



**ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-
PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM
(BURKINA FASO)**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES_EAUX AGRICOLES

Présenté et soutenu publiquement le 30 Octobre 2017 par :

Wenddaabo Aida SOMDAKOUMA

Travaux dirigés par :

M. LO Moussa, Enseignant (Département GCH/Fondation 2iE)

M. CONGO Issaka, Ingénieur Génie Civil(AC3E).

Dr. NIANG Dial, Enseignant chercheur 2iE

Dr. BIAOU Angelbert, Enseignant chercheur 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Adjadi Lawani MOUNIROU

Membres : M. Moussa FAYE

M. Facia Giraude ADEOSSI

M. Moussa LO

M. Issaka CONGO

Promotion [2016/2017]

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 AC3E Monsieur Adama OUEDRAOGO pour m'avoir accueillie dans son entreprise pour mon stage.

J'adresse mes remerciements également à Monsieur Issaka CONGO, mon maître de stage pour son encadrement et son suivi régulier tout au long de mon stage.

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

Je remercie aussi le Docteur Dial NIANG pour son encadrement et sa disponibilité.

Mes remerciements au Docteur Angelbert BIAOU pour son encadrement et ses conseils.

Je remercie également Monsieur Zakaria BELEM, Directeur Technique de AC3E pour ses précieux conseils.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Barnaby KOUDOUGOU pour son aide 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 AC3E.

Je remercie tous mes amis et proches pour leur aide.

DEDICACES



A TOUTE MA FAMILLE

RESUME

La présente étude a été menée dans la province du Soum en zone sahélienne burkinabè plus particulièrement dans le barrage de Kelbo. Il s'agit d'une région fragile subissant les effets combinés des aléas climatiques et de l'action de l'Homme. Dans l'optique d'un soutien des populations face aux impacts des changements climatiques, le gouvernement burkinabè avec l'appui de partenaires techniques et financiers a initié un important projet de construction ou de réhabilitation d'ouvrages à vocation hydro-agricole. C'est dans ce contexte que l'édification du barrage de Kelbo a été retenue en vue d'aménager des périmètres agricoles, de favoriser le développement de l'élevage et d'augmenter la production halieutique.

Pour mener cette étude, nous avons élaboré une démarche méthodologique basée essentiellement sur des études hydrologiques, de génie civil en vue de quantifier les apports et de dimensionner l'ensemble des éléments constituant cet ouvrage de stockage.

Ce barrage calé à l'exutoire d'un bassin versant d'une superficie de 599 km² présente un apport liquide en année quinquennale sèche d'environ 9 millions de m³. Cet ouvrage qui a une capacité d'environ 21 millions de m³ servira essentiellement à irriguer 300 ha de terre et à abreuver les animaux. C'est une digue homogène à remblai argileux dont les dimensions sont définies comme suit :

- longueur de 2,3 km environ et largeur en crête de 4 m ;
- la digue est calée à la côte 303 m avec comme hauteur 8,5m ;
- les talus amont et aval sont de 1v/2h.

Le déversoir d'une longueur de 130 m de long occupe une position latérale et permettra d'évacuer un débit centennal de 300m³/s. A l'aval de ce déversoir se trouve un bassin de dissipation à ressaut du type II. Le coût de l'ouvrage est d'environ 1,3 milliards de francs CFA.

Mots Clés :

- 1 – Etude Technique
- 2 – Barrage
- 3 – Kelbo
- 4 – Agro-Pastoral
- 5 –Déversoir trapézoïdale

ABSTRACT

The present study has been done in the province of the Soum, more precisely in Kelbo's dam. It's a fragile zone victim of climate hazards and human actions. In the optic of a support to the populations face to the impact of climate variation, the government of Burkina Faso, with technic and financial partners has unbarred on an important project of constructing or rehabilitating the Kelbo's agro-pastoral dam. That's, in this context that the construction of Kelbo's dam has been retained in the view to adjust agricol perimeters, to favor breeding development, to increase fish production.

To do this study, we have developed a methodic approach essentially based on hydraulic studies, civil engineering, in the view to quantify contributions and evaluate all elements which constitute this work.

This dam is set at the outlet of a catchment area of five 599 square kilometers with a liquid intake in the average quinquennial year about 9 million cubic meters. This structure, which has a capacity of approximately 21 million cubic meters (PEN), will be used mainly for irrigation of 300 ha of land and for the watering of animals that graze near the dam. This design of the dam resulting from our studying is as follows:

This is a homogeneous clay embankment dam whose dimensions are:

- length of 2,3 km and crest width of 4 m
- the dike is set at the coast 303 m
- the upstream and downstream slopes are 1v/2h

The weir 130 m long semi occupies a frontal position designed to remove a hundred-year flood flow of about 300 m³ / s. At the downstream of the weir in a stilling basin projection Type II will be built. The cost of the development has been estimated at about 1,3 billion CFA including taxes.

Key words :

- 1 – Technical Study
- 2 – Dam
- 3 –Kelbo
- 4 – Agro-Pastora
- 5 –Trapezoidal overfall

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BV : Bassin Versant

EIER : Établissement Inter-état de l'Équipement Rural

EIES : Étude d'Impact Environnemental et Social

CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GPS : Global Positioning System

IGB : Institut de la Géographie du Burkina

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie

IRD : Institut de Recherche et de Développement (Ex Orstom)

NIES : Notice d'Impacts Environnementale et Sociale

ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

PCD : Plan Communal de Développement

SIG : Système d'Information Géographique

PEN : Plan d'Eau Normal

PHE : Plus Hautes Eaux

MAH : Ministère de l'Agriculture et l'Hydraulique

BUNED : Le Bureau National des évaluations Environnementales et de gestion des Déchets spéciaux

CS : Contrôle Sanitaire

MDC : Mission de Contrôle

PGES : Plan de Gestion Environnemental et Social

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| <i>Tableau 1 : Coordonnées géographiques de la zone d'étude</i> | 2 |
| <i>Tableau 2 : Pentés de talus en fonction de la hauteur du barrage</i> | 16 |
| <i>Tableau 3 :Caractéristiques du bassin versant</i> | 27 |
| <i>Tableau 4 :Quantiles pluviométriques</i> | 28 |
| <i>Tableau 5 :Débit de projet</i> | 28 |
| <i>Tableau 6 :Apports liquides en années sèches</i> | 29 |
| <i>Tableau 7 : Caractéristiques du PEN et du PHE</i> | 32 |
| <i>Tableau 8 : Hypothèse de simulation et Estimation des besoins</i> | 33 |
| <i>Tableau 9 : Pertes par évaporation de la retenue</i> | 34 |
| <i>Tableau 10 : Pertes par infiltration</i> | 35 |
| <i>Tableau 11 : Caractéristiques de la digue</i> | 37 |
| <i>Tableau 12 :Caractéristiques de l'évacuateur de crue</i> | 42 |
| <i>Tableau 13 :Vérification de la stabilité du déversoir au PEN</i> | 43 |
| <i>Tableau 14 :Vérification de la stabilité du déversoir au PHE</i> | 44 |
| <i>Tableau 15 :Vérification de la stabilité du déversoir au PHES</i> | 45 |
| <i>Tableau 16 :Caractéristiques du Bassin de dissipation et chenal d'évacuation</i> | 46 |
| <i>Tableau 17 : Caractéristiques géométriques des bajoyers</i> | 47 |
| <i>Tableau 18 :Vérification de la Stabilité du mûr bajoyer</i> | 48 |
| <i>Tableau 19 :Caractéristiques du tapis amont étanche</i> | 49 |
| <i>Tableau 20 :Caractéristiques des diguettes de protections</i> | 50 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| <i>Figure 1: Situation géographique de la commune de KELBO</i> | 2 |
| <i>Figure 2 :Types de sols de la Zone d'étude</i> | 3 |
| <i>Figure 3 :Forces agissant sur le déversoir pour différents cas</i> | 19 |
| <i>Figure 4 :Effectif du Cheptel de Kelbo de2009-2011</i> | 25 |
| <i>Figure 5 :Courbe Hauteur-Volume-Hauteur-Surface</i> | 31 |
| <i>Figure 6 :Courbe d'exploitation de la retenue en année quinquennale sèche</i> | 36 |
| <i>Figure 7 :Cercles de glissement des talus.</i> | 41 |
| <i>Figure 8 :Déversoir et Bassin de dissipation</i> | 47 |
| <i>Figure 9 :Coupe transversale du mûr bajoyer</i> | 48 |
| <i>Figure 10 :Mur Bajoyer et écran anti-renard</i> | 49 |
| <i>Figure 11 :Ouvrage de Vidange</i> | 51 |
| <i>Figure 12: Ajustement de la pluviométrie annuelle</i> | 56 |
| <i>Figure 13: Ajustement des pluies journalières maximale</i> | 58 |
| <i>Figure 14: Courbe de KOZENY</i> | 73 |
| <i>Figure 15: 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> | 88 |
| <i>Figure 16: Détermination des caractéristiques du bassin de dissipation pour un nombre de Froude supérieur à 4,5 et une vitesse inférieur à 15 m/s</i> | 89 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-------------|
| REMERCIEMENTS | ii |
| DEDICACES | iii |
| RESUME | iv |
| ABSTRACT | v |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS | vi |
| LISTE DES TABLEAUX | vii |
| LISTE DES FIGURES | viii |
| I. INTRODUCTION | 1 |
| II. MATERIELS ET METHODES | 2 |
| II.1 LOCALISATION DE LA ZONE D’ETUDE | 2 |
| II.1.1 Climat..... | 3 |
| II.1.2 Géomorphologie..... | 3 |
| II.1.3 Sols..... | 3 |
| II.1.4 Végétation et faune..... | 4 |
| II.1.5 Hydrographie..... | 4 |
| II.1.6 Données socio-économiques..... | 4 |
| II.2 MATERIELS | 5 |
| II.3 METHODES | 6 |
| II.3.1 Études hydrologiques..... | 6 |
| A. Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant..... | 6 |
| B. Analyse fréquentielle des pluies..... | 7 |
| C. Débit de projet..... | 8 |
| D. Etude des apports..... | 10 |
| II.3.2 Étude de la cuvette..... | 11 |
| A. Courbe hauteur-Volume-Surface..... | 11 |
| B. Calage du Plan d’Eau Normal (PEN)..... | 11 |
| C. Calage des Plus Hautes Eaux (PHE)..... | 11 |

| | |
|---|-----------|
| D. Estimation des besoins en eau et des pertes..... | 12 |
| II.3.3 Etude de la digue et de ses ouvrages | 14 |
| A. Digue..... | 14 |
| B. Ouvrages annexes | 18 |
| III. SYNTHÈSE DES ETUDES DE BASE..... | 24 |
| III.1 ETUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE..... | 24 |
| III.1.1 L’agriculture..... | 24 |
| III.1.2 L’élevage..... | 24 |
| III.2 ÉTUDES GEOTECHNIQUES..... | 25 |
| III.2.1 Sol de fondation sous la digue | 25 |
| III.2.2 Zones d’emprunts..... | 26 |
| III.2.3 Zone d’approvisionnement des autres matériaux..... | 26 |
| III.3 ÉTUDES PEDOLOGIQUES..... | 26 |
| III.4 NOTICE D’IMPACT ENVIRONNEMENTAL | 52 |
| III.4.1 Les impacts négatifs sur l’environnement | 52 |
| III.4.2 Les impacts positifs sur l’environnement | 52 |
| III.4.3 Composantes du Plan de gestion Environnemental et Social | 52 |
| IV. RESULTATS ET DISCUSSION..... | 27 |
| IV.1 ETUDE HYDROLOGIQUE..... | 27 |
| IV.1.1 Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant..... | 27 |
| IV.1.2 Analyse fréquentielle | 28 |
| IV.1.3 Débit projet | 28 |
| IV.1.4 Crue de sécurité..... | 29 |
| IV.1.5 Crue de rupture..... | 29 |
| IV.1.6 Apports liquides du bassin versant..... | 29 |
| IV.2 ETUDE DE LA CUVETTE | 30 |
| IV.2.1 Courbe Hauteur-Volume/Hauteur-Surface | 30 |
| IV.2.2 Caractéristiques de la cuvette au PEN et au PEH | 32 |
| IV.2.3 Revanche libre..... | 32 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| IV.2.4 | Simulation de la retenue..... | 32 |
| IV.2.5 | Évaluation des besoins | 33 |
| IV.2.6 | Évaluation des pertes de la retenue | 34 |
| A. | Pertes par évaporation..... | 34 |
| B. | Pertes par infiltration | 35 |
| C. | Quantification des dépôts solides | 35 |
| IV.3 | ÉTUDE DE LA DIGUE ET DE SES OUVRAGES..... | 37 |
| IV.3.1 | Digue..... | 37 |
| A. | Protections des talus et de la crête | 39 |
| B. | Stabilité des pentes de la digue..... | 41 |
| IV.3.2 | Etude des ouvrages annexes..... | 42 |
| A. | Evacuateur de crue..... | 42 |
| B. | Bassin de dissipation et chenal d'évacuation..... | 46 |
| C. | Murs Bajoyers..... | 47 |
| D. | Le tapis amont étanche | 49 |
| E. | Diguettes de protection | 49 |
| F. | Ouvrage de prise | 50 |
| G. | Ouvrage de Vidange | 51 |
| V. | CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 46 |
| VI. | BIBLIOGRAPHIE..... | 47 |
| VII. | ANNEXES | 48 |

FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE DE KELBO

| I. LOCALISATION | | |
|-------------------------------------|--|--------------------|
| Commune | Kelbo | |
| Province | SOUM | |
| Région | Sahel | |
| Coordonnées | Latitude : 13°51'25,83''N ; Longitude : 01°11'23,38'' O | |
| Désignations | Unités | Caractéristiques |
| Période de retour | Année | 100 |
| Durée de retour souhaitée | Année | 30 |
| Risque global accepté | % | 25 |
| II. BASSIN VERSANT | | |
| Superficie | km ² | 599 |
| Périmètre | km | 164 |
| Débit de projet | m ³ /s | 300 |
| Pluie annuelle moyenne | mm | 414 |
| Pluie journalière décennale humide | mm | 72,1 |
| Pluie journalière centennale humide | mm | 104 |
| Apports en année quinquennale sèche | m ³ | 18 066 715 |
| Apports en année moyenne | m ³ | 24 790 214 |
| III. CUVETTE | | |
| Côte PHE | m | 301,7 |
| Côte PEN | m | 300,5 |
| Volume d'eau au PHE | m ³ | 38 832 679 |
| Volume d'eau au PEN | m ³ | 20 979 147 |
| Superficie du PHE | m ² | 16 515 435 |
| Superficie du PEN | m ² | 12 3733 93 |
| IV. DIGUE | | |
| Type | - | Homogène en argile |
| Côte de calage | m | 303 |

| | | |
|--|------|------------------------------|
| Hauteur maximale par rapport au lit mineur | m | 8,5 |
| Largeur en crête | m | 4 |
| Longueur (déversoir + digue) | m | 2401 |
| Pente du talus amont = Pente du talus aval | - | 1V/2H |
| V. EVACUATEUR DE CRUE | | |
| Nombre | - | 01 |
| Position | - | Centrale |
| Cote de calage | m | 300,5 |
| Hauteur maximale | m | 5,76 |
| Type | - | Déversoir poids trapézoïdale |
| Longueur totale | m | 130 |
| Largeur en crête | m | 0,85 |
| Type bassin de dissipation | - | A Ressaut Type II |
| Longueur bassin | m | 130 |
| Largeur bassin | m | 3,4 |
| VI. OUVRAGE DE PRISE | | |
| Position | - | Rive droite et gauche |
| Type de commande | - | Vanne aval |
| Nature de la conduite | - | Conduite en fonte |
| Diamètre d la conduite | mm | Ø 500 |
| VII. COUT DES TRAVAUX | FCFA | 1 243 816 566 TTC |

I. INTRODUCTION

Le Burkina Faso est un pays sahélien et continental d'une superficie estimée à 274 200 km² situé au cœur de l'Afrique occidentale. L'économie du pays repose essentiellement sur l'agriculture et l'élevage. Les potentialités offertes par les barrages sont importantes car les volumes stockés sécurisent la production hydro-agricole pendant l'hivernage mais permettent aussi l'exploitation des terres agricoles en saison sèche. Malheureusement les aléas climatiques, marqués par la rareté des pluies et leur mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace constituent un frein à la production agricole conduisant ainsi les populations à migrer vers les villes à la recherche d'un mieux-être.

Des efforts sont certes consentis par l'Etat à travers la construction de retenues d'eau, mais le problème de la mobilisation des eaux de surface persiste. Ainsi, dans la quête permanente de la sécurité alimentaire, et du mieux-être des populations rurales, l'une des mesures de sécurité optée par le gouvernement est la maîtrise partielle ou totale de la ressource eau à travers la réalisation d'ouvrages de stockage.

Le projet de réalisation du barrage de Kelbo (Province du Soum) s'inscrit dans cette logique avec comme attribution principale la réduction de la pauvreté dans un milieu relativement fragile à cause des effets néfastes des changements climatiques. Le présent mémoire dont le thème s'intitule : « Etude Technique du barrage agro-pastoral de Kelbo dans la Province du Soum » dont l'objectif général est la mise en place d'un ouvrage à vocation hydro-agricole. Il s'agira spécifiquement de :

- procéder à des études de base (hydrologie, hydraulique etc...)
- dimensionner l'ouvrage ;
- estimer le coût de l'aménagement.
- présenter une synthèse de la notice d'impact environnemental et social

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant où se trouve le barrage de Kelbo (figure 1) est situé à environ 75 km de la ville de Djibo chef-lieu de la province du Soum dans la région du Sahel. Les coordonnées géographiques du site d'étude sont reportées au tableau 2.

Tableau 1: Coordonnées géographiques de la zone d'étude

| Coordonnées du site | | | |
|----------------------|-----------------|----------------|----------------------|
| | Longitude | Latitude | Description |
| Coordonnées polaires | 01°11'23,38'' O | 13°51'25,83''N | Coordonnées Exutoire |
| Coordonnées UTM | 695631,13 E | 1532671,07 N | |

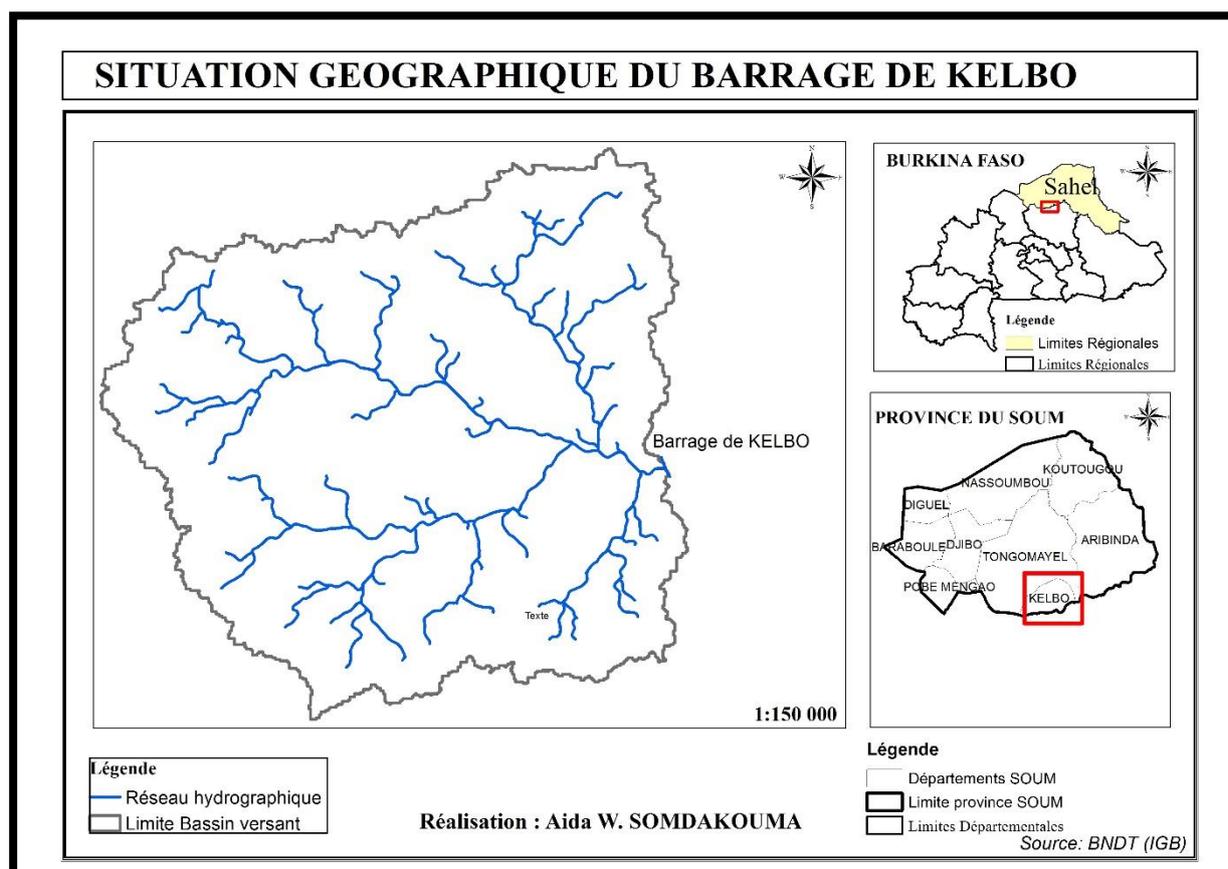


Figure 1: Situation géographique de la commune de KELBO

II.1.1 Climat

La commune de Kelbo a un climat de type sahélien, chaud et sec marquée par deux (2) flux d'air dominants que sont :

- l'harmattan : vent chaud et sec de direction nord-est / sud-ouest ;
- la mousson : vent humide de direction sud-ouest / nord-est.

Ces deux vents déterminent les deux principales saisons de la localité :

- une saison sèche d'octobre à mai ;
- une courte saison pluvieuse située généralement entre fin mai et septembre
- la moyenne pluviométrique interannuelle est inférieure à 600 mm de 1971 à 2015.

II.1.2 Géomorphologie

Le relief de la commune de Kelbo est caractérisé par les glacis et les cordons dunaires. Ces formations matérialisent un ensemble monotone entrecoupé de bas-fonds dont les eaux tarissent généralement dans le premier trimestre de l'année.

II.1.3 Sols

Le domaine sahélien (Soum) est caractérisé par trois groupes de sols dont la typologie et les caractéristiques sont :

- les sols éoliens profonds, sableux à argilo-sableux en surface et argileux en profondeur, caractérisés par une faible fertilité.
- les sols argileux à profondeur moyenne présentant une fertilité moyenne.
- les sols hydromorphes gley et pseudo gley.

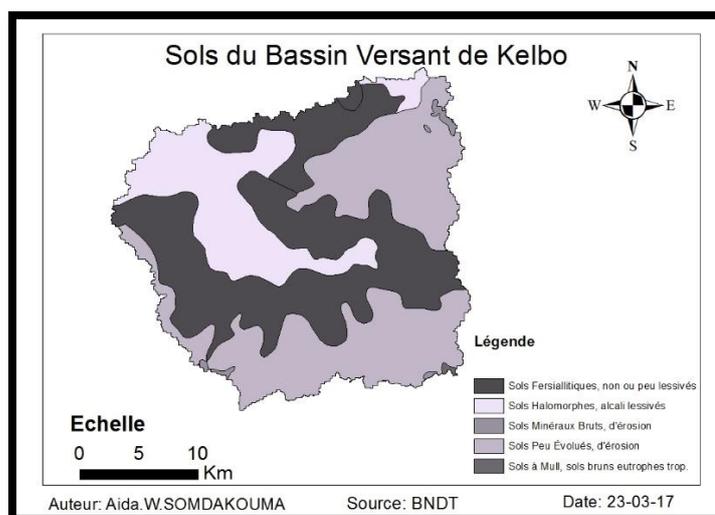


Figure 2 :Types de sols de la Zone d'étude

II.1.4 Végétation et faune

La végétation naturelle est dominée par la steppe herbeuse servant de pâturage pour le bétail. C'est une steppe herbeuse, buissonnante, arbustive et arborée. Elle est caractérisée par un lot d'espèces sahéliennes : acacia sp, leptadeniapyrotechnica, Grewiatenax. Cette steppe comporte de minces cordons ripicoles où dominent Anogéinsusléocarpus, Mitraginainermis, Acacia ataxacantha, acacias Eyal, acacia senegal, acacia laeta, Bosciasalicifolia, ptérocarpuslucens.

La faune, constituée actuellement de petits gibiers, a connu une forte perturbation de son biotope naturel par les activités anthropiques. On rencontre des biches, porc-épic, singes, lièvres, phacochères et périodiquement, quelques éléphants de passage.

II.1.5 Hydrographie

Outre le principal cours d'eau principal (affluent de la Faga) en arête de poisson, on note quatre tributaires dont deux confluent à droite et deux à gauche dans le voisinage du site du barrage de Kelbo.

Un seul barrage existe en amont du site du barrage de Kelbo. Il s'agit du barrage de Serkissouma, construit en 1985 sur le cours d'eau appelé SAWARI, à environ 50 km au Sud Est de Djibo et à environ 12 km à l'Ouest –Nord –Ouest de Kelbo. Son bassin versant à une superficie actualisée d'environ 184 km² et la capacité de la retenue d'eau est de 520 000 m³. De l'enquête de terrain, il ressort que le barrage déverse annuellement.

II.1.6 Données socio-économiques

La population de la Commune rurale de Kelbo était de 24 157 habitants au RGPH de 2006, soit une densité de 48 habitants au km² (superficie de la commune étant de 504 km²). Le recensement administratif de 2004 l'avait estimée à 22 880 habitants. La projection pour 2011, sur la base du taux de croissance de 2,8% (RPGH 2006), donne une population de 24 497 habitants. Quatre (4) ethnies cohabitent dans la commune de Kelbo, ce sont : les mossis, les peulhs, les fulcés, les rimaïbés. Trois langues y sont parlées : le peulh, le mooré, le fulcé. La commune est en majorité musulmane. On a environ 97% de musulmans, 2% d'animiste et 1% de chrétiens. Les différentes religions et ethnies vivent en parfaite cohésion sociale.

L'économie est essentiellement basée sur l'élevage et l'agriculture.

II.2 MATERIEL

Le matériel que nous avons utilisé dans le cadre de notre travail sont définis comme suit :

- **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 Hydrolab** pour la vérification des traitements statistiques.
- **Le logiciel CROPWAT 8.0 de la FAO** pour la détermination des besoins en eau des cultures.
- **Le logiciel CYPE** pour la vérification de la stabilité des murs bajoyers.
- **Le logiciel Géoslope v12** pour la vérification de la stabilité des talus de la digue

II.3 METHODES

II.3.1 Études hydrologiques

Le dimensionnement hydrologique d'un barrage revient à :

- Dimensionner le réservoir du barrage afin de trouver la capacité qu'il peut stocker.
- Dimensionner l'évacuateur de crue afin de déterminer le débit qu'il peut évacuer ainsi que le débit de pointe.
- Définir la période de retour, la période de retour souhaitée ainsi que le risque global accepté. Ces paramètres se définissent par l'équation :

| | |
|--|---|
| $T \geq \frac{1}{1-(1-R)^{\frac{1}{N}}} \quad (0)$ | <p>T=période de retour (ans)</p> <p>R=risque global accepté (%)</p> <p>N= période de retour souhaitée(ans)</p> |
|--|---|

A. Caractéristiques physiques et géomorphologiques 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 (KG) 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 l'équation 1 :

| | |
|---------------------------------------|--|
| $KG = 0,282 * P * S^{-0.5} \quad (1)$ | <p>S=superficie du bassin versant (km²)</p> <p>P=périmètre (Km)</p> <p>KG=Indice de compacité (m)</p> |
|---------------------------------------|--|

➤ **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 les équations 2 et 3 :

| | |
|--|--|
| $Leq = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4} \quad (2)$ | <p>S=superficie du bassin versant (km²)</p> <p>P=périmètre (Km)</p> <p>Leq=Longueur du rectangle équivalent (Km)</p> <p>leq=Longueur du rectangle équivalent (Km)</p> |
| $leq = \frac{P - \sqrt{P^2 - 16S}}{4} \quad (3)$ | |

➤ **Densité de drainage :** La densité de drainage est le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique et la surface du bassin versant. Elle est obtenue avec l'équation 4 :

| | |
|--------------------------------------|--|
| $D_d = \frac{\sum L_i}{S} \quad (4)$ | S=superficie du bassin versant (km ²) Li=Longueur totale des cours d'eau (Km) |
|--------------------------------------|--|

➤ **Pente transversale moyenne :** Elle est déterminée en faisant la moyenne de quatre à six pentes transversales.

➤ **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 et est défini par l'équation 5 :

| | |
|--|---|
| $Ig = \frac{0,026}{\sqrt{S}} * 1000 \quad (5)$ | S=superficie du bassin versant (km ²) Ig=Indice global de pente (m/Km) |
|--|---|

❖ **Indice global de pente corrigé (Ig_{Cor}) :** La pente transversale est trop différente de la pente longitudinale, on calcule alors un Indice global de pente corrigé (Ig_{Corr}). Il est donné par l'équation 6 :

| | |
|---|---|
| $Igc_{orr} = \frac{[(n-1) * Ig + It]}{n} \quad (6)$ | n=Coefficient fonction de la longueur du rectangle équivalent Ig=Indice global de pente (m/Km) It=Pente transversale (m/Km) |
|---|---|

B. Analyse fréquentielle des pluies

Les analyses fréquentielles des pluies ont été faites grâce aux données pluviométriques recueillies à la station de Djibo.

Les pluies moyennes annuelles (1971 – 2013) ont été ajustées à partir de la loi de Gauss dont la fonction de répartition est décrite par l'équation :

| | |
|---|--|
| $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2u^2}} du \quad (7)$ <p style="text-align: center;">avec $u = \frac{x-\bar{x}}{S}$</p> | U=la variante réduite \bar{x} =la moyenne S=l'écart type |
|---|--|

Quant aux pluies maximales journalières (1968 – 2015), elles ont été traitées à partir de la loi de Gumbel dont la fonction de répartition est donnée par l'équation 8 :

| | |
|---------------------------------------|--|
| $F(x) = e^{-e^{-a(x-x_0)}} \quad (8)$ | $x_0 =$ paramètre de position $\frac{1}{a} =$ paramètre d'échelle |
|---------------------------------------|--|

Les calculs ont été faits manuellement puis vérifiés à l'aide du logiciel Hydrolab version 2013. Les résultats, consignés à l'Annexe II (Etude hydrologique) page 61 permettent de définir pour les moyennes annuelles et les maximales journalières les quantiles caractéristiques, à un niveau de confiance de 95%.

C. 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 spécialement mises au point pour les petits bassins versants de l'Afrique occidentale et centrale sont celles utilisées pour la prédétermination des débits de crue et des apports. Les deux méthodes retenues sont celles de l'ORSTOM et du CIEH. Le détail de calcul est donné en l'Annexe II (Etude hydrologique) page 67.

❖ Méthode ORSTOM :

Elle s'applique à des bassins dont la superficie se situe entre quelques dizaines d'hectares et plus de 1500 km², relevant de la zone sahélienne et de la zone tropicale sèche (FAO, 1998). La zone d'étude étant située en zone sahélienne, avec un bassin peu 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 9 :

| | |
|---|---|
| $Q_{r10} = A * P_{10} * \alpha_{10} * \frac{S}{T_{b10}}$ $Q_{10} = m * Q_{r10} \quad (9)$ | <p>Qr10 =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 Kr70 - Kr100</p> <p>T_b=temps de base de la crue décennale (mn)</p> <p>A=coefficient d'abattement de VILLAUME</p> <p>α=Coefficient de pointe pris égal à 2,6</p> <p>m=Coefficient majorateur égal à 1,03</p> |
|---|---|

❖ **Méthode CIEH ou méthode statistique**

Elle a été établie sur la base d'un échantillon de 162 bassins versants répartis en Afrique francophone, peut être employée sur des bassins allant jusqu'à 1000 km², relevant de la zone tropicale sèche ou sahélienne de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Elle est donnée par l'équation 10 :

| | |
|--|---|
| $Q_{10} = a * S^s * Pan^p * Ig^i * Kr^k * Dd^d \quad (10)$ | <p>a : Constante de la régression</p> <p>S : la superficie du bassin versant (km²)</p> <p>Pan : Pluviométrie annuelle (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 :

- ✓ Equation N°39 : Formulation pour le Burkina Faso en fonction de S et Kr10
- ✓ Equation N°40 : Formulation pour le Burkina Faso en fonction de S, Ig et Kr10

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

❖ **L'Hydrogramme de crue**

Le barrage est dimensionné en tenant compte de la crue de sécurité et donnée par l'équation 11 :

| | |
|---|--|
| $Q(t) = Q_p * \frac{2 * \left(\frac{t}{t_m}\right)^{2a}}{1 + \left(\frac{t}{t_m}\right)^{2a}} \quad (11)$ | <p>Q(t) : Débit à l'instant t t : instant ou Q(t)=Qp en heure t_m : temps de montée en heure a : paramètre à calculer</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 l'équation 12 :

| | |
|---|--|
| $Q_{rupt} = 2 * l * (a + 0,20)^{1,5} + 0,15 * L \quad (12)$ | <p>Q_{rupt} : crue de rupture du barrage en m³/s L : longueur de la digue sans déversoir (m) ; l : longueur du déversoir (m) a : revanche totale (m)</p> |
|---|--|

D. Etude des apports

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 l'équation suivante (13) :

| | |
|--|---|
| $K_e = \frac{Ecoulement}{Quantile}$ <p><i>Et</i></p> $V_{apports} = K_e * P * 1000 * VBV \quad (13)$ | <p>V : Volume des apports (m3) SBV : Surface du bassin versant (km²) P : Quantile pluviométrique considéré (mm) K_e : Coefficient d'écoulements obtenus par les abaques de RODIER</p> |
|--|---|

II.3.2 Étude de la cuvette

A. Courbe hauteur-Volume-Surface

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

| | |
|--|---|
| $V_{i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} * h \quad (14)$ | V_{n+1} : volume du bassin versant en m ³ S_n : surface du plan d'eau correspondant à la courbe n (ha) S_{n+1} : surface du plan d'eau correspondant à la courbe n+1 (ha) h : dénivelée entre deux courbes de niveau n et n+1 (m) |
|--|---|

B. 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.

C. Calage des Plus Hautes Eaux (PHE)

Elle correspond au PEN augmenté de la charge au-dessus du seuil. Elle est donnée par l'équation 15 suivante :

| | |
|----------------------------|---|
| $PHE = PEN + h \quad (15)$ | PEH : Plan des Hautes Eaux (m) PEN : Plan d'Eau Normal (m) h : hauteur d'eau au-dessus du seuil (m) |
|----------------------------|---|

D. Estimation des besoins en eau et des pertes

Hypothèses de calcul

Connaissant la consommation humaine, animale et les valeurs des différentes pertes par évaporation, infiltration et dépôt solide nous pouvons simuler la courbe d'utilisation de la retenue d'eau. Ainsi, convient-il donc de déterminer les besoins en eau des cultures du périmètre à irriguer enfin d'effectuer le calage de la digue à la cote de projet adéquate.

Nous avons déterminé les besoins totaux de chacune des cultures que sont le riz, la tomate et l'oignon. Nous avons ensuite considéré la culture la plus gourmande en eau (oignon).

❖ Estimation des besoins agricoles

Les cultures concernées sont :

- La riziculture pluviale sur 150 ha
- Le maraîchage en saison sèche (oignon) sur 150 ha.

Les valeurs des paramètres permettant d'estimer les besoins des cultures sont données par les équations 16,17,18 et 19 suivantes :

| | |
|--|--|
| <p>➤ <i>si</i> $P \geq 20 \text{ mm}$ <i>Alors</i></p> $Pe \text{ (mm)} = P - (0.15 * (P - 20)) \quad (16)$ <p>➤ $Pe \text{ (mm)} = P$ <i>si</i> $P < 20 \text{ mm}$ (17)</p> <p>➤ $B_n = K_c * ET_0 - Pe$ (18)</p> <p>➤ $B_b = \frac{B_n}{e}$ (19)</p> | <p>P = pluviométrie moyenne mensuelles (mm)</p> <p>Pe=Pluie efficace (mm) Source IRAT (Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (Paris – France)).</p> <p>Kc=Coefficient cultural de la plante</p> <p>ET0= Evapotranspiration de référence (mm)</p> <p>e= Efficience du système d'irrigation</p> <p>Bn= Besoins nets (mm)</p> <p>Bb= Besoins bruts (mm)</p> |
|--|--|

❖ **Estimation des besoins pastoraux**

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/UBT pour le petit bétail. La population d'UBT a été actualisée à l'aide de l'équation 20 suivante avec des taux d'accroissement qui sont respectivement de 2% et 3% (**Source : Statistiques du Secteur de l'élevage au Burkina Faso Animaux, 2008**) :

| | |
|------------------------------------|---|
| $P_n = P_0 (1 + T_x)^n \quad (20)$ | P _n = population à l'échéance du projet P _o = population initiale n = nombre d'année T _x = taux d'accroissement |
|------------------------------------|---|

❖ **Besoins domestiques**

Pour les besoins domestiques d'après les enquêtes faites sur le terrain, nous décidons d'allouer 15 litres/jour/habitant.

❖ **Évaporation**

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**).

| | |
|--|--|
| $Elac = 1,664 * Ebac A^{0,602} \quad (21)$ | r : coefficient de régression Elac : évaporation du plan d'eau (mm/j) Ebac A : évaporation au bac A (mm/j) |
|--|--|

❖ **Infiltration**

D'après les études faites par certains auteurs il ressort que l'infiltration au niveau de la cuvette est de l'ordre de 1 à 3mm/jour. Notre site se trouvant en zone sahélienne nous décidons de prendre une valeur de 2 mm/jour.

❖ **Dépôts solides**

Il existe tout un ensemble de formules permettant d'évaluer de manière plus ou moins fiable l'importance des apports solides. Celle utilisée est celle de (KARAMBIRI, 1998) donné par l'équation 22, du fait que son élaboration a été faite en grande partie sur des recherches faites sur les retenues du Burkina Faso.

| | |
|---|---|
| $D = 137 * \left(\frac{P}{700} \right)^{-2.02} * S^{-0.05} * [0,25 + 1,13 * (h + r)]^{1,15}$ <p style="text-align: center;"><i>Et</i></p> $V_s = D * S * n \quad (22)$ | <p>H : paramètre anthropique, pris ceci égale à 0,55 (bassin versant comportant des petites villes et des villages moyens) ;</p> <p>R : paramètre morphologique, pris égale à 0,55 (relief moyen)</p> <p>P : la pluviométrie moyenne annuelle (mm) ;</p> <p>S : la superficie du bassin versant (km²)</p> <p>D : la dégradation spécifique annuelle (m³/km²/an) ;</p> <p>V_s : Volume de dépôts solides (m³/an)</p> <p>n : la durée de vie de l'ouvrage</p> |
|---|---|

II.3.3 Etude de la digue et de ses ouvrages

A. Digue

❖ **Calage de la digue (E) :**

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 et elle est calculée à partir de l'équation 23 suivante :

| | |
|--------------------------------|--|
| $H_D = H_r + h + R \quad (23)$ | <p>H_r= hauteur de la retenue (m)</p> <p>h=lame d'eau au-dessus du seuil (m)</p> <p>R=revanche (m)</p> |
|--------------------------------|--|

❖ **Largeur de la crête :**

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 correspondant aux équations 24 et 25 :

| | |
|--|--|
| Formule de KNAPPEN $lc = 1,65 * \sqrt{H_D} \quad (24)$ | H_D : Hauteur de la digue en (m) lc : largeur en crête de la digue en (m) |
| Formule de PREECE $lc = 1,1 * \sqrt{H_D} + 1 \quad (25)$ | H_D : Hauteur de la digue en (m) lc : largeur en crête de la digue en (m) |

❖ **Largeur en fondation :**

La digue étant de forme trapézoïdale la largeur en base est donnée par l'équation 26

| | |
|---|---|
| $L_f = L_c + (m_{amont} + m_{aval}) * H_D \quad (26)$ | L_c =largeur en crête de la digue (m) m_{amont} = (Fruit de berge amont) m_{aval} = (Fruit de berge aval) H_D =hauteur de la digue (m) |
|---|---|

❖ **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 à l'équation 28 :

| | |
|---------------------------------------|---|
| $R = 0,75 * h + V^2/2 * g \quad (28)$ | h =hauteur des vagues (m) f = fetch en km U = vitesse du vent en km/h V =vitesse de propagation des vagues (m/s) $V=1,5+2* h$ |
|---------------------------------------|---|

❖ **Pentes des talus de la digue.**

Les pentes des talus sont fixées par les conditions de stabilité mécanique du massif et de ses fondations.

Les pentes ont été 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 granulométrie étendue, avec une hauteur de digue comprise entre 5 et 10 m les pentes sont de 2H/1V à l'aval et 2/1V à l'amont sont admises.

Tableau 2 : Pentés de talus en fonction de la hauteur du barrage

| 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 |

Source : LO (2016), cours de barrage, page 161

❖ **Infiltration et hydraulique interne**

Cette étude consiste à analyser les conditions d'étanchéité des 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.

| | |
|---|---|
| $q = k_r * Y_0 * S \quad (29)$ | Y_0 : Point d'intersection de l'axe des ordonnées et de la parabole de Kozeny |
| $Y^2 - 2xY_0 - Y_0^2 = 0 \quad (30)$ | h : tirant d'eau à l'amont (m) |
| $Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d \quad (31)$ | d : largeur en base du barrage diminuée de 0.7 b et de la longueur du drain (m) |
| | q : débit de fuite par mètre linéaire (m ³ /s/ml) |

❖ **Filtres et drains**

Le filtre horizontal doit 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.

Le filtre vertical sert de lieu de transition entre le remblai de la digue et le drain vertical. Il sert à éviter l'entraînement des particules fines du remblai par l'eau. Les caractéristiques des filtres sont données par les équations 32 et 33 :

| | |
|---|---|
| $e = 2 * \sqrt{\left(\frac{q * l_d}{k_d}\right)} \quad (32)$ | e : épaisseur (m) |
| $l_d = \frac{L_b}{3} \quad (33)$ | l_d : longueur (m) |
| | L_b : largeur en base de la digue (m) |
| | K_d (perméabilité du drain en m/s) |
| <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 de BISHOP. Elle a été vérifiée à l'aide du logiciel Géoslope Version 2012 afin de conforter les valeurs forfaitaires choisies dans le tableau 2 ci-dessus énoncé.

Nous effectuerons deux types de vérifications :

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

| | |
|--|--|
| $F_s = \frac{\Sigma \frac{(W-Pb) \cdot \tan\phi + C \cdot b}{\cos\alpha \cdot (1 + \frac{\tan\alpha \cdot \tan\phi}{F_s})}}{\Sigma (w \sin\phi)} \quad (34)$ | <p>C : cohésion du matériau de remblai W : Poids propre de l'ouvrage (KN/ml) P : Poussées exercées sur l'ouvrage (KN/ml)</p> |
|--|--|

B. Ouvrages annexes

➤ Évacuateur de Crue

❖ Longueur du seuil déversant

La longueur du seuil déversant a été déterminée avec la crue brute. Elle est donnée à l'équation 35 :

| | |
|---|--|
| $L = \frac{Q}{m \times (2 \times g)^{1/2} \times h^{3/2}} \quad (35)$ | <p>Q= débit du projet (m³/s) L=longueur du seuil déversant (m) M=coefficient de débit du seuil déversant (profil trapézoïdal) g= Constante de gravitation g(m/s²) h= lame d'eau déversante (m)</p> |
|---|--|

❖ Étude de Stabilité du déversoir

L'étude de stabilité du barrage en 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, nous avons considéré trois cas de figure :

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

Cas2 : Nous trouvons à la côte des plus hautes eaux (PHE) et $h=1,2$

Cas3 : Nous supposons que nous nous trouvons à la côte de la digue (PHES) et $h=2,5$

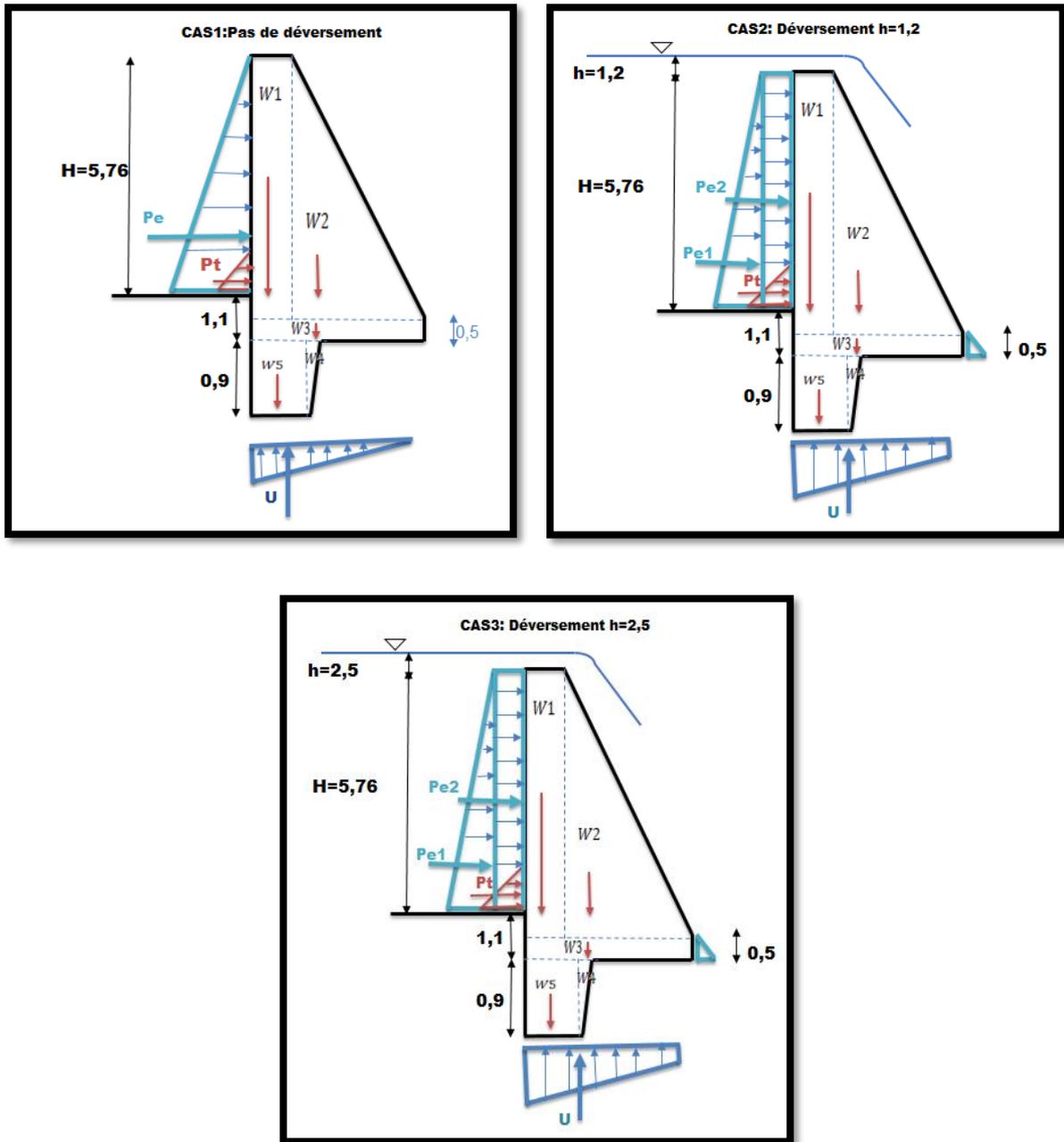


Figure 3 : Forces agissant sur le déversoir pour différents cas

✓ **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. Il est donné à l'équation 36 :

$$F_G = \frac{C \cdot S + \sum (W - P_i) \tan \phi}{\sum (P)} \geq 1,5 \quad (36)$$

F_G = coefficient de sécurité au glissement ;

W = poids propre de l'ouvrage ;

P_i = sous pression ;

C = la cohésion du sol de fondation

✓ **Stabilité au renversement :**

Dans un premier temps, on suppose que le mur pivote autour du point B 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. Il est donné à l'équation 37 :

$$F_R = \frac{\sum M_{résistants}}{\sum M_{moteurs}} \geq 1,5 \quad (37)$$

F_R = coefficient de sécurité au renversement ;

✓ **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 $< \sigma_{sol}$).

Le point C agit au centre de gravité du seuil mais à la base du seuil, il agit à $b/2$.

La contrainte admissible du sol est donnée par l'équation 38 :

$$\sigma_{adm.sol} = \frac{1}{2} * B * \gamma * Ny + C * Nc + \gamma * D * Nq \quad (38)$$

La contrainte maximale soumise au sol est donnée à l'équation 39 ci-dessus :

| | |
|---|---|
| $\sigma_{max} \leq \sigma_{adm.sol}$ <p style="text-align: center;"><i>Avec</i></p> $\sigma_{max} = \left(\frac{\sum(W-u)}{B} \right) * \left(1 + 6 * \frac{e}{B} \right) \quad (39)$ | <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 Grésillon et Lahaye, soit à partir de formules de calcul.

Les eaux déversées dans le bassin de dissipation seront acheminées par un chenal d'évacuation et délimité par des diguettes de protection. Les caractéristiques du chenal ont été définies par les lois d'écoulement en surface libre (MAR, 2004).

| | |
|--|--|
| $\frac{Q_{Projet}}{K_s * \sqrt{I}} = \frac{y_n * (b + m y_n)^{\frac{5}{3}}}{(b + 2 y_n * \sqrt{1 + m^2})^{\frac{2}{3}}}$ $Fr = \frac{V1}{g * y1}$ $V1 = \frac{Qs}{y1}$ | <p>QProjet : débit du projet (m³/s)</p> <p>Ks : 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>V1 : vitesse à l'entrée du Bassin de dissipation (m/s)</p> <p>Y1 : Tirant d'eau à l'entrée du Bassin de dissipation(m)</p> <p>Qs : Débit spécifique (m³/s/ml)</p> |
|--|--|

➤ **Mur bajoyer**

✓ **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. Il est donné à l'équation 36 :

$$F_G = \frac{C * S + \sum(W - P_i) \tan \phi}{\sum(P)} \geq 1,5 \quad (38)$$

FG = coefficient de sécurité au glissement ;

W = poids propre de l'ouvrage ;

P_i = sous pression ;

C = la cohésion du sol de fondation

✓ **Stabilité au renversement :**

Dans un premier temps, on suppose que le mur pivote autour du point B 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. Il est donné à l'équation 37 :

$$F_R = \frac{\sum M_{résistants}}{\sum M_{moteurs}} \geq 1,5 \quad (39)$$

➤ **Ouvrage de prise et de Vidange**

✓ **Ouvrage de prise**

Le choix du type d'ouvrage de prise a été fait en fonction des contraintes budgétaires et de la charge d'eau disponible. Son diamètre a été déterminé à partir de la formule de Torricelli qui se définit à l'équation 40 :

| | |
|---|---|
| $Q = c * \pi * \frac{D^2}{4} * \sqrt{2gH} \quad (40)$ | <p>Q=Débit obtenu par la formule de Torricelli (m³/s)</p> <p>C = coefficient de Torricelli (Source : Cours Hydraulique générale Page 23)</p> <p>D = diamètre de la conduite (mm)</p> <p>H = charge de l'eau (m)</p> |
|---|---|

✓ **Ouvrage de vidange**

Sur les petits barrages agricoles, on prévoit des organes de vidanges qui sont souvent des batardeaux destinés à vider la retenue en cas de besoin (**Source : Technique des petits barrages en Afrique Sahélienne et Equatoriale**). L'ouvrage de vidange se définit par son temps de Vidange donné à l'équation 41.

| | |
|--|---|
| $T = \left(\frac{S}{s}\right)^2 * \sqrt{\frac{2}{g}} * (\sqrt{h_0} - \sqrt{h}) \quad (41)$ | <p>T=Temps de vidange (s)</p> <p>S = Superficie au PEN (Source)</p> <p>s = Section de l'ouvrage de vidange (m²)</p> <p>h₀=Charge au PEN (m)</p> <p>h=Charge à côte de l'ouvrage de vidange (m)</p> |
|--|---|

III. SYNTHÈSE DES ETUDES DE BASE

III.1 ETUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE

III.1.1 L'agriculture

Sur le plan agricole et dans la production pluviale, la province du Soum ne couvre pas plus de 80% de ses besoins en céréales. La Commune de Kelbo a été identifiée pendant la campagne agricole 2009/2010 à risque avec un besoin d'intervention de vente de céréales à prix social. Compte tenu du tarissement rapide des eaux, la culture maraîchère est très difficile à réaliser. En fonction de la disponibilité de l'eau, les acteurs produisent de l'oignon, des choux, des carottes, des aubergines, etc.

Tableau 3: Production annuelle des cultures maraîchères en 2009

| | Tomate | Choux | Oignon bulbe | Piment |
|------------------|--------|--------|--------------|--------|
| Superficie (ha) | 119,5 | 49,5 | 139,9 | 118,5 |
| Production (T) | 3226,5 | 1471,5 | 3497,5 | 1540,5 |
| Rendement (T/ha) | 27 | 25 | 30 | 13 |

Source : Enquête de terrain AC3E décembre 2016

III.1.2 L'élevage

De manière générale, les effectifs du cheptel sont approximatifs. Pour la Commune de Kelbo, les données du PCD 2009 avec les taux de croissance fournis par l'ENEC II, permettent les estimations suivantes :

Tableau 4 : Effectif du cheptel de la commune de Kelbo de 2009-2011

| Espèces | 2009 | 2010 | 2011 |
|-----------|--------|--------|--------|
| Bovins | 29259 | 29844 | 30441 |
| Ovins | 3443 | 3564 | 36116 |
| Caprins | 42638 | 43917 | 45235 |
| Volailles | 132900 | 136887 | 140993 |

Source : PCD de la commune de Kelbo 2010-2014

La pêche est pratiquée par des acteurs en nombre très réduit et le tarissement rapide des eaux ne permet cette activité qu'en saison pluviale.

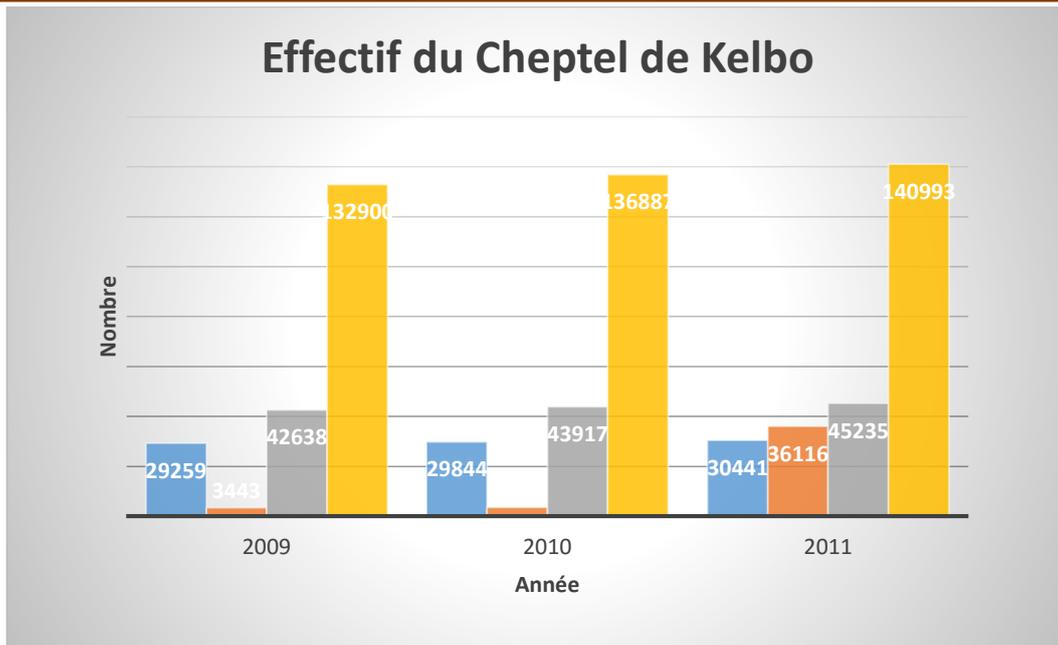


Figure 4 : Effectif du Cheptel de Kelbo de 2009-2011

Nous remarquons de manière une croissance du cheptel chaque d'année en année. Avec un plus fort pourcentage de volailles (environ 60%) et de caprins (environ 20%).

III.2 ÉTUDES GEOTECHNIQUES

III.2.1 Sol de fondation sous la digue

Sur le tracé de l'axe de la digue qui fait environ 2,4 km, il a été réalisé six (06) puits à ciel ouverts et dix (10) forages de la rive gauche à la rive droite soit à partir de la Borne B1. Ces profondeurs varient de 2,5 à 15 m.

Au vu des faciès des puits à ciel ouvert et des forages destructifs on peut dresser la stratigraphie suivante de l'axe projeté de la digue du barrage de KELBO :

- Suite à la terre végétale peu épaisse sablo-limoneuse il vient un dépôt éolien fait de sable fins à grains émoussés plus ou moins meuble en surface et compacte en profondeur
- Aux bords du lit mineur et en fond de celui-ci ce faciès sableux fin subit la compaction statique et avec le battement de la nappe phréatique entre en diagenèse pour donner des sols consolidés et indurés à canalicules et vacuoles.
- La formation éolienne repose sur des altérites ferrugineuses constituées par les graves latéritiques argileuses et les argiles latéritiques qui sont-elles adossées aux arènes argileuses (arènes finement grenues et arène farineuse violacée couleur « lie de vin »

qui préfigurent le substratum ou le bed-rock altéré. En lit mineur la nappe phréatique a été repère à 4.00m profondeur et en dehors du lit à 14.00m.

III.2.2 Zones d'emprunts

Les recherches ont permis d'identifier 04 sites d'emprunts argileux A1, A2, A3 et A4 à environ 1700 m du site de la future digue pour les trois (03) premiers sites et à 660 m pour le quatrième site. Des puits à ciel ouvert ont été exécutés sur ces quatre sites par maille de 100*100m. L'emprunt A3 jugé très sableux, ce sont les emprunts A1, A2 et A4 qui ont été soumis aux essais de laboratoire. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Argile peu sableuse, peu plastique, imperméable pour les emprunts A1 et A4
- Argile sableuse peu plastique, peu perméable pour l'emprunts A2.

III.2.3 Zone d'approvisionnement des autres matériaux

Un site d'emprunt de graveleux latéritique a été prospecté et étudié à environ 6 km de la future digue.

Il s'agit de graveleux latéritique peu argileux. Ce matériau pourra servir pour les travaux de couche de protection et les pistes d'accès.

III.3 ÉTUDES PEDOLOGIQUES

Les unités pédologiques inventoriées sont les suivantes :

❖ En périmètre amont :

- Des sols Ferrugineux tropicaux Peu Lessivés (FPL) Série AS (Argile Sableuse) 143.58ha, 70.91% de la superficie du périmètre.
- Des sols Peu Lessivés inter grade vers les sols Ferrugineux tropicaux Lessivés à taches et à Concrétions (FPL/FLTC) 19.07ha, 9.42% de la superficie du périmètre
- Des sols Ferrugineux tropicaux Peu Lessivés (FPL) Série SL (Sable Limoneux), 39.82ha, 19.67% de la superficie du périmètre.

❖ En périmètre aval :

- Des sols Hydromorphes peu humifères à Pseudo-Gley d'Ensemble, (HPGE de type LAS ou LS), unité pédologique 1 s'étendant sur 78.83ha, 58.63% de la superficie du périmètre ;
- Des sols Peu Evolués d'Apport Alluvial Hydromorphes (PEAAH de texture A/A/AL) constituant l'unité pédologique 4 qui couvre 24.76ha, 18.42% de la superficie du périmètre.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 ETUDE HYDROLOGIQUE

Le dimensionnement hydrologique du barrage de Kelbo nous donne :

| DÉSIGNATION | UNITÉS | VALEURS |
|-----------------------------|---------------|----------------|
| Période de retour | ans | 100 |
| Période de retour souhaitée | ans | 30 |
| Risque global accepté | % | 25 |

IV.1.1 Caractéristiques physiques et géomorphologiques du bassin versant

Les paramètres obtenus sont reportés au tableau 3 :

Tableau 5 :Caractéristiques du bassin versant

| | |
|---|----------------------|
| Climat | Sahélien |
| Classe de perméabilité | RI (P3) |
| Surface (km ²) | 599,00 |
| Périmètre (km) | 164 |
| Typologie du bassin suivant la taille | Grand Bassin versant |
| Typologie du réseau hydrographique | Arête de Poisson |
| Coefficient de compacité de GRAVELIUS | 1,89 |
| Longueur du rectangle équivalent (km) | 73,89 |
| Largeur du rectangle équivalent (km) | 8,11 |
| Indice global de pente (M/ km) | 0,50 |
| Indice de pente transversale (M/ km) | 6,63 |
| Indice global de pente corrigé (M/km) | 1,73 |
| Pente moyenne du réseau hydrographique (M/km) | 1,33 |
| Dénivelée spécifique (m) | 12,25 |
| Typologie du relief | Faible |

IV.1.2 Analyse fréquentielle

Les différents quantiles obtenus à partir de l'analyse fréquentielle sont reportés au tableau 4

Tableau 6 :Quantiles pluviométriques

| Caractéristiques | Valeurs (mm) |
|-------------------------------------|---------------------|
| Pluie annuelle moyenne | 414 |
| Pluie décennale humide | 575 |
| Pluie décennale sèche | 252 |
| Pluie quinquennale humide | 520 |
| Pluie quinquennale sèche | 308 |
| Pluie journalière décennale humide | 72,09 |
| Pluie journalière décennale sèche | 29,72 |
| Pluie journalière centennale humide | 104,4 |
| Pluie journalière centennale sèche | 20,20 |

IV.1.3 Débit projet

L'utilisation des deux méthodes de calcul du débit maximal nous a permis d'avoir respectivement les valeurs pour la méthode de l'Orstom et du CIEH. Comme l'ouvrage à mettre en place est un ouvrage de sécurité, nous allons retenir la valeur fournie par la méthode CIEH pour avoir de la sécurité

Tableau 7 :Débit de projet

| | DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|-----------------------|------------------------|--------------|---------------|
| Méthode ORSTOM | Crue décennale | m^3/s | 36,51 |
| Méthode CIEH | Crue décennale | m^3/s | 48,95 |
| Débit retenu | Crue décennale retenue | m^3/s | 48,95 |

| | DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|---------------------|-------------------------|-------------------|------------|
| Débit Projet | Coefficient majorateur | | 6,06 |
| | Crue centennale | m ³ /s | 296,60 |
| | Crue centennale retenue | m ³ /s | 300 |

IV.1.4 Crue de sécurité

Le barrage de Kelbo est dimensionné en tenant compte de la crue de sécurité. La crue de sécurité est de l'ordre de **826 m³/s**.

IV.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 **1499 m³/s**.

IV.1.6 Apports liquides du bassin versant

Les apports pour différentes fréquences sont reportés au tableau 6 ; Pour la mise d'un aménagement agricole en aval de la retenue, la simulation se fera avec la valeur fournie par la quinquennale sèche.

Tableau 8 : Apports liquides en années sèches

| Fréquence de dépassement (Fd) | Durée de retour correspondant | Coefficient d'écoulement K _e (%) | Apports liquides (m ³) |
|-------------------------------|-------------------------------|---|------------------------------------|
| 0.1 | Décennale sèche | 8,00% | 12 091 174 |
| 0.2 | Quinquennale sèche | 9,80% | 18 066 715 |
| 0.50 | Moyenne | 10,00% | 24 790 214 |

IV.2 ETUDE DE LA CUVETTE

IV.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 III (Etude de la cuvette) page 69

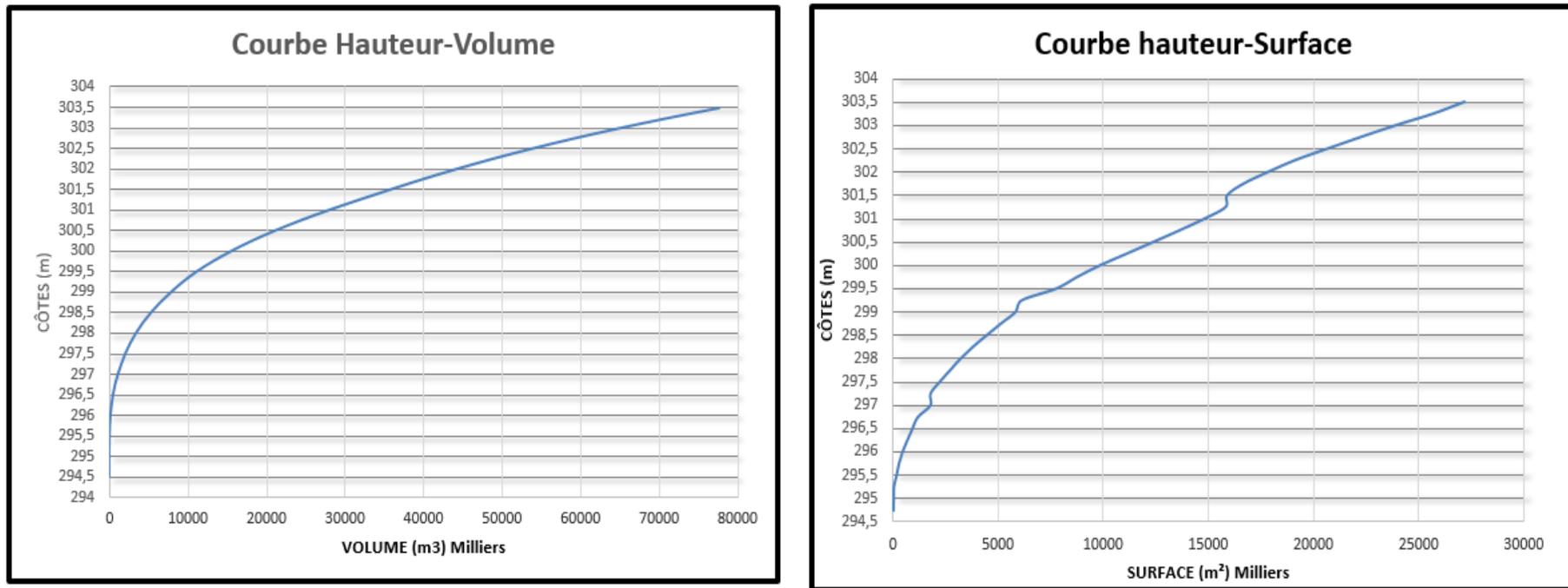


Figure 5 : Courbe Hauteur-Volume-Hauteur-Surface

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

Ainsi, la cote du PEN a été fixée à 300,5 m. A cette côte, les caractéristiques de la retenue sont alors les suivantes :

Tableau 9 : Caractéristiques du PEN et du PHE

| | | |
|------------------------------------|------------|----------------|
| Cote Plan d'Eau Normal | 300,5 | m |
| Capacité de stockage de la cuvette | 20 979 147 | m ³ |
| Superficie du plan d'eau normal | 12 3733 93 | m ² |
| Cote Plan des Hautes eaux (PHE) | 301,7 | m |
| Superficie du plan des hautes eaux | 16 515 435 | m ² |
| Capacité de stockage de la cuvette | 38 832 679 | m ³ |
| Apports moyens annuels | 14 874 128 | m ³ |

IV.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 et de STEVENSON. Nous obtenons une revanche **R=1,2 m**.

IV.2.4 Simulation de la retenue

Connaissant la consommation humaine, animale et les valeurs des différentes pertes par évaporation, infiltration et dépôt solide nous pouvons procéder à la simulation de la retenue. De cette simulation il ressort que nous pouvons exploiter environ 300ha pour l'agriculture.

IV.2.5 Évaluation des besoins

Tableau 10 : Hypothèse de simulation et Estimation des besoins

| Hypothèses de simulation (Besoins) | Domestiques | | Pastoraux | | Agricoles | | Efficience d'irrigation |
|------------------------------------|---------------|-------|----------------|--------------------------------------|-----------------|-----|-------------------------|
| | Nhbts. | 74948 | Ntêtes | | Riz (ha) | 150 | |
| | Cs (l/jr/hbt) | 15 | Cs (l/jr/tête) | 5 (petit bétail) 40 (gros bétail) | Maraichage (ha) | 150 | |

| Besoins humains et pastoraux | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Mois | Nov. | Déc. | Janv. | Fév. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | Août | Sept | Oct. | Total |
| Nbre de jours | 30 | 31 | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | 31 | 30 | 31 | 365 |
| Besoins mensuels(m3) | 131670 | 136059 | 136059 | 122892 | 136059 | 131670 | 136059 | 131670 | 136059 | 136059 | 131670 | 136059 | 1601988 |
| Besoins agricoles pour la riziculture | | | | | | | | | | | | | |
| Besoins bruts(m3/ha) | | | | | | | | 1610 | 1400 | 918 | 1480 | | 5 408 |
| Besoins agricoles pour la maraichage | | | | | | | | | | | | | |
| Besoins bruts(m3/ha) | 1320 | 1947 | 2298 | 2357 | 1147 | | | | | | | | 9 070 |
| Besoins agricole(m3) | 4 343 148 | | | | | | | | | | | | |
| Somme de tous les besoins | | | | | | | | | | | | | |
| Besoins (m3) | 5 945 136 | | | | | | | | | | | | |

IV.2.6 Évaluation des pertes de la retenue

A. Pertes par évaporation

Tableau 11 : Pertes par évaporation de la retenue

| Mois | Durée (j) | Evaporation bac "A" (mm) | Evaporation Lac (mm) |
|-----------|-----------|--------------------------|----------------------|
| Janvier | 31 | 219,9 | 167,8 |
| Février | 28 | 248,2 | 173,3 |
| Mars | 31 | 320,5 | 210,5 |
| Avril | 30 | 328,3 | 210,8 |
| Mai | 31 | 332,8 | 215,3 |
| Juin | 30 | 280,6 | 191,8 |
| Juillet | 31 | 225,9 | 170,5 |
| Août | 31 | 186,4 | 151,9 |
| Septembre | 30 | 186,6 | 150,0 |
| Octobre | 31 | 240,3 | 177,0 |
| Novembre | 30 | 233,8 | 171,8 |
| Décembre | 31 | 221 | 168,3 |
| Total | | 2159,0 | |

L'évaporation maximale de la retenue est observée en Avril (215,3 mm) tandis que la plus faible en Septembre (150 mm).

B. Pertes par 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.

L'infiltration varie au cours de l'année en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue. Au Burkina Faso, il est d'usage de considérer que les pertes seraient de l'ordre de 1 à 3 mm/jour en moyenne. Nous décidons d'utiliser la valeur de 2 mm/jour.

Tableau 12 : Pertes par infiltration

| Mois | Jan | Fév. | Mar | Avr. | Mai | Juin | Juil. | Aoû | Sept | Oct | Nov | Déc | Total |
|------------------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------|------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|
| Pertes par infiltration (mm) | 62 | 56 | 62 | 60 | 62 | 60 | 62 | 62 | 60 | 62 | 60 | 62 | 730 |

C. Quantification des dépôts solides

A l'horizon du projet et en faisant l'hypothèse que le barrage sera mis en eau au début du présent projet, le cumul de débit solide évalué avec la méthode de KARAMBIRI est d'environ 354673 m³.

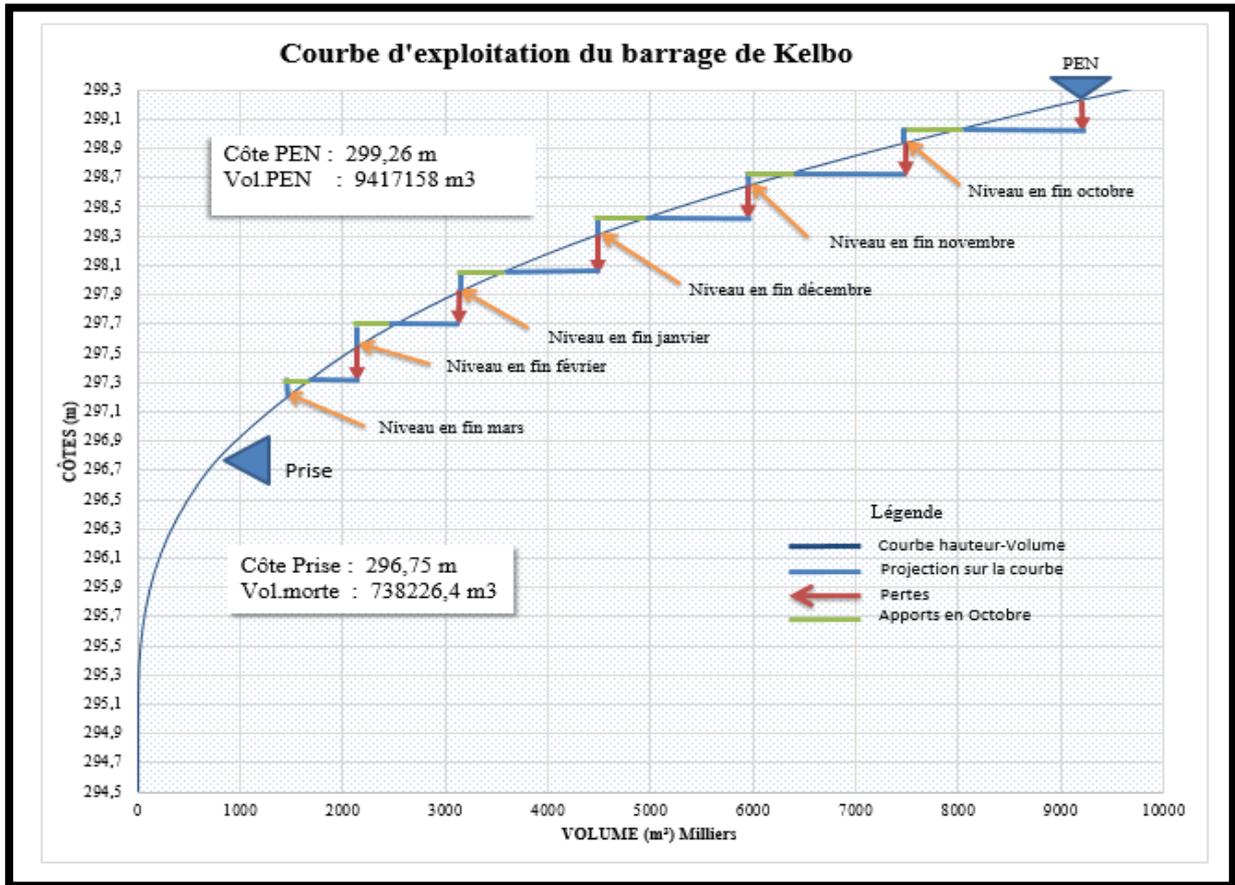


Figure 6 : Courbe d'exploitation de la retenue en année quinquennale sèche

IV.3 ÉTUDE DE LA DIGUE ET DE SES OUVRAGES

IV.3.1 Digue

Le site choisi pour le barrage de Kelbo présente un relief faible, et la cuvette très peu étroite. On note également la présence de matériaux argileux de bonne qualité. Ces éléments nous permettent de réaliser une digue homogène en terre compactée. La disponibilité de matériaux facilitera l'exécution et permettra de réaliser les économies sur le projet.

Tableau 13 : Caractéristiques de la digue

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR | DISCUSSION |
|--------------------------|--------------|---------------|--|
| DIGUE | | | |
| Type de digue | - | homogène | Disponibilité des matériaux |
| Côte crête déversoir | m | 300,5 | Cette côte correspond à la côte au PEN. |
| Revanche | m | 1,2 | |
| Côte crête digue | m | 303 | |
| Côte crête mur parapet | m | 303,5 | Pour rester dans la sécurité, nous rehaussons la digue avec un mûr parapet |
| Hauteur digue | m | 8,5 | |
| Longueur digue | m | 2301 | 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 | |
| Filtre horizontal | | | |
| Epaisseur minimale | m | 0,6 | |

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR | DISCUSSION |
|---|----------------------|----------|---|
| DIGUE | | | |
| Largeur du filtre | m | 15,50 | Longueur obtenue du profil 15 au profil 24 et du profil 34 au profil 43. Lorsque la hauteur de la digue est supérieure ou égale à la revanche libre le filtre horizontale est nécessaire. Source La maîtrise des crues dans les bas-fonds p 136 |
| Longueur du filtre | m | 480,07 | |
| Drain verticale | | | |
| Epaisseur minimale | m | 0,6 | Cette hauteur correspond à la hauteur du PEN au droit du déversoir. |
| Hauteur du drain | m | 5,76 | |
| Pente de talus de la tranchée d'ancrage | H/V | 3/1 | Cette valeur permet de faciliter la mise en œuvre de la tranchée par les engins. |
| Profondeur de la tranchée | m | 0,5-3 | La profondeur de la tranchée varie selon le profil donné |
| Largeur en gueule | m | 4 | |
| Débit de fuite par mètre linéaire | m ³ /s/ml | 4,48E-07 | Les fuite proviennent du corps de la digue et de la fondation Elles sont négligeables parce que les matériaux utilisés et le compactage entrainent des perméabilités faibles. |
| Débit de fuite | m ³ /s | 1,03E-03 | |
| Débit de fuite annuel | m ³ /an | 3,25E+04 | |

A. Protections des talus et de la crête

La protection de la crête et des talus est donnée comme suit :

| | |
|---|---|
| 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 qui jouera le rôle de filtre inverse.</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 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> |
| Protection de la crête de la digue | <p>Il est nécessaire de protéger la crête pour lutter contre la dessiccation mais aussi pour assurer la circulation éventuelle</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>d'engins. La protection sera constituée de 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 1,00 m, ancré dans la digue de 0,50 m. Le mur sera équipé de barbacanes 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 2303 m.</p> |
|--|--|

B. Stabilité des pentes de la digue

La vérification à l'aide du logiciel Géo-slope nous donne des coefficients de sécurité supérieurs à 1,5 dans les deux cas :

Retenue vide : FS=1,6

Retenue pleine : FS=2,3

Nous pouvons donc conclure à la stabilité des talus amont et aval. Ainsi nous gardons les pentes de 1V/2H pour le talus amont et aval.

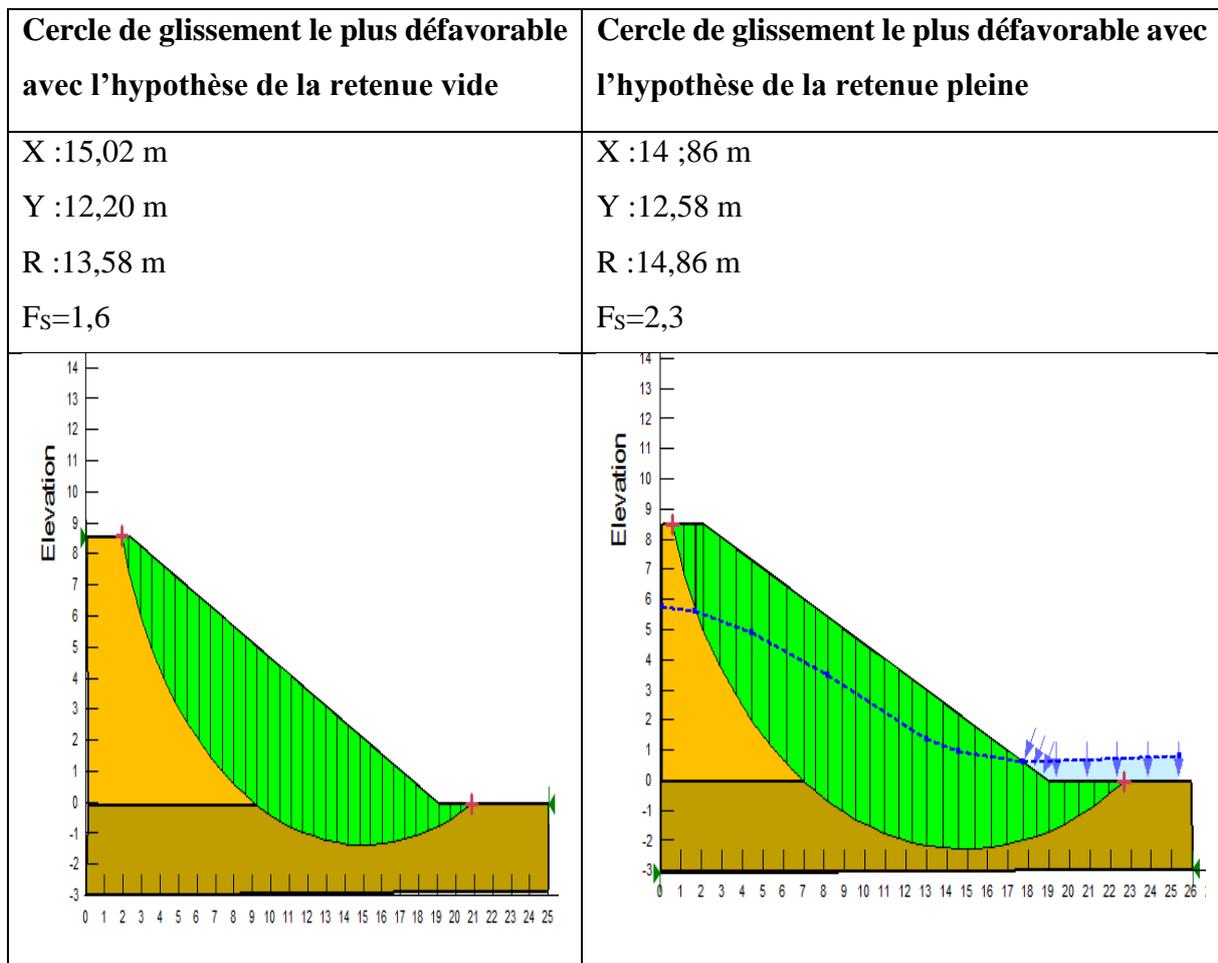


Figure 7 :Cercles de glissement des talus.

IV.3.2 Etude des ouvrages annexes

A. Evacuateur de crue

Tableau 14 :Caractéristiques de l'évacuateur de crue

| Evacuateur de crue | | | |
|--------------------------------------|---|----------------------------------|--|
| Type de déversoir | | Déversoir poids à Profil CREAGER | Facilité de mise en œuvre et relativement abordable. |
| Position déversoir | - | Centrale | Pour restituer le lit du cours d'eau. |
| Lame d'eau déversante | m | 1,2 | Cette valeur est inférieure à la valeur maximale recommandée pour les évacuateurs de crue :1,5m (Source COMPAORE 1996) |
| Longueur du seuil déversant | m | 130 | Cette longueur est obtenue avec la crue projet. |
| Profondeur de la parafouille amont | m | 2 | Ces valeurs sont confortées par l'étude de stabilité du déversoir. |
| Profondeur de la parafouille aval | m | 0.9 | |
| Grande base de l'assise trapézoïdale | m | 1,5 | |
| Petite base de l'assise trapézoïdale | m | 1,2 | |

❖ **Stabilité du déversoir**

Le tableau suivant présente les résultats de l'étude de la stabilité du déversoir poids (Le détail des calculs est joint à l'Annexe IV (Etude de la digue et de ses ouvrages annexes) page 80

✓ CAS1 : PEN (h=0)

Tableau 15 : Vérification de la stabilité du déversoir au PEN

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|---|-------------------|--------------|
| Stabilité au renversement | | |
| Somme des moments renversants | kN.m | 1489,758 |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 3404,108 |
| Coefficient de sécurité au renversement | | 2,29 m > 1,5 |
| Stabilité au glissement | | |
| Résultante des forces horizontales | kN/ml | 176,580 |
| Résultante des forces verticales | kN/ml | 531,211 |
| Coefficient de sécurité au glissement | | 1,95 > 1,5 |
| Règle du tiers central | | |
| Excentricité | m | -0,05 |
| B/6 | m | 1,19 > -0,05 |
| Stabilité au poinçonnement | | |
| Capacité portant du sol | kN/m ² | 1153,11 |
| Contrainte maximale imposée | kN/ml | 71,64 |
| Coefficient de sécurité au poinçonnement | | 16,10 > 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 à la stabilité du déversoir. | | |

✓ CAS2 : PEH (h=1,2)

Tableau 16 : Vérification de la stabilité du déversoir au PHE

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|---|-------------------|-------------|
| Stabilité au renversement | | |
| Somme des moments renversants | kN.m | 1161,886 |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 3153,444 |
| Coefficient de sécurité au renversement | | 2,71 > 1,5 |
| Stabilité au glissement | | |
| Résultante des forces horizontales | kN/ml | 244,450 |
| Résultante des forces verticales | kN/ml | 645,654 |
| Coefficient de sécurité au glissement | | 1,72 > 1,5 |
| Règle du tiers central | | |
| Excentricité | m | 0,47 |
| B/6 | m | 1,19 > 0,47 |
| Stabilité au poinçonnement | | |
| Capacité portant du sol | kN/m ² | 1153,11 |
| Contrainte maximale imposée | kN/ml | 126,86 |
| Coefficient de sécurité au poinçonnement | | 9,09 > 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 à la stabilité du déversoir. | | |

✓ CAS3 : PEHS (h=2,5)

Tableau 17 : Vérification de la stabilité du déversoir au PHES

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|--|-------------------|--------------|
| Stabilité au renversement | | |
| Somme des moments renversants | kN.m | 1575,824 |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 3153,444 |
| Coefficient de sécurité au renversement | | 1,31 > 1,3 |
| Stabilité au glissement | | |
| Résultante des forces horizontales | kN/ml | 319,330 |
| Résultante des forces verticales | kN/ml | 641,321 |
| Coefficient de sécurité au glissement | | 2,00 m > 1,3 |
| Règle du tiers central | | |
| Excentricité | m | 1,10 |
| B/6 | m | 1,19 > 1,10 |
| Stabilité au poinçonnement | | |
| Capacité portant du sol | kN/m ² | 1153,11 |
| Contrainte maximale imposée | kN/ml | 173,55 |
| Coefficient de sécurité au poinçonnement | | 6,64 > 1,5 |
| <p>CONCLUSION : Toutes les stabilités au glissement, au renversement, au poinçonnement et la règle du tiers central ayant été vérifiées alors nous pouvons conclure à la stabilité du déversoir.</p> | | |

B. Bassin de dissipation et chenal d'évacuation

Les caractéristiques du Bassin de dissipation et du chenal sont résumées au tableau 16 :

Tableau 18 :Caractéristiques du Bassin de dissipation et chenal d'évacuation

| Bassin de Dissipation | | |
|---|----------------------|--|
| Hauteur de la lame d'eau sur le déversoir | m | 5,76 |
| Enfoncement du bassin | m | 0,5 |
| Débit de crue | m ³ /s | 300 |
| Débit unitaire | m ³ /s/ml | 7,5 |
| Lame d'eau déversante | m | 1,2 |
| Hauteur de chute | m | 7,4 |
| Tirant d'eau avant ressaut | m | 0,2 |
| Vitesse d'eau à l'entrée du bassin | m/s | 11,4 |
| Nombre de Froude | Fr | 5,6 |
| Bassin retenue | - | Bassin USBR de type II béton en cyclopéen |
| Tirant d'eau conjugué | m | 1,4 |
| Longueur du bassin de dissipation | m | 3,4 |
| Hauteur du seuil terminal | m | 0,3 |
| Hauteur des blocs chicanes | m | 0,3 |
| Distance entre chicanes | m | 0,2 |
| Chenal d'évacuation | | |
| Pente longitudinale | m/km | 1,5 |
| Pente des talus | H/V | 3/2 |
| Profondeur | m | 2 |
| Largeur en plafond | m | 130 |
| Longueur du chenal | m | 40 |
| Débit maximal | m ³ /s | 300 |

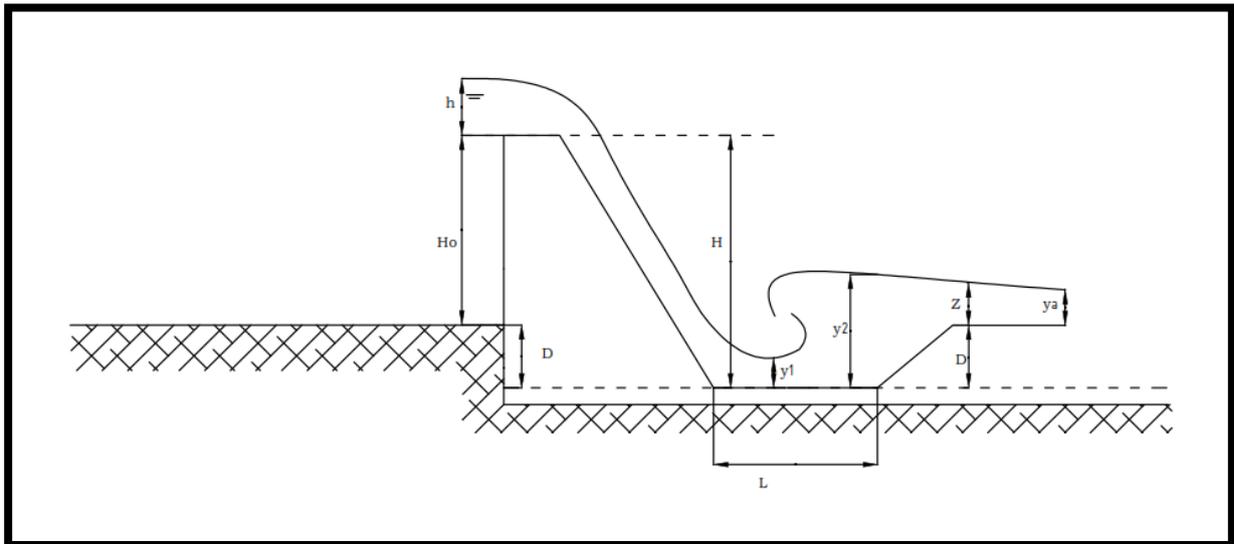


Figure 8 :Déversoir et Bassin de dissipation

C. Murs Bajoyers

❖ Caractéristiques géométriques du bajoyer

Les bajoyers servent de jonction entre le déversoir et le remblai de la digue. Ils ont été dimensionnés comme un mur de soutènement.

Les résultats de calcul des caractéristiques des bajoyers se présentent comme suit l'Annexe IV (Etude de la digue et de ses ouvrages annexes) page 80 pour le détail des calculs).

Tableau 19 : Caractéristiques géométriques des bajoyers

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|---|-------|--------|
| Hauteur maximale du bajoyer | m | 8,5 |
| Epaisseur du mur à la base bajoyer | m | 0,75 |
| Epaisseur crête du bajoyer | m | 0,25 |
| Epaisseur de la semelle | m | 0,75 |
| Largeur base du mur bajoyer | m | 5,75 |
| Hauteur mur bajoyer au-dessus de la semelle | m | 7,75 |

❖ Stabilité du bajoyer

Le tableau suivant présente les résultats de l'étude de la stabilité du déversoir poids.

Le détail des calculs est joint dans l'Annexe IV.

Tableau 20 : Vérification de la Stabilité du mûr bajoyer

| DÉSIGNATIONS | UNITÉS | VALEURS |
|---|--------|----------------|
| Stabilité au renversement | | |
| Somme des moments renversants | kN.m | 1117,857 |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 2846,606 |
| Coefficient de sécurité au renversement | | 2,55 $m > 1,5$ |
| Stabilité au glissement | | |
| Résultante des forces horizontales | kN/ml | 248,006 |
| Résultante des forces verticales | kN/ml | 840,563 |
| Coefficient de sécurité au glissement | | 2,20 $> 1,5$ |
| Règle du tiers central | | |
| Excentricité | m | 0,82 m |
| B/6 | m | 0,96 $> 0,82$ |
| Après ces vérifications nous pouvons conclure à la stabilité du Bajoyer | | |

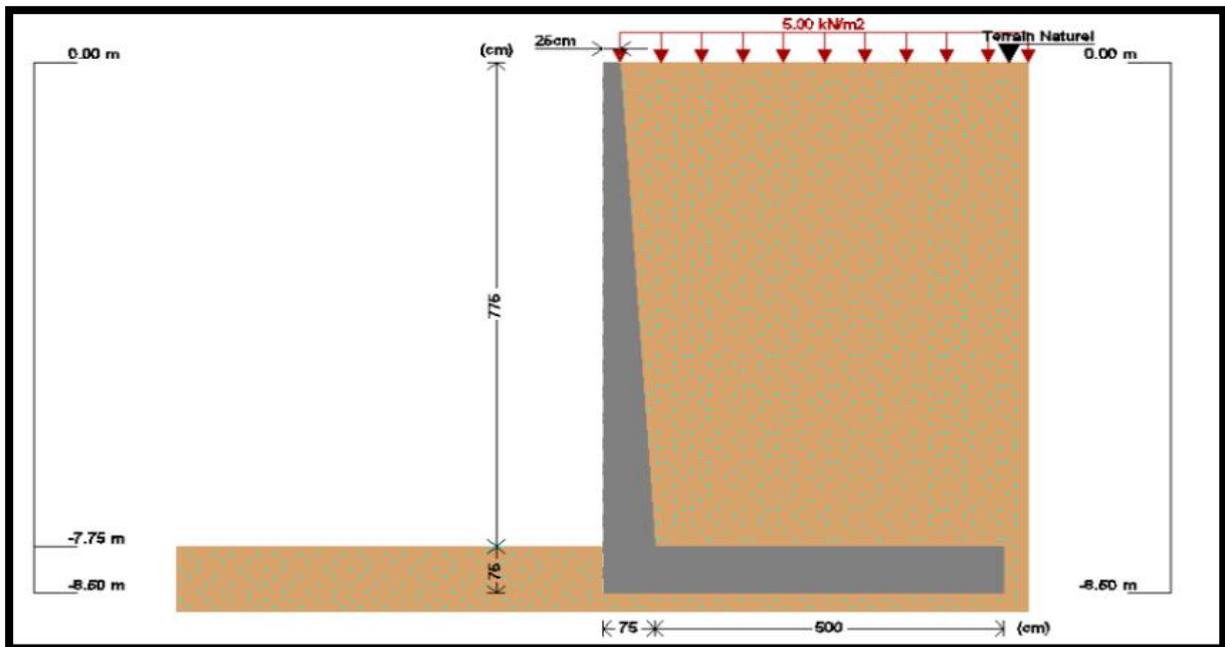


Figure 9 : Coupe transversale du mûr bajoyer

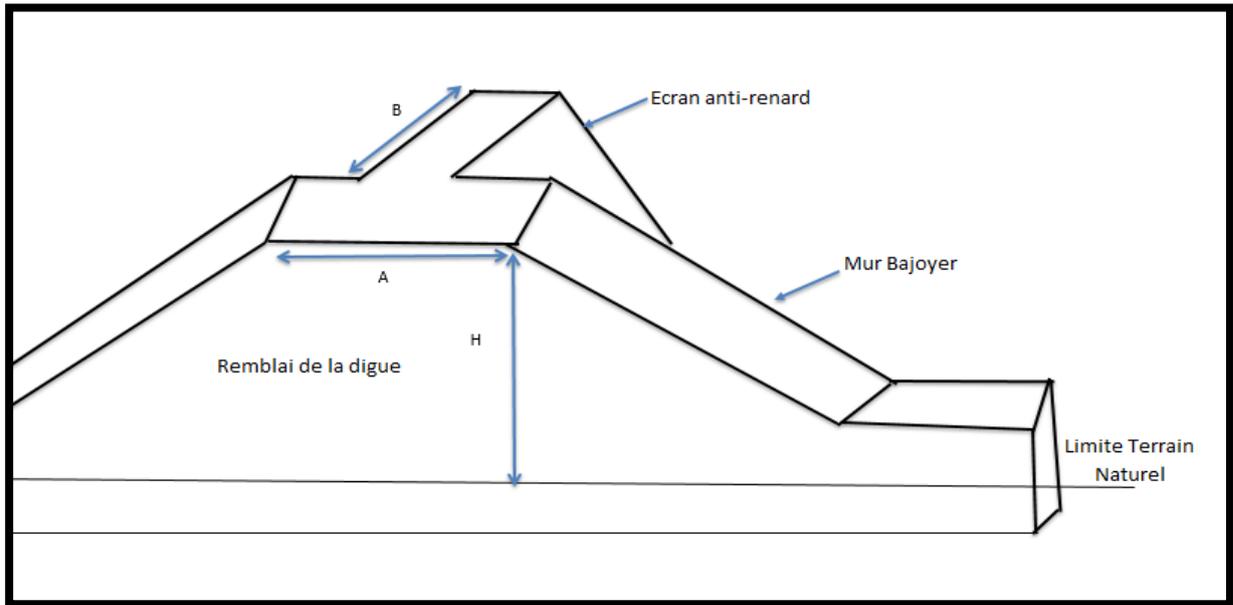


Figure 10 :Mur Bajoyer et écran anti-renard

D. 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. Les caractéristiques de ce tapis sont les suivantes :

Tableau 21 :Caractéristiques du tapis amont étanche

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

E. 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 (une de chaque côté du déversoir).

Les diguettes ont les caractéristiques suivantes :

Tableau 22 :Caractéristiques des diguettes de protections

| | |
|-------------------------|------------------------|
| Matériau | Argile compactée |
| Type | homogène |
| Cote crête | 297,40 m |
| Longueur | 50,00 m |
| 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 |

F. Ouvrage de prise

Il servira pour l'irrigation du périmètre à l'aval du barrage. Une dérivation sera installée sur celle-ci et aboutira à des abreuvoirs aménagés spécialement pour le bétail.

Au regard des potentialités des terres irrigables par gravité en aval et par souci de maintenir une charge d'eau suffisante au-dessus de la prise pour permettre de conduire une double campagne agricole à terme, la cote de prise d'eau a été fixée à **296,75 m** pour chaque ouvrage.

Le volume mort sera alors de l'ordre 738 226 m³ avec une tranche d'eau de 2,01 m de hauteur maximale.

➤ Type d'ouvrage

Il est constitué :

- d'un bac d'admission amont dont le seuil est calé à la cote 296,75 m, protégée par une grille métallique ;
- d'une conduite en fonte Ø 500 mm, de longueur 51,5 m, enrobée du béton armé de 20 cm d'épaisseur, l'entrée de la conduite est équipé d'une crépine de protection.
- d'un regard aval abritant un robinet vanne Ø 500 mm pour le contrôle du débit d'irrigation.

G. Ouvrage de Vidange

L'ouvrage de vidange permet d'évacuer le barrage en cas de besoin soit pour sécuriser le barrage, pour évacuer les dépôts solides ou pour tout simplement effectuer des travaux. Dans notre cas nous optons pour un pertuis avec batardeau comportant un système d'obturation par vanne à glissement. Ce choix se justifie par le fait que ce système est moins soumis aux aléas d'entretien tels que les blocages de vanne, l'obstruction des conduites

| DÉSIGNATION | UNITÉ | VALEUR |
|--|------------------|-------------|
| Côte au PEN | m | 300,5 |
| Surface au PEN | m ² | 12373393,11 |
| Cote de l'ouvrage de Vidange | m | 294,74 |
| Section du Batardeau | m ² | 11,52 |
| Pesanteur | m/s ² | 9,81 |
| Charge d'eau | m | 5,76 |
| Temps de Vidange totale | s | 1163933,231 |
| Temps de Vidange totale | jr | 13,47144943 |
| Nous considérons un temps de vidange de 14 jrs | | |

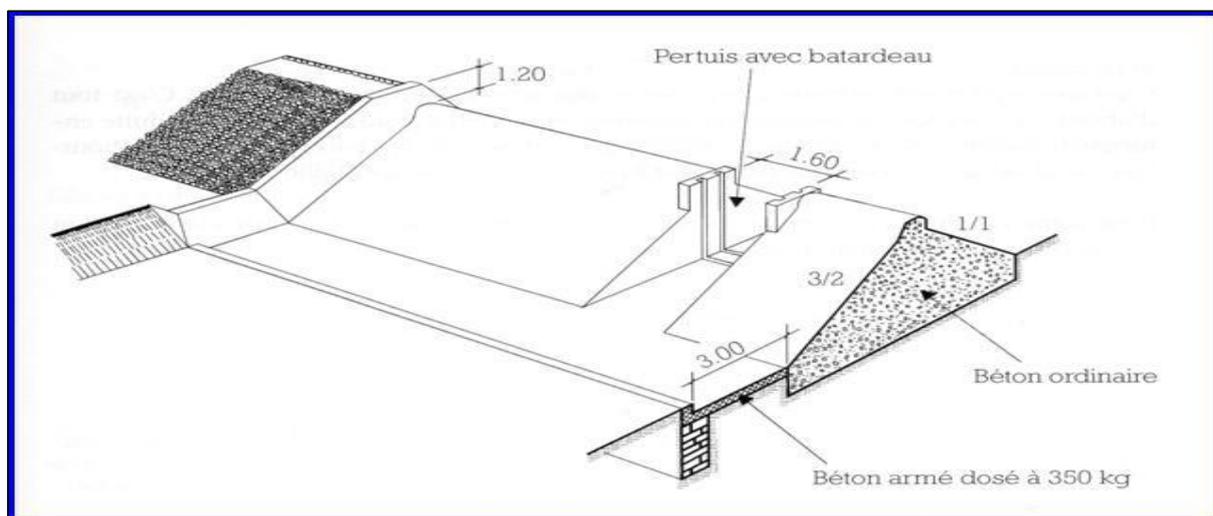


Figure 11 :Ouvrage de Vidange

IV.4 NOTICE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Les éléments sensibles de l'environnement qui seront les plus affectés par les travaux de chantier sont le sol, les ressources en eau, la végétation (faune et flore), l'air, l'environnement acoustique, les populations riveraines.

IV.4.1 Les impacts négatifs sur l'environnement

Les impacts négatifs se répercuteront sur le milieu humain et biophysique. Il s'agit de/des :

- la coupe des arbres et la destruction de certains écosystèmes du milieu.
- l'insécurité, la pollution de l'air (gaz d'échappement, poussière), nuisances provoquées par la circulation des engins (faible portée et temporaires)
- la destruction de biens privés et des habitations situés dans l'emprise ou à proximité du projet impliquant ainsi le déplacement involontaire des populations ;
- accidents d'animaux lors de l'abreuvement si des aménagements ne sont pas prévus pour l'accès à l'eau par les animaux.
- la pollution de l'eau du barrage ;
- etc...

Des mesures d'atténuation ont, toutefois, été identifiées et analysées afin de réduire ou supprimer ces effets négatifs.

IV.4.2 Les impacts positifs sur l'environnement

Le projet, une fois réalisé, produira les impacts positifs suivants :

- l'intensification des productions agricole et piscicole ;
- l'amélioration des conditions de vie (qualité nutritionnelle) des populations de la zone du projet ;
- le renforcement des capacités des producteurs et de leurs structures faïtières ;
- la création d'emplois ;
- le développement des AGR ;
- l'accroissement des revenus ;
- la fixation des jeunes dans la zone ;

IV.4.3 Composantes du Plan de gestion Environnemental et Social

Dans l'optique de protéger l'ensemble des ressources naturelles et d'impacter un minimum sur l'écosystème, le plan de gestion mis en place se définit sur trois axes:

- des mesures d'atténuation, de compensation ou de bonification des impacts du projet (cf. Annexe I.2),

- un programme de surveillance environnemental,
- un plan de suivi environnemental.

L'objet de ce plan est de présenter les impacts les plus significatifs, les mesures d'atténuation, tout en présentant les institutions responsables de la mise en œuvre de ces mesures et le coût de celles-ci dans la mesure du possible, la période d'exécution des mesures et les lieux de leur application.

V. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent projet porte sur les études techniques du barrage de Kelbo. Entrant dans le cadre global de la lutte pour la sécurité 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 l'ensemble de la commune. Ce barrage s'inscrit en étroite ligne avec les objectifs du développement durable en permettant de lutter contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire dans la région du Sahel.

En effet, il vise d'une part la satisfaction des besoins en eau d'irrigation du riz sur 150 hectares durant la saison pluvieuse. D'autre part, il permettra la satisfaction des besoins en eau de la culture de l'oignon pendant la saison sèche sur 150 ha.

Notre étude a montré que l'ouvrage permettra de stocker plus de 20 millions de mètres cube. Cette capacité est largement suffisante pour satisfaire en plus des besoins humains et animaux, l'irrigation des 300 ha situés à son aval en année quinquennale sèche.

Pour sa survie, il appartiendra aux bénéficiaires de s'impliquer dans sa gestion. Les parties prenantes pourraient élaborer un schéma d'organisation pour le suivi, le contrôle et l'entretien de l'ouvrage afin d'assurer sa pérennité. Il faudra donc :

- Mettre en place un comité chargé de la gestion et de l'entretien régulier de l'ouvrage,
- Réaliser des digues de protection sur les affluents alimentant la cuvette pour réduire les effets d'ensablement sur la cuvette.

Le coût des travaux de réalisation du barrage s'élève à un milliard deux cent quarante-trois millions huit cent seize mille cinq cent soixante-six (**1 243 816 566**) francs CFA TTC.

Aussi, dans un contexte de changements climatiques marqué soit par la diminution des pluies, soit par la multiplication des pluviométries annuelles de forte intensité, le barrage de Kelbo pourrait faire face aux effets négatifs de ces changements tels que le non remplissage et les ruptures compromettant ainsi que la viabilité de l'ouvrage.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- ❖ AC3E (2016). *Etude géotechnique (Rapport des essais en laboratoire No. 02). Burkina Faso.*
- ❖ AC3E (2016). *Rapport Notice d'Impact Environnemental et Social. Burkina Faso.*
- ❖ Banque Mondiale (2008). *Agriculture au service du développement. Ouagadougou.*
- ❖ DIENG (2007). *Cours d'hydrogéologie et ouvrages de captage.*
- ❖ ALONSO, BECUE, BOLLE, BRODIN (2000). *Les types de barrages en remblai, in : Barrages En Remblai.*
- ❖ PILOT, CARTIER (1964). *Digues et barrages en terre de faible hauteur.*
- ❖ DEGOUTTE (1997). *PETITS BARRAGE : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Cemagref.*
- ❖ COMPAORE (1996). *Cours de barrage, EIER.*
- ❖ KARAMBIRI (2005). *Cours du cycle hydrologique du bassin versant.*
- ❖ KARAMBIRI, GUEYE (2006). *Cours de barrage.*
- ❖ INSD-MEF (2010). *Annuaire statistique de l'environnement.*
- ❖ DURAND (1996). *Cours de Petits barrages pour l'équipement rural en Afrique.*
- ❖ DURAND, ROYET, MERIAUX (1998). *Techniques de petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale.*
- ❖ LO (2016). *Cours de barrage1.*
- ❖ PCD Kelbo (2009). *Plan communal de la commune de Kelbo.*
- ❖ BETTON (1988). *La maîtrise des crues dans les bas-fonds.*
- ❖ 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.*
- ❖ 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.*

VII. ANNEXES

| | |
|---|------------|
| <u>ANNEXE I: SYNTHÈSES DES ETUDES DE BASES</u> | 49 |
| ANNEXE I. 1ETUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE..... | 49 |
| ANNEXE I. 2ÉTUDES GEOTECHNIQUES..... | 50 |
| ANNEXE I. 3ÉTUDES PEDOLOGIQUES..... | 51 |
| ANNEXE I. 4 PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL (PGES)..... | 53 |
| <u>ANNEXE II: ETUDE HYDROLOGIQUE</u> | 56 |
| ANNEXE II. 1SYNTHÈSE DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES PLUIES..... | 56 |
| ANNEXE II. 2CARACTÉRISATION DU BASSIN VERSANT..... | 61 |
| ANNEXE II. 3ESTIMATION DES APPORTS..... | 64 |
| <u>ANNEXE III: ETUDE DE LA CUVETTE</u> | 66 |
| ANNEXE III. 1COURBE HAUTEUR-SURFACE-VOLUME..... | 66 |
| ANNEXE III. 2REVANCHE LIBRE..... | 67 |
| ANNEXE III. 3ÉVALUATION DES PERTES DE LA RETENUE..... | 67 |
| ANNEXE III. 4ESTIMATION DES BESOINS..... | 68 |
| ANNEXE III. 5LA DIGUE..... | 71 |
| ANNEXE III. 6 :OUVRAGE ANNEXES..... | 73 |
| <u>ANNEXE V: METRE ET DEVIS</u> | 90 |
| <u>ANNEXE VI :CARTES ET PLANS</u> | 104 |

ANNEXE I: SYNTHESSES DES ETUDES DE BASES

ANNEXE I. 1. ETUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE

1. L'agriculture

Sur le plan agricole et dans la production pluviale, la province du Soum ne couvre pas plus de 80% de ses besoins en céréales. La Commune de Kelbo a été identifiée pendant la campagne agricole 2009/2010 à risque avec un besoin d'intervention de vente de céréales à prix social. Compte tenu du tarissement rapide des eaux, la culture maraîchère est très difficile à réaliser. En fonction de la disponibilité de l'eau, les acteurs produisent de l'oignon, des choux, des carottes, des aubergines, etc.

Tableau 23: Production annuelle des cultures maraichères en 2009

| | Tomate | Choux | Oignon bulbe | Piment |
|------------------|--------|--------|--------------|--------|
| Superficie (ha) | 119,5 | 49,5 | 139,9 | 118,5 |
| Production (T) | 3226,5 | 1471,5 | 3497,5 | 1540,5 |
| Rendement (T/ha) | 27 | 25 | 30 | 13 |

Source : Enquête de terrain AC3E décembre 2016

2. L'élevage

De manière générale, les effectifs du cheptel sont approximatifs. Pour la Commune de Kelbo, les données du PCD 2009 avec les taux de croissance fournis par l'ENEC II, permettent les estimations suivantes :

Tableau 24 : Effectif du cheptel de la commune de Kelbo de 2009-2011

| Espèces | 2009 | 2010 | 2011 |
|-----------|--------|--------|--------|
| Bovins | 29259 | 29844 | 30441 |
| Ovins | 3443 | 3564 | 36116 |
| Caprins | 42638 | 43917 | 45235 |
| Volailles | 132900 | 136887 | 140993 |

Source : PCD de la commune de Kelbo 2010-2014 ; juin 2009

La pêche est pratiquée par des acteurs en nombre très réduit et le tarissement rapide des eaux ne permet cette activité qu'en saison pluviale.

3. Projet de barrage de kelbo

La Commune de Kelbo avait planifié la réalisation d'un barrage pour répondre aux besoins d'abreuvement des animaux et de la production agricole en contre saison dans son PCD 2010-

2014. Il était aussi prévu la réalisation de bas-fonds d'environ 20 hectares par le Projet Riz Pluvial (PRP).

Des échanges avec le Directeur Provincial de l'Agriculture et de l'Hydraulique (DPAH), entouré de tous les agents d'encadrement à Kelbo, ainsi qu'avec le Maire de la Commune de Kelbo, il ressort que le projet de barrage est une priorité surtout que le potentiel en aménagement hydro-agricole qui est estimé à environ 200 hectares.

ANNEXE I. 2ÉTUDES GEOTECHNIQUES

a. Sol de fondation sous la digue

Sur le tracé de l'axe de la digue qui fait environ 2,4 km, il a été réalisé six (06) puits à ciel ouverts et dix (10) forages de la rive gauche à la rive droite soit à partir de la Borne B1. Ces profondeurs varient de 2,5 à 15 m.

Au vu des faciès des puits à ciel ouvert et des forages destructifs on peut dresser la stratigraphie suivante de l'axe projeté de la digue du barrage de KELBO :

- Suite à la terre végétale peu épaisse sablo-limoneuse il vient un dépôt éolien fait de sable fins à grains émoussés plus ou moins meuble en surface et compacte en profondeur
- Aux bords du lit mineur et en fond de celui-ci ce faciès sableux fin subit la compaction statique et avec le battement de la nappe phréatique entre en diagénèse pour donner des sols consolidés et indurés à canalicules et vacuoles.
- La formation éolienne repose sur des altérites ferrugineuses constituées par les graves latéritiques argileuses et les argiles latéritiques qui sont-elles adossées aux arènes argileuses (arènes finement grenues et arène farineuse violacée couleur « lie de vin » qui préfigurent le substratum ou le bed-rock altéré. En lit mineur la nappe phréatique a été repère à 4.00m profondeur et en dehors du lit à 14.00m.

b. Zones d'emprunts

Les recherches ont permis d'identifier 04 sites d'emprunts argileux A1, A2, A3 et A4 à environ 1700 m du site de la future digue pour les trois (03) premiers sites et à 660 m pour le quatrième site. Des puits à ciel ouvert ont été exécutés sur ces quatre sites par maille de 100*100m. L'emprunt A3 jugé très sableux, ce sont les emprunts A1, A2 et A4 qui ont été soumis aux essais de laboratoire. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Argile peu sableuse, peu plastique, imperméable pour les emprunts A1 et A4
- Argile sableuse peu plastique, peu perméable pour l'emprunts A2.

c. Zone d'approvisionnement des autres matériaux

Un site d'emprunt de graveleux latéritique a été prospecté et étudié à environ 6 km de la future digue.

Il s'agit de graveleux latéritique peu argileux. Ce matériau pourra servir pour les travaux de couche de protection et les pistes d'accès.

ANNEXE I. 3ÉTUDES PEDOLOGIQUES

Les unités pédologiques inventoriées sont les suivantes :

❖ En périmètre amont :

- Des sols Ferrugineux tropicaux Peu Lessivés (FPL) Série AS (Argile Sableuse) 143.58ha, 70.91% de la superficie du périmètre.
- Des sols Peu Lessivés inter grade vers les sols Ferrugineux tropicaux Lessivés à taches et à Concrétions (FPL/FLTC) 19.07ha, 9.42% de la superficie du périmètre
- Des sols Ferrugineux tropicaux Peu Lessivés (FPL) Série SL (Sable Limoneux), 39.82ha, 19.67% de la superficie du périmètre.

❖ En périmètre aval :

- Des sols Hydromorphes peu humifères à Pseudo-Gley d'Ensemble, (HPGE de type LAS ou LS), unité pédologique 1 s'étendant sur 78.83ha, 58.63% de la superficie du périmètre ;
- Des sols HPGE, de type AL, unité pédologique 2 qui fait 22.7ha, 16.88% de la superficie du périmètre et des sols Bruns Eutrophes Peu Evolués Hydromorphes (BEPEH de texture A/AL/A) unité pédologique 3 qui couvre 8.12ha soit 6.07% de la superficie du périmètre
- Des sols Peu Evolués d'Apport Alluvial Hydromorphes (PEAAH de texture A/A/AL) constituant l'unité pédologique 4 qui couvre 24.76ha, 18.42% de la superficie du périmètre.

ANNEXE I. 4 PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL (PGES)

Tableau 25 :Grille d'évaluation des impacts

| | | Milieu physique et biologique | | | | | | | Milieu humain | | | | | |
|----------------------|--|-------------------------------|---------------|----------------|------|------------|---------------------|---------|----------------|--------|-------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| | | Qualité de l'air | Eaux surfaces | Eaux souterrai | Sols | Végétation | Faune et microfaune | Paysage | Santé publique | Emploi | Circulation | Activités économiques | Patrimoine culturel | Qualité de vie et bien être |
| Phase de démarrage | Installation des chantiers et bases-vie | N | O | O | N | N | O | N | N | P | O | P | O | O |
| | Transport et circulation main d'œuvre,machinerie et matériaux | N | O | O | N | N | N | N | N | P | N | P | O | N |
| | Déblai et mise en dépôt du tout venant | N | O | O | N | N | N | N | N | O | O | O | O | N |
| | Exploitation des emprunts et carrières | N | O | O | N | N | N/P | N | N | P | N | O | O | N |
| | Travaux de remblaiement des diguettes | N | N | O | N | N | N | N | N | O | N | P | O | O |
| Phase des travaux | Travaux de dessouchage dans l'aire du barrage et des périmètres à aménager | N | O | O | N | N | N | N | O | P | N | O | O | O |
| | Travaux maçonnerie des ouvrages | N | N | O | N | N | O | N | N | P | N | P | O | O |
| | Construction des ouvrages connexes (drains,protection divers) | N | N/P | O | N | N | N | N | N | P | N | O | O | O |
| | Présence de la main d'œuvre | O | N | N | O | N | N | O | N | P | O | P | P | N |
| | Repli du chantier | N | N | O | N | N | N | N | O | O | O | O | O | O |
| | Plantation d'arbres | N | O | O | N | P | P | P | O | P | O | P | O | P |
| | Déplacement et réinstallation de populations | O | O | N | N | N | O | N | N | P | O | N/P | O | N/P |
| Phase d'exploitation | Entretien courant ou périodique des ouvrages | N | N | O | O | N | O | O | N | P | N | O | O | N/P |
| | Présence de barrage et des périmètres aménagée et d'infrastructures d'accompagnement | N/P | N | N | O | N | N | N | N/P | P | N/P | P | P | N/P |

Légende : N = Négatif, P = Positif, N/P = Positif et Négatif, O = Nul ou négligeable

Tableau 26 : Plan de mise en œuvre des mesures d'atténuation

| Impacts négatifs potentiels | Mesures d'atténuation | Responsabilités | | Phase du projet |
|--|--|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| | | Planification | Mise en œuvre | |
| Risque de blessures lors du débroussaillage et dessouchage, remblaiement et déblaiement | Sensibiliser les ouvriers sur le terrain Doter chaque équipe d'une trousse de premiers secours | BUNED, MDC, entreprise | Entreprise | Pendant les travaux |
| Transmission de maladies sexuellement transmissibles, grossesse non désirée | sensibilisation du personnel ouvrier | MAH, Entreprise, commune | MAH, Entreprise, | Avant et au cours des travaux |
| | sensibilisation des populations | MAH, Entreprise, commune | MAH, Entreprise, commune | Avant et au cours des travaux |
| Nuisances diverses | Gestion efficace des déchets solides et liquides Interdiction de travailler la nuit sauf dérogation faisant l'objet d'accord communal | Population, Entreprise, commune | Entreprise | Pendant les travaux |
| Détérioration de la qualité de l'air ambiant | Arrosage périodique et fréquent des pistes à la traversée des villages | M AH, BUNED, MDC, Entreprise | Entreprise | Pendant les travaux |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | |
|--|---|---|-------------------------------|--------------------------|
| Perturbation de la circulation locale pendant les travaux | Faire respecter les normes de circulation | MAH, BUNED, Entreprise | MAH, Entreprise, | Pendant les travaux |
| Destruction de la végétation | Sensibilisation du personnel travaillant sur les respects de l'environnement | M AH, BUNED, MDC, Entreprise | MAH, Entreprise, | Pendant les travaux |
| | Contrôles périodiques des respects de l'environnement | M AH, BUNED, MDC, Entreprise et commune | BUNED, MDC | Pendant les travaux |
| | Plantation de compensation dans les villages limitrophes de chaque site Aménagement des berges du barrage pour assurer sa protection | M AH, BUNED, MDC, Entreprise et commune | Entreprise, commune | Après les travaux lourds |
| | Restauration des carrières | M AH, BUNED, MDC, Entreprise | Entreprise | Après les travaux |
| Risques d'accidents sur les animaux | Installation de panneaux de limitation des vitesses | MAH, Entreprise et populations. | Entreprise | A la fin des travaux |
| Braconnage | Renforcement des capacités des services locaux de l'environnement | Direction de l'environnement, MAH, BUNED, | Direction de l'environnement, | Après les travaux |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | |
|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| | Interdiction au personnel l'abatage des animaux sauvages | MAH, BUNED, Entreprise | Entreprise | Pendant les travaux |
| Diminution des quantités d'eau par les prélèvements abusifs | Interdiction de prélèvement au niveau des points d'eau sensibles | MAH, BUNED Entreprise et populations. | Entreprise | Pendant les travaux |
| Pollution des eaux par des polluants laissés sur le sol | Sensibilisation du personnel travaillant sur les chantiers | M AH, BUNED, MDC, Entreprise | M AH, Entreprise | Pendant les travaux |
| | Bonne gestion des déchets | MAH, BUNED, MDC, Entreprise | Entreprise | Pendant et Après les travaux |
| Erosion et ensablement | Aménagement et protection des berges selon la réglementation en vigueur | MAH, MDC, Entreprise | Entreprise, service forestier local | Vers la fin des travaux |
| Perte des plantations, de maisons et des terrains | Indemnisation des propriétaires et leur réinstallation sur d'autres sites | MAH, Entreprise et commune | Entreprise et commune | Au démarrage des travaux |

Tableau 27: Plan des suivis environnementaux et sociaux du projet

| Composante du milieu | Activités à mener | Localisation | Paramètres/ Indicateurs de suivi | Période | Responsabilités |
|----------------------------|--|--|--|------------------------------|---|
| Santé publique et Sécurité | <ul style="list-style-type: none"> • Campagne de sensibilisation sur les IST/VIH-SIDA • Sensibilisation sur l'hygiène et l'assainissement • Mise en place d'une unité de santé pour la prise en charge rapide des accidents de chantier • Mise en place de balises, de signalisations et de panneaux de chantier • Dotation d'équipements adéquations • Interdictions de travaux de nuits, de consommations d'alcool et excitants par le personnel • Information et sensibilisation des populations sur les risques liés à la présence du chantier <ul style="list-style-type: none"> • Respect des lieux de culte • Signalisation de tout vestige culturel ou archéologique découvert | <ul style="list-style-type: none"> •Chantier •Pistes d'accès aux sites d'emprunts et des carrières •Déviations •Domiciles des populations Environnement | Nombre de maladies respiratoires Arrosage du chantier Nombre de séances de sensibilisations Existence de mini santé Existence de balises et panneaux de signalisations Nombre d'accidents observés. | Avant et pendant les travaux | MDC CS |
| Patrimoine culturel | <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisation des ouvriers à l'évitement de la profanation de lieux sacrés • Signalisation de toute découverte de vestiges culturels ou archéologiques | <ul style="list-style-type: none"> •Sites du projet | Adhésion des Autorités coutumières Pas de profanation de sites culturels | Pendant les travaux | Autorités Coutumières Mairies MDC CS |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| Emplois | •Recrutement de la main d'œuvre locale | •Populations | Nombre de personnes embauchées | Pendant les travaux | Entreprise |
|--------------------|--|--|--|--|---------------------|
| Circulation | <ul style="list-style-type: none"> •Contournement dans la mesure du possible les lieux par les véhicules et engins de chantier •Imposition aux chauffeurs d'une limitation de vitesse sur le chantier, les déviations, les croisements •Maintien en permanence la circulation et l'accès des riverains à leurs habitations •Mise en place de signalisation adéquate •Réglementation de la circulation | <ul style="list-style-type: none"> •Chantier •Base-vie •Parking •Zones d'emprunts et carrières | Existence de panneaux de signalisation Contournement des lieux fréquentés Nombre d'accidents Respect des limitations de vitesse Entretien du tronçon | Pendant les travaux et exploitation du tronçon | MDC CS Mairie |

Tableau 28 : Evaluation du coût du PGES

| Mesures | Détails des évaluations | Unité | Quantité | | Coût unitaire | Coût total(FCFA) |
|---|---|-------|----------|--|---------------|------------------|
| Remise en états du site et des carrières | Remise en état avec la participation des populations, végétalisation de ces sites | FF | 1 | | 3 000 000 | 3 000 000 |
| Protection des berges | Aménagement et plantations avec des essences locales | FF | 1 | | 6 000 000 | 6 000 000 |
| Aménagement des pistes d'accès au barrage | Disposer des pistes d'accès au barrage | m | 50 | | 25 000 | 1 250 000 |
| Reboisement compensatoire | Compenser les arbres abattus lors travaux. Il faudra donc doter la mairie de pépinières pour assurer la compensation des essences coupées | u | 2000 | | 6000 | 1 200 000 |
| Clôture du périmètre aménagé | Clôture avec de la haie vive | FF | 1 | | 3 000 000 | 3 000 000 |
| Ecotourisme | Aménagement d'un site pour loisirs | FF | 1 | | 2 000 000 | 2 000 000 |
| Indemnisations | Plantations, habitations | u | 100 | | 50 000 | 5 000 000 |
| | Terres agricoles | | PM | | | |
| Total hors taxes | | | | | 32 250 000 | |

ANNEXE II: ETUDE HYDROLOGIQUE

ANNEXE II. 1 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES PLUIES

L'analyse statistique de la série de pluies a été conduite sur deux échantillons de données pluviométriques recueillies à la station synoptique de Djibo :

- série des pluies moyennes annuelles : 1971 – 2013 (40 valeurs), ajustement à la loi de GAUSS
- série des pluies maximales journalières : 1968 – 2015 (48 valeurs), ajustement à la loi de GUMBEL

Les calculs ont été fait manuellement puis vérifiés à l'aide du logiciel HyfranPlus.

Les résultats, permettent de définir pour les moyennes annuelles et les maximales journalières, les quantiles caractéristiques, à un niveau de confiance de 95 %.

1. Ajustement de la pluviométrie

a. *Pluviométrie annuelle*

Nous utilisons la loi normale pour ajuster les données de la pluviométrie annuelle. Les résultats sont donnés ci-dessous :

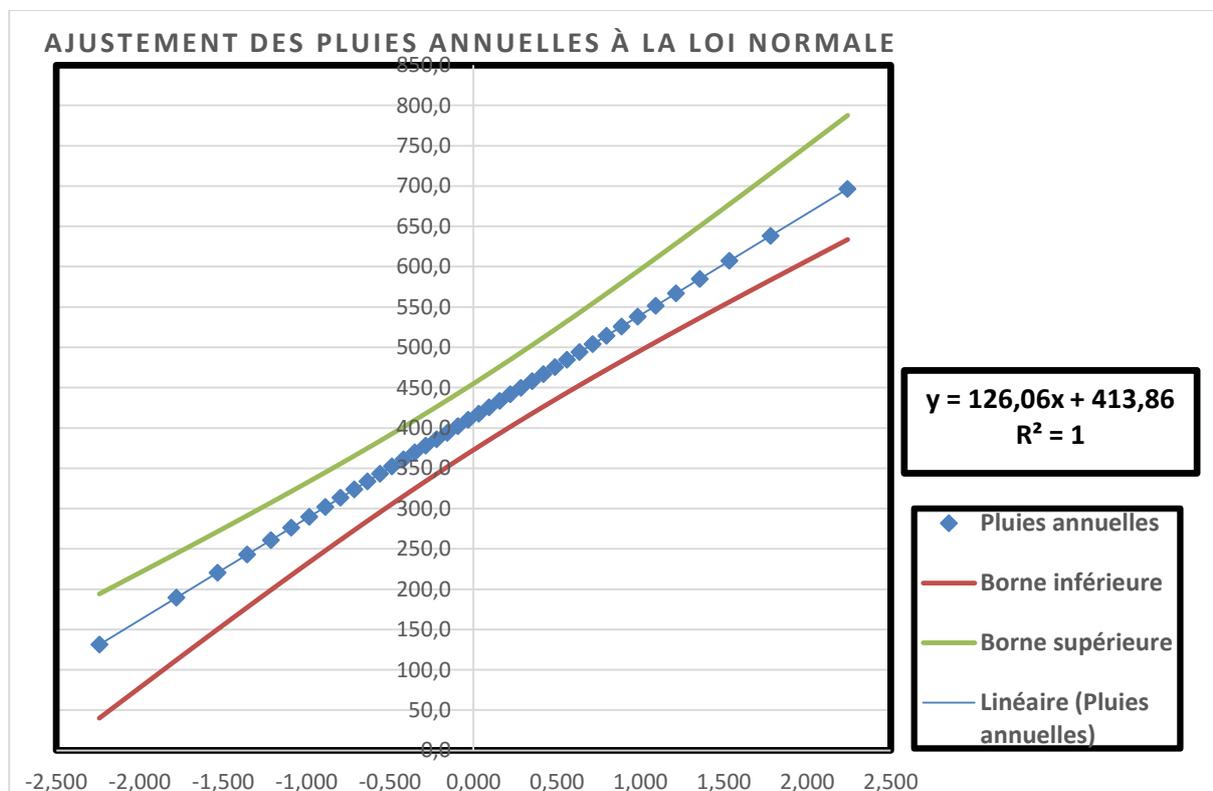


Figure 12: Ajustement de la pluviométrie annuelle

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

L'ajustement ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs de la pluviométrie pour différentes fréquences de dépassement données dans le tableau ci-après

Tableau 29: Ajustement des pluies annuelles

| Taille n= 48 | | Xo= 41,18 | | g= 13,74 | | I,C(en%)= 95 | | UGauss= 1,95 |
|--------------|-------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------------------|------------------|------------|--------------|
| Val. Départ | Val. classé | Ordre de classement | Fréquence expérimentale | Variable réduite | Valeur expérimentale | Valeur théorique | Borne inf. | Borne sup |
| 261,6 | 174,7 | 1 | 0,0125 | -2,242 | 174,7 | 131,3 | 40,1 | 193,9 |
| 364,5 | 209,4 | 2 | 0,0375 | -1,781 | 209,4 | 189,4 | 112,0 | 244,0 |
| 438,3 | 226,5 | 3 | 0,0625 | -1,534 | 226,5 | 220,4 | 150,1 | 271,2 |
| 499,5 | 231,7 | 4 | 0,0875 | -1,357 | 231,7 | 242,9 | 177,4 | 291,1 |
| 400,2 | 261,6 | 5 | 0,1125 | -1,213 | 261,6 | 260,9 | 199,1 | 307,3 |
| 403,1 | 297,6 | 6 | 0,1375 | -1,092 | 297,6 | 276,3 | 217,5 | 321,2 |
| 430,1 | 297,9 | 7 | 0,1625 | -0,984 | 297,9 | 289,8 | 233,5 | 333,5 |
| 543,2 | 308,8 | 8 | 0,1875 | -0,887 | 308,8 | 302,0 | 248,0 | 344,9 |
| 483,2 | 311,3 | 9 | 0,2125 | -0,798 | 311,3 | 313,3 | 261,1 | 355,4 |
| 400 | 322 | 10 | 0,2375 | -0,714 | 322 | 323,8 | 273,3 | 365,3 |
| 481,3 | 326 | 11 | 0,2625 | -0,635 | 326 | 333,8 | 284,7 | 374,7 |
| 308,8 | 326,4 | 12 | 0,2875 | -0,560 | 326,4 | 343,2 | 295,5 | 383,8 |
| 322 | 327,2 | 13 | 0,3125 | -0,488 | 327,2 | 352,3 | 305,8 | 392,6 |
| 226,5 | 338,5 | 14 | 0,3375 | -0,419 | 338,5 | 361,1 | 315,6 | 401,2 |
| 174,7 | 345,2 | 15 | 0,3625 | -0,351 | 345,2 | 369,6 | 325,0 | 409,6 |
| 297,9 | 364,5 | 16 | 0,3875 | -0,285 | 364,5 | 377,9 | 334,2 | 417,9 |
| 297,6 | 374,4 | 17 | 0,4125 | -0,221 | 374,4 | 386,0 | 343,1 | 426,2 |
| 209,4 | 393,1 | 18 | 0,4375 | -0,157 | 393,1 | 394,1 | 351,8 | 434,4 |
| 345,2 | 400 | 19 | 0,4625 | -0,094 | 400 | 402,0 | 360,3 | 442,6 |
| 231,7 | 400,2 | 20 | 0,4875 | -0,031 | 400,2 | 409,9 | 368,7 | 450,8 |
| 585 | 400,3 | 21 | 0,5125 | 0,031 | 400,3 | 417,8 | 376,9 | 459,1 |
| 326 | 403,1 | 22 | 0,5375 | 0,094 | 403,1 | 425,7 | 385,2 | 467,4 |
| 400,3 | 430,1 | 23 | 0,5625 | 0,157 | 430,1 | 433,7 | 393,4 | 475,9 |
| 566,6 | 438,3 | 24 | 0,5875 | 0,221 | 438,3 | 441,7 | 401,5 | 484,6 |
| 338,5 | 441,3 | 25 | 0,6125 | 0,285 | 441,3 | 449,8 | 409,8 | 493,5 |
| 311,3 | 447,5 | 26 | 0,6375 | 0,351 | 447,5 | 458,2 | 418,1 | 502,7 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | |
|-------|-------|----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 327,2 | 466,4 | 27 | 0,6625 | 0,419 | 466,4 | 466,7 | 426,5 | 512,1 |
| 678,6 | 481,3 | 28 | 0,6875 | 0,488 | 481,3 | 475,4 | 435,1 | 522,0 |
| 636 | 483,2 | 29 | 0,7125 | 0,560 | 483,2 | 484,5 | 443,9 | 532,2 |
| 326,4 | 487,1 | 30 | 0,7375 | 0,635 | 487,1 | 493,9 | 453,0 | 543,0 |
| 572,7 | 499,5 | 31 | 0,7625 | 0,714 | 499,5 | 503,9 | 462,4 | 554,4 |
| 447,5 | 537,9 | 32 | 0,7875 | 0,798 | 537,9 | 514,4 | 472,4 | 566,6 |
| 620,7 | 543,2 | 33 | 0,8125 | 0,887 | 543,2 | 525,7 | 482,9 | 579,8 |
| 393,1 | 566,6 | 34 | 0,8375 | 0,984 | 566,6 | 537,9 | 494,2 | 594,2 |
| 537,9 | 572,7 | 35 | 0,8625 | 1,092 | 572,7 | 551,5 | 506,6 | 610,3 |
| 487,1 | 585 | 36 | 0,8875 | 1,213 | 585 | 566,8 | 520,5 | 628,6 |
| 374,4 | 598,7 | 37 | 0,9125 | 1,357 | 598,7 | 584,9 | 536,6 | 650,4 |
| 466,4 | 620,7 | 38 | 0,9375 | 1,534 | 620,7 | 607,3 | 556,5 | 677,6 |
| 598,7 | 636 | 39 | 0,9625 | 1,781 | 636 | 638,3 | 583,7 | 715,7 |
| 441,3 | 678,6 | 40 | 0,9875 | 2,242 | 678,6 | 696,5 | 633,8 | 787,6 |

b. Pluviométrie maximale journalière

Nous utilisons la loi de Gumbel pour ajuster les données de la pluviométrie maximale journalière. Les résultats sont donnés ci-dessous :

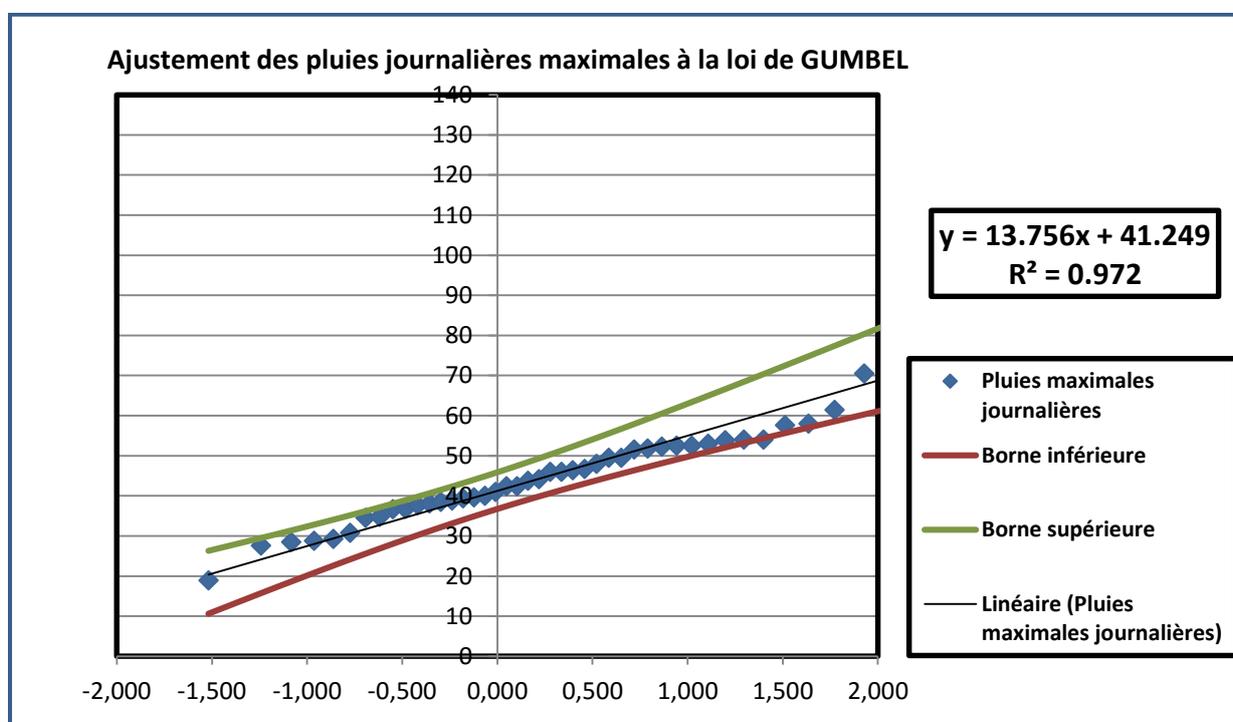


Figure 13: Ajustement des pluies journalières maximale

Tableau 30: Ajustement des pluies journalières maximales

| Taille n= 48 | | Xo= 41,18 | | g= 13,74 | | I,C(en%)= 95 | | UGauss= 1,95 |
|-------------------|------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|------------------|-------------|--------------|
| Valeurs de départ | Valeurs classées | Ordre de classement | Fréquence expérimentale | Variab le réduite | Valeur expérimentale | Valeur théorique | Born e inf. | Born e sup |
| 48 | 18,9 | 1 | 0,01 | -1,52 | 18,9 | 20,3 | 10,6 | 26,3 |
| 58 | 27,6 | 2 | 0,031 | -1,24 | 27,6 | 24,1 | 15,7 | 29,5 |
| 57,6 | 28,5 | 3 | 0,052 | -1,08 | 28,5 | 26,3 | 18,6 | 31,4 |
| 36,7 | 28,8 | 4 | 0,073 | -0,96 | 28,8 | 28,0 | 20,8 | 32,8 |
| 49,5 | 29,3 | 5 | 0,094 | -0,86 | 29,3 | 29,3 | 22,6 | 34,1 |
| 76,5 | 30,8 | 6 | 0,115 | -0,77 | 30,8 | 30,6 | 24,1 | 35,2 |
| 54 | 34,5 | 7 | 0,135 | -0,69 | 34,5 | 31,7 | 25,5 | 36,2 |
| 53,9 | 34,8 | 8 | 0,156 | -0,62 | 34,8 | 32,7 | 26,8 | 37,1 |
| 44,2 | 36,7 | 9 | 0,177 | -0,55 | 36,7 | 33,6 | 28,0 | 38,1 |
| 39,6 | 36,8 | 10 | 0,198 | -0,48 | 36,8 | 34,6 | 29,1 | 38,9 |
| 46,4 | 37,7 | 11 | 0,219 | -0,42 | 37,7 | 35,4 | 30,2 | 39,8 |
| 73,5 | 38,1 | 12 | 0,24 | -0,36 | 38,1 | 36,3 | 31,2 | 40,7 |
| 34,8 | 38,5 | 13 | 0,26 | -0,30 | 38,5 | 37,1 | 32,2 | 41,5 |
| 61,4 | 38,8 | 14 | 0,281 | -0,24 | 38,8 | 37,9 | 33,1 | 42,3 |
| 37,7 | 39,4 | 15 | 0,302 | -0,18 | 39,4 | 38,7 | 34,0 | 43,2 |
| 52,5 | 39,6 | 16 | 0,323 | -0,12 | 39,6 | 39,5 | 34,9 | 44,0 |
| 38,5 | 40 | 17 | 0,344 | -0,07 | 40 | 40,3 | 35,7 | 44,9 |
| 28,5 | 41 | 18 | 0,365 | -0,01 | 41 | 41,1 | 36,6 | 45,7 |
| 34,5 | 42,4 | 19 | 0,385 | 0,05 | 42,4 | 41,8 | 37,4 | 46,6 |
| 46,7 | 42,4 | 20 | 0,406 | 0,10 | 42,4 | 42,6 | 38,2 | 47,5 |
| 30,8 | 43,8 | 21 | 0,427 | 0,16 | 43,8 | 43,4 | 39,0 | 48,4 |
| 49,5 | 44,2 | 22 | 0,448 | 0,22 | 44,2 | 44,2 | 39,8 | 49,4 |
| 38,1 | 46 | 23 | 0,469 | 0,28 | 46 | 45,0 | 40,6 | 50,3 |
| 52,5 | 46 | 24 | 0,49 | 0,34 | 46 | 45,8 | 41,4 | 51,3 |
| 29,3 | 46,4 | 25 | 0,51 | 0,40 | 46,4 | 46,6 | 42,2 | 52,3 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | |
|-------|-------|----|-------|------|-------|-------|------|------|
| 18,9 | 46,7 | 26 | 0,531 | 0,46 | 46,7 | 47,5 | 43,0 | 53,3 |
| 53 | 48 | 27 | 0,552 | 0,52 | 48 | 48,3 | 43,8 | 54,4 |
| 38,8 | 49,5 | 28 | 0,573 | 0,59 | 49,5 | 49,2 | 44,7 | 55,5 |
| 28,8 | 49,5 | 29 | 0,594 | 0,65 | 49,5 | 50,1 | 45,5 | 56,7 |
| 41 | 51,6 | 30 | 0,615 | 0,72 | 51,6 | 51,1 | 46,3 | 57,9 |
| 42,4 | 51,8 | 31 | 0,635 | 0,79 | 51,8 | 52,0 | 47,2 | 59,2 |
| 46 | 52,3 | 32 | 0,656 | 0,87 | 52,3 | 53,1 | 48,1 | 60,5 |
| 27,6 | 52,5 | 33 | 0,677 | 0,94 | 52,5 | 54,1 | 49,0 | 61,9 |
| 51,6 | 52,5 | 34 | 0,698 | 1,02 | 52,5 | 55,2 | 50,0 | 63,4 |
| 42,4 | 53 | 35 | 0,719 | 1,11 | 53 | 56,4 | 51,0 | 65,0 |
| 78,8 | 53,9 | 36 | 0,74 | 1,20 | 53,9 | 57,6 | 52,0 | 66,6 |
| 40 | 54 | 37 | 0,76 | 1,30 | 54 | 59,0 | 53,1 | 68,4 |
| 39,4 | 54 | 38 | 0,781 | 1,40 | 54 | 60,4 | 54,3 | 70,4 |
| 115,8 | 57,6 | 39 | 0,802 | 1,51 | 57,6 | 61,9 | 55,6 | 72,5 |
| 43,8 | 58 | 40 | 0,823 | 1,64 | 58 | 63,6 | 57,0 | 74,8 |
| 46 | 61,4 | 41 | 0,844 | 1,77 | 61,4 | 65,5 | 58,5 | 77,4 |
| 54 | 70,5 | 42 | 0,865 | 1,93 | 70,5 | 67,7 | 60,3 | 80,3 |
| 52,3 | 73,5 | 43 | 0,885 | 2,11 | 73,5 | 70,1 | 62,2 | 83,7 |
| 36,8 | 73,5 | 44 | 0,906 | 2,32 | 73,5 | 73,0 | 64,6 | 87,8 |
| 73,5 | 76,5 | 45 | 0,927 | 2,58 | 76,5 | 76,6 | 67,4 | 92,8 |
| 70,5 | 78,8 | 46 | 0,948 | 2,93 | 78,8 | 81,4 | 71,2 | 99,5 |
| 51,8 | 91,2 | 47 | 0,969 | 3,45 | 91,2 | 88,6 | 76,9 | 110 |
| 91,2 | 115,8 | 48 | 0,99 | 4,56 | 115,8 | 103,8 | 88,8 | 131 |

L'ajustement ainsi réalisé, permet de déterminer les valeurs de la pluviométrie maximale journalière pour différentes fréquences de dépassement données dans le tableau ci-après :

ANNEXE II. 2 CARACTÉRISATION DU BASSIN VERSANT

Tableau 31: Caractéristiques du bassin versant de Kelbo

| Caractéristiques Physiques | | | | |
|----------------------------------|--|----------------------|-----------|-----------------|
| Périmètre | | P = | 164 | km |
| Superficie | | S = | 599 | km ² |
| Longueur totale des cours d'eau | | Lte = | 30,1 | km |
| Pente transversale | | It = | 6,63 | m/ km |
| Indice de compacité de Gravelius | $Ic = 0,282 \times P/S^{1/2}$ | Ic = | 1,89 | |
| Longueur du rectangle équivalent | $Leq = S^{1/2} \times (Ic / 1,128) \times (1 + (1 - (1.128/Ic)^2) / 0,5)$ | Leq = | 73,89 | km |
| Largeur du rectangle équivalent | $leq = S/Leq$ | leq = | 8,11 | km |
| Longueur du thalweg | | Lt = | 30,1 | km |
| Altitude à 5% de surface | | Z5% = | 358 | m |
| Altitude à 95% de surface | | Z95% = | 321 | m |
| Altitude médiane | $Zmed = Z_{50\%}$ | Zmed = | 341 | |
| Indice globale de pente | $Ig = (Z5\% - Z95\%) / Leq$ | Ig = | 0,50 | m/ km |
| <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 | $Ig_{corr} = [(n-1) \times Ig + It] / n$ | Ig _{corr} = | 1,7 3 | m/km |
| Indice globale de pente retenu | $Ig_{ret} = Ig_{corr}$ si $(It - Ig) / It > 20\%$, sinon $Ig_{ret} = Ig$ | Ig _{ret} = | 1,7 3 | m/km |
| Dénivelé spécifique | $Ds = Ig \times S^{1/2}$ | Ds = | 12, 25 | m |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | |
|---|--|----------------------------|-----------|------------------------|
| Densité de drainage | $Dd = Lt/S$ | $Dd =$ | 0,5 1 | km/k m 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 humide | | $P_{10} =$ | 72, 1 | mm |
| Pluie centennale humide | | $P_{100} =$ | 10 4,4 | mm |
| Pluie moyenne annuelle | | $P_{moy} =$ | 41 4 | mm |
| Type de climat | | Sahélien | | |
| Coefficient majorateur | | $m =$ | 1,0 3 | |
| Coefficient d'abattement | $A=1-[(161-0,042 \times P_{moy})/1000] \times \text{Log}(S)$ | $A =$ | 0,6 | |
| Coefficient de pointe correspondant à la crue décennale | | α_1 $\alpha_0 =$ | 2,6 0 | |

Tableau 32: Caractéristiques Hydrologiques du bassin versant de Kelbo

| Calcul du coefficient de ruissellement décennal | | | |
|---|--------------|-------|------|
| pour I_{g1} on a: | $I_{g1} =$ | 3,00 | m/km |
| $Kr_{70} = 164/(S+17)+10.5$ | $Kr_{70} =$ | 10,77 | % |
| $Kr_{100} = 250/(S+20)+12$ | $Kr_{100} =$ | 12,40 | % |
| pour I_{g2} on a: | $I_{g2} =$ | 7,00 | m/km |
| $Kr_{70} = 239/(S+17,7)+14.5$ | $Kr_{70} =$ | 14,89 | % |
| $Kr_{100} = 300/(S+20)+15$ | $Kr_{100} =$ | 15,48 | % |
| Pour I_{gret} on aura par interpolation linéaire: | $I_{gret} =$ | 1,73 | m/km |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | |
|---|---|----------------|--------------------------|
| Kr70 calculé | Kr70cal = | 9,45 | % |
| Kr100 calculé | Kr100cal = | 11,42 | % |
| $Kr10 = (Kr100 - Kr70) / (100 - 70) \times (P10 - P100)$ Kr100 | Kr10 = | 9,70 | % |
| Calcul du temps de base | | | |
| pour Ig1 on a: | Ig1 = | 3,00 | m/km |
| $Tb = 250 \times S^{0.35} + 300$ | Tb = | 2644,44 | mn |
| pour Ig2 on a: | Ig2 = | 7,00 | m/km |
| $Tb = 126 \times S^{0.35} + 100$ | Tb = | 1281,60 | mn |
| Pour Igret on aura par interpolation linéaire : | Igret = | 1,73 | m/km |
| | Tbcal = | 3078,31 | mn |
| | | 51,31 | h |
| Calcul du temps de montée | | | |
| pour Ig1 on a: | Ig1 = | 3,00 | m/km |
| $Tm = 100 \times S^{0.35} + 75$ | Tm = | 1012,78 | mn |
| pour Ig2 on a: | Ig2 = | 7,00 | m/km |
| $Tm = 32 \times S^{0.35} + 23$ | Tm = | 323,09 | mn |
| Pour Igret on aura par interpolation linéaire : | Igret = | 1,73 | m/km |
| | Tmcal = | 1232,34 | mn |
| | | 20,54 | h |
| Calcul de la crue centennale | | | |
| Méthode ORSTOM (1992) | | | |
| Crue décennale maximale | $Q_{max10} = m \times A \times \alpha_{10} \times P_{10} \times Kr_{10} \times S / T_b$ | $Q_{max10} =$ | 36,51 m ³ /s |
| | $C = (1 + ((P_{100} - P_{10}) / P_{10}) \times ((T_b / 24)^{0,12} / Kr_{10}))$ | $C =$ | 6,06 |
| Crue centennale maximale | $Q_{max100} = C \times Q_{max10}$ | $Q_{max100} =$ | 221,24 m ³ /s |
| Méthode CIEH (1994) | | | |
| Crue décennale maximale | $Q_{max10} = a \cdot S^{p \cdot I_g} \cdot I \cdot K_r \cdot 10^k \cdot D_{dd} = 0.41 \times S^{0.425} \times Kr_{100}^{0.923}$ | $Q_{max10} =$ | 50,58 m ³ /s |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | $Q_{max10} = 0.254 \times S \times 0.462 \times I_{gcorr} \times 0.101 \times K_r \times 100.976$ | | 47,32 | m ³ /s |
|---|---|--------------------|--------------|-------------------|
| | | $Q_{moy} =$ | 48,95 | m ³ /s |
| | $C = (1 + ((P_{100} - P_{10}) / P_{10}) \times ((T_b / 24)^{0,12} / K_r))$ | $C =$ | 6,06 | |
| Crue centennale maximale | $Q_{max100} = C \times Q_{max10}$ | $Q_{max100} =$ | 296,6 | m ³ /s |
| Crue de projet retenue | | $Q_{projet} =$ | 296,6 | m ³ /s |
| CRUE DE SECURITE | | | | |
| Désignation | | Crête du déversoir | | |
| Charge (m) | | 1,2 | | |
| Longueur déversante : L (m) | | 130 | | |
| Coefficient de débit : m | | 0,4 | | |
| Débit de sécurité : Q (m ³ /s) = $m \times L \times (2g)^{0,5} \times h^{1,5}$ | | 825,6 | | |

ANNEXE II. 3 ESTIMATION DES APPORTS

1. Apports liquides

Les quantiles critiques permettent d'évaluer une probabilité cumulée au dépassement. Cette probabilité est convertie en une hauteur d'écoulement annuel en fonction du bassin type choisi par l'abaque de RODIER Le coefficient d'écoulement est alors défini par :

$$K_e = \frac{\text{Écoulement}}{\text{Quantile}} \quad \text{Et} \quad \boxed{V_e = K_e * \text{Quantile} * S_{BV}}$$

Tableau 33: Apports liquides du bassin versant de Kelbo

| Durée de retour | Pluie annuelle correspondante du bassin versant Pac (mm) | Coefficient d'écoulement Ke | Volume d'eau écoulée $V_e(m^3) = K_e \times S_{BV} \times Pac$ |
|--------------------|--|-----------------------------|--|
| Décennale sèche | 252,32 | 8,00% | 12 091 174 |
| Quinquennale sèche | 307,77 | 9,80% | 18 066 715 |
| Médiane | 413,86 | 10,00% | 24 790 214 |

2. Apports solides

Tableau 34: apports solides du bassin versant de Kelbo

| Formules | Apports solides (m ³ /an) : V=D*S | Apports solides pour les 30 années (m ³) |
|-------------------------|---|---|
| GRESILLON (CIEH – EIER) | 20 718,01 | 621540,17 |
| KARAMBIRI | 11 822,42 | 354672,63 |

ANNEXE III: ETUDE DE LA CUVETTE

ANNEXE III. 1 COURBE HAUTEUR-SURFACE-VOLUME

Les surfaces ont été obtenues en estimant les surfaces moyennes entre les plans définis par pas de hauteur. Le volume est alors obtenu par la formule suivante :

$$V_{i+1} = \frac{S_i + S_{i+1}}{2} * h$$

Tableau 35: Donnée pour la Courbe-hauteur-surface-volume

| Cotes | Surface(m ²) | Volume partiel (m ³) | Volume cum (m ³) |
|--------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 294,5 | | 0,0 | 0,0 |
| 294,75 | 177 | 22,1 | 22,1 |
| 295 | 2193 | 296,3 | 318,4 |
| 295,25 | 12523 | 1839,5 | 2157,9 |
| 295,5 | 140720,59 | 19155,4 | 21313,3 |
| 295,75 | 252668,8 | 49173,7 | 70487,0 |
| 296 | 422426,7 | 84386,9 | 154873,9 |
| 296,25 | 651800,1 | 134278,3 | 289152,3 |
| 296,5 | 892198,0 | 192999,8 | 482152,0 |
| 296,75 | 1156397,5 | 256074,4 | 738226,4 |
| 297 | 1753189,5 | 363698,4 | 1101924,8 |
| 297,25 | 1753189,5 | 438297,4 | 1540222,2 |
| 297,5 | 2185191,6 | 492297,6 | 2032519,8 |
| 297,75 | 2687663,4 | 609106,9 | 2641626,7 |
| 298 | 3185740,1 | 734175,4 | 3375802,2 |
| 298,25 | 3766662,2 | 869050,3 | 4244852,4 |
| 298,5 | 4427980,7 | 1024330,4 | 5269182,8 |
| 298,75 | 5106718,6 | 1191837,4 | 6461020,2 |
| 299 | 5805589,4 | 1364038,5 | 7825058,7 |
| 299,25 | 6105079 | 1488833,6 | 9313892,3 |
| 299,5 | 7742331,5 | 1730926,3 | 11044818,6 |
| 299,75 | 8740011,4 | 2060292,9 | 13105111,4 |
| 300 | 9833587,1 | 2321699,8 | 15426811,3 |
| 300,25 | 11105851,1 | 2617429,8 | 18044241,0 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | |
|--------|------------|-----------|------------|
| 300,5 | 12373393,1 | 2934905,5 | 20979146,6 |
| 300,75 | 13626619,6 | 3250001,6 | 24229148,1 |
| 301 | 14816710,3 | 3555416,2 | 27784564,4 |
| 301,25 | 15816710,3 | 3829177,6 | 31613741,9 |
| 301,5 | 15887092,3 | 3962975,3 | 35576717,3 |
| 301,75 | 16672521 | 4069951,7 | 39646668,9 |
| 302 | 17839489 | 4314001,3 | 43960670,2 |
| 302,25 | 19116424 | 4619489,1 | 48580159,3 |
| 302,5 | 20673905 | 4973791,1 | 53553950,4 |
| 302,75 | 22269966 | 5367983,9 | 58921934,3 |
| 303 | 23925911 | 5774484,6 | 64696418,9 |
| 303,25 | 25716230 | 6205267,6 | 70901686,5 |
| 303,5 | 27186408 | 6612829,8 | 77514516,3 |

ANNEXE III. 2REVANCHE LIBRE

Tableau 36: Revanche libre

| Calcul de la revanche | | | | |
|--|---|---------|----------|------|
| h=hauteur des vagues en m | | | | |
| f= fetch en km | | | | |
| U= vitesse du vent en km/h | | | | |
| V=vitesse de propagation des vagues en m/s | | | | |
| Formule de STEVENSON pour le calcul de la hauteur des vagues | | | | |
| Formules | | f (km) | U (km/h) | h(m) |
| Pour le fetch <18km | $h = 0,75 + 0,34 * \sqrt{f} + 0,36^4 \sqrt{f} (m)$ | 8,5 | | 1,13 |
| Formule de MOLITOR pour le calcul de la hauteur des vagues | | | | |
| Pour le fetch <30km | $h = 0,75 + 0,032 * \sqrt{f} - 0,26^4 \sqrt{f} (m)$ | 8,5 | 7,56 | 0,57 |
| Moyenne | | | | 0,85 |
| Formule de GAILLARD | | | | |
| V=1,5+2*h (m/s) | 3,20 | | | |
| R=0,75*h+V ² /2*g (m) | 1,15 | | | |

ANNEXE III. 3ÉVALUATION DES PERTES DE LA RETENUE

1. Pertes par évaporation

Formule de POUYAUD : $E_{lac} = 1,664 * E_{bacA}^{0,602}$

avec un coefficient de régression $r = 0.93$

E_{lac} : évaporation du plan d'eau (mm/j)

$E_{bac A}$: évaporation au bac A (mm/j)

Tableau 37: Perte de la retenue d'eau de Kelbo

| Mois | Durée (j) | Evaporation bac "A" (mm) | Evaporation Lac (mm) |
|-----------|-----------|--------------------------|----------------------|
| janvier | 31 | 219,9 | 167,8 |
| février | 28 | 248,2 | 173,3 |
| mars | 31 | 320,5 | 210,5 |
| avril | 30 | 328,3 | 210,8 |
| mai | 31 | 332,8 | 215,3 |
| juin | 30 | 280,6 | 191,8 |
| juillet | 31 | 225,9 | 170,5 |
| août | 31 | 186,4 | 151,9 |
| septembre | 30 | 186,6 | 150,0 |
| octobre | 31 | 240,3 | 177,0 |
| novembre | 30 | 233,8 | 171,8 |
| décembre | 31 | 221 | 168,3 |
| Total | | 2159,0 | |

2. Pertes par infiltration

Au Burkina Faso, il est d'usage de considérer que les pertes seraient de l'ordre de 1 à 3 mm/jour en moyenne.

Infiltration : 2 mm/j

Tableau 38: Perte par infiltration

| Mois | Jan. | Fév. | Mar | Avr. | Mai | Juin | Juil. | Août. | Sept | Oct. | Nov. | Déc | Total |
|------------------------------|------|------|-----|------|-----|------|-------|-------|------|------|------|-----|-------|
| Pertes par infiltration (mm) | 62 | 56 | 62 | 60 | 62 | 60 | 62 | 62 | 60 | 62 | 60 | 62 | 730 |

*ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU
SOUM (BURKINA FASO)*

ANNEXE III. 4ESTIMATION DES BESOINS

| Hypothèses de simulation (Besoins) | Domestiques | | Pastoraux | | Riz (h) |
|------------------------------------|---------------|-------|----------------|--------------------------------------|---------|
| | Nhpts. | 74948 | Ntêtes | | |
| | Cs (l/jr/hbt) | 15 | Cs (l/jr/tête) | 5 (petit bétail) 40 (gros bétail) | Marai |

| Besoins humains et pastoraux | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| Mois | Nov. | Déc. | Janv. | Fév. | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil. | |
| Nbre de jours | 30 | 31 | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 | |
| Besoins mensuels(m3) | 131670 | 136059 | 136059 | 122892 | 136059 | 131670 | 136059 | 131670 | 136059 | 1 |
| Besoins agricoles pour la riziculture | | | | | | | | | | |
| Besoins bruts (m3/ha) | | | | | | | | 1610,1 | 1399,8 | |
| Besoins agricoles pour la maraîchage | | | | | | | | | | |
| Besoins bruts (m3/ha) | 1320,4 | 1946,5 | 2298,2 | 2357,2 | 1147,4 | | | | | |
| Besoins pour l'agriculture(m3) | 4 343 148 | | | | | | | | | |
| Somme de tous les besoins | | | | | | | | | | |
| Besoins(m3) | 5 945 136 | | | | | | | | | |

I. EXPLOITATION DE LA RETENUE

✓ **En année moyenne**

Tableau 39: Simulation en année moyenne

| Périodes | Début période | | Volume Infiltré | | | Volume Evaporé | | | Humain/Pas |
|----------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | Niveau du plan d'eau | Volume correspond | Haut d'eau perdue (m) | Nouveau niveau | Volume correspond | Haut d'eau perdue (m) | Nouveau niveau | Volume correspond | Volume prélevé |
| oct-16 | 300,50 | 20 979 147 | 0,06 | 300,44 | 20 251 290 | 0,192 | 300,25 | 17 999 697 | 136 059 |
| nov-16 | 300,30 | 18 675 999 | 0,06 | 300,24 | 17 979 477 | 0,17 | 300,07 | 16 180 662 | 131 670 |
| déc-16 | 300,04 | 15 850 938 | 0,06 | 299,98 | 15 227 237 | 0,17 | 299,81 | 13 664 283 | 136 059 |
| janv-17 | 299,76 | 13 236 253 | 0,06 | 299,70 | 12 710 535 | 0,17 | 299,53 | 11 327 770 | 136 059 |
| févr-17 | 299,47 | 10 846 986 | 0,06 | 299,42 | 9 019 980 | 0,17 | 299,24 | 9 267 039 | 122 892 |
| mars-17 | 299,16 | 8 790 573 | 0,06 | 299,10 | 6 932 509 | 0,21 | 298,89 | 7 222 922 | 136 059 |
| avr-17 | 298,83 | 6 914 755 | 0,06 | 298,77 | 6 587 385 | 0,21 | 298,56 | 5 566 508 | 131 670 |
| mai-17 | 298,57 | 5 585 168 | 0,06 | 298,50 | 5 289 593 | 0,22 | 298,29 | 4 404 528 | 136 059 |
| juin-17 | 298,45 | 5 081 142 | 0,06 | 298,39 | 4 835 303 | 0,19 | 298,20 | 4 079 156 | 131 670 |
| juil-17 | 298,65 | 5 966 826 | 0,06 | 298,58 | 5 671 250 | 0,17 | 298,41 | 4 916 160 | 136 059 |
| août-17 | 299,30 | 9 669 550 | 0,06 | 299,24 | 9 250 576 | 0,15 | 299,09 | 8 346 049 | 136 059 |
| sept-17 | 299,87 | 14 181 461 | 0,06 | 299,81 | 13 624 253 | 0,15 | 299,66 | 12 329 614 | 131 670 |

Nous considérons que les pluies ponctuelles tombées au cours de la saison sèche constituent un apport négligeable pour la retenue.

✓ **En année quinquennale sèche**

Tableau 40: Simulation en année Quinquennale sèche

| Périodes | Début période | | Volume Infiltré | | | Volume Evaporé | | | Humain/Pas |
|----------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | Niveau du plan d'eau | Volume correspond | Haut d'eau perdue (m) | Nouveau niveau | Volume correspond | Haut d'eau perdue (m) | Nouveau niveau | Volume correspond | Volume prélevé |
| oct-16 | 299,26 | 9 417 158 | 0,06 | 299,20 | 9 033 484 | 0,192 | 299,01 | 8 222 213 | 136 059 |

*ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU
SOUH (BURKINA FASO)*

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|------------|------|--------|-----------|------|--------|-----------|---------|
| nov-16 | 299,16 | 8 803 708 | 0,06 | 299,10 | 8 446 388 | 0,17 | 298,93 | 7 456 880 | 131 670 |
| déc-16 | 298,87 | 7 127 156 | 0,06 | 298,81 | 6 788 875 | 0,17 | 298,64 | 5 945 148 | 136 059 |
| janv-17 | 298,55 | 5 517 118 | 0,06 | 298,49 | 5 228 238 | 0,17 | 298,32 | 4 540 759 | 136 059 |
| févr-17 | 298,20 | 4 059 974 | 0,06 | 298,14 | 3 865 307 | 0,17 | 297,97 | 3 280 424 | 122 892 |
| mars-17 | 297,81 | 2 803 958 | 0,06 | 297,74 | 2 625 246 | 0,21 | 297,53 | 2 112 414 | 136 059 |
| avr-17 | 297,38 | 1 804 246 | 0,06 | 297,32 | 1 686 095 | 0,21 | 297,11 | 1 300 534 | 131 670 |
| mai-17 | 297,11 | 1 301 649 | 0,06 | 297,05 | 1 192 952 | 0,22 | 296,84 | 864 227 | 136 059 |
| juin-17 | 297,20 | 1 445 999 | 0,06 | 297,14 | 1 340 807 | 0,19 | 296,94 | 1 021 160 | 131 670 |
| juil-17 | 297,75 | 2 644 979 | 0,06 | 297,69 | 2 462 903 | 0,17 | 297,52 | 2 077 945 | 136 059 |
| août-17 | 298,70 | 6 236 212 | 0,06 | 298,64 | 5 940 637 | 0,15 | 298,49 | 5 223 945 | 136 059 |
| sept-17 | 299,40 | 10 346 397 | 0,06 | 299,34 | 9 930 975 | 0,15 | 299,19 | 8 951 359 | 131 670 |

Nous considérons que les pluies ponctuelles tombées au cours de la saison sèche constituent un apport négligeable pour la retenue.

ANNEXE IV : ETUDE DE LA DIGUE ET DE SES OUVRAGES

ANNEXE III. 5LA DIGUE

1. 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 ;
- La hauteur d'eau (h) au-dessus du seuil lors du déversement de la crue de projet ;
- La revanche (R) sur les plus hautes eaux.

La revanche sur les plus hautes eaux permet :

- d'éviter la submersion de la digue par les vagues engendrées par les vents lors des crues ;
- 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.

La cote de la crête de la digue est donc déterminée à partir de la formule :

| Côte PEN (m) | H (m) | Revanche (m) | Côte digue (m) | Côte parapet (m) | Côte TN (m) | Hauteur max (m) |
|-----------------|-------|-----------------|-------------------|---------------------|----------------|--------------------|
| 300,5 | 1,2 | 1,2 | 303 | 303,5 | 294,74 | 8,5 |

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 (lc) de la digue :

| | |
|---------------------|--|
| formule 1 (Knappen) | $lc = 1,65 * \sqrt{H_d} = 1,65 * \sqrt{8,5}$ |
| formule 3 (Preece) | $lc = 1,1 * \sqrt{H_d} + 1 = 1,1 * \sqrt{8,5} + 1$ |

Avec H_d : hauteur maximale de la digue (m)

Les calculs donnent pour ces différentes formules les résultats suivants :

| Paramètres | Formule 1 | Formule 2 | Moyenne |
|-----------------------|-----------|-----------|---------|
| Hauteur max digue (m) | | 8,5 | |
| Largeur crête (m) | 4,81 | 4,25 | 4 |

Au regard de ces résultats, nous retenons **4 m** comme largeur en crête de la digue.

3. Longueur de la digue

Le calage du remblai de la digue à la cote 303 m a conduit à une longueur de la digue de 2301 m sans la longueur du déversoir.

4. 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) = 2,5m • H_D = hauteur de la digue : 8,5 m |
|---|

5. Infiltration à travers la digue

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

Elle a pour équation :

$$Y^2 - 2xY_0 - Y_0^2 = 0$$

Avec

$$Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$$

Le débit de fuite est :

$$q = k_r * Y_0 * S$$

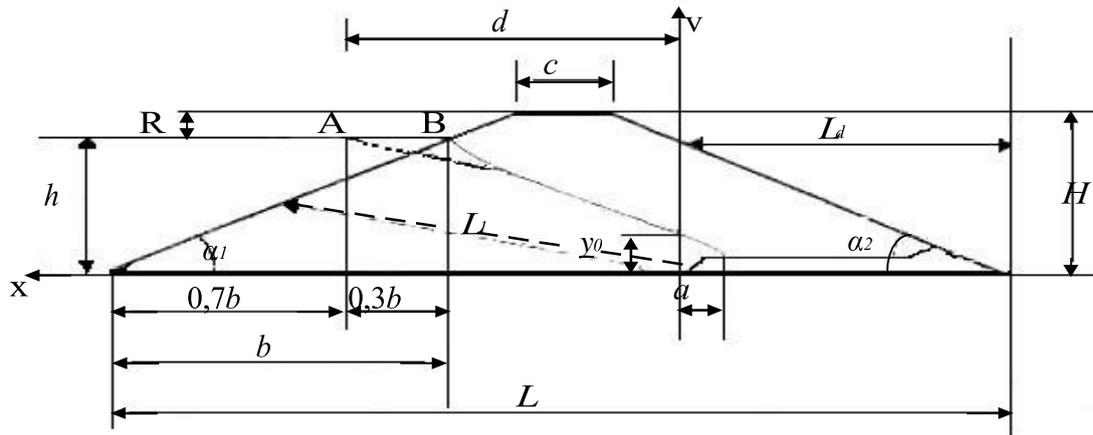


Figure 14: Courbe de KOZENY

Tableau 41: Détermination du débit de fuite

| Désignation | Formules | Valeurs |
|---|--------------------------------|----------|
| h :tirant d'eau à l'amont (m) | | 6 |
| b :projection horizontale de la partie mouillée du parement amont (m) | $b = h * m_{amont}$ | 15 |
| d :largeur en base du barrage diminuée de 0.7 b et de la longueur du drain (m) | $d = L_b - 0,7 * b - l_d$ | 24,5 |
| l_d :longueur du drain (m) | $l_d = \frac{1}{3} * L_b$ | 15,50 |
| Y_0 : Point d'intersection de l'axe des ordonnées et de la parabole de Kozeny | $Y_0 = \sqrt{(h^2 + d^2)} - d$ | 4,26 |
| L_b :largeur en base de la digue (m) | | 46,5 |
| q calcul du débit de fuite (m ³ /s) | $q = Kr * Y_0$ | 3,00E-08 |

ANNEXE III. 6 :OUVRAGE ANNEXES

1. Calcul de l'épaisseur du drain

| Paramètres | Formules | Valeurs |
|---------------------------|---|---------|
| e :épaisseur du drain (m) | $e = 2 * \sqrt{\left(\frac{q * l_d}{k_d}\right)}$ | 0,14 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|---|--|----------|
| Kd (perméabilité du drain en m/s) | | 1,00E-04 |
| La valeur minimale recommandée est de 0,5 m (Source Techniques des petits barrage page 193) | | 0,50 |

2. Le tapis 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 haute charge, notamment au droit du déversoir principal. Les caractéristiques de ce tapis sont les suivantes :

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

3. Les ouvrages de prise

Tableau 42: Dimensionnement des ouvrages de prise

| Désignation | Unité | Valeurs |
|--|-------|---------|
| Détermination de la longueur (L) de la conduite | | |
| Largeur en crête de la digue : Lc | 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 | 271,76 |
| Cote crête de la digue : $Z_{crête}$ | m | 303 |
| Côte au plan d'eau normale : Z_{PEN} | m | 300,5 |
| 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. | | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|--|-------------------|-------------|
| Débit spécifique du mois de pointe : Qs | l/s/ha | 2,9 |
| Surface totale irriguée par saison: S | ha | 150 |
| Débit de pointe délivré par la conduite : Q = C*S*(2gH)^{0,5} | m ³ /s | 0,51 |
| | l/s | 510 |
| Cote PEN | m | 300,5 |
| Coefficient de contraction | | 0,6 |
| Charge de l'eau sur la conduite : H | m | 2,22 |
| Vitesse maximale : Vmax = | m/s | 2.6 |
| Diamètre de la conduite : D | m | 0,5 |
| Débit maximum : Qmax | l/s | 510 |
| Détermination du temps de vidange | | |
| Côte au PEN | m | 300,5 |
| Surface au PEN | m ² | 12373393,11 |
| Cote de l'ouvrage de Vidange | m | 294,74 |
| Section du Batardeau (5,76 m*2 m) | m ² | 11,52 |
| Pesanteur | m/s ² | 9,81 |
| Charge d'eau | m | 5,76 |
| 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 | 1163933,23 |
| Temps de Vidange | jr | 13,5 |
| Nous considérons un temps de vidange de 14 jrs | | |

I. DIMENSIONNEMENT DE L'EVACUATEUR DE CRUE

CAS 1: charge nulle au-dessus du seuil $h_s=0$

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 | 127,704 | | 6,685 | 853,701 | |
| W2 | 470,251 | | 4,173 | 1962,515 | |
| W3 | 102,384 | | 3,555 | 363,975 | |
| W4 | 3,240 | | 5,510 | 17,852 | |
| W5 | 32,400 | | 6,360 | 206,064 | |
| Poussées externes | | | | | |
| Pe | | 165,888 | 3,020 | | 500,982 |
| Sous pressions | | | | | |
| Upar | 57,600 | | | | |
| U | 204,768 | | 4,740 | | 970,600 |
| Poussées des terres Amont | | | | | |
| Pts | | 10,692 | 1,700 | | 18,176 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|--|----------------|---|
| Somme des forces verticales | 531,211 | |
| Somme des forces horizontales | | 176,580 |
| Somme des moments stabilisants | | 3404,108 |
| Somme des moments renversants | | 1489,758 |
| Vérification de la Stabilité au glissement | | |
| Coefficient de sécurité au glissement | | 1,95 Fg > 1,5:Condition vérifiée Ok! |
| Vérification de la Stabilité au renversement | | |
| M(W-U)/ M(Pe+Pt) | 2,29 m | Fg > 1,5:Condition vérifiée OK! |
| Les coefficients de sécurité étant supérieur à 1,5 les stabilités au renversement et au glissement sont vérifiées | | |
| Vérification de la Stabilité interne | | |
| Excentricité $e=B/2-(Ms-Mr)/Fv(res)$ | -0,05 m | $e < B/6$:Condition de non fissuration vérifiée OK! |
| Valeur de B/6 | | 1,19 m |
| La valeur de l'excentricité étant inférieure à B/6 la règle du tiers centrale est vérifiée | | |
| Calcul des contraintes | | |
| Contrainte minimale σ_{min} (MPa) $(w-u)/B*(1-6*e/B)$ | | 77,8 |
| La valeur de la contrainte minimale étant >0 alors il n'ya pas de traction dans le béton | | |
| Contrainte maximale σ_{max} (MPa) | | 8 |
| Contrainte au point B σ_B (MPa) | 0,09 | $\sigma_B < \sigma_{max}$:Condition de résistance vérifiée OK! |
| Vérification de la Stabilité au poinçonnement | | |
| Contrainte admissible du sol $q_{adm}=1/2*\gamma*Ny+C*Nc+\gamma*D*Nq$ | | 1153,11 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|---|--------------------------------|--|
| 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 | 23,62 | |
| Facteur de portance N_y obtenu par interpolation | 8,97 | |
| Cohésion du sol sous la base de la fondation C | 17,5 | |
| Facteur de portance N_c obtenu par interpolation | 18,84 | |
| D | 0,6 | |
| Facteur de portance N_q obtenu par interpolation | 9,24 | |
| Contrainte maximale imposée au sol de fondation σ_{max} (MPa) | Si $0 < e < B/6 \Rightarrow$ | $\sigma_{max} = (N/B) * (1 + 6 * e/B)$ |
| | Si $B/6 < e < B/2 \Rightarrow$ | $\sigma_{max} = (2 * N) / (3 * (B/2 - e))$ |
| | $0 < e < B/6$ | 71,64 |
| Valeur de q_{adm} / σ_{max} | 16,10 | |
| La valeur de q_{adm} / σ_{max} étant supérieur à 1,5 alor sla 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. | | |

CAS 2: PHE $h_s = 1,2$

Résultats (stabilité par rapport au point B)

| Designations | Force [kN/ml] | | Bras de levier [m] | Moments [KN.m] | |
|--------------|---------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | Verticale | Horizontale | | stabilisants [+] | renversants [-] |
| Poids propre | | | | | |
| W1 | 127,704 | | 6,685 | 853,701 | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | |
|---------------------------------------|---------|----------------|-------------|--------------------------------|-----------------|
| W2 | 470,251 | | 4,173 | 1962,515 | |
| W3 | 51,192 | | 3,555 | 181,988 | |
| W4 | 5,760 | | 6,377 | 36,730 | |
| W5 | 17,280 | | 6,810 | 117,677 | |
| Poussées externes | | | | | |
| Pe1 | | 69,12 | 5,18 | | 358,042 |
| Pe2 | | 165,888 | 4,220 | | 700,047 |
| Pe3 | | 1,25 | 0,667 | 0,833 | |
| Sous pressions | | | | | |
| Upar | 48,067 | | | | |
| U | 26,533 | | 2,743 | | 72,790 |
| Poussées des terres Amont | | | | | |
| Pt | | 10,692 | 2,900 | | 31,007 |
| Somme des forces verticales | | 645,654 | | | |
| Somme des forces horizontales | | 244,450 | | | |
| Somme des moments stabilisants | | | | 3153,444 | |
| Somme des moments renversants | | | | | 1161,886 |
| Stabilité au glissement | | | | | |
| Coefficient de sécurité au glissement | | | 1,72 | Fg> 1,5:Condition vérifiée Ok! | |
| Stabilité au renversement | | | | | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|--|------------------------------|---|
| M(W-U)/ M(Pe+Pt) | 2,71 m | Fg>1,5:Condition vérifiée OK! |
| Les coefficients de sécurité étant supérieur à 1,5 les stabilités au renversement et au glissement sont vérifiées | | |
| Vérification de la Stabilité interne | | |
| Excentricité $e=B/2-(Ms-Mr)/Fv(res)$ | 0,47 m | e<B/6:Condition de non fissuration vérifiée OK! |
| Valeur de B/6 | | 1,19 m |
| La valeur de l'excentricité étant inférieure à B/6 la règle du tiers centrale est vérifiée | | |
| Calcul des contraintes | | |
| Contrainte minimale σ_{min} (MPa) $(w-u)/B*(1-6*e/B)$ | | 54,8 |
| La valeur de la contrainte minimale étant >0 alors il n'ya pas de traction dans le béton | | |
| Contrainte maximale σ_{max} (MPa) | | 8 |
| Contrainte au point B σ_B (MPa) | 0,13 | $\sigma_B < \sigma_{max}$:Condition de résistance vérifiée OK! |
| Vérification de la Stabilité au poinçonnement | | |
| Contrainte admissible du sol $q_{adm}=1/2*\gamma*Ny+C*Nc+\gamma*D*Nq$ | | 1153,11 |
| 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 | | 23,62 |
| Facteur de portance Ny obtenu par interpolation | | 8,97 |
| Cohésion du sol sous la base de la fondation C | | 17,5 |
| Facteur de portance Nc obtenu par interpolation | | 18,84 |
| D | | 0,6 |
| Facteur de portance Nq obtenu par interpolation | | 9,24 |
| Contrainte maximale imposée au sol de fondation σ_{max} (MPa) | Si $0 < e < B/6 \Rightarrow$ | $\sigma_{max}=(N/B)*(1+6*e/B)$ |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | |
|--|--------------------------------|--|
| | Si $B/6 < e < B/2 \Rightarrow$ | $\sigma_{max} = (2 \cdot N) / (3 \cdot (B/2 - e))$ |
| | $0 < e < B/6$ | 126,86 |
| Valeur de q_{adm} / σ_{max} | 9,09 | |
| 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. | | |

CAS 3: PHE $h_s = 2,5$

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 | 127,704 | | 6,685 | 853,701 | |
| W2 | 470,251 | | 4,173 | 1962,515 | |
| W3 | 51,192 | | 3,555 | 181,988 | |
| W4 | 5,760 | | 6,377 | 36,730 | |
| W5 | 17,280 | | 6,810 | 117,677 | |
| Poussées externes | | | | | |
| Pe1 | | 144 | 5,18 | | 745,920 |
| Pe2 | | 165,888 | 4,220 | | 700,047 |
| Pe3 | | 1,25 | 0,667 | 0,833 | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| Sous pressions | | | | | |
|---|--------|----------------|---|--------------------------------|-----------------|
| Upar | 56,733 | | | | |
| U | 30,867 | | 3,202 | | 98,850 |
| Poussées des terres Amont | | | | | |
| Pt | | 10,692 | 2,900 | | 31,007 |
| Somme des forces verticales | | 641,321 | | | |
| Somme des forces horizontales | | 319,330 | | | |
| Somme des moments stabilisants | | | | 3153,444 | |
| Somme des moments renversants | | | | | 1575,824 |
| Stabilité au glissement | | | | | |
| Coefficient de sécurité au glissement | | | 1,30 | Fg> 1,3:Condition vérifiée Ok! | |
| Stabilité au renversement | | | | | |
| M(W-U)/ M(Pe+Pt) | | 2,00 | Fg>1,3:Condition vérifiée OK! | | |
| Les coefficients de sécurité étant supérieur à 1,5 les stabilités au renversement et au glissement sont vérifiées | | | | | |
| Vérification de la Stabilité interne | | | | | |
| Excentricité $e=B/2-(Ms-Mr)/Fv(res)$ | | 1,10 m | e<B/6:Condition de non fissuration vérifiée OK! | | |
| Valeur de B/6 | | 1,19 m | | | |
| La valeur de l'excentricité étant inférieure à B/6 la règle du tiers centrale est vérifiée | | | | | |
| Calcul des contraintes | | | | | |
| Contrainte minimale σ_{min} (MPa) $(w-u)/B*(1-6*e/B)$ | | 6,8 | | | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| La valeur de la contrainte minimale étant >0 alors il n'ya pas de traction dans le béton | | |
|---|--------------------------------|--|
| Contrainte maximale σ_{max} (MPa) | 8 | |
| Contrainte au point B σ_B (MPa) | 0,18 | $\sigma_B < \sigma_{max}$: Condition de résistance vérifiée OK! |
| Vérification de la Stabilité au poinçonnement | | |
| Contrainte admissible du sol $q_{adm} = 1/2 * \gamma * N_y + C * N_c + \gamma * D * N_q$ | 1153,11 | |
| 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 | 23,62 | |
| Facteur de portance N_y obtenu par interpolation | 8,97 | |
| Cohésion du sol sous la base de la fondation C | 17,5 | |
| Facteur de portance N_c obtenu par interpolation | 18,84 | |
| D | 0,6 | |
| Facteur de portance N_q obtenu par interpolation | 9,24 | |
| Contrainte maximale imposée au sol de fondation σ_{max} (MPa) | Si $0 < e < B/6 \Rightarrow$ | $\sigma_{max} = (N/B) * (1 + 6 * e/B)$ |
| | Si $B/6 < e < B/2 \Rightarrow$ | $\sigma_{max} = (2 * N) / (3 * (B/2 - e))$ |
| | $0 < e < B/6$ | 173,55 |
| Valeur de q_{adm} / σ_{max} | 6,64 | |
| 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. | | |

4. Bassin de dissipation

Que ce soit à la traversée d'un déversoir ou au bas d'un coursier d'évacuateur, les eaux arrivent au bas de l'ouvrage avec une énergie cinétique importante qu'il s'agit de dissiper le plus possible à l'intérieur du liquide lui-même plutôt que sur le fond ou les rives de talweg ce qui entrainerait à la longue un déchaussement de l'ouvrage évacuateur. Dans ce but, on fait suivre les ouvrages évacuateurs d'un ouvrage dit de dissipation ou de tranquillisation.

(Compaoré, 1996). Il existe plusieurs types dont le plus fréquemment employé est le bassin à ressaut.

Ce bassin permettra d'amortir l'énergie de chute et son action érosive. Il devra pouvoir contenir le ressaut hydraulique à l'aval

Tableau 43: Dimensionnement du bassin de dissipation

| Désignation | Unité | Valeur |
|--|------------|--------|
| Côte la plus basse du terrain naturel : Z_{TN} | m | 274,76 |
| Côte du plan d'eau normal : Z_{PEN} | m | 300,5 |
| Longueur déversante : L | m | 130 |
| Coefficient de débit : m | m | 0,4 |
| Intensité de la pesanteur : g | m/s^2 | 10 |
| Lame d'eau déversante (cf, la simulation de la crue centennale) : h | m | 1,2 |
| Débit maxi évacué (cf, la simulation de la crue centennale) = Q_{maxe} | m^3/s | 300 |
| Débit spécifique : $Q_s = Q_{maxe} / L$ | $m^3/s/ml$ | 2,31 |
| Pelle : $H_0 = Z_{PEN} - Z_{TN}$ | m | 5,76 |
| 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 | 130 |
| Fruit des berges : m' | | 1,5 |
| Pente moyenne du chenal : I | | 0,0015 |
| Profondeur nominale : Y_n | m | 2 |
| Surface mouillée : $S(Y_n) = Y_n * (b + m * Y_n)$ | m^2 | 263,57 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

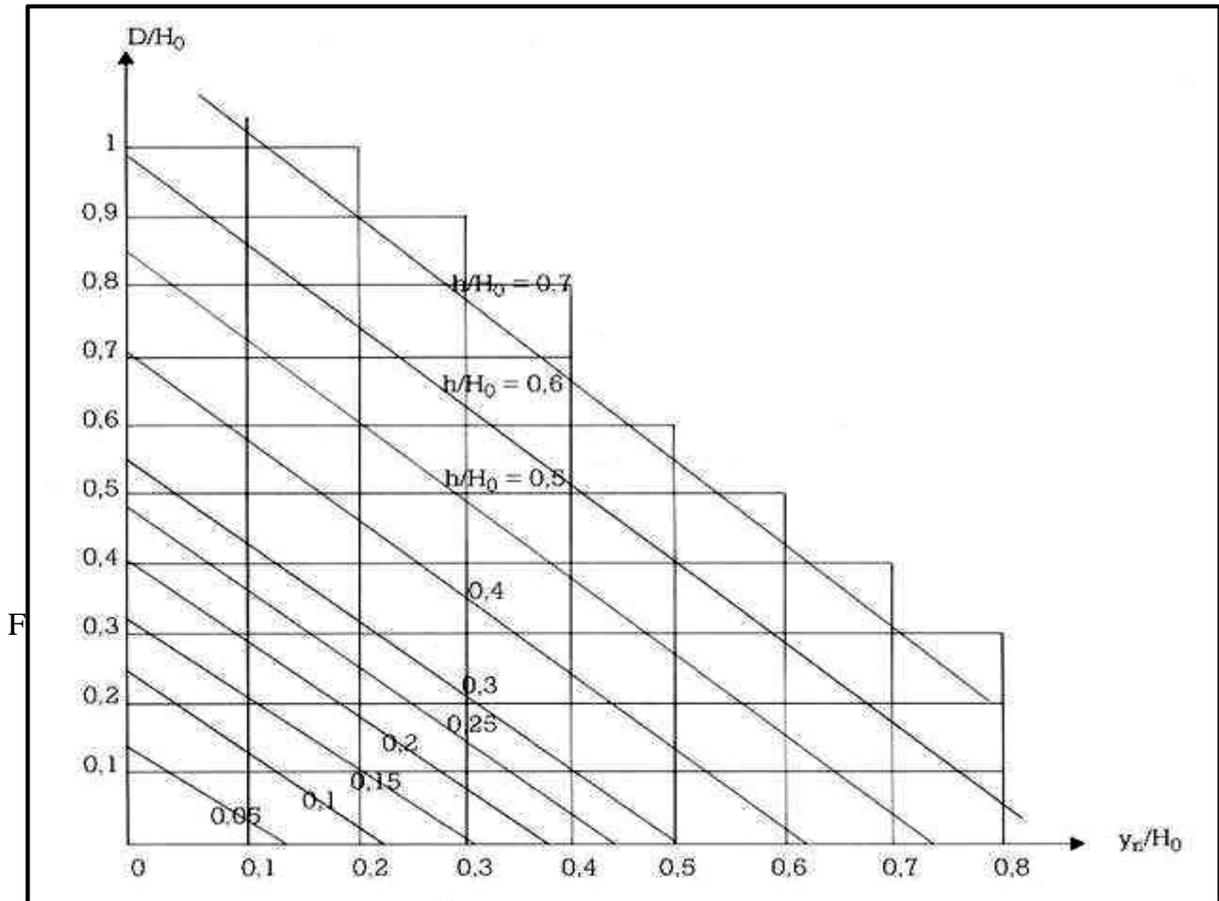
| Désignation | Unité | Valeur |
|--|-------|--------|
| Périmètre mouillé : $P(Y_n) = b + 2Y_n(1+m^2)^{0,5}$ | m | 137,15 |
| $D(Y_n) = K_s * S^{5/3} * P^{-2/3}$ | | 258,20 |
| $Q_{maxe}/Racine(I)$ | | 258,20 |
| Convergence = $D(Y_n) - Q_{maxe}/\sqrt{I}$ | | 0 |
| 2, Calcul de la profondeur de la fosse 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 | | 0,3 |
| h/H_0 | | 0,2 |
| La valeur de D/H₀ | | 0,1 |
| Profondeur : D = a*H₀ | m | 046 |
| Nous retenons D | m | 0,50 |
| 3, Les caractéristiques d'entrées du ressaut | | |
| Vitesse au-dessus du seuil : V₀ = Qs/h | m/s | 192 |
| Hauteur de chute : H = D + H₀ | m | 7,4 |
| Profondeur d'eau à l'entrée du bassin : | m | 0,2 |
| 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 | 0,2 |
| Convergence | | 0,00 |
| Par itération on trouve Y₁ | m | 0,2 |
| Vitesse à l'entrée du bassin : V₁ = Qs/Y₁ | m/s | 11,4 |
| Le nombre de Froude : Fr = V₁/(g*Y₁)^{0,5} | | 5,6 |
| 4, Les caractéristiques de sortie du ressaut | | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| Désignation | Unité | Valeur |
|--|--------|--------|
| Profondeur d'eau conjuguée à la fin du ressaut (sortie du bassin): $Y_2 = (Y_1/2)*((1+8Fr^2)^{0,5}-1)$ | m | 1,4 |
| Vitesse à la sortie du bassin : $V_2 = Qs/Y_2$ | m/s | 1,64 |
| 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 | 2,5 |
| 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 de Fr et v_1 | | |
| $Fr_1 = 5,6$ | > | 4,5 |
| v_1 (m/s) = 11,4 | ≤ | 15 |
| Conclusion : ces conditions nous amène à choisir le bassin de type II, (Cf, Technique des petits barrages en Afrique sahéenne et équatoriale) | | |
| Désignation | Unités | Valeur |
| 1, Longueur du bassin de dissipation | | |
| Nombre de Froude : Fr | | 5,6 |
| Y_1 | m | 0,2 |
| Y_2 | m | 1,4 |
| Largeur du déversoir : L_{dev} | m | 130 |
| Sur l'abaque $L/Y_2 = a$ | | 2,4 |
| Longueur du bassin : $L = a*Y_2$ | m | 3,4 |
| 2, Blocs de chutes | | |
| Hauteur $h_1 = Y_1$ | m | 0,20 |
| Largeur : $lc = Y_1$ | m | 0,20 |
| Espacement : $e = Y_1$ | m | 0,20 |
| Longueur : $Lc = 2*Y_1$ | m | 0,4 |
| Distance entre bajoyer et blocs de chutes : $d' = 0,5*Y_1$ | m | 0,10 |
| 3, Blocs chicanes | | |
| Sur l'abaque $h_2/Y_1 = c$ | | 1,5 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| Désignation | Unité | Valeur |
|---|-------|--------|
| Hauteur : $h_2 = c \cdot Y_1$ | m | 0,3 |
| Largeur : $lc' = 0,75 \cdot h_2$ | m | 0,23 |
| Longueur : $L'c = 2 \cdot Y_1$ | m | 0,40 |
| Espacement : $e' = 0,75 \cdot h_2$ | m | 0,23 |
| Epaisseur en crête : $e_{crete} = 0,2 \cdot h_2$ | m | 0,06 |
| Pente aval | 1H/1V | 1,00 |
| Distance entre bajoyer et blocs de chicanes : $d'' = 0,375 \cdot h_2$ | m | 0,11 |
| Distance entre blocs de chutes et blocs de chicanes : $d = 0,8 \cdot Y_2$ | m | 1,13 |
| 4, Seuil terminal | | |
| Sur l'abaque $h_4/Y_1 = f$ | | 1,3 |
| Hauteur par rapport au niveau aval du TN : $h_4 = f \cdot Y_1$ | m | 0,25 |
| Epaisseur en crête: e'_{crete} | m | 0,1 |
| Pente amont | 1V/2H | 0,5 |
| Epaisseur en base : $e_{base} = e'_{crete} + 2 \cdot h_4$ | m | 0,6 |
| 5, Protection aval du bassin de dissipation | | |
| Vitesse de début d'entraînement : $0,8 < V_e < 1,2$ (Cf, cours de barrage de Dr KARAMBIRI) | m/s | 1 |
| Diamètre minimum des enrochements nécessaires (sur l'abaque) : $D_{enrochement}$ | m | 0,1 |
| Epaisseur de la couche d'enrochement : $E_{enrochement} \geq 3 \cdot D_{enrochement}$ (Cf., cours de barrage de Dr KARAMBIRI) | m | 0,30 |
| Longueur de protection : $L_{protection} \geq 2 \cdot L$ (Cf., cours de barrage de Dr KARAMBIRI) | m | 4,20 |



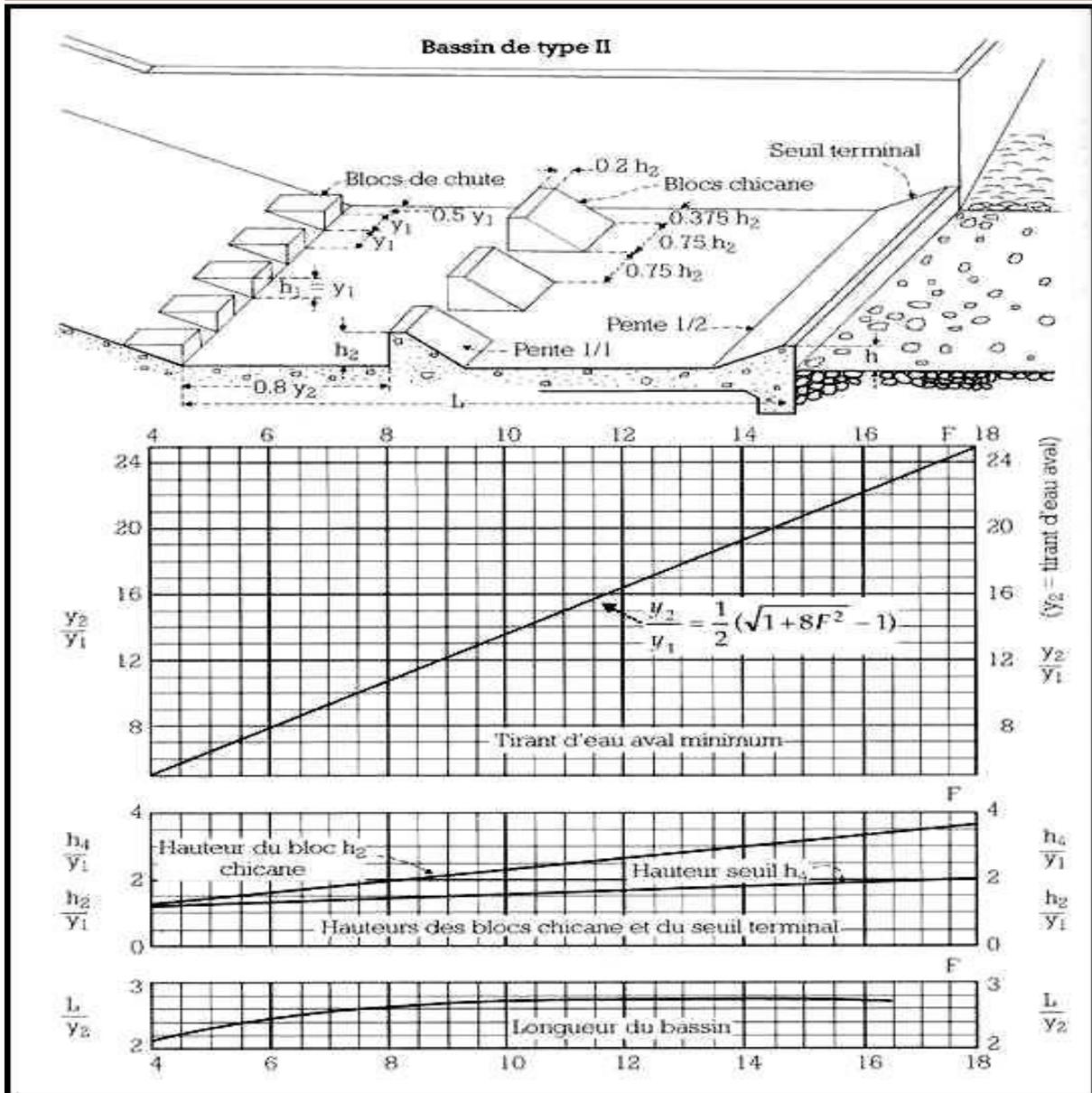


Figure 16: Détermination des caractéristiques du bassin de dissipation pour un nombre de Froude supérieur à 4,5 et une vitesse inférieure à 15 m/s

ANNEXE V: METRE ET DEVIS

Volume du Remblai de la digue

| N° profil | Côte TN (m) | Côte de la digue (m) | Largeur en crête (m) | Distance partielle (m) | Hauteur interm. (m) | Surface interm.(m2) | Volume interm.(m3) | N° profil | m1: Fruit du talus amont | m2: Fruit du talus aval |
|-----------|-------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 304.31 | 303 | 4 | 0 | -1.01 | -1.49 | - | 1 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | 303 | 303 | 4 | 13.24 | 0.3 | 1.43 | - 0.43 | 2 | 2.5 | 2.5 |
| 3 | 303.24 | 303 | 4 | 47.61 | 0.06 | 0.25 | 39.85 | 3 | 2.5 | 2.5 |
| 4 | 302.59 | 303 | 4 | 53.93 | 0.71 | 4.10 | 117.28 | 4 | 2.5 | 2.5 |
| 5 | 301.88 | 303 | 4 | 45.3 | 1.42 | 10.72 | 335.70 | 5 | 2.5 | 2.5 |
| 6 | 301.83 | 303 | 4 | 6.77 | 1.47 | 11.28 | 74.48 | 6 | 2.5 | 2.5 |
| 7 | 301.38 | 303 | 4 | 43.81 | 1.92 | 16.90 | 617.24 | 7 | 2.5 | 2.5 |
| 8 | 301.12 | 303 | 4 | 46.67 | 2.18 | 20.60 | 874.99 | 8 | 2.5 | 2.5 |
| 9 | 301.07 | 303 | 4 | 37.02 | 2.23 | 21.35 | 776.55 | 9 | 2.5 | 2.5 |
| 10 | 301.06 | 303 | 4 | 2.69 | 2.24 | 21.50 | 57.64 | 10 | 2.5 | 2.5 |
| 11 | 301.12 | 303 | 4 | 1.82 | 2.18 | 20.60 | 38.32 | 11 | 2.5 | 2.5 |
| 12 | 301.47 | 303 | 4 | 31.46 | 1.83 | 15.69 | 570.89 | 12 | 2.5 | 2.5 |
| 13 | 301.39 | 303 | 4 | 1.96 | 1.91 | 16.76 | 31.80 | 13 | 2.5 | 2.5 |
| 14 | 300.71 | 303 | 4 | 42.9 | 2.59 | 27.13 | 941.45 | 14 | 2.5 | 2.5 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|-----|---|-------|------|--------|---------|----|-----|-----|
| 15 | 300.44 | 303 | 4 | 33.81 | 2.86 | 31.89 | 997.72 | 15 | 2.5 | 2.5 |
| 16 | 300.28 | 303 | 4 | 14.5 | 3.02 | 34.88 | 484.08 | 16 | 2.5 | 2.5 |
| 17 | 300.45 | 303 | 4 | 12.38 | 2.85 | 31.71 | 412.18 | 17 | 2.5 | 2.5 |
| 18 | 300.55 | 303 | 4 | 16.38 | 2.75 | 29.91 | 504.61 | 18 | 2.5 | 2.5 |
| 19 | 300.59 | 303 | 4 | 8.33 | 2.71 | 29.20 | 246.18 | 19 | 2.5 | 2.5 |
| 20 | 299.18 | 303 | 4 | 41.46 | 4.12 | 58.92 | 1826.65 | 20 | 2.5 | 2.5 |
| 21 | 297.74 | 303 | 4 | 54.65 | 5.56 | 99.52 | 4329.37 | 21 | 2.5 | 2.5 |
| 22 | 296.89 | 303 | 4 | 49 | 6.41 | 128.36 | 5583.16 | 22 | 2.5 | 2.5 |
| 23 | 296.37 | 303 | 4 | 24.46 | 6.93 | 147.78 | 3377.22 | 23 | 2.5 | 2.5 |
| 24 | 295.93 | 303 | 4 | 18.85 | 7.37 | 165.27 | 2950.54 | 24 | 2.5 | 2.5 |
| 25 | 295.55 | 303 | 4 | 4.82 | 7.75 | 181.16 | 834.89 | 25 | 2.5 | 2.5 |
| 26 | 295.62 | 303 | 4 | 11.54 | 7.68 | 178.18 | 2073.35 | 26 | 2.5 | 2.5 |
| 27 | 295.39 | 303 | 4 | 12.58 | 7.91 | 188.06 | 2303.63 | 27 | 2.5 | 2.5 |
| 28 | 295.27 | 303 | 4 | 10.47 | 8.03 | 193.32 | 1996.54 | 28 | 2.5 | 2.5 |
| 29 | 295.1 | 303 | 4 | 14.16 | 8.2 | 200.90 | 2791.09 | 29 | 2.5 | 2.5 |
| 30 | 294.74 | 303 | 4 | 12.96 | 8.56 | 217.42 | 2710.74 | 30 | 2.5 | 2.5 |
| 31 | 295.2 | 303 | 4 | 8.3 | 8.1 | 196.43 | 1717.47 | 31 | 2.5 | 2.5 |
| 32 | 295.61 | 303 | 4 | 20.72 | 7.69 | 178.60 | 3885.26 | 32 | 2.5 | 2.5 |
| 33 | 296.06 | 303 | 4 | 24.69 | 7.24 | 160.00 | 4180.07 | 33 | 2.5 | 2.5 |
| 34 | 297.02 | 303 | 4 | 34.81 | 6.28 | 123.72 | 4938.15 | 34 | 2.5 | 2.5 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|-----|---|-------|------|-------|---------|----|-----|-----|
| 35 | 297.95 | 303 | 4 | 31.89 | 5.35 | 92.96 | 3454.84 | 35 | 2.5 | 2.5 |
| 36 | 298.65 | 303 | 4 | 24.52 | 4.65 | 72.66 | 2030.41 | 36 | 2.5 | 2.5 |
| 37 | 299.34 | 303 | 4 | 24.84 | 3.96 | 55.04 | 1586.04 | 37 | 2.5 | 2.5 |
| 38 | 299.98 | 303 | 4 | 26.98 | 3.32 | 40.84 | 1293.42 | 38 | 2.5 | 2.5 |
| 39 | 299.46 | 303 | 4 | 30.35 | 3.84 | 52.22 | 1412.19 | 39 | 2.5 | 2.5 |
| 40 | 299.68 | 303 | 4 | 14.59 | 3.62 | 47.24 | 725.60 | 40 | 2.5 | 2.5 |
| 41 | 299.67 | 303 | 4 | 29.8 | 3.63 | 47.46 | 1411.08 | 41 | 2.5 | 2.5 |
| 42 | 299.62 | 303 | 4 | 34.11 | 3.68 | 48.58 | 1637.93 | 42 | 2.5 | 2.5 |
| 43 | 300.15 | 303 | 4 | 22.98 | 3.15 | 37.41 | 987.94 | 43 | 2.5 | 2.5 |
| 44 | 300.63 | 303 | 4 | 17.89 | 2.67 | 28.50 | 589.55 | 44 | 2.5 | 2.5 |
| 45 | 300.76 | 303 | 4 | 29.42 | 2.54 | 26.29 | 805.98 | 45 | 2.5 | 2.5 |
| 46 | 300.66 | 303 | 4 | 1.2 | 2.64 | 27.98 | 32.56 | 46 | 2.5 | 2.5 |
| 47 | 300.72 | 303 | 4 | 1.54 | 2.58 | 26.96 | 42.31 | 47 | 2.5 | 2.5 |
| 48 | 300.55 | 303 | 4 | 30.69 | 2.75 | 29.91 | 872.63 | 48 | 2.5 | 2.5 |
| 49 | 300.64 | 303 | 4 | 5.85 | 2.66 | 28.33 | 170.34 | 49 | 2.5 | 2.5 |
| 50 | 300.81 | 303 | 4 | 39.09 | 2.49 | 25.46 | 1051.31 | 50 | 2.5 | 2.5 |
| 51 | 300.59 | 303 | 4 | 38.16 | 2.71 | 29.20 | 1042.92 | 51 | 2.5 | 2.5 |
| 52 | 300.63 | 303 | 4 | 14.13 | 2.67 | 28.50 | 407.67 | 52 | 2.5 | 2.5 |
| 53 | 300.64 | 303 | 4 | 21.05 | 2.66 | 28.33 | 598.15 | 53 | 2.5 | 2.5 |
| 54 | 300.61 | 303 | 4 | 19.93 | 2.69 | 28.85 | 569.79 | 54 | 2.5 | 2.5 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|-----|---|-------|------|-------|---------|----|-----|-----|
| 55 | 300.49 | 303 | 4 | 33.15 | 2.81 | 30.98 | 991.69 | 55 | 2.5 | 2.5 |
| 56 | 301.21 | 303 | 4 | 29.37 | 2.09 | 19.28 | 738.08 | 56 | 2.5 | 2.5 |
| 57 | 300.91 | 303 | 4 | 22.55 | 2.39 | 23.84 | 486.18 | 57 | 2.5 | 2.5 |
| 58 | 300.74 | 303 | 4 | 22.55 | 2.56 | 26.62 | 568.98 | 58 | 2.5 | 2.5 |
| 59 | 300.92 | 303 | 4 | 44.27 | 2.38 | 23.68 | 1113.50 | 59 | 2.5 | 2.5 |
| 60 | 300.92 | 303 | 4 | 6.42 | 2.38 | 23.68 | 152.03 | 60 | 2.5 | 2.5 |
| 61 | 300.91 | 303 | 4 | 1.45 | 2.39 | 23.84 | 34.45 | 61 | 2.5 | 2.5 |
| 62 | 301.06 | 303 | 4 | 2.07 | 2.24 | 21.50 | 46.93 | 62 | 2.5 | 2.5 |
| 63 | 300.82 | 303 | 4 | 20.65 | 2.48 | 25.30 | 483.21 | 63 | 2.5 | 2.5 |
| 64 | 300.68 | 303 | 4 | 41.84 | 2.62 | 27.64 | 1107.44 | 64 | 2.5 | 2.5 |
| 65 | 300.77 | 303 | 4 | 25.49 | 2.53 | 26.12 | 685.21 | 65 | 2.5 | 2.5 |
| 66 | 301.12 | 303 | 4 | 47.29 | 2.18 | 20.60 | 1104.77 | 66 | 2.5 | 2.5 |
| 67 | 300.91 | 303 | 4 | 40.91 | 2.39 | 23.84 | 909.05 | 67 | 2.5 | 2.5 |
| 68 | 300.89 | 303 | 4 | 3.77 | 2.41 | 36.21 | 113.20 | 68 | 2.5 | 2.5 |
| 69 | 300.91 | 303 | 4 | 2.22 | 2.39 | 23.84 | 66.66 | 69 | 2.5 | 2.5 |
| 70 | 301.01 | 303 | 4 | 28.49 | 2.29 | 22.27 | 656.84 | 70 | 2.5 | 2.5 |
| 71 | 301.39 | 303 | 4 | 37.19 | 1.91 | 16.76 | 725.77 | 71 | 2.5 | 2.5 |
| 72 | 302.05 | 303 | 4 | 43.79 | 1.25 | 8.91 | 561.97 | 72 | 2.5 | 2.5 |
| 73 | 302.07 | 303 | 4 | 30.86 | 1.23 | 8.70 | 271.70 | 73 | 2.5 | 2.5 |
| 74 | 302.3 | 303 | 4 | 24.35 | 1 | 6.50 | 185.09 | 74 | 2.5 | 2.5 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | | | | |
|--|--------|-----|---|-------|-------|-------|--------------|----|-----|-----|
| 75 | 302.47 | 303 | 4 | 24.83 | 0.83 | 5.04 | 143.30 | 75 | 2.5 | 2.5 |
| 76 | 302.51 | 303 | 4 | 15.01 | 0.79 | 4.72 | 73.27 | 76 | 2.5 | 2.5 |
| 77 | 302.69 | 303 | 4 | 33.06 | 0.61 | 3.37 | 133.74 | 77 | 2.5 | 2.5 |
| 78 | 302.68 | 303 | 4 | 26.38 | 0.62 | 3.44 | 89.84 | 78 | 2.5 | 2.5 |
| 79 | 302.45 | 303 | 4 | 19.86 | 0.85 | 5.21 | 85.87 | 79 | 2.5 | 2.5 |
| 80 | 303.25 | 303 | 4 | 43.86 | 0.05 | 0.21 | 118.70 | 80 | 2.5 | 2.5 |
| 81 | 303.07 | 303 | 4 | 38.16 | 0.23 | 1.05 | 24.01 | 81 | 2.5 | 2.5 |
| 82 | 302.81 | 303 | 4 | 69.53 | 0.49 | 2.56 | 125.59 | 82 | 2.5 | 2.5 |
| 83 | 302.85 | 303 | 4 | 88.69 | 0.45 | 2.31 | 215.80 | 83 | 2.5 | 2.5 |
| 84 | 303.26 | 303 | 4 | 66.95 | 0.04 | 0.16 | 82.69 | 84 | 2.5 | 2.5 |
| 85 | 303.2 | 303 | 4 | 24.89 | 0.1 | 0.43 | 7.33 | 85 | 2.5 | 2.5 |
| 86 | 303.52 | 303 | 4 | 41.34 | -0.22 | -0.76 | -6.90 | 86 | 2.5 | 2.5 |
| 87 | 303.55 | 303 | 4 | 50.81 | -0.25 | -0.84 | -40.72 | 87 | 2.5 | 2.5 |
| 88 | 303.5 | 303 | 4 | 53.49 | -0.2 | -0.70 | -41.29 | 88 | 2.5 | 2.5 |
| 89 | 303.75 | 303 | 4 | 50.35 | -0.45 | -1.29 | -50.19 | 89 | 2.5 | 2.5 |
| 90 | 304 | 303 | 4 | 33.73 | -0.7 | -1.58 | -48.38 | 90 | 2.5 | 2.5 |
| Total du volume de remblai de la Digue (m3) | | | | | | | 60002 | | | |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

Volume du Remblai de la tranchée

| N° profil | Côte TN (m) | Côte de la digue (m) | Largeur en crête (m) | Distance partielle (m) | Hauteur interm. (m) | Surface interm.(m2) | Volume interm.(m3) |
|-----------|-------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | 304.31 | 303.5 | 4 | 0 | 0.81 | 4.88025 | - |
| 2 | 303 | 302.5 | 4 | 13.24 | 0.5 | 2.625 | 49.684755 |
| 3 | 303.24 | 302.21 | 4 | 47.61 | 1.03 | 6.77 | 223.70 |
| 4 | 302.59 | 302.09 | 4 | 53.93 | 0.5 | 2.63 | 253.40 |
| 5 | 301.88 | 301.08 | 4 | 45.3 | 0.8 | 4.80 | 168.18 |
| 6 | 301.83 | 301.1 | 4 | 6.77 | 0.73 | 4.25 | 30.64 |
| 7 | 301.38 | 300.58 | 4 | 43.81 | 0.8 | 4.80 | 198.29 |
| 8 | 301.12 | 300.32 | 4 | 46.67 | 0.8 | 4.80 | 224.02 |
| 9 | 301.07 | 300.27 | 4 | 37.02 | 0.8 | 4.80 | 177.70 |
| 10 | 301.06 | 300.26 | 4 | 2.69 | 0.8 | 4.80 | 12.91 |
| 11 | 301.12 | 300.26 | 4 | 1.82 | 0.86 | 5.29 | 9.18 |
| 12 | 301.47 | 299.97 | 4 | 31.46 | 1.5 | 11.63 | 266.06 |
| 13 | 301.39 | 299.89 | 4 | 1.96 | 1.5 | 11.63 | 22.79 |
| 14 | 300.71 | 299.21 | 4 | 42.9 | 1.5 | 11.63 | 498.71 |
| 15 | 300.44 | 298.46 | 4 | 33.81 | 1.98 | 17.72 | 496.09 |
| 16 | 300.28 | 298.33 | 4 | 14.5 | 1.95 | 17.31 | 253.95 |
| 17 | 300.45 | 298.21 | 4 | 12.38 | 2.24 | 21.50 | 240.24 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|-------|------|-------|---------|
| 18 | 300.55 | 298.04 | 4 | 16.38 | 2.51 | 25.79 | 387.34 |
| 19 | 300.59 | 297.78 | 4 | 8.33 | 2.81 | 30.98 | 236.45 |
| 20 | 299.18 | 296.48 | 4 | 41.46 | 2.7 | 29.02 | 1243.91 |
| 21 | 297.74 | 294.74 | 4 | 54.65 | 3 | 34.50 | 1735.82 |
| 22 | 296.89 | 293.89 | 4 | 49 | 3 | 34.50 | 1690.50 |
| 23 | 296.37 | 293.45 | 4 | 24.46 | 2.92 | 33.00 | 825.48 |
| 24 | 295.93 | 293.23 | 4 | 18.85 | 2.7 | 29.02 | 584.55 |
| 25 | 295.55 | 293.06 | 4 | 4.82 | 2.49 | 25.46 | 131.31 |
| 26 | 295.62 | 292.92 | 4 | 11.54 | 2.7 | 29.02 | 314.38 |
| 27 | 295.39 | 292.69 | 4 | 12.58 | 2.7 | 29.02 | 365.13 |
| 28 | 295.27 | 292.57 | 4 | 10.47 | 2.7 | 29.02 | 303.89 |
| 29 | 295.1 | 292.4 | 4 | 14.16 | 2.7 | 29.03 | 410.99 |
| 30 | 294.74 | 292.4 | 4 | 12.96 | 2.34 | 23.05 | 337.44 |
| 31 | 295.2 | 292.5 | 4 | 8.3 | 2.7 | 29.02 | 216.11 |
| 32 | 295.61 | 292.91 | 4 | 20.72 | 2.7 | 29.02 | 601.40 |
| 33 | 296.06 | 293.42 | 4 | 24.69 | 2.64 | 27.98 | 703.78 |
| 34 | 297.02 | 294.04 | 4 | 34.81 | 2.98 | 34.12 | 1080.94 |
| 35 | 297.95 | 294.95 | 4 | 31.89 | 3 | 34.50 | 1094.16 |
| 36 | 298.65 | 295.65 | 4 | 24.52 | 3 | 34.50 | 845.94 |
| 37 | 299.34 | 296.48 | 4 | 24.84 | 2.86 | 31.89 | 824.55 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|-------|------|-------|--------|
| 38 | 299.98 | 297.18 | 4 | 26.98 | 2.8 | 30.80 | 845.67 |
| 39 | 299.46 | 297.18 | 4 | 30.35 | 2.28 | 22.12 | 803.00 |
| 40 | 299.68 | 297.18 | 4 | 14.59 | 2.5 | 25.63 | 348.27 |
| 41 | 299.67 | 297.17 | 4 | 29.8 | 2.5 | 25.63 | 763.63 |
| 42 | 299.62 | 297.21 | 4 | 34.11 | 2.41 | 24.16 | 849.09 |
| 43 | 300.15 | 298.55 | 4 | 22.98 | 1.6 | 12.80 | 424.67 |
| 44 | 300.63 | 299.13 | 4 | 17.89 | 1.5 | 11.63 | 218.48 |
| 45 | 300.76 | 299.26 | 4 | 29.42 | 1.5 | 11.63 | 342.01 |
| 46 | 300.66 | 299.26 | 4 | 1.2 | 1.4 | 10.50 | 13.28 |
| 47 | 300.72 | 299.26 | 4 | 1.54 | 1.46 | 11.17 | 16.69 |
| 48 | 300.55 | 299.35 | 4 | 30.69 | 1.2 | 8.40 | 300.29 |
| 49 | 300.64 | 299.44 | 4 | 5.85 | 1.2 | 8.40 | 49.14 |
| 50 | 300.81 | 299.61 | 4 | 39.09 | 1.2 | 8.40 | 328.36 |
| 51 | 300.59 | 299.39 | 4 | 38.16 | 1.2 | 8.40 | 320.54 |
| 52 | 300.63 | 299.43 | 4 | 14.13 | 1.2 | 8.40 | 118.69 |
| 53 | 300.64 | 299.43 | 4 | 21.05 | 1.21 | 8.50 | 177.88 |
| 54 | 300.61 | 299.36 | 4 | 19.93 | 1.25 | 8.91 | 173.46 |
| 55 | 300.49 | 299.29 | 4 | 33.15 | 1.2 | 8.40 | 286.85 |
| 56 | 301.21 | 299.8 | 4 | 29.37 | 1.41 | 10.61 | 279.17 |
| 57 | 300.91 | 299.91 | 4 | 22.55 | 1 | 6.50 | 192.92 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|---|-------|------|-------|--------|
| 58 | 300.74 | 299.75 | 4 | 22.55 | 0.99 | 6.41 | 145.56 |
| 59 | 300.92 | 299.92 | 4 | 44.27 | 1 | 6.50 | 285.77 |
| 60 | 300.92 | 299.92 | 4 | 6.42 | 1 | 6.50 | 41.73 |
| 61 | 300.91 | 299.92 | 4 | 1.45 | 0.99 | 6.41 | 9.36 |
| 62 | 301.06 | 299.92 | 4 | 2.07 | 1.14 | 7.81 | 14.72 |
| 63 | 300.82 | 299.82 | 4 | 20.65 | 1 | 6.50 | 147.74 |
| 64 | 300.68 | 299.63 | 4 | 41.84 | 1.05 | 6.96 | 281.50 |
| 65 | 300.77 | 299.77 | 4 | 25.49 | 1 | 6.50 | 171.50 |
| 66 | 301.12 | 299.92 | 4 | 47.29 | 1.2 | 8.40 | 352.31 |
| 67 | 300.91 | 299.92 | 4 | 40.91 | 0.99 | 6.41 | 302.94 |
| 68 | 300.89 | 299.92 | 9 | 3.77 | 0.97 | 11.08 | 32.97 |
| 69 | 300.91 | 299.92 | 4 | 2.22 | 0.99 | 6.41 | 19.42 |
| 70 | 301.01 | 300.01 | 4 | 28.49 | 1 | 6.50 | 183.91 |
| 71 | 301.39 | 300.39 | 4 | 37.19 | 1 | 6.50 | 241.74 |
| 72 | 302.05 | 301.05 | 4 | 43.79 | 1 | 6.50 | 284.64 |
| 73 | 302.07 | 301.07 | 4 | 30.86 | 1 | 6.50 | 200.59 |
| 74 | 302.3 | 301.3 | 4 | 24.35 | 1 | 6.50 | 158.28 |
| 75 | 302.47 | 301.47 | 4 | 24.83 | 1 | 6.50 | 161.40 |
| 76 | 302.51 | 301.71 | 4 | 15.01 | 0.8 | 4.80 | 84.81 |
| 77 | 302.69 | 301.89 | 4 | 33.06 | 0.8 | 4.80 | 158.69 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | | | |
|---|--------|--------|---|-------|------|------|--------------|
| 78 | 302.68 | 301.88 | 4 | 26.38 | 0.8 | 4.80 | 126.62 |
| 79 | 302.45 | 301.88 | 4 | 19.86 | 0.57 | 3.09 | 78.37 |
| 80 | 303.25 | 302.56 | 4 | 43.86 | 0.69 | 3.95 | 154.44 |
| 81 | 303.07 | 302.57 | 4 | 38.16 | 0.5 | 2.63 | 125.46 |
| 82 | 302.81 | 302.31 | 4 | 69.53 | 0.5 | 2.63 | 182.52 |
| 83 | 302.85 | 302.35 | 4 | 88.69 | 0.5 | 2.63 | 232.81 |
| 84 | 303.26 | 303.25 | 4 | 66.95 | 0.01 | 0.04 | 89.22 |
| Total du volume de remblai de la tranchée (m3) | | | | | | | 28181 |

DEVIS QUANTITATIF ET ESTIMATIF DES TRAVAUX

| N° Prix | Désignation | Unité | Quantité | Prix unitaire | Montant |
|-------------|---|-------|----------|---------------|-------------|
| I | INSTALLATIONS GENERALES DE CHANTIER | | | | |
| I.1 | Amenée et repli du matériel | ff | 1 | 50 000 000 | 50 000 000 |
| I.2 | Installation et Implantation du chantier | ff | 1 | 20 000 000 | 20 000 000 |
| I.3 | mise en œuvre du plan de gestion environnementale et sociale | | 1 | 30 000 000 | 30 000 000 |
| | TOTAL INSTALLATION | | | | 100 000 000 |
| II | DIGUE | | | | |
| II.1 | abattage et dessouchage d'arbres de circonférence supérieur ou égale à 1,00 m, dans l'emprise de la digue | u | PM | | - |
| II.2 | Débroussaillage et nettoyage | ha | 20 | 100 000 | 2 000 000 |
| II.3 | Décapage de l'emprise, épaisseur max. 30 cm | m2 | 33494 | 400 | 13 397 580 |
| II.4 | Déblai aux engins pour tranchée d'ancrage | m3 | 28180 | 3 000 | 84 540 000 |
| II.5 | Déblai manuel pour muret de crête, mur parapet, butée et drain de pied | m3 | 1500 | 3 500 | 5 250 000 |
| II.6 | Remblai argileux compacté à l'OPN pour tranchée d'ancrage | m3 | 28812 | 4 500 | 129 654 000 |
| II.7 | Remblai argileux compacté à l'OPN pour corps de digue | m3 | 60002 | 4 000 | 240 008 000 |
| II.8 | filtre horizontal | m3 | 5664 | 4 500 | 25 488 000 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| | | | | | |
|------------------------------------|---|----|--------|---------|-------------|
| II.9 | Couche de pose talus amont et aval | m3 | 1030 | 4 500 | 4 635 000 |
| II.10 | perré sec talus amont et aval | m3 | 21867 | 5 000 | 109 335 000 |
| II.11 | Perré maçonné sur 5m sur le talus amont | | 319 | 37500 | 11 962 500 |
| II.12 | enrochement butée de pied amont et drain de pied | | 600 | 5000 | 3 000 000 |
| II.13 | béton cyclopéen pour muret de crête | m3 | 185 | 100 000 | 18 500 000 |
| II.14 | Béton cyclopéen dosé à 250 kg/m3 pour mur parapet | m3 | 600 | 50 000 | 30 000 000 |
| II.15 | Revêtement latéritique compacte sur crête | ml | 242 | 45 000 | 10 890 000 |
| II.16 | Echelle limnimétrique | ml | 8 | 150 000 | 1 200 000 |
| TOTAL DIGUE | | | | | 689 860 080 |
| III | BASSIN DE DISSIPATION | | | | |
| III.1 | Partie rectangulaire | m3 | 87 | 100 000 | 8700000 |
| III.2 | seuil terminal | m3 | 34,8 | 100 000 | 3480000 |
| III.3 | Parafouille | m3 | 14,5 | 100 000 | 1450000 |
| III.4 | Bloc de chute | m3 | 14,5 | 100 000 | 1450000 |
| III.5 | Bloc chicane | m3 | 9,1 | 100 000 | 906250 |
| III.6 | Protection aval (moellons) | m3 | 290,0 | 8 000 | 2320000 |
| TOTAL BASSIN DE DISSIPATION | | | | | 18 306 250 |
| IV | MUR BAJoyer | | | | |
| IV.1 | Partie trapézoïdale | m3 | 53,55 | 150 000 | 8032500 |
| IV.2 | Ecran anti-renard | m3 | 1,9125 | 150 000 | 286875 |
| IV.3 | Partie rectangulaire | m3 | 3,42 | 150 000 | 513000 |

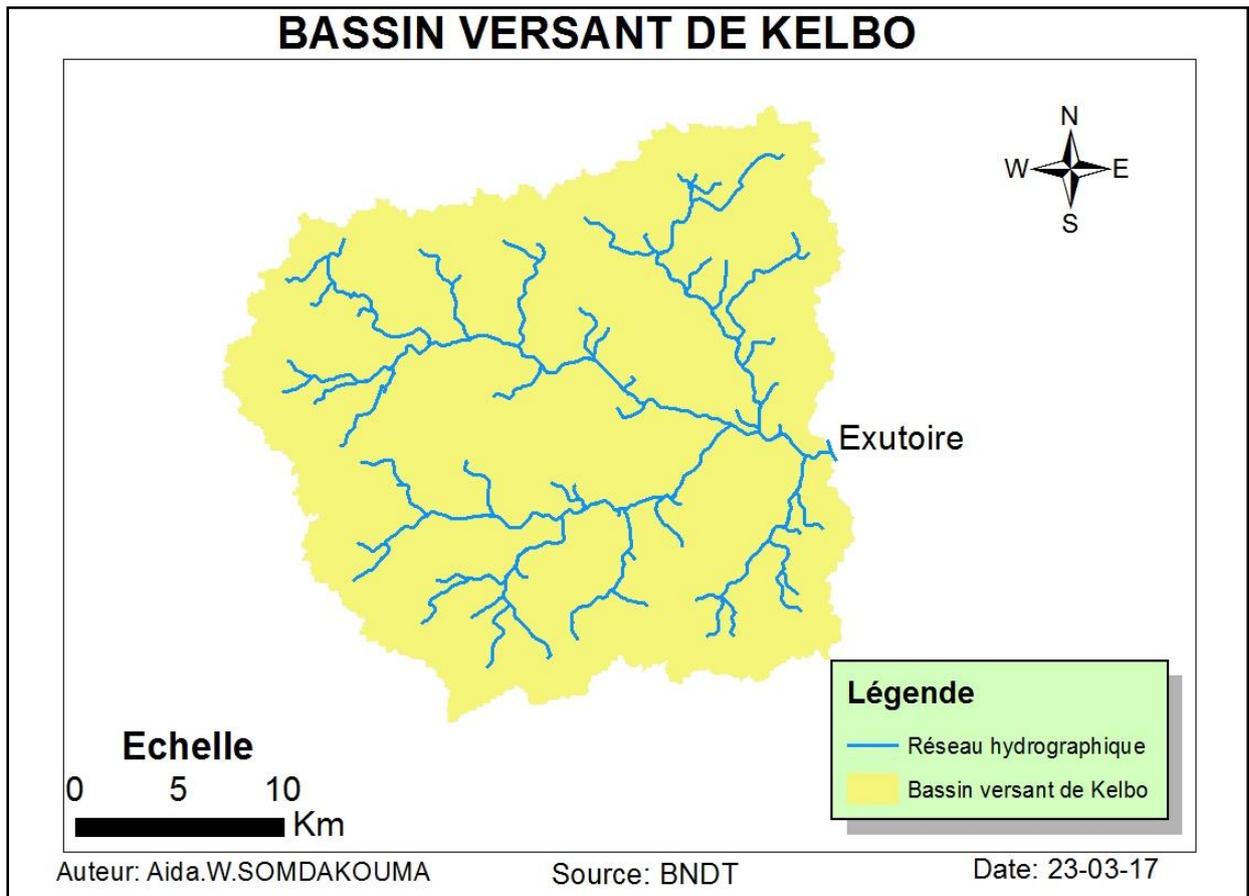
ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

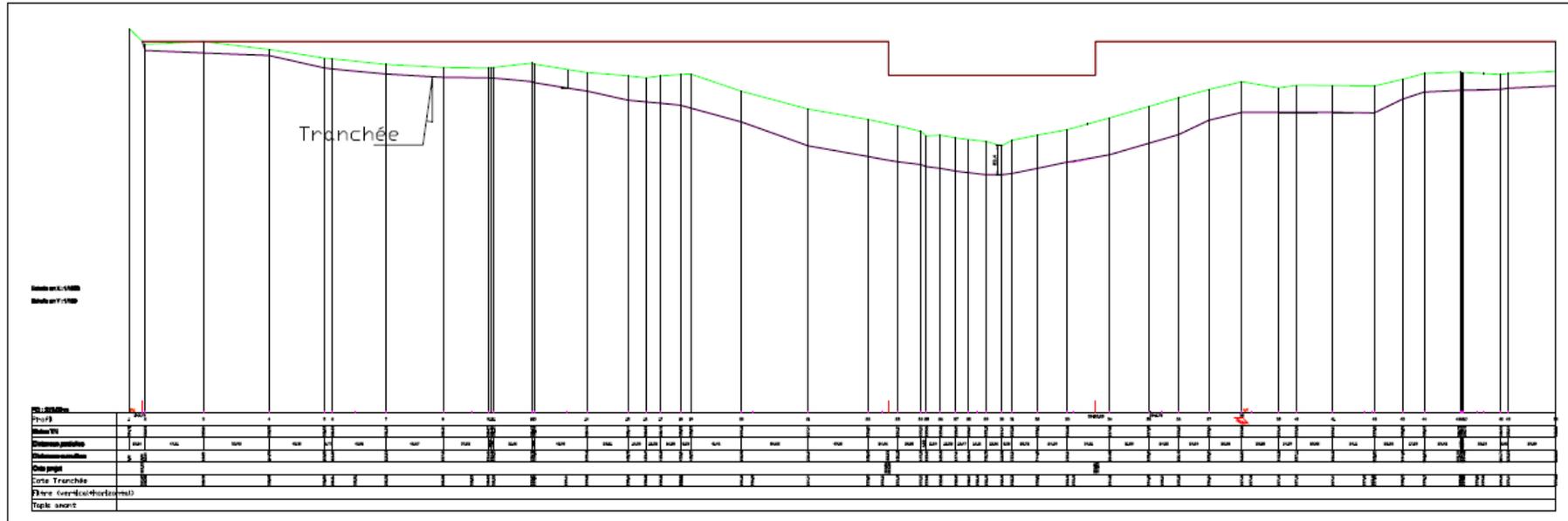
| | | | | | |
|-------------|---|----|-------|-----------|------------|
| IV.4 | Talon | m3 | 15,39 | 150 000 | 2308500 |
| | TOTAL MUR BAJOYER | m3 | | | 11 140 875 |
| V | DIGUETTE DE PROTECTION | | | | |
| V.1 | Décapage de l'emprise des digues de protection, épaisseur 30 cm | m2 | 750 | 400 | 300 000 |
| V.2 | Déblai aux engins | m3 | 16700 | 3 000 | 50 100 000 |
| V.3 | Déblai manuel | m3 | PM | 3 500 | - |
| V.4 | Remblai argileux pour diguettes de protection | m3 | 1000 | 4 000 | 4 000 000 |
| V.5 | Couche de couronnement latéritique des diguettes de protection | m3 | 55 | 5 000 | 275 000 |
| | TOTAL DIGUETTE DE PROTECTION | m3 | | | 54 675 000 |
| VI | OUVRAGE DE PRISE ET DE VIDANGE | | | | |
| VI.1 | Déblai manuel | m3 | 90 | 3 500 | 315 000 |
| VI.2 | Béton armé dosé à 350 kg/m3 | m3 | 20 | 145 000 | 2 900 000 |
| VI.3 | Béton de propreté dosé à 150 kg/m3 | m3 | 2 | 50 000 | 100 000 |
| VI.4 | Perré maçonné de protection entre talus aval et bac aval (ép. 0.25 m) | m3 | 5 | 37 500 | 187 500 |
| VI.5 | Perré sec de protection entre bac amont et talus amont (ép. 0.25 m) | m3 | 5 | 10 000 | 50 000 |
| VI.6 | Conduite en acier Ø 500 | ml | 38 | 300 000 | 11 400 000 |
| VI.7 | Crépine Ø 500 | u | 1 | 200 000 | 200 000 |
| VI.8 | Robinet vanne Ø 500 et accessoires | u | 1 | 5 000 000 | 5 000 000 |
| VI.9 | Grille de protection | u | 1 | 150 000 | 150 000 |
| | TOTAL OUVRAGE DE PRISE | | | | 20 302 500 |
| | TOTAL POUR 02 OUVRAGES DE PRISE | | | | 40 605 000 |

ETUDES TECHNIQUES DU BARRAGE AGRO-PASTORAL DE KELBO, PROVINCE DU SOUM (BURKINA FASO)

| VII | OUVRAGE DE DESENCLAVEMENT | | | | |
|--------------|--|----|----|----------------------|--------------------|
| VII.1 | Mise en place d'une piste de type B | km | 12 | 22 500 000 | 270 000 000 |
| | TOTAL OUVRAGE DE DESENCLAVEMENT | | | | 270 000 000 |
| | TOTAL HORS TAXE | | | 1 184 587 205 | |
| | DIVERS ET IMPREVUS (5%) | | | 59 229 361 | |
| | TOTAL GENERAL HTVA | | | 1 243 816 566 | |

ANNEXE VI : CARTES ET PLANS





Tranchée d'Ancrage de l'axe de la digue

