2	35,4	2,5	4	5,22	30,125	89,15	3155,97
A1 14	257,5	264,2	31,857	2,5	4	6,38	35,875	127,10	4049,07
15	256,82	264,2	22,687	2,5	4	7,04	39,2	152,06	3449,88
16	257	264,2	31,345	2,5	4	7,29	40,45	162,02	5078,52
17	257,25	264,2	27,358	2,5	4	7,07	39,375	153,44	4197,79
18	257,59	264,2	30,925	2,5	4	6,78	37,9	142,041	4392,62
19	256	264,2	37,711	2,5	4	7,41	41,025	166,71	6286,61
20	256,75	264,2	13,823	2,5	4	7,82	43,125	184,38	2548,64
21	257,82	264,2	45,097	2,5	4	6,9	38,575	147,20	6638,42
22	259,5	264,2	37,654	2,5	4	5,54	31,7	98,89	3723,57
23	260,94	264,2	28,474	2,5	4	3,98	23,9	55,52	1580,90
24	262,14	264,2	42,996	2,5	4	2,66	17,3	28,33	1218,034
25	262,88	264,2	31,2	2,5	4	1,69	12,45	13,90	433,69
26	263,15	264,2	19,965	2,5	4	1,19	9,925	8,25	164,72
B1 27	263,95	264,2	44,684	2,5	4	0,65	7,25	3,66	163,38
28	264,61	264,2	42,459	2,5	4	-0,08	3,6	-0,30	-12,91
Total du volume de remblai de la digue(m3)									58 632

Annexe VII : Devis quantitatif et estimatif des travaux

Tableau 40 : Devis estimatif et quantitatif des travaux

N° Prix	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire	Montant (FCFA)
I	INSTALLATIONS GENERALES DE CHANTIER				
I.1	Amenée et repli du matériel	ff	1	15 000 000	15 000 000
I.2	Installation et implantation du chantier	ff	1	10 000 000	10 000 000
I.3	Mise en œuvre du plan de gestion environnementale et sociale		1	75 496 500	75 496 500
	TOTAL INSTALLATION				100 496 500
II	DIGUE				
II.2	Débroussaillage et nettoyage	ha	62	45 000	2 790 000
II.3	Décapage de l'emprise, épaisseur max. 30 cm	m ²	11874	400	4 749 600
II.4	Déblai aux engins pour tranchée d'ancrage	m ³	10866	3 000	32 598 593
II.5	Déblai manuel pour muret de crête, mur parapet, butée et drain de pied	m ³	1200	3 500	4 200 000
II.6	Remblai argileux compacté à l'OPN pour tranchée d'ancrage	m ³	10866	4 500	48 897 890
II.7	Remblai argileux compacté à l'OPN pour corps de digue	m ³	58632	4 000	234 526 951
II.8	Filtre horizontal	m ³	4664	4 500	20 988 000
II.9	Couche de pose talus amont et aval	m ³	3784	4 500	17 028 000
II.10	Perré sec talus amont et aval	m ³	9461	5 000	47 305 000
II.11	Perré maçonné sur 5m sur le talus amont	m ³	961	27500	26 434 375
II.12	Enrochement butée de pied amont et drain de pied	m ³	420	5000	2 100 000
II.13	Béton cyclopéen pour muret de crête	m ³	192	50 000	9 612 500
II.14	Béton cyclopéen à pour mur parapet	m ³	192	50 000	9 612 500
II.15	Revêtement latéritique compacte sur crête	m ³	461,4	25 000	11 535 000
II.16	Echelles limnimétriques	ml	4	80 000	320 000
	TOTAL DIGUE				472 698 410

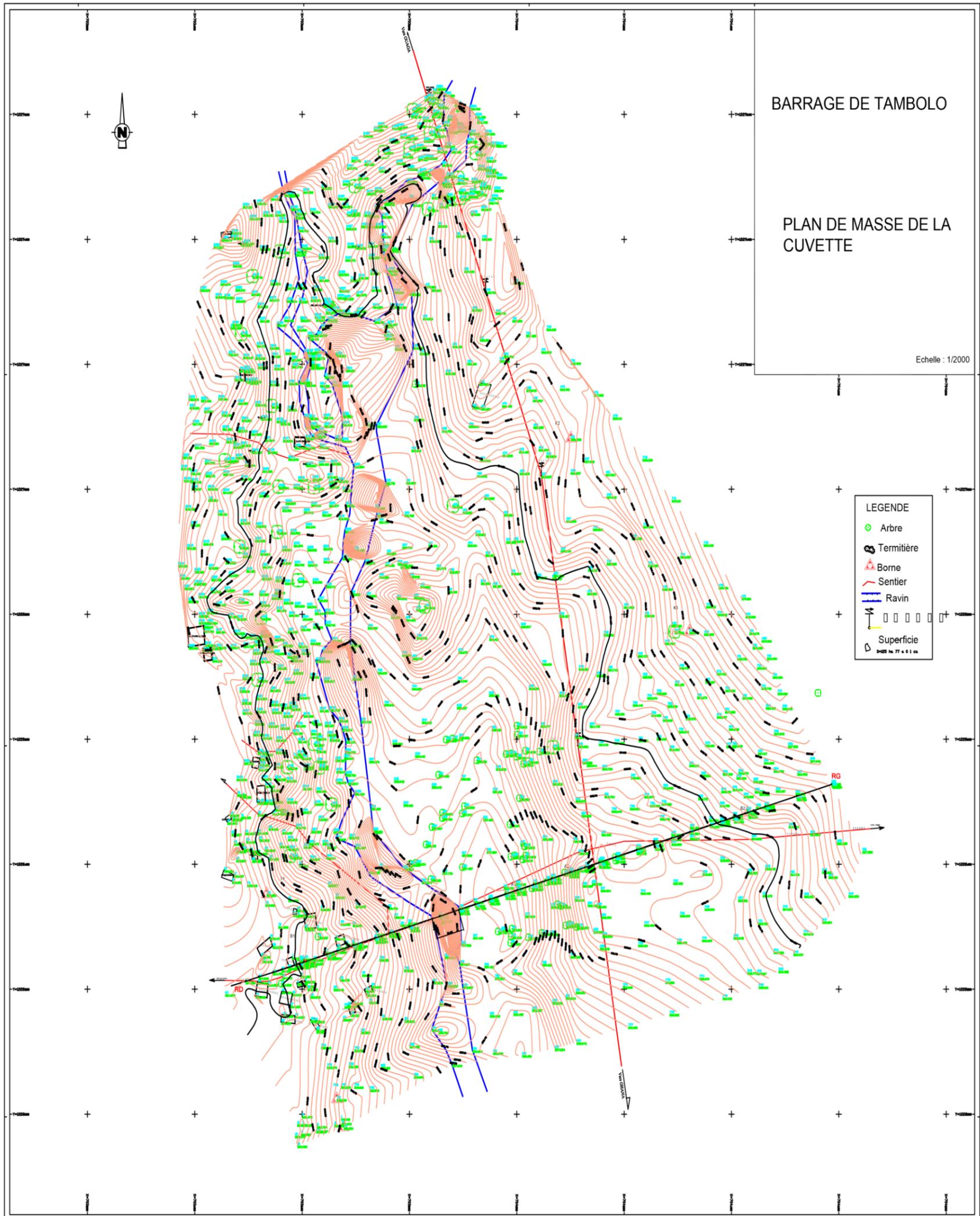
Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

III	EVACUATEUR DE CRUE : DEVERSOIR ET BASSIN DE DISSIPATION				
III.1	Débroussaillage et décapage pour déversoir et bassin de dissipation sur 50 m à l'aval	m ²	0,772	45 000	34 740
III.2	Déblai aux engins pour bassin de dissipation et chenal	m ³	400	3 000	1 200 000
III.3	Mise en œuvre du déversoir poids en béton cyclopéen dosé à 350 kg/m ³	m ³	1720	90 000	154 800 000
III.4	Joints bitumineux	ml	107	10 000	1 070 000
III.5	Joints water stop	ml	16	45 000	720 000
III.6	Barbacanes en PVC (diamètre 50 mm)	ml	64	5 000	320 000
III.7	Fournitures et pose de gabions métalliques	m ³	800	30 000	24 000 000
III.8	Bétonnage du bassin de dissipation en béton cyclopéen dosé à 250 kg/m ³	m ³	14,5	75 000	1 087 500
III.9	Protection du chenal	m ³	50	8 000	400 000
	TOTAL EVACUATEUR DE CRUE				183 632 240
IV	MURS BAJOYERS				
IV.1	Mur trapézoïdale	m ³	82,1	150 000	12 309 375
IV.2	Talon	m ³	174,4	150 000	26 156 250
IV.3	Jonction	m ³	26,2	150 000	3 923 438
IV.4	Bèche	m ³	17,4	150 000	2 615 625
	TOTAL MUR BAJOYER	m³			45 004 688
V	DIGUETTE DE PROTECTION				
V.1	Décapage de l'emprise des diguettes de protection, épaisseur 30 cm	m ³	120	400	48 000
V.2	Déblai aux engins	m ³	160	3 000	480 000
V.3	Remblai argileux pour diguettes de protection	m ³	510	6 000	3 060 000
V.4	Couche de pose sur les talus amont et aval	m ³	10	3 500	35 000
V.5	Perré sec sur talus aval des deux diguettes	m ³	30	4 000	120 000
V.6	Perré maçonné sur talus amont des deux diguettes	m ³	30	20 500	615 000
V.7	Déblai à la main pour butée et drain de pied aval des deux diguettes	m ³	8	3 500	28 000

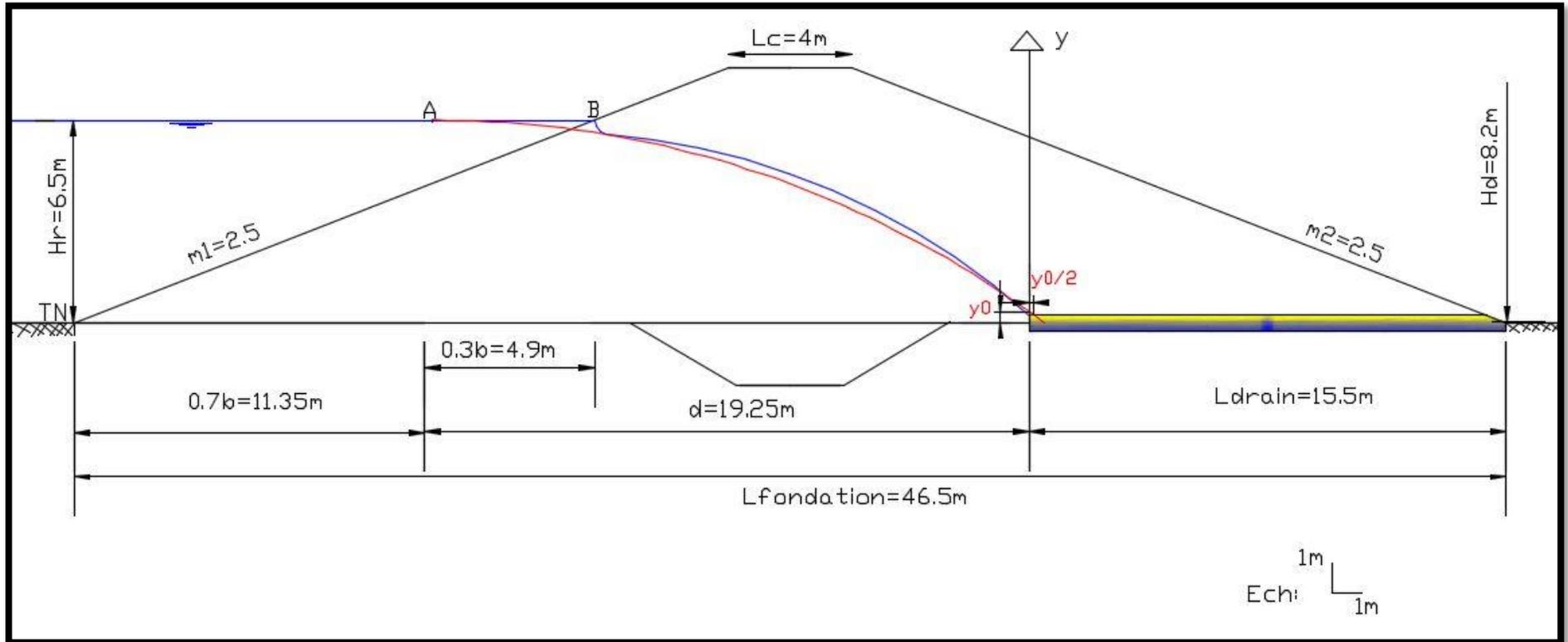
Etude Technique Détaillée du Barrage de Tombolo dans la Province du Nahouri

V.8	Enrochement à la main pour butée et drain de pied des deux diguettes	m ³	20	10 000	200 000
V.9	Couche de couronnement latéritique des diguettes de protection	m ³	60	7 000	420 000
	TOTAL DIGUETTE DE PROTECTION	m ³			5 006 000
VI	OUVRAGE DE PRISE ET DE VIDANGE				
VI.1	Déblai manuel	m ³	86	3 500	301 000
VI.2	Béton armé dosé à 350 kg/m ³	m ³	16,8	145 000	2 436 000
VI.3	Béton de propreté dosé à 150 kg/m ³	m ³	2	50 000	100 000
VI.4	Perré maçonné de protection entre talus amont et bac amont (ép. 0.25 m)	m ³	6	37 500	225 000
VI.5	Conduite en acier Ø 300	ml	36	300 000	10 800 000
VI.6	Crépine Ø 300	u	1	150 000	150 000
VI.7	Robinet vanne Ø 300 et accessoires	u	1	4 000 000	4 000 000
VI.8	Grille de protection	u	2	150 000	300 000
	TOTAL OUVRAGE DE PRISE				18 312 000
	TOTAL HORS TAXE			825 149 837	
	DIVERS ET IMPREVUS (5%)			41 257 492	
	TOTAL GENERAL HTVA			866 407 329	

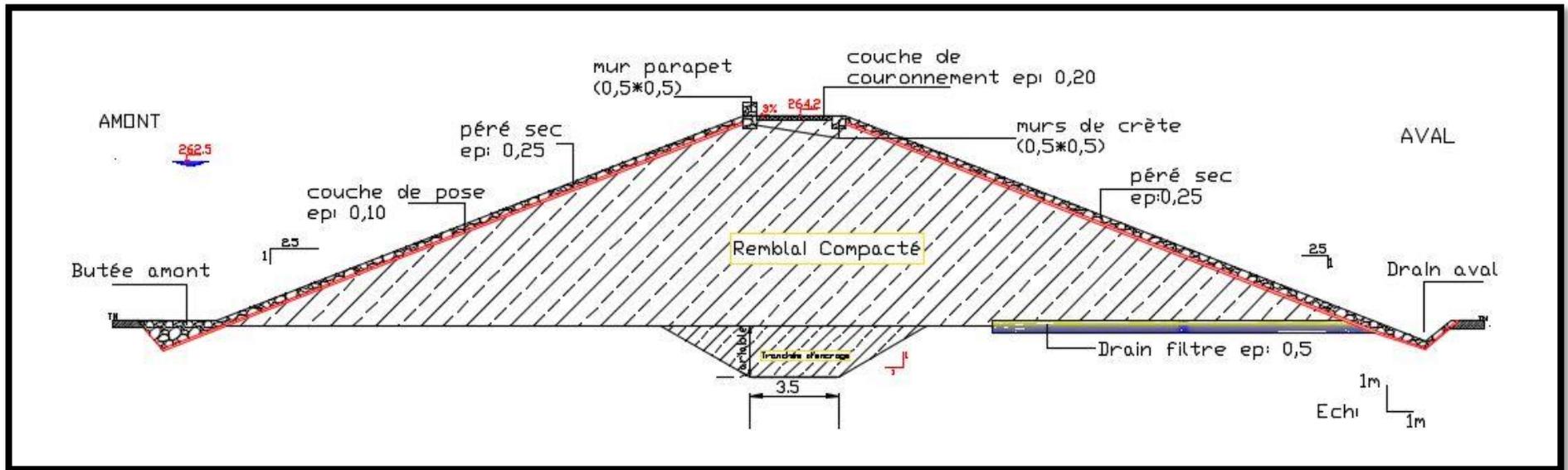
Annexe VIII : Plan de masse de la cuvette



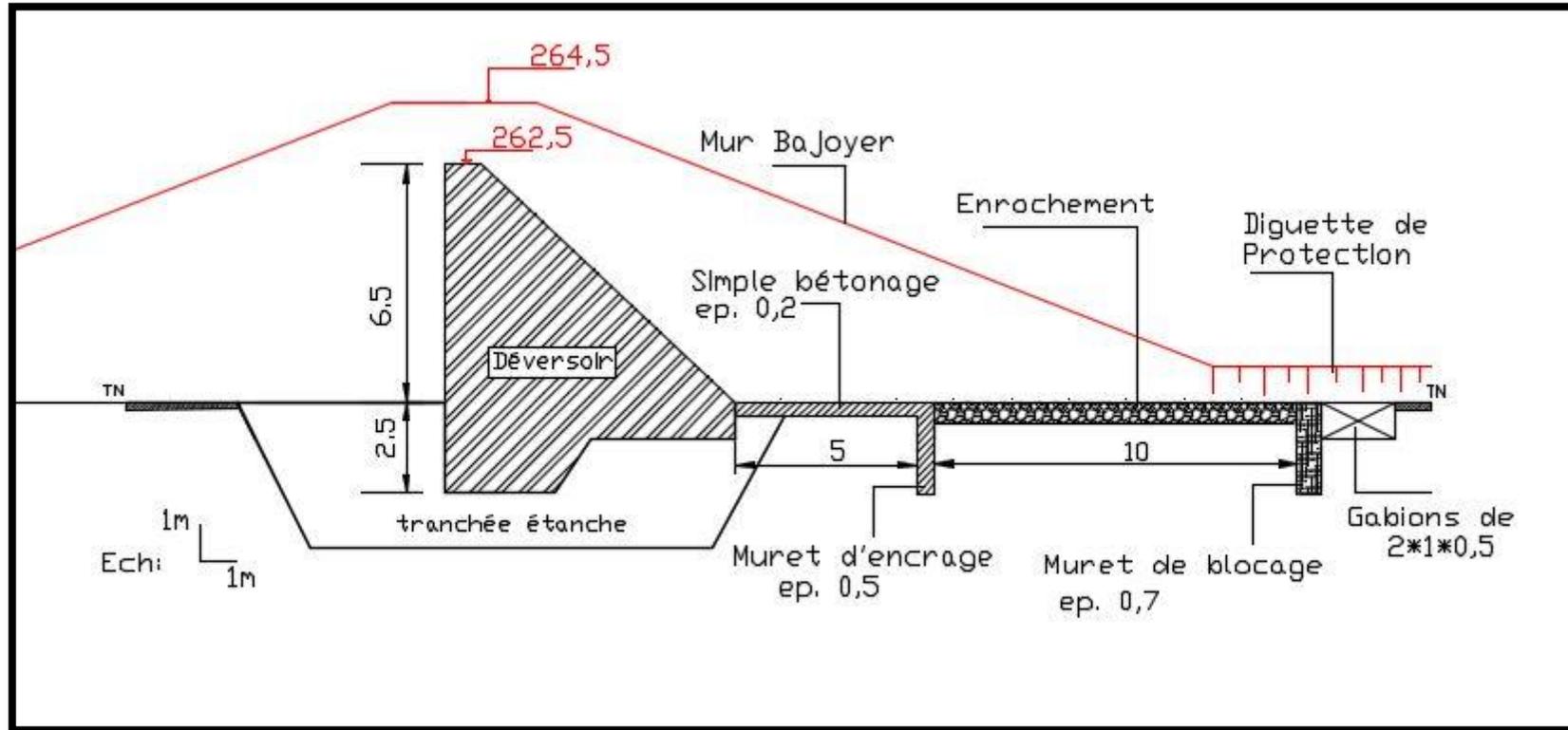
Annexe X : Géométrie de la digue munie de la parabole de Kozeny



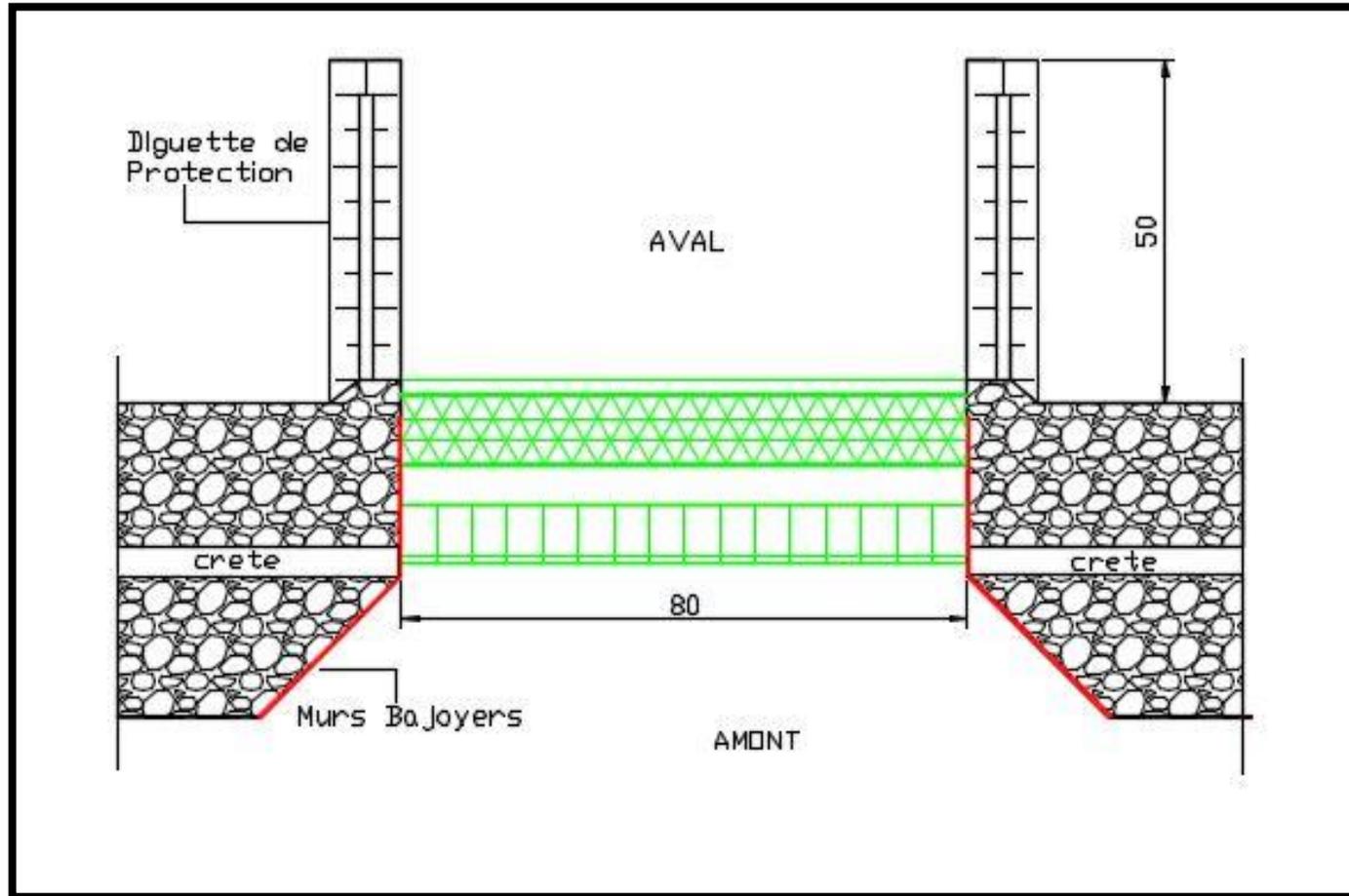
Annexe XI : Coupe en travers type de la digue



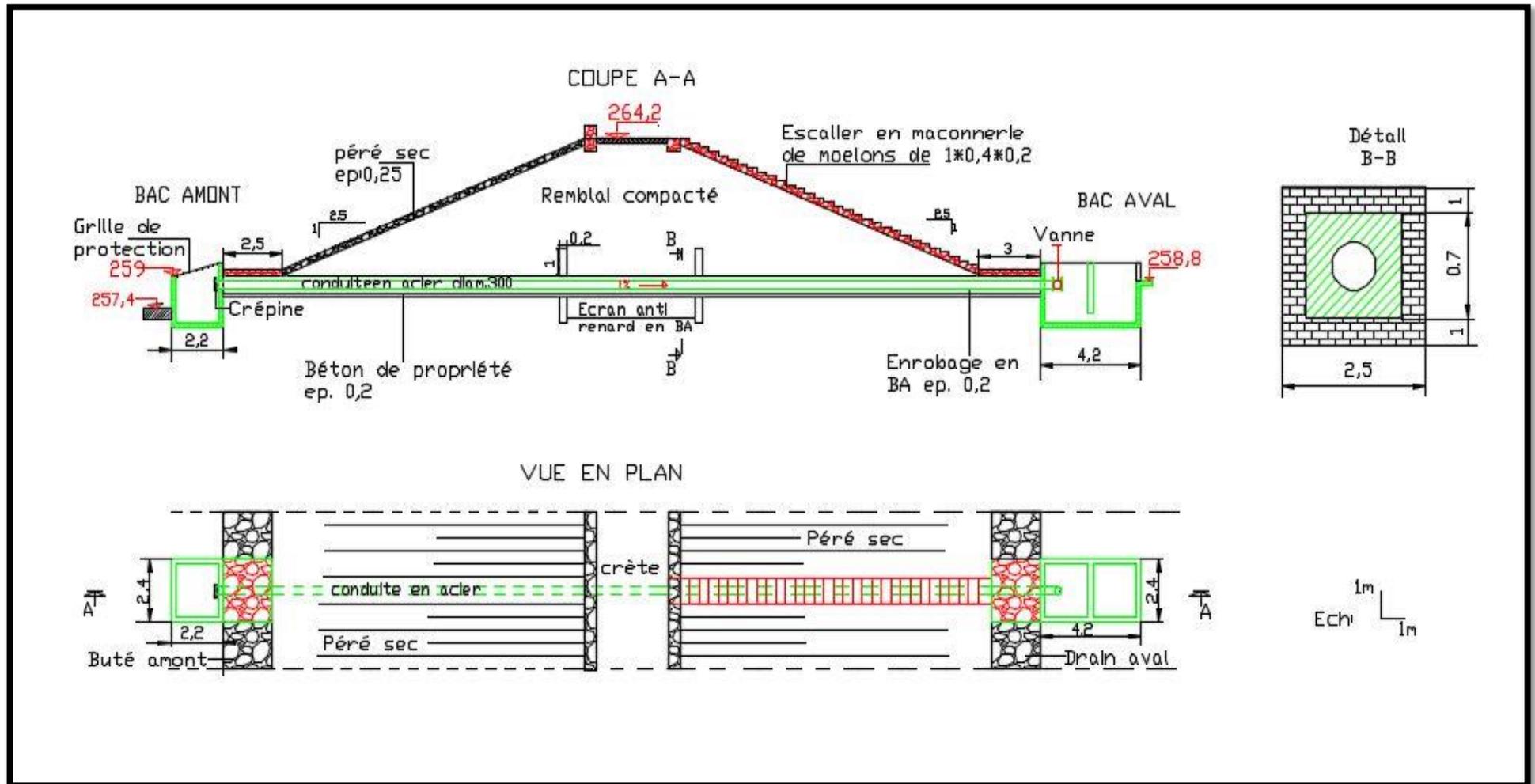
Annexe XII : Coupe en travers type de l'évacuateur de crue



Annexe XIII : Vue en plan de l'évacuateur de crue



Annexe XIV : Vue en plan et coupe en travers de l'ouvrage de prise/vidange



Annexe XV : Plan de ferrailage des murs bajoyers

