C.E.T.R.I

CABINET D'ETUDE TECHNIQUE ET DE RECHERCHE EN INGENIERIE

12 BP 145 OUAGADOUGOU 12 BF E-mail : cetri@fasonet.bf TEL/FAX : 25 36 02 01 / 25 47 10 45

# ETUDE TECHNIQUE DETAILLEE POUR LA REHABILITATION DU BARRAGE DE YAONGO, COMMUNE DE DARGO, PROVINCE DU NAMENTENGA, BURKINA FASO

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION **:** .Génie Civil et Hydraulique

---

Présenté et soutenu publiquement le 08 juillet 2019 par

**Younoussa GAMSORE N° 20100958**

**Travaux dirigés par :**

**M. Moussa LO :** Enseignant à 2iE

ET

**M. Fouta DERA :** Ingénieur du Génie civil, Directeur technique de CETRI

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Dial NIANG

Membres et correcteurs : Dr FOWE TAZEN

Mr Célestin OVONO MEZUI

**Promotion [2018/2019]**

# DEDICACES

Je dédie ce mémoire à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à faire de moi l'Homme que je suis aujourd'hui.

# REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre ont contribué au bon déroulement de cette formation. Plus particulièrement à :

- L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de L'environnement (2IE) pour la qualité de la formation qui nous a été donnée durant tout notre cursus ;
- Mon Directeur de Mémoire Mr LO Moussa, enseignant à 2iE, pour son assistance, sa disponibilité et tous les conseils prodigués tout au long de ce présent mémoire ;
- Mr DAMIBA Hervé Désiré, Gérant du cabinet d'étude CETRI, pour nous avoir donné l'opportunité d'effectuer notre stage dans sa structure ;
- Mr DERA, Directeur Technique du cabinet CETRI et mon maitre de stage, pour avoir mis à notre disposition les éléments nécessaires à l'élaboration du mémoire ;
- Docteur Dial NIANG pour sa disponibilité et ses orientations ;
- Mr COULIBALY Gnenekanhan pour sa disponibilité et ses remarques ;
- Mr KABORE Ousmane pour ses multiples conseils et recommandations pour l'élaboration du mémoire ;
- Mr SAWADOGO M. Hilaire pour son soutien et ses orientations lors de l'élaboration du mémoire ;
- Mr OUEDRAOGO Moumouni pour sa disponibilité, sa présence et ses conseils ;
- Tous nos amis et camarades de 2iE ;
- Tous le corps professoral de 2iE en particulier ceux qui ont contribué à notre formation ;
- A l'ensemble du personnel de CETRI, pour l'accueil et le soutien témoigné à notre égard.

# RESUME

L'atteinte de la sécurité alimentaire des pays sahéliens à faible ressources naturelles comme le Burkina Faso passe par la mise en œuvre de projets et programmes dans les domaines de l'agriculture et de l'élevage. C'est dans ce cadre que l'Etat Burkinabè et ses partenaires ont mis en place le Projet de Valorisation Agricole des petits Barrages (ProValAB). L'atteinte des objectifs de ce projet passe par la réhabilitation de cinq (05) petits barrages dont le barrage de Yaongo dans la commune de Dargo. Le présent mémoire s'inscrit dans ce cadre. Il traite de l'étude technique détaillée pour la réhabilitation de ce barrage.

La démarche méthodologique part de l'état des lieux (diagnostic) et l'analyse des études de bases, ensuite l'actualisation des études hydrologiques et de la retenue et enfin les études de dimensionnement des ouvrages constitutifs du barrage.

Les caractéristiques actuelles font état d'une digue en terre homogène de 482 m de long calée à la cote 300 m, un déversoir radier de 211 m de longueur calé à la cote 298,25 m et une cuvette de 1 142 140 $m^3$ de volume. Les ouvrages qui feront l'objet de réhabilitation sont principalement le talus aval de la digue, le déversoir et le bassin de dissipation. Le déversoir passera d'un type radier à un type poids à profil trapézoïdal.

Les résultats indiquent que la retenue se trouve à l'exutoire d'un bassin versant de 633,38 km². Après réhabilitation, le volume du barrage passe à **1 524 636 $m^3$**. La digue aura une longueur de 443 m. Cette retenue servira essentiellement à irriguer 15 ha de terre aménagée et à abreuver des animaux. Le déversoir passera à une longueur de 250 m. Le débit de crue de projet de 346,09 $m^3/s$ est évacué à travers un bassin de dissipation de type II long de 4 m. Le coût de la réhabilitation est de **878 443 998 F** CFA TTC.

**Mots clés :**

1. Barrage de Yaongo
2. Déversoir trapézoïdal
3. Réhabilitation
4. Dargo
5. Burkina Faso

# ABSTRACT

The way to reach food security in the Sahel countries with low natural resources such as Burkina Faso, goes through the implementation of projects and programs in agriculture and breeding domain. That is the way that the Burkinabe State and its partners have set up the Small Dams Agricultural Valorization Project (ProValAB). Reach the objectives of this project goes through the rehabilitation of five (05) small dams including the Yaongo Dam in the commune of Dargo. This memo goes into this framework. It deals with the detailed technical study for this dam rehabilitation.

The methodological approach starts from the inventory of fixtures and the basic studies analysis, next the actualization of hydrological studies and water retention and finally the dam structure construction studies.

Current characteristics show a homogeneous earth dike 482 m length at 300 m altitude, the spillway has a 211 m of length at 298.25 m altitude and a volume of 1,142,140 $m^3$. The structures to be rehabilitated are mainly the downstream slope of the dike, the spillway and the dissipation pond. The Spillway will be change from an apron type to a trapezoidal concrete weight type.

The results indicate that the dam is located at the outlet of a 633.38 $km^2$ catchment area with a volume of **1,524,635.91 $m^3$**. After the rehabilitation, the dike length will be 443 m. This dam will deserve mainly a 15 ha of irrigated perimeter and animals. The spillway length will be about 250 m. The project water flow is about 346.09 $m^3/s$. It is evacuated through a dissipation pond of type II which length is 4 m. The cost of the rehabilitation is **878 443 998** F CFA including tax.

**Keywords:**

1. Yaongo dam
2. Trapezoidal spillway
3. Rehabilitation
4. Dargo
5. Burkina Faso

# LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|---|---|
| **APD** | Avant-Projet Détaillé |
| **BUNEE** | Bureau National des Evaluations Environnementales |
| **BNDT** | Base Nationale de Données Topographiques |
| **CIEH** | Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques |
| **CIGB** | Comité International des Grands Barrages |
| **DPEA** | Direction Provinciale de l'Eau et de l'Assainissement |
| **DPRAH** | Direction Provinciale des Ressources Animales et Halieutiques |
| **FAO** | Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| **GPS** | Global Positioning System |
| **HYFRAN** | Hydrological Frequency Analysis |
| **IGB** | Institut de la Géographie du Burkina |
| **MCD** | Mission De Contrôle |
| **NIES** | Notice d'impact Environnementale et Sociale |
| **ORSTOM** | Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer |
| **PAPANAM** | Projet d'Action de Production et d'Accompagnement dans la province du Namentenga |
| **PCD** | Plan Communal de Développement |
| **PEN** | Plan d'Eau Normal |
| **PHE** | Plus Hautes Eaux |
| **PGES** | Plan de Gestion Environnementale et Sociale |
| **ProValAB** | Projet de Valorisation Agricole des petits Barrages |
| **RN** | Route Nationale |
| **RR** | Route Régionale |
| **SOGREAH** | Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques |
| **UBT** | Unité de Bétail Tropical |
| **USBR** | United States Bureau of Reclamation |

# TABLE DES MATIERES

DEDICACES ..... i
REMERCIEMENTS ..... ii
RESUME ..... iii
ABSTRACT ..... iv
LISTE DES ABREVIATIONS ..... v
TABLE DES MATIERES ..... vi
LISTE DES TABLEAUX ..... ix
LISTE DES FIGURES ..... x
LISTE DES GRAPHIQUES ..... xi
FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE DE YAONGO ..... xii
INTRODUCTION ..... 1
PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ..... 2
I. PRESENTATION DE L'ETUDE ..... 4
I.1. Les objectifs de l'étude ..... 4
I.2. Présentation de la zone d'étude ..... 4
I.2.1. Localisation et accès au site ..... 4
I.2.2. Présentation du barrage ..... 5
I.2.3. Climat ..... 6
I.2.4. Hydrographie ..... 6
I.2.5. Sols et végétation ..... 6
I.2.6. Contexte géologique ..... 7
I.2.7. Situation démographique ..... 7
II. MATERIELS ET METHODES ..... 8
II.1. Matériels ..... 8
II.2. Méthodes ..... 10
II.2.1. Recherche documentaire ..... 10
II.2.2. Visite de site et la collecte des données ..... 10
II.2.3. Etude diagnostique du barrage ..... 10
II.2.4. Etude hydrologique ..... 10
II.2.4.1. Les caractéristiques du bassin versant ..... 10
II.2.4.2. L'analyse statistique des pluies ..... 15
II.2.4.3. Calcul des crues ..... 16

II.2.5. Etude de la retenue ..... 18
II.2.5.1. Evaluation des besoins en eau ..... 18
II.2.5.2. Evaluation des pertes en eau ..... 19
II.2.5.3. Evaluation des dépôts solides ..... 19
II.2.5.4. Evaluation des apports liquides ..... 20
II.2.5.5. Calcul du volume de la retenue ..... 21
II.2.5.6. Simulation de l'utilisation de la retenue ..... 21
II.2.6. Conception et dimensionnement des ouvrages du barrage ..... 23
II.2.6.1. Choix du type de barrage ..... 23
II.2.6.2. La digue du barrage ..... 23
II.2.6.3. L'évacuateur de crue ..... 25
II.2.6.4. Le mur bajoyer ..... 28
II.2.6.5. La digue de protection ..... 29
II.2.6.6. L'ouvrage de prise ..... 30
II.2.6.7. Coût de la réhabilitation ..... 30
II.3. Synthèse des études de bases ..... 31
II.3.1. Etudes géotechniques ..... 31
II.3.2. Etude socio-économique ..... 32
II.3.3. Notice d'impact environnementale et sociale (NIES) ..... 33
III. RESULTATS ET DISCUSSIONS ..... 35
III.1. Etude diagnostique du barrage ..... 35
III.1.1. Etat actuel du barrage ..... 35
III.1.1.1. La cuvette du barrage ..... 35
III.1.1.2. Etat de la digue ..... 35
III.1.1.3. Etat de l'évacuateur de crue ..... 36
III.1.1.4. Etat des ouvrages annexes ..... 39
III.1.2. Causes probable des dégradations ..... 41
III.1.3.1. La digue ..... 41
III.1.3.2. L'évacuateur de crue ..... 41
III.1.3.3. Les terres à l'aval du bassin de dissipation ..... 41
III.2. Etudes hydrologiques ..... 42
III.2.1. Caractérisation du bassin versant ..... 42
III.2.2. Analyse statistiques des pluies ..... 43

III.2.3. Détermination des crues ..... 45
III.3. Estimation et exploitation de la retenue ..... 47
III.3.1. Evaluation des besoins en eau ..... 47
III.3.2. Estimation des pertes en eau ..... 47
III.3.3. Evaluation des dépôts solides ..... 47
III.3.4. Evaluation du volume de la retenue ..... 47
III.3.5. Calculs des apports liquides ..... 48
III.3.6. Simulation de l'utilisation de la retenue ..... 49
III.4. Vérification de la conception des ouvrages existants ..... 51
III.4.1. Vérification de la conception de la digue ..... 51
III.4.2. Vérification de la conception de l'évacuateur de crue ..... 51
III.4.3. Crue de rupture du barrage ..... 51
III.5. Proposition de réhabilitation des ouvrages existants du barrage ..... 52
III.5.1. Réhabilitation de la digue du barrage ..... 52
III.5.2. Réhabilitation de l'évacuateur de crue ..... 54
III.5.3. Dimensionnement du bassin de dissipation ..... 55
III.5.4. Dimensionnement du mur bajoyer ..... 56
III.5.5. Réhabilitation de la digue de protection ..... 57
III.5.6. Réhabilitation de l'ouvrage de prise ..... 58
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ..... 59
Bibliographie ..... 60
ANNEXES ..... 61

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classes d'infiltrabilité des sols ..... 13
Tableau 3 : Classification des pentes des bassins versant (ORSTOM) ..... 13
Tableau 3 : Conditions de stabilité du déversoir ..... 27
Tableau 4 : Conditions de stabilité externe du mur Bajoyer ..... 29
Tableau 5 : Conditions de stabilité interne du mur Bajoyer ..... 29
Tableau 7 : Superficies cultivées et rendements des principales cultures en 2012 ..... 32
Tableau 8 : Production maraichères en 2012 ..... 32
Tableau 9 : Effectif du cheptel commercialisé entre 2010 et 2012 ..... 33
Tableau 9 : Caractéristiques du bassin versant ..... 43
Tableau 10 : Valeurs caractéristiques des pluies annuelles ..... 44
Tableau 11 : Valeurs caractéristiques des pluies maximales journalières annuelles ..... 45
Tableau 12 : Calcul de la crue de projet ..... 45
Tableau 13 : Besoins en eau par campagne ..... 47
Tableau 16 : Caractéristiques de la cuvette du barrage ..... 47
Tableau 17 : Calcul des apports liquides ..... 48
Tableau 16 : Vérification de la largeur en crête ..... 51
Tableau 17 : Caractéristiques de la digue ..... 52
Tableau 18 : Travaux de réhabilitation et de protection de la digue ..... 52
Tableau 19 : Stabilité du déversoir ..... 54
Tableau 20 : Caractéristiques du déversoir ..... 55
Tableau 21 : Caractéristiques du bassin de dissipation et du chenal d'évacuation ..... 55
Tableau 22 : Caractéristiques géométriques du mur Bajoyer ..... 56
Tableau 23 : Stabilité externe du mur Bajoyer ..... 57
Tableau 24 : Stabilité interne du mur Bajoyer ..... 57
Tableau 25 : Caractéristiques de la digue de protection ..... 58

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de CETRI ..... 3
Figure 2 : Carte de situation de la zone d'étude ..... 5
Figure 3 : Présentation du barrage de Yaongo ..... 6
Figure 4 : Dégradations de la digue du barrage ..... 36
Figure 5 : Dégradation du déversoir ..... 38
Figure 6 : Dégradations du bassin de dissipation et des enrochements ..... 39
Figure 7 : Dégradations des ouvrages annexes du barrage ..... 40
Figure 8 : Carte du bassin versant du barrage de Yaongo ..... 42
Figure 9 : Cercle de glissement le plus défavorable ..... 53

# LISTE DES GRAPHIQUES

Graphe 1 : Histogramme des pluies moyennes de la station de Boulsa (1980-2015) ..... 44
Graphe 2 : Hydrogramme de crue du projet ..... 46
Graphe 3 : Simulation de la retenue ..... 49

# FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE DE YAONGO

**1 : Localisation**
Région : Centre Nord

Province : Namentenga

Commune : Dargo

Village : Yaongo

Coordonnées **:** longitude : 00° 16’ 19,09’’ Ouest ; Latitude : 12° 36’ 55,84’’ Nord

| **Désignation** | **Unité** | **Caractéristiques actuelles** | **Caractéristiques après réhabilitation** |
|---|---|---|---|
| **2 : Bassin versant** | | | |
| Superficie | Km² | - | 633,80 |
| Périmètre | km | - | 164,28 |
| Pluie moyenne annuelle (1980-2015) | mm | - | 671 |
| Crue décennale | $m^3/s$ | - | 144,21 |
| Crue de projet | $m^3/s$ | - | 346,09 |
| Apports liquides en année moyenne | $m^3$ | - | 19 014 000 |
| **3 : Digue** | | | |
| Type | - | Terre homogène | Terre homogène |
| Longueur totale avec déversoir | m | 693 | 693 |
| Largeur en crête | m | 3,00 | 3,50 |
| Cote calage | m | 300,00 | 300,00 |
| Pente talus amont | - | 1V / 2H | 1V / 2H |
| Pente talus aval | - | 1V / 2H | 1V / 2H |
| **4 : Retenue** | | | |
| Cote Plan d’Eau Normale (PEN) | m | 298,25 | 298,50 |
| Superficie du plan d’eau au PEN | ha | 140,13 | 165,65 |
| Capacité au PEN | $m^3$ | 1 142 410 | 1 524 636 |
| **5 : Evacuateur de crue** | | | |
| Type | - | Radier | Poids à profil trapézoïdal |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Nature du matériau | - | Béton cyclopéen et terre homogène sous radier | Béton cyclopéen |
| Charge au-dessus du seuil | m | - | 0,8 |
| Longueur hydraulique | m | 211 | 250 |
| Cote de calage | m | 298,25 | 298,50 |
| Débit évacué | $m^3/s$ | - | 323,09 |
| Longueur bassin de dissipation | m | 4,00 | 4,00 |
| Profondeur bassin de dissipation | m | 1,00 | 1,00 |
| **6 : Ouvrage de prise/vidange** | | | |
| Diamètre de la conduite | mm | 300 | 300 |
| Longueur de la conduite | m | 24 | 24 |
| Diamètre du robinet vanne | mm | 300 | 300 |
| Cote de fond bac amont | m | 295,8 | 295,8 |
| Cote de fond bac aval | m | 295,7 | 295,7 |

# INTRODUCTION

Le Burkina Faso, pays sahélien et enclavé au cœur de l'Afrique de l'Ouest, est soumis à une pluviométrie généralement faible et mal répartie dans le temps et dans l'espace. De ce fait, la problématique de la satisfaction des besoins en eau a toujours été d'actualité et cela s'est accentuée avec la croissance démographique. Le caractère social et économique de la ressource apparaît nettement d'autant plus que l'agriculture et l'élevage constituent les piliers du développement économique et social du pays. Pour faire face à cette situation, le pays a entrepris depuis les années 60 des campagnes de construction de retenues d'eau. Aujourd'hui 47 % de ces retenues sont fortement dégradées (DGRE, 2011).

Pour résoudre ces anomalies et assurer la pérennité des barrages dans le but d'améliorer durablement la sécurité alimentaire, l'Etat avec la collaboration et l'appui de l'Agence Suédoise de la coopération au Développement International (ASDI), à travers des projets tel que le Projet de Valorisation Agricole des petits Barrages (ProValAB) prévoit la réhabilitation de barrages et la réalisation d'aménagements hydroagricoles. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent mémoire intitulé : « Etude technique détaillée pour la réhabilitation du barrage de Yaongo, Commune de Dargo, Province du Namentenga, Burkina Faso ».

Pour traiter le sujet, nous allons tout d'abord présenter la zone et les objectifs de l'étude, ensuite les matériels et méthodes que nous avons utilisés dans cette étude, puis nous présenterons les résultats obtenus et les discussions de ceux-ci. Nous finirons par la présentation des notes de calculs, des pièces dessinées et de l'estimation du coût du projet.

# PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

Fondé en juillet 1999, le Cabinet d'Etudes Techniques et de Recherche en Ingénierie en abrégé CETRI était au départ une entreprise individuelle qui a évolué en une Entreprise à responsabilité limité (SARL). Elle œuvre dans le domaine des prestations intellectuelles et de maîtrise d'œuvre et a pour mission principale, la valorisation de ses services dans ses domaines d'intervention.

Le bureau d'études CETRI intervient dans les domaines tels que l'eau, les infrastructures et l'environnement et ses prestations vont des études préliminaires et de faisabilité à l'élaboration des dossiers d'appel d'offres en passant par les études d'avant-projet sommaires, les études techniques détaillées et d'exécution. Il assure également des missions de pilotage, de maîtrise d'ouvrage déléguée, de contrôle et supervision de travaux, d'assistance technique ou d'expertise.

Il comprend un personnel permanent et contractuel, compétent et expérimenté, qui intervient à toutes les étapes de conception et de mise en œuvre des projets de développement.

- **Objectifs**

Les principaux objectifs du cabinet CETRI sont :

- Définir et valoriser les grandes lignes de recherche en matière d'Hydraulique, de Génie civil, de Génie rural, de Socio-économie, d'Environnement et de Formations ;
- Satisfaire et fidéliser ses partenaires au travail à travers la recherche de la qualité de ses services ;
- Assurer la promotion des actions pour le bien-être du Personnel ;
- Conquérir le Marché extérieur dans ses aires de prédilection.

- **Organisation**

La structuration de CETRI reflète son caractère multisectoriel tant d'un point de vue de la variété de ses domaines d'intervention, que d'un point de vue institutionnel et administratif.

Le cabinet CETRI comprend :

- Une Direction Générale ;
- Une Direction Administrative et financière ;
- Une Direction Technique ;
- Une Direction du Développement et de la Gestion des Projets ;
- Une Direction des ressources Humaines, de l'Audit interne et du Management Qualité ;

- Un Pool de Cabinets d'assistance.

La Figure 1 présente l'organigramme de CETRI.

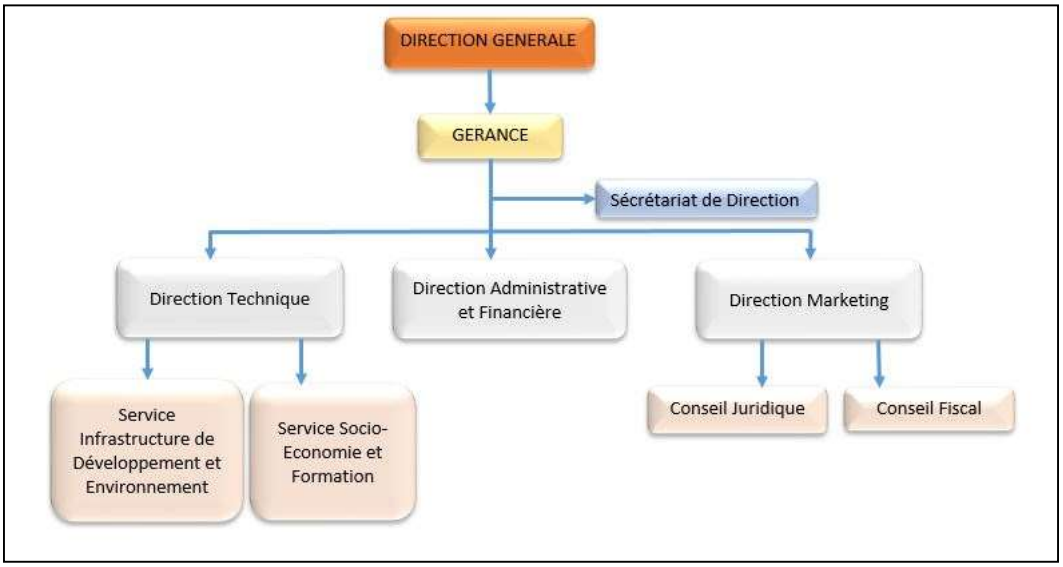



*Figure 1 : Organigramme de CETRI*

# I. PRESENTATION DE L'ETUDE

## I.1. Les objectifs de l'étude

L'objectif général de l'étude est de réaliser une étude technique détaillée pour la réhabilitation du barrage de Yaongo. Il s'agit spécifiquement de :

- Faire l'état des lieux (diagnostic) du barrage ;
- Présenter une synthèse des études de bases ;
- Proposer des solutions techniques pour la réhabilitation des ouvrages du barrage ;
- Elaborer une note de calcul détaillée et les plans d'exécution des différents ouvrages réhabilités du barrage ;
- Etablir un devis quantitatif et estimatif pour la réhabilitation du barrage.

## I.2. Présentation de la zone d'étude

### I.2.1. Localisation et accès au site

Le site du barrage est situé dans le village de Yaongo dans la commune de Dargo, Province du Namentenga, Région du Centre-Nord au Burkina Faso. Le village est situé à une quinzaine de kilomètres du département de Dargo. L'accès au site se fait à partir de Ouagadougou sur la RN4 sur 106 km jusqu'à Zorgho, puis de la RR1 jusqu'à Boulsa sur 54 km. Ensuite à partir de Boulsa sur la RR2 jusqu'à Dargo sur 34 km, et enfin de Dargo a Yaongo sur 15 km. Soit un total de 209 km à partir de Ouagadougou. La Figure 2 présente la carte de situation du village de la zone d'étude. Les coordonnées géographiques du site du barrage relevé au GPS sont suivantes : Longitude 00° 16' 19,09'' Ouest, Latitude 12° 36' 55,84'' Nord.

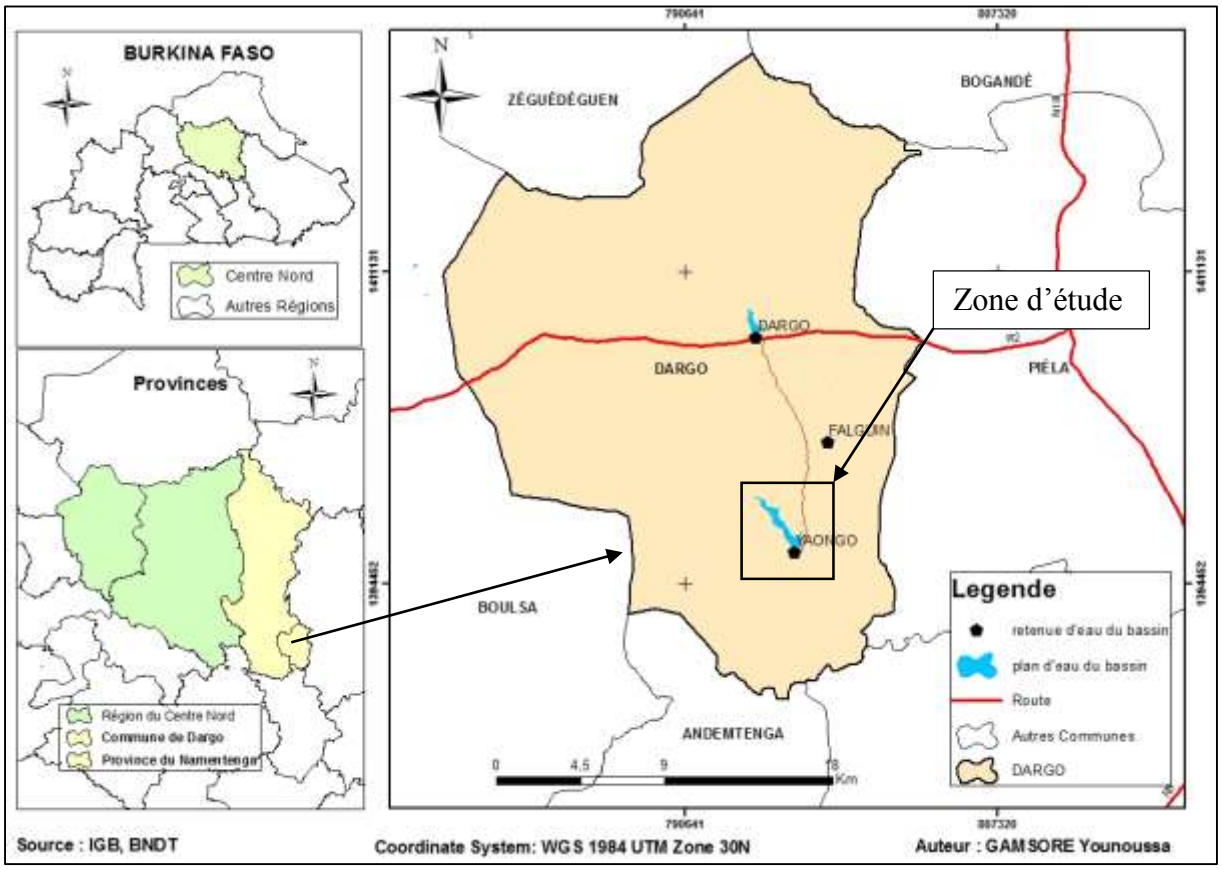



*Figure 2 : Carte de situation de la zone d'étude*

### I.2.2. Présentation du barrage

Le barrage de Yaongo est un petit barrage dont la construction a été initiée par le Projet d'Action de Production et d'Accompagnement dans la province du Namentenga (PAPANAM). Les études de réalisation du barrage ont été effectuées en 1999, elles ont été effectuées en parallèle avec les études d'aménagement hydro-agricoles du périmètre irrigué situé à l'aval du barrage (SAHEL CONSULT, 1999). Sa construction est intervenue en 2002 avec comme capacité près de 1 895 000 $m^3$. Il faut noter que le barrage a été réhabilité en 2013. En 2017, une partie du déversoir a été détruite suite à une forte pluie dans la localité. Malgré la mobilisation des populations à plusieurs reprises afin de réparer les dégâts, le barrage présente aujourd'hui des dégradations majeures. Le barrage est présenté à la Figure 3.

*Figure 3 : Présentation du barrage de Yaongo*

### I.2.3. Climat

Le climat est de type sahélien caractérisé par une faible pluviométrie avec une saison des pluies courte d'environ quatre (04) mois (Juin à Septembre) et une longue saison sèche d'environ huit (08) mois (Octobre à Mai). A l'instar des pays sahéliens, l'évaporation est très importante dans cette zone. La pluviométrie annuelle varie entre 350 et 980 mm (PCD, 2014-2018).

### I.2.4. Hydrographie

Le réseau hydrographique du bassin versant du barrage de Yaongo est composé d'un cours d'eau principal (la Sirba) long de 50 km environ. Il coule en direction de l'Est sur 25 km avant de s'infléchir et de prendre la direction du Sud-Est. Le barrage de Dargo est érigé sur un des affluents de celui-ci (IGB). Le barrage de Yaongo est érigé sur ce cours d'eau principal qui traverse le village. Les détails sont présentés sur la carte du bassin versant à la Figure 8.

### I.2.5. Sols et végétation

Les sols de la partie Nord du bassin est constitué de sols peu évolués associé à des lithosols sur cuirasse ferrugineuse. Dans sa partie Sud, nous avons des sols à sesquioxydes associés à des sols peu évolués hydromorphes sur matériau gravillonnaire (IGB). Le village de Yaongo se trouve entièrement dans cette partie sud.

Au regard de la classification de la FAO, nous avons des sols ferrugineux lessivés plus ou moins gravillonnaire, les vertisols et les sols bruns sur roche basaltique.

La végétation est constituée en grande partie par la savane arbustive et la steppe. Elle est majoritairement constituée de zone de cultures pluviales.

### I.2.6. Contexte géologique

La géologie du site est essentiellement constituée de granites à biotites du précambrien C tout comme le bassin entier. Dans la partie Est, on rencontre des biotites amphiboles alors que tout le reste est constitué de biotites parfois muscovites (SAHEL CONSULT, 1999).

### I.2.7. Situation démographique

La population de la commune rurale de Dargo est estimée à 29 266 habitants selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitation de 2006. Cette population est constituée de 52 % de femmes. Plus spécifiquement, la commune de Yaongo comptait en 2006 près de 2 816 habitants (PCD, 2014-2018). Cette population est estimée de nos jours à 3982 habitants.

# II. MATERIELS ET METHODES

## II.1. Matériels

Le matériel utilisé pour le traitement des données dans le cadre de cette étude est diversifié en fonction du résultat attendu. Les éléments constitutifs sont les suivants :

- **Appareil photo, GPS et décamètre**

L'appareil photo a été utilisé pour les prises de vue des différents ouvrages, lors de la visite terrain dans le cadre de l'étude diagnostique. Le GPS a permis de lever les coordonnées de certains points caractéristiques de la digue et des ouvrages du barrage, tandis que le décamètre a servi pour les différentes mesures de distance sur le terrain.

- **Google Earth, Global Mapper et ArcGis**

Le logiciel Google Earth a permis d'obtenir des images satellitaires du barrage et des éléments environnants. La délimitation du bassin versant a été réalisée avec le logiciel Global Mapper V.18, cela a permis de déterminer les caractéristiques du bassin versant et de son réseau hydrographique. Les différentes cartes ont été faites avec ArcGis 10.3.1.

- **CLIMWAT et CROPWAT**

L'application CLIMWAT 2.0 a permis d'obtenir les données climatiques de la zone d'étude pendant que CROPWAT 8.0 a quant à elle permis d'obtenir les paramètres de calculs des besoins en eau des cultures.

- **AutoCad et COVADIS**

Les différents plans des ouvrages ont été réalisés avec AutoCad 2016. COVADIS 2013 a été utilisé pour l'analyse topographique du site et le tracé des différents profils.

- **Geoslope et CYPE**

La stabilité des pentes des talus de la digue du barrage a été vérifiée avec Geoslope V.2012. Le mur Bajoyer a été vérifié avec le logiciel CYPE V.2014.

- **HYFRAN, Excel, Word.**

Les différents calculs entrant dans le cadre de cette étude de réhabilitation ont été faits avec des programmes élaborés sous Excel. Le logiciel HYFRAN a permis de vérifier l'analyse statistique des pluies de la zone d'étude qui a été fait sous Excel. La rédaction du document a été réalisée avec Word.

- **Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :**

- Les résultats de l'étude topographique réalisée par le bureau d'étude ;
- Les résultats de l'étude géotechnique réalisée par le bureau d'étude ;
- Les résultats de l'étude environnementale réalisée par le bureau d'étude ;
- Les résultats de l'étude socio-économique réalisée par le bureau d'étude ;
- Les données pluviométriques de la station de Boulsa pour l'analyse statistique.

## II.2. Méthodes

La démarche adoptée pour réaliser cette étude de réhabilitation est la suivante :

### II.2.1. Recherche documentaire

Cette étape a consisté d'abord à rechercher des informations (documents physiques et numériques) sur l'historique du barrage de Yaongo. Ainsi nous avons obtenu le rapport d'étude géotechnique pour la réalisation du barrage et le rapport de l'étude d'aménagement du périmètre à l'aval du barrage. Ensuite une revue documentaire sur les études APD de réalisation et de réhabilitation de barrages et de leurs ouvrages annexes.

### II.2.2. Visite de site et la collecte des données

La visite de site a permis d'avoir un regard complet sur le barrage à travers les prises de vues, la description et l'analyse des différentes dégradations observées. Cela a permis de faire un état des lieux (diagnostic) de ce barrage. Cette visite a été le moment de confirmer la localisation et l'accès au site du projet.

La collecte de données a consisté à récolter les données pluviométriques de la station de Boulsa et les résultats d'études de base (études topographiques, géotechniques, environnementales et socio-économiques). Les données sur les sols, la végétation, la géologie et l'occupation des terres ont été prises dans la base de données BNDT de l'IGB version 2012.

### II.2.3. Etude diagnostique du barrage

Cette étape a consisté à faire l'état des lieux du barrage et de tous les ouvrages existants à travers l'identification des parties dégradées, leurs descriptions et la recherche des causes probables de ces éventuelles dégradations. Cela a été fait à partir des prises de vues et l'analyse sur le terrain des différents ouvrages.

### II.2.4. Etude hydrologique

L'étude hydrologique a consisté à déterminer les caractéristiques du bassin versant, faire l'analyse statistique des pluies et calculer la crue de projet et celle de rupture. Cette étude a été faite en raison de l'indisponibilité de celle effectuée lors de la construction du barrage et du fait que les données pluviométriques ont évolués depuis lors.

#### II.2.4.1. Les caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de ladite section

(KARAMBIRI, 2008). La surface, le périmètre, les cotes maximale et minimale, la longueur du réseau hydrographique, la pente moyenne ont été déterminés à partir de la délimitation de ce bassin sur Global Mapper.

Les autres caractéristiques sont les suivantes :

- **L'indice de compacité**

Il correspond au rapport du périmètre à celui d'un cercle de même superficie (FAO 54, 1996). Il est donné par l'équation 1 :

$$I_{comp} = 0{,}282 * \frac{P}{\sqrt{S}} \qquad (Eq.1)$$

Où *P* est le périmètre du bassin versant en km et *S* est la superficie de ce bassin en km².

- **La longueur et la largeur du rectangle équivalent**

Ce sont la longueur (*L*) et la largeur (*l*) d'un rectangle ayant la même surface et le même périmètre que le bassin versant (KARAMBIRI, 2008). Elles sont données par les équations 2 et 3 **:**

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16 * S}}{4} \quad (Eq.2) \quad et \quad l = \frac{S}{L} \quad (Eq.3)$$

Où, *L* et *l* sont exprimée en km ;

*P* est le périmètre du bassin versant en km et *S* est la superficie de ce bassin en km².

- **L'indice global de pente**

Indice caractérisant le relief d'un bassin (FAO 54, 1996). Il est défini par l'équation 4 :

$$I_g = \frac{D}{L} \qquad (Eq.4)$$

Où, *D* représente la dénivelée, exprimée en mètres, séparent les altitudes ayant approximativement 5% et 95% de la surface du bassin au-dessus d'elles, ces altitudes sont déterminées sur la courbe hypsométrique ;

*L* est la longueur du rectangle équivalent, exprimée en km ;

*Ig* est exprimée en m/km.

Pour les bassins dont la longueur du rectangle équivalent est très différente de la longueur du talweg le plus long (le cas de notre bassin), il serait préférable d'utiliser la largeur du rectangle équivalent dans le calcul de l'indice global de pente (FAO 54, 1996).

La courbe hypsométrique est une courbe qui donne le pourcentage de la surface du bassin située d'une hauteur H en fonction de cette altitude H (KARAMBIRI, 2008). Elle présente une vue globale de la pente du bassin.

- **La dénivelée spécifique**

Elle s'exprime en mètres et est indépendante, en théorie, de l'aire du bassin (FAO 54, 1996). Elle est donnée par l'équation 5 :

$$Ds = I_g * \sqrt{S} \qquad (Eq.5)$$

Où, *Ds* en mètres ;

*Ig* est en m/km et *S* en km².

On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de Ds (FAO 54, 1996):

- Relief faible : Ds > 50 m ;
- Relief modéré : 50 m < Ds < 100 m ;
- Relief fort : 100 m < Ds.

- **La densité de drainage**

C'est le rapport à la superficie du bassin versant, de la longueur totale des cours d'eau de tous ordre (FAO 54, 1996). La formule est l'équation 6 :

$$D_d = \frac{\sum l_i}{S} \qquad (Eq.7)$$

Où, $\sum l_i$ est la longueur totale du réseau hydrographique en km et *S* est en km².

- **Infiltrabilité des sols**

C'est l'aptitude d'un terrain à l'infiltration. Les éléments déterminants de l'infiltrabilité sont les caractères d'état de la surface qui intègrent le couvert végétal, la surface du sol et les organisations pédologiques superficielles ayant subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques (FAO 54, 1996).

Une classification qualitative de l'infiltrabilité a été effectuée par Rodier. Elle comprend six classes. Cette classification est donnée au Tableau 1.

*Tableau 1 : Classes d'infiltrabilité des sols*

| **Classe d'infiltrabilité** | **Caractéristiques** |
|---|---|
| TI | Bassin rigoureusement imperméable |
| I | Bassin imperméable |
| RI | Bassin relativement imperméable |
| P | Bassin perméable |
| TP | Bassin très perméable |

***Source :*** *Crues et apports (Bulletin FAO 54)*

- **Classification des pentes**

La pente moyenne du bassin versant est la pente du cours d'eau principal après avoir éliminé les 20% de la partie supérieur et les 20% de la partie inferieur du bassin (DURAND, 1996). L'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) a défini six classes de pentes. Cette classification est donnée au Tableau 2 ci-dessous.

*Tableau 2 : Classification des pentes des bassins versant (ORSTOM)*

| **Classes de pente** | **Caractéristiques** |
|---|---|
| R1 | Pentes très faibles, inférieur à 1 à 2‰ |
| R2 | Pentes faibles, inférieur à 5‰ |
| R3 | Pentes modérées comprises entre 5‰ et 1% |
| R4 | Pentes assez fortes : longitudinales entre 1 et 2%, transversales supérieur à 2 % |
| R5 | Pentes fortes : longitudinales entre 2 et 5 %, transversales entre 8 et 20% |
| R6 | Pentes très fortes : longitudinales supérieur à 5% |

***Source :*** *Petits barrages pour l'équipement rural en Afrique.*

- **Les sols**

A l'échelle continentale, les sols mis en place à partir des altérations entre la surface et la roche saine se différencient en fonction principalement de la pluviométrie annuelle (FAO 54, 1996). Ainsi selon la classification de la FAO, on distingue du nord au sud, les formations suivantes :

- Au-dessous de l'isohyète 400 mm, les sols ferrugineux peu lessivés sableux sur dunes ou les sols bruns rouges subarides ;

- Entre 1000 et 400 mm, les sols ferrugineux lessivés plus ou moins gravillonnaires, les vertisols et les sols bruns sur roche basaltique ;
- Au-delà de 1000 mm, les sols ferrallitiques désaturés plus ou moins gravillonnaires, vertisols et sols bruns sur roches basaltiques.

❖ **Le régime hydrologique**

Le sahel Africain peut être subdivisé en quatre (04) régimes hydrologiques différents. Ils sont étroitement associés aux régimes climatiques rencontrés dans cette région (FAO 54, 1996). Ce sont :

- Le régime désertique, au nord de l'isohyète 100 mm ;
- Le régime subdésertique, entre les isohyètes 100 et 300 mm ;
- Le régime sahélien, entre les isohyètes 300 et 750 mm ;
- Le régime tropical sec entre les isohyètes 750 et 1000 mm.

### II.2.4.2. L'analyse statistique des pluies

L'analyse statistique des pluies a été réalisée avec Excel et vérifiée avec HYFRAN. Les données de pluies annuelles ont été analysées avec la loi normale et les données de pluies maximales journalières annuelles ont été analysées avec la loi de Gumbel. Les données utilisées sont celle de la station de Boulsa qui est la station météorologique la plus proche de notre zone d'étude. Cette analyse nous a permis de déterminer les valeurs caractéristiques des pluies (quantiles) à des périodes de retour définies (décennales, centennales…).

- **Analyse des pluies annuelles**

La loi normale ou loi de Gauss est caractérisée par une fonction de répartition ou probabilité au non dépassement donnée par l'équation 7 :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u} e^{\frac{-u^2}{2}} du \qquad (Eq.7)$$

Avec $u = \frac{x-\bar{x}}{s}$ la variable réduite de Gauss, $\bar{x}$ est la Moyenne et $s$ est l'Ecart Type.

Les quantiles sont calculés par la formule suivante : $x_p = \bar{x} + u_p * s$

Avec $x_p$ le quantile à la probabilité p et $u_p$ la variable réduite à la probabilité p.

- **Analyse des pluies maximales journalières annuelles**

La loi de Gumbel est caractérisée par une fonction de répartition qui n'utilise que les fréquences au non dépassement, donnée par l'équation 8 :

$$F(x) = e^{-e-u} \qquad (Eq.8)$$

Avec $u = -\ln\left[-\ln\left(F(x)\right)\right]$ la variable réduite de Gumbel.

L'ajustement est réalisé avec la méthode des moments dont les paramètres sont :

$$\frac{1}{a} = 0{,}780 * s \text{ et } x_0 = \bar{x} - \frac{0{,}577}{a}$$

Où, $\bar{x}$ est la Moyenne et $s$ est l'Ecart Type. Ainsi les quantiles sont calculés par la formule suivante :

$$x_p = \frac{u_p}{a} + x_0$$

Avec $x_p$ le quantile à la probabilité p et $u_p$ la variable réduite à la probabilité p.

### II.2.4.3. Calcul des crues

#### ❖ Calcul de la crue de fréquence décennale

La crue décennale peut être définie comme étant la crue provoquée par une pluie décennale (hauteur de pluie de précipitation égalée ou dépassée en moyenne une fois par décennie), toutes les autres conditions étant celles observées le plus fréquemment lors de fortes averses (FAO 54, 1996). Le calcul de cette crue revient à calculer le débit de pointe décennal qui correspond au ruissellement superficiel de cette crue. Les méthodes utilisées pour le calcul de cette crue ont été la méthode ORSTOM et la méthode CIEH (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) car le bassin versant de notre Barrage n'est pas jaugé.

- **La méthode ORSTOM**

Cette méthode est aussi connue sous le nom de la méthode Rodier pour le calcul de crue décennale. Elle s'applique à des bassins dont la superficie se situe entre quelques dizaines d'hectares et plus de 1500 km² (FAO 54, 1996).

Dans cette méthode, le débit de crue décennale est calculé par l'équation 9 :

$$Qr_{10} = A * P_{10} * Kr_{10} * \alpha_{10} * {}^{S}/_{Tb_{10}} \qquad (Eq.9)$$

Avec, $A$ le coefficient d'abattement ;

$P_{10}$ la hauteur de pluie journalière décennale ;

$Kr_{10}$ le coefficient de ruissellement correspondant à la crue décennale ;

$\alpha_{10}$ le coefficient de pointe correspondant à la crue décennale ;

$S$ la superficie du bassin versant ;

$Tb_{10}$ le temps de base correspondant à la crue décennale.

Le débit maximal total $Q_{10}$ est obtenu en fonction de la région et de l'indice de l'infiltrabilité par les équations 10 et 11 :

En région sahélienne :

- pour un indice d'infiltrabilité I : $Q_{10} = 1{,}03 * Qr_{10}$ $(Eq.10)$ ;
- pour un indice d'infiltrabilité P : $Q_{10} = 1{,}06 * Qr_{10}$ $(Eq.11)$

- **La méthode CIEH**

C'est une méthode statistique basée sur 162 bassins versants dont l'origine vient essentiellement du recueil de Dubreuil (1972) sur les bassins expérimentaux. La formulation retenue pour retrouver l'expression du débit de pointe $Q_{10}$ (équation 12) est basée sur un schéma de régression multiple et se présente sous la forme (FAO 54, 1996) :

$$Q_{10} = a * S^s * \bar{P}_{an}^p * I_g^i * Kr_{10}^k * Dd^d \qquad (Eq.12)$$

Où : a, s, p, i, k, d sont des coefficients à déterminer ;

*S* est la surface du bassin en km², *Ig* est l'indice global de pente en m/km ;

$\bar{P}an$ est la pluie moyenne annuelle en mm et $Kr_{10}$ est le coefficient de ruissellement décennal ;

*Dd* est la densité de drainage en km$^{-1}$. La liste des paramètres à inclure n'est pas limitative.

Les valeurs des coefficients sont données dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 77. Le débit de crue décennal a été obtenu en prenant la valeur maximale des débits calculés par les méthodes ORSTOM et CIEH pour tenir compte de la sécurité de l'ouvrage.

- **La crue de projet**

Il s'agit ici d'accroitre la marge de sécurité des ouvrages en majorant la crue décennale par un coefficient multiplicateur (FAO 54, 1996). La valeur de ce coefficient varie entre 2,4 et 2,6. Nous avons donc utilisé la valeur de C=2,4 pour la détermination de la crue de projet afin de tenir compte de la sécurité de l'ouvrage.

- **L'hydrogramme de crue**

Les temps de montée et les temps de base qui ont été calculés précédemment (calcul de la crue par la méthode ORSTOM) peuvent être considérés comme typique des crues exceptionnelles (COMPAORE, 1996). Le schéma de l'hydrogramme de crue que nous avons adopté est alors celui de GRESILLON, HERTER et LAHAYE. Le changement de pente de la décrue s'effectue en point où le débit Q dont la valeur est définie par l'équation 13 (DURAND et al, 1999) :

$$\frac{Q}{Q_{projet}} = \frac{2}{\alpha_{10}} * \frac{T_{b10} - \alpha_{10} * T_{m10}}{T_{b10} - 2 * T_{m10}} \qquad (Eq.13)$$

Où $Q_{projet}$ est le débit de crue du projet, $T_{m10}$ est le temps de montée décennal ;

$T_{b10}$ est le temps de base décennal et $\alpha_{10}$ est le coefficient de pointe décennal.

- **La crue de rupture**

Selon le Comité International des Grands Barrages (CIGB), la crue de rupture d'un barrage peut être approchée par l'équation 14 :

$$Q_{rup} = 2 * L_{deversoir} * (R_t + 0{,}2)^{1{,}5} + 0{,}15 * L_{digue} \qquad (Eq.14)$$

Avec $L_{deversoir}$ la longueur du déversoir, $R_t$ la revanche totale et $L_{digue}$ la longueur de la digue.

### II.2.5. Etude de la retenue

La construction d'un barrage répond à l'objectif de constituer une réserve d'eau pour satisfaire plusieurs besoins en eau. Aussi, pour concevoir et gérer correctement une retenue, il faut aussi tenir compte des diverses pertes d'eau (infiltrations, évaporations et dépôts solides) inhérentes au site même (LO, 2016). Pour la satisfaction des besoins sus cités, il faut aussi tenir compte des apports liquides. Etudier la retenue a donc consisté à évaluer les besoins en eau, les pertes, les apports liquides et de faire une conclusion concernant la satisfaction des besoins.

#### II.2.5.1. Evaluation des besoins en eau

Il ressort des études socio-économiques que les besoins en eau sont d'ordre agricoles, pastorales et humaines.

- **Besoins agricoles**

Il s'agit des besoins en eau des cultures pour l'irrigation. Exprimés en terme de besoins brutes ($B_b$), les besoins en eau des cultures ont été évalués par l'équation 15 :

$$B_b = {B_n}/{E_a} \qquad (Eq.15)$$

Avec $B_n = K_c * ETP - P_e$ et $\begin{cases} P_e = P \; si \; P < 20 \; mm \\ P_e = 0{,}8 * P \; si \; P \geq 20 \; mm \end{cases}$

Où, $P$ est la pluviométrie moyenne mensuelle en mm et $P_e$ est la pluie efficace en mm ;

$K_c$ est le coefficient cultural caractéristique de la culture et de son stade de développement végétatif ;

$ETP$ évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle en mm ;

$E_a$ est l'efficience du réseau et $B_n$ besoins nets en mm ou en $m^3$/ha.

Nous avons effectué un assolement des spéculations afin d'obtenir une plus grande précision de ces besoins en eau. Le mois de décembre a été retenu comme période de début de la campagne. La campagne agricole s'étant de Décembre à Avril, soit cinq (05) mois.

- **Besoins pastoraux**

En Afrique subsaharienne, on décompte le bétail en UBT (Unité de Bétail Tropical). Un (01) bovin équivaut à un (01) UBT, de même que cinq (05) caprins et cinq (ovins). Dans le cas où on doit tenir compte d'un bétail transhumant, on peut considérer qu'un animal ne peut s'abreuver à une réserve que s'il pâture à moins de 10 km du barrage soit 30000 ha concentrique à la retenue. En zone sahélienne, la densité de bétail est d'une (01) bête pour 5 ha soit 6000 bêtes au total (LO, 2016). Les besoins en eau pastoraux ont donc été évalués en tenant compte

de cette hypothèse ci-dessus en plus de la population animale donnée par le PCD 2014-2018 de la commune de Dargo.

Les besoins en eau de divers animaux en divers situations sont donnés en ANNEXES 1.2 à la page 82.

- **Besoins humains**

Les besoins humains sont ici dans le sens des activités sociales (ménages, confections des briques pour les habitations, etc…). Ces besoins sont ceux de la population du village Yaongo et environnant. Ils ont été estimés à 15 litres par jour par habitant.

### II.2.5.2. Evaluation des pertes en eau

- **Pertes par infiltration**

Dans le cas général, les pertes d'eau par infiltration dans la cuvette ou au travers de la digue sont limitées et on peut les estimer à une tranche d'eau de l'ordre de 10 % de la hauteur utile de la réserve (KARAMBIRI & GUEYE, 2006). On s'accorde sur des valeurs d'infiltration de 1 à 3 mm/j en moyenne (LO, 2016). La valeur moyenne de 1 mm/j a été considérée en raison de l'état d'ensablement du barrage par les dépôts solides depuis sa construction.

- **Pertes par évaporation**

Les pertes par évaporation ont été calculées en utilisant le bac de classe « A ». B POUYAUD de l'ORSTOM a, dans ses travaux de recherche, trouvé une relation entre l'évaporation d'une retenue et l'évaporation du bac de classe « A » (LO, 2016). Cette relation est donnée par l'équation 16 :

$$E_{ret} = 1{,}664 * (E_{bacA})^{0{,}602} \qquad (Eq.16)$$

Où, $E_{ret}$ est l'évaporation au niveau de la retenue en mm/j ;

$E_{bacA}$ est l'évaporation au niveau du bac de classe « A » en mm/j.

Les données d'évaporation utilisées ont été celle de la station synoptique de Ouagadougou.

### II.2.5.3. Evaluation des dépôts solides

L'eau qui se dépose sur les bassins versants entraine avec elle des matériaux solides qu'elle arrache tout au long de son parcours. Ces matériaux se déposent dès que la vitesse de l'eau devient inferieur à un certain seuil. La grandeur associée à la quantification des dépôts solides est la dégradation spécifique exprimée en $m^3/km^2/an$ (DURAND et al, 1999). La dégradation spécifique (D) peut être déterminée par les équations 17, 18 et 19 :

- La formule de GOTTSCHALK

$$D = 260 * S^{-0,1} \qquad (Eq. 17)$$

Où, D est la dégradation spécifique en $m^3/km^2/an$ ;

*S* est la superficie du bassin versant.

- La formule de GRESILLON (CIEH-EIER)

$$D = 700 * \left(\frac{P}{500}\right)^{-2,2} * S^{-0,1} \qquad (Eq. 18)$$

Où, D est la dégradation spécifique en $m^3/km^2/an$ ;

*P* est la pluviométrie moyenne annuelle en mm ;

*S* est la superficie du bassin versant en km².

- La formule de KARAMBIRI

$$D = 137 * \left(\frac{P}{700}\right)^{-2,02} * S^{-0,05} * [0,25 + 1,13 * (h + r)]^{1,15} \qquad (Eq. 19)$$

Où, D est la dégradation spécifique en $m^3/km^2/an$

*P* est la pluviométrie moyenne annuelle en mm, *S* est la superficie du bassin versant en km² ;

*h* est un paramètre anthropique et *r* est un paramètre morphologique.

Dans le cadre de cette étude, la quantité de dépôts solides a été calculée avec la formule de KARAMBIRI parce que la valeur obtenue avec cette formule est très proche de la valeur moyenne des trois formules.

Le volume annuel des dépôts solides est donné par l'équation 20 :

$$V = D * S \qquad (Eq. 20)$$

Où, *V* est le volume de dépôts solides en $m^3$, *D* est la dégradation spécifique en $m^3/km^2/an$ et *S* est la surface du bassin versant en $km^2$.

#### II.2.5.4. Evaluation des apports liquides

Les apports liquides ont été évalués par la méthode Rodier. Cette méthode consiste à identifier, dans le catalogue des bassins-type, celui ou ceux ayant les caractéristiques les plus voisins du

bassin étudié pour estimer ainsi l'écoulement annuel de ce dernier. Les bassins types sont sélectionnés en fonction du régime hydrologique, de la superficie du bassin, des caractéristiques du sol et de la physiographie du bassin (FAO 54, 1996). Le volume d'écoulement annuel associé à un quantile a été calculé par l'équation 21 :

$$Ve_{quantile} = Ke_{quantile} * P_{quantile} * S * 10^3 \qquad (Eq. 21)$$

Où, $Ve_{quantile}$ est le volume écoulé associé au quantile en $m^3$ ;

$P_{quantile}$ est la pluviométrie moyenne associée au quantile en mm ;

$Ke_{quantile}$ est le coefficient d'écoulement annuel en % associé au quantile (déterminé en fonction du bassin type) ;

$S$ est la superficie du bassin versant en km².

### II.2.5.5. Calcul du volume de la retenue

De l'analyse des résultats de l'étude topographique, nous avons tracé la courbe hauteur volume et la courbe hauteur surface du barrage. Le volume du barrage peut être évalué à partir de l'équation 22 :

$$V_{n,n+1} = \left(\frac{S_n + S_{n+1}}{2}\right) * h \qquad (Eq. 22)$$

Où, $V_{n,n+1}$ est le volume partiel entre deux surfaces consécutives (correspondant à deux cotes consécutives)

$S_n$ est la surface correspondante à la cote $n$ en $m^2$ et $S_{n+1}$ est la surface correspondante à la cote $n+1$ en m² ;

$h$ est la dénivelée entre la cote $n$ et la cote $n+1$.

Le volume de la retenue à une cote donnée est obtenu en faisant la somme des volumes partiels jusqu'à cette cote.

### II.2.5.6. Simulation de l'utilisation de la retenue

La simulation de l'utilisation de la retenue a été réalisée à partir de la courbe hauteur volume du barrage. Le tracé a consisté, partant de la date de la retenue pleine, à retrancher les divers besoins ou pertes correspondants à un intervalle de temps choisi (un mois par exemple). En opérant ainsi de proche en proche on détermine la période pendant laquelle on peut utiliser l'eau de la retenue et les ajustements éventuels (LO, 2016). Il permet d'optimiser la gestion de la retenue.

### II.2.6. Conception et dimensionnement des ouvrages du barrage

Cette étape a consisté au dimensionnement des ouvrages constitutifs du barrage au regard des résultats de l'étude diagnostique et des résultats de l'étude géotechnique.

#### II.2.6.1. Choix du type de barrage

Le barrage existant est en terre homogène et la disponibilité des matériaux argileux (études géotechnique) nous permet de le conserver pendant la réhabilitation.

#### II.2.6.2. La digue du barrage

Au regard des résultats de l'étude diagnostique et des vérifications de la conception de la digue, une réhabilitation s'impose et les travaux de celle-ci concernent surtout la crête entière, le talus aval en entier et le talus amont en rive droite. Les éléments de dimensionnement sont les suivants :

- **La hauteur de la digue**

La hauteur de la digue (du barrage) a été calculée par l'équation 23 :

$$H_{digue} = H_{PEN} + h + R \qquad (Eq.23)$$

Où, $H_{digue}$ est la hauteur de la digue (m) et $h$ est la charge au-dessus du déversoir (m) ;
$H_{PEN}$ est la hauteur du plan d'eau normal (m) et $R$ est la revanche (m).
La revanche a été calculée par l'équation 23 :

$$R = 0{,}75 * h_v + \frac{V^2}{2g}$$

$V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} * h_v$ (Formule de GAILLARD)

$h_v = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} * \sqrt{f}$ (Formule de MALLET PACQUANT)

Où, $R$ est la revanche en m ; $V$ est la vitesse des vagues en m/s ; $h_v$ est la hauteur des vagues ;
$f$ est la plus longue distance entre la cuvette et l'axe de la digue en km (Fetch) ;
$g$ est l'accélération de la pesanteur en m/s$^2$.

- **La largeur en crête**

La largeur en crête a été calculée avec les équations 24 et 25 :

$l_c = 1{,}65 * \sqrt{H_{digue}} \qquad (Eq.24)$ (Formule de KNAPPEN)

$l_c = 1{,}1 * \sqrt{H_{digue}} + 1 \quad (Eq.25)$ (Formule de PREECE)

Où, $l_c$ est la largeur en crête (m) et $H_{digue}$ est la hauteur de la digue (m).

- **Stabilité des pentes**

Les pentes des talus ont été retenues en fonction la vérification de la stabilité de celles-ci. Cette vérification a été réalisée avec Geoslope. Néanmoins pour le predimensionnement, les pentes ont été définies en fonction de la hauteur du barrage. Le tableau fourni en ANNEXES 1.3 à la page 88 proposé dans *Technique des Petits Barrages en Afrique Sahélienne et Equatorienne*, donne les fruits indicatifs des talus des barrages stables.

- **Etanchéité de la digue**

Les perrés maçonnés sur le talus amont de la digue assurent la fonction d'étanchéité pour celle-ci, néanmoins un drain placé sous le talus aval pour tenir compte des éventuelles fuites à travers la digue. Le tapis drainant est la solution traditionnellement adoptée pour assurer le drainage d'un remblai homogène. Ce tapis drainant une longueur telle que $\frac{1}{4} * l_f \leq L_d \leq \frac{1}{3} * l_f$ (DURAND et al, 1999). Nous avons donc un massif homogène avec drain horizontal. Ce cas de figure est régi par le système d'équation 26 :

$$\begin{cases} y_0 = [H_r^2 + d^2]^{\frac{1}{2}} - d \\ X = l_f - l_d \\ d = X - 0{,}7 * b \end{cases} \qquad (Eq.26)$$

Où, $H_r$ est la hauteur déversante (m), $l_f$ est la largeur de fond de la digue (m) ;
$l_d$ est la longueur du drain (m).

L'épaisseur du drain peut être calculé par l'équation 27 et 28 :

$$e = 2 * \sqrt{\frac{q * l_d}{K_d}} \qquad (Eq.27) \qquad \text{avec} \quad q = K_r * y_0 \qquad (Eq.28)$$

Où, $e$ est l'épaisseur du drain (m), $K_d$ est la perméabilité du drain en m²/s ;
$q$ est le débit de fuite en m³/s, $K_r$ est la perméabilité du remblai homogène ;

#### II.2.6.3. L'évacuateur de crue

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'évacuation de la crue de projet calculée dans l'étude hydrologique. En effet même si un barrage retient les écoulements, il doit aussi conserver la capacité d'évacuer les crues exceptionnelles (DURAND et al, 1999). L'évacuateur de crue sera constitué d'un déversoir, d'un bassin de dissipation, d'enrochements pour la protection aval du bassin et d'un chenal d'évacuation. Une image d'ensemble d'un déversoir et bassin de dissipation est présenté en ANNEXES 1.5 à la page 97.

❖ **Le déversoir**

Nous avons considéré deux types de déversoirs à savoir le déversoir radier (cas actuel du barrage) et le déversoir poids pour leurs grands nombres au Burkina Faso et la maîtrise de leurs constructions au niveau national. Ces deux types de déversoirs sont présentés en ANNEXES 1.4 à la page 93.

▪ **Choix du type de déversoir**

Des résultats de l'étude diagnostique du barrage, il ressort que le remblai compacté (sous le béton du déversoir) est dégradé. En effet l'érosion régressive de celui-ci avec départ de matériaux observée dans cette partie représente une menace pour l'ouvrage entier. Ainsi deux cas de figure se présentent pour la réhabilitation du déversoir :

- Une réhabilitation du déversoir en place (type radier) à partir d'une reprise du compactage du remblai tout entier avec reprise des plots dégradés ;
- Un remplacement du déversoir radier par un déversoir poids à section trapézoïdale.

Le choix s'est porté sur le deuxième cas à savoir le déversoir poids à section trapézoïdale pour les raisons suivantes :

- Bien qu'il peut exiger d'importante quantité de béton, il a la particularité d'être entièrement en béton ce qui écarte les dégradations liées à l'érosion du remblai du déversoir radier et les dispositions difficiles de construction de ce dernier ;
- Aussi le fait que la digue reçoive des charges des véhicules fragilise sa résistance et cela se ressent le plus sur la partie déversante. Chose qui explique que malgré une réhabilitation réalisée en 2013 (six ans aujourd'hui), le déversoir et le bassin de dissipation sont en mauvais état.

Le dimensionnement du déversoir poids passera par un laminage de la crue de projet. En effet, tenir compte de l'effet de laminage permet de réduire la longueur du déversoir sans augmenter le risque de submersion du barrage (LO, 2016).

- **Laminage de la crue**

La méthode utilisée pour le laminage de la crue a été celle du « $X_0$ » encore appelée méthode EIER-CIEH dans laquelle l'effet de laminage peut être évalué sous la forme d'un coefficient β tel que (équation 29) :

$$\beta = {Q_{cmax}}/{Q_{e\,max}} \qquad (Eq.29)$$

Où, $Q_{cmax}$ est le débit maximum et $Q_{emax}$ est le débit maximum évacué.

La valeur de β est fonction de $\log_{10}x_0$ avec $x_0$ calculé par l'équation 30. Elle est lue sur un tableau donné dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 77.

Avec $$x_0 = \frac{m^2 * g * L_1^2 * Q_{c\,max} * t_m^3}{S^3} \qquad (Eq.30)$$

Où, $L_1$ est la longueur approchée de déversoir (m) $L_1 = \frac{Q_{cmax}}{m*h*\sqrt{2*g*h}}$

$h$ est la charge maximum sur le seuil, $S$ est la surface du plan d'eau, $g$ = 9,81 m/s² ;

$m$ est le coefficient de débit de l'évacuateur, $t_m$ est le temps de montée (s) ;

$Q_{cmax}$ est le débit de pointe de la crue (m³/s).

Le principe consiste à calculer les paramètres $L$, $\beta$ et $x_0$ par itération successive jusqu'à obtenir une valeur convergente de L qui sera retenue comme longueur du déversoir.

- **Etude de la stabilité du déversoir**

Le déversoir poids est comme un barrage poids, il doit donc pouvoir résister à la poussée de l'eau et être stable vis-à-vis du renversement ainsi que du glissement sur la fondation (stabilité externe). Il doit également vérifier la stabilité interne du massif (DURAND et al, 1999). Les conditions de stabilité du déversoir sont données dans le Tableau 3.

*Tableau 3 : Conditions de stabilité du déversoir*

| Désignation | Condition de stabilité |
|---|---|
| Stabilité au glissement | $$F_{sg} = \frac{W-U}{P_t+P_e} * \tan\varphi \geq 1{,}2$$ $F_{sg}$ est le facteur de sécurité vis-à-vis du glissement ;<br>$W$ est le poids propre du déversoir ;<br>$U$ est force des pressions interstitielles ;<br>$P_t$ est la poussée des terres ;<br>$P_e$ est la poussée de l'eau ;<br>$\varphi$ est l'angle de frottement interne du matériau |
| Stabilité au renversement | $$F_{sr} = \frac{M_{/B}(W-U)}{M_{/B}(P_t+P_e)} \geq 1{,}5$$ $F_{sr}$ est le facteur de sécurité vis-à-vis du renversement<br>$M_{/B}(W-U)$ est le moment des forces stabilisantes ;<br>$M_{/B}(P_t+P_e)$ est le moment des forces renversantes. |
| Stabilité vis-à-vis de la rupture | $$\sigma_{max} \leq \sigma_{lim,beton}$$ $\sigma_{lim,beton} = 0{,}3 * f_{c28}$ et $\sigma_{max} = \frac{(W-U)}{b} * \left(1 + \frac{6*\lvert e\rvert}{b}\right)$<br>$\sigma_{max}$ est la contrainte maximale de l'ouvrage ;<br>$\sigma_{lim,beton}$ est la contrainte limite du béton utilisé. |
| Stabilité vis-à-vis de la fissuration | $\lvert e\rvert \leq \frac{b}{6}$ avec $e = X_{Gouv} + Y_{Gouv} * \left(\frac{P_t+P_e}{W-U}\right) - \frac{b}{2}$<br>($X_{Gouv}$ , $Y_{Gouv}$ ) sont les coordonnées du centre de gravité du déversoir ;<br>$e$ est l'excentricité et $b$ est la base du déversoir (trapézoïdal) |

Dans le souci d'optimiser la quantité de béton, le calcul des paramètres du tableau est fait en fonction d'un angle α qui représente l'inclinaison du talus aval. Optimiser la quantité de béton revient alors à considérer la plus faible valeur de cet angle qui permet de vérifier les stabilité externe et interne de l'ouvrage.

- **Le bassin de dissipation**

Notre choix s'est porté sur les bassins à ressaut car ils font partie des plus employés dans notre contexte selon COMPAORE (1996). Ces bassins sont caractérisés par le nombre de Froude et la vitesse d'entrée de l'eau. Pour le dimensionnement des éléments constitutifs de ce bassin,

nous avons utilisé les abaques proposés par GRESILLON et LAHAYE dans l'ouvrage Techniques de Petits Barrages en Afriques Sahélienne et Equatoriale.

Le nombre de Froude est calculé par l'équation 31 :

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * y_1}} \qquad (Eq.31)$$

Où, $V$ est la vitesse d'entrée du ressaut (m/s) et $y_1$ est le tirant d'eau à l'entrée du ressaut.
$V$ et $y_1$ sont liés par la formule de GRESILLON (équation 32) :

$$\begin{cases} V = \sqrt{2g\left(0{,}9 * \left(H + h + \frac{{V_0}^2}{2g}\right) - y_1\right)} \\ y_1 = \frac{Q}{L' * V} \end{cases} \qquad (Eq.32)$$

Où, $Q$ est le débit laminé ($m^3/s$), $L'$ est la longueur du déversoir (m) ;
$H$ est la hauteur du déversoir et $h$ est la lame d'eau au-dessus du seuil.

- **Le chenal d'évacuation**

Pour le dimensionnement du chenal, la formule utilisée a été celle de Manning Strickler (équation 33) :

$$Q = K_s * S * R_H^{2/3} * \sqrt{I} \qquad (Eq.33)$$

Où, $Q$ est le débit en $m^3/s$, $K_s$ est le coefficient de rugosité de Strickler ;
$R_H$ est le rayon hydraulique (m), $I$ est la pente du chenal ;
$S$ est la surface mouillée et $P$ le périmètre mouillé.

- **Protection aval du bassin**

La méthode de dimensionnement utilisée a été celle recommandée par SOGREAH à travers des abaques donnant le diamètre des enrochements en fonction de la vitesse à l'aval du seuil. Ces abaques sont présentés en ANNEXES 1.1.

#### II.2.6.4. Le mur bajoyer

Nous avons procédé à un prédimensionnement de l'ouvrage à travers un abaque (ANNEXES 1.1 à la page 99). Les éléments de vérification de la stabilité externe sont donnés dans le Tableau 4. Le dimensionnement de l'ouvrage a été réalisé sur le logiciel CYPE. La vérification de la stabilité interne a été faite en comparant les aciers obtenus aux aciers forfaitaires (conditions de non fragilité du béton) donné au Tableau 5.

*Tableau 4 : Conditions de stabilité externe du mur Bajoyer*

| Désignation | Condition de stabilité |
|---|---|
| Stabilité vis-à-vis du glissement | $F_{sg} = \frac{C' * B + \sum F_V * \tan\delta}{\sum F_H} \geq 1{,}5$<br>$F_{sg}$ est le facteur de sécurité vis-à-vis du glissement ;<br>$\sum F_V$ est la somme des forces verticales ;<br>$\sum F_H$ est la somme des forces horizontales ;<br>$C'$ est la cohésion du sol en contact avec la base ;<br>$B$ est la base du mur ;<br>$\delta$ est l'oblicité de la résultante des forces. |
| Stabilité vis-à-vis du renversement | $F_{sr} = \frac{M_S}{M_R} \geq 1{,}5$<br>$F_{sr}$ est le facteur de sécurité vis-à-vis du renversement<br>$M_S$ est le moment des forces stabilisantes ;<br>$M_R$ est le moment des forces renversantes. |
| Stabilité du sol de fondation | $\lvert e \rvert \leq \frac{B}{4}$ avec $e = \frac{B}{2} - \frac{M_S - M_R}{\sum F_V}$<br>$e$ est l'excentricité et $B$ est la base du mur |

*Tableau 5 : Conditions de stabilité interne du mur Bajoyer*

| **Désignation** | **Conditions de stabilité** |
|---|---|
| Vérification des aciers horizontaux en face arrière | $A_h \geq 0{,}10e_1$ |
| Vérification des aciers horizontaux en face avant | $A_h \geq 0{,}075e_1$ |
| Vérification des aciers verticaux en face arrière | $A_v \geq 0{,}10e_1$ |
| Vérification des aciers de répartition du patin | $A_r \geq 0{,}10e_2$ |
| Vérification des aciers de répartition du talon | $A_r \geq 0{,}10e_2$ |

#### II.2.6.5. La digue de protection

Cette digue est réalisée pour la protection de l'aménagement hydroagricole qui se trouve à l'aval du barrage en rive gauche. Elle sert également de passage pour les petits véhicules et les cyclomoteurs. Elle est dimensionnée comme la digue du barrage.

#### II.2.6.6. L'ouvrage de prise

Dans notre cas, l'ouvrage de prise aura un double rôle. Il s'agit de prise d'eau pour l'irrigation du périmètre à l'aval et d'ouvrage de vidange du réservoir. La cote de la prise a été calée à partir des résultats de la simulation de l'utilisation du barrage et de manière à satisfaire les besoins en eau. Le diamètre de la prise a été calculé par la formule de Torricelli (équation 34) :

$$D^2 = \frac{4 * Q}{c * \pi * \sqrt{2gH}} \qquad (Eq.34)$$

Avec *D* diamètre de la conduite en mm ;

*Q* est le débit en tête du réseau d'irrigation en $m^3/s$ ;

*c* est le coefficient de Torricelli ;

*H* est la charge au-dessus de la prise.

#### II.2.6.7. Coût de la réhabilitation

Le coût de cette réhabilitation a été estimé à partir du métré des différents travaux qui nous a permis de faire le devis quantitatif. Les différents prix obtenus auprès du bureau d'étude ont été utilisé pour faire le devis estimatif. Le détail des calculs est présenté en ANNEXES 3 à la page 108.

## II.3. Synthèse des études de bases

### II.3.1. Etudes géotechniques

❖ **Sol de fondation sous la digue**

Le long de l'axe de la digue, quatre (04) sondages de 0,50 m ont été effectués sur la digue dont deux sur la crête et deux sur le talus aval. Les caractéristiques du sol de fondation sont les suivantes :

- Suite à de la terre plus ou moins meuble en surface, nous avons du sable argileux jaunâtre ;
- Au niveau du lit mineur, le sol est essentiellement constitué de sable argileuse blanchâtre en surface et d'argile peu plastique à forte compacité en profondeur.
- En rive droite, nous avons du sable argileux jaunâtre suivi de sable argileux blanchâtre.

La digue du barrage ne présente aucune fuite d'eau apparente à l'aval, chose qui prouve que l'étanchéité assurée par les perrés maçonnés en amont fonctionne normalement.

❖ **Sol de fondation sous le déversoir**

Un sondage de 2,40 m a été effectué sur le talus aval du déversoir. Ce sondage a révélé qu'il y a une présence de fuite d'eau au niveau du remblai sous le déversoir. Il a dont e été proposé de :

- Procéder à l'enlèvement du béton du déversoir, colmater les parties érodées du corps du déversoir ;
- Réaliser un clef aval tout le long du déversoir afin d'arrêter les fuites d'eau ;
- De reprendre entièrement le déversoir.

❖ **Zone d'emprunt de matériaux**

Des zones d'emprunt de matériaux pour la réhabilitation du barrage ont été identifiés comme suit :

- Une zone d'emprunt latéritiques a été identifié à 3,8 km de la digue du barrage à 250 m de la route Yaongo-Dargo avec une superficie de 100 m sur 100 m d'épaisseur exploitable de 65 cm. Ses coordonnées GPS sont 30P 0797208 / 1399503 ;
- Une zone d'emprunt argileuse qui se situe dans la cuvette à partir de 150 m du déversoir sur une superficie de 200 m sur 300 m d'épaisseur exploitable de 50 à 70 cm
- Du sable qui se situe à environ 1,50 km en amont de la digue dans une grande ravine ;
- Du gravier latéritique roulé tout au bord d'une colline située à 4,50 km à l'est du barrage ;

- Des moellons latéritiques qui se trouvent sur des collines situées à 1,2 km en aval du barrage.

### II.3.2. Etude socio-économique

❖ **L'agriculture**

L'agriculture de la commune de Dargo est caractérisée par une prédominance de l'agriculture familiale avec un faible niveau d'équipement et d'utilisation d'intrants (engrais, semences améliorée et pesticides). C'est une agriculture à forte dominance pluviale. L'agriculture irriguée est présente seulement au niveau des aménagements hydroagricoles réalisés autour des retenues d'eau de Dargo et de Yaongo. Cette agriculture présente des rendements faibles qui plongent chaque année les ménages dans une situation d'insécurité alimentaire. Les spéculations produites dans la commune sont le mil, le sorgho, le maïs, le riz, l'arachide, le sésame et le voandzou pour la saison pluviale. Pour les aménagements hydroagricoles on rencontre le riz, la tomate, l'oignon, le chou, l'aubergine …etc. les Tableau 6 et Tableau 7 ci-dessous présentent respectivement la production céréalière et la production maraichère en 2012.

*Tableau 6 : Superficies cultivées et rendements des principales cultures en 2012*

| Cultures | Mil | Sorgho | Maïs | Riz pluvial | Riz irrigué | Niébé | Arachide | sésame |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Superficie (ha) | 1500 | 2300 | 490 | 500 | 35 | 1500 | 1400 | 100 |
| Rendement (t/ha) | 1 | 1,5 | 3 | 2 | 3,5 | 1,2 | 2 | 1 |
| Production (t) | 1500 | 3450 | 1500 | 1000 | 122,5 | 1800 | 2800 | 100 |

***Source :*** *PCD 2014-2018 de la commune de Dargo*

*Tableau 7 : Production maraichères en 2012*

| Cultures | Chou | Tomate | Oignons | Aubergine | Autres |
|---|---|---|---|---|---|
| Superficie (ha) | 3,5 | 38 | 8 | 0,75 | 2,5 |
| Rendement (t/ha) | 30 | 17,5 | 14 | 8 | 1 |
| Production (t) | 105 | 665 | 112 | 6 | 2,5 |

***Source :*** *PCD 2014-2018 de la commune de Dargo*

❖ **L'élevage**

L'élevage demeure la seconde activité économique après l'agriculture. C'est un élevage généralement extensif. Le bétail sur pied est commercialisé sur le marché de bétail de Yaongo qui représente un point de collecte et acheminé et commercialisé sur le marché de Pouytenga. Le Tableau 8 ci-après présente l'effectif du cheptel commercialisé de 2010 à 2012.

*Tableau 8 : Effectif du cheptel commercialisé entre 2010 et 2012*

| Année | Espèces vendues | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Bovins | Ovins | Caprins | volaille |
| 2010 | 963 | 2934 | 3801 | 24321 |
| 2011 | 1099 | 3825 | 2542 | 19910 |
| 2012 | 1410 | 3112 | 3845 | 25674 |
| Total | 3472 | 9871 | 10188 | 69905 |

***Source :*** *PCD 2014-2018 de la commune de Dargo*

### II.3.3. Notice d'impact environnementale et sociale (NIES)

La réalisation des travaux de réhabilitation du barrage affectera des éléments de l'environnement qui sont entre autre le sol, les ressources en eau, la végétation (faune, flore), l'air et les populations riveraines.

#### ❖ Impacts négatifs

Les impacts négatifs les plus significatifs des travaux sont les suivants :

- La pollution de l'aire à travers la poussière et les gaz d'échappement des engins ;
- La détérioration du couvert végétal par la coupe d'arbres dans l'emprise du projet ;
- La détérioration du sol à travers l'érosion et le tassement du sol tout le long du trajet des engins ;
- Les nuisances sonores provoquées par les engins ;
- La destruction des biens privés et des habitations situés dans l'emprise du projet ;
- La pollution de l'eau du barrage par les hydrocarbures et les matières en suspensions ;
- Perturbation de la circulation par le déplacement des engins.

En terme de réponse à ces impacts négatifs, des mesures d'atténuation ont été identifiées et analysées. Elles seront données dans le plan de gestion environnemental en ANNEXES 2 à la page 102.

- **Impacts positifs**

La réalisation du projet aura des impacts positifs qui sont les suivants :

- L'intensification de la production agricole ;
- L'accroissement des revenus des producteurs ;
- La contribution à la sécurité alimentaire ;
- La création d'emploi ;
- L'amélioration des conditions de vies des populations de la zone du projet.

- **Composante du plan de gestion environnementale et sociale**

Pour tenir compte des impacts négatifs et réduire leurs impacts sur l'environnement, le plan de gestion s'articule sur trois axes à savoir :

- Des mesures d'atténuations, de compensations et de bonification des impacts du projet ;
- Un programme de surveillance environnemental ;
- Un plan de suivi environnemental.

Ce plan est présenté en ANNEXES 2 à la page 102.

# III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

## III.1. Etude diagnostique du barrage

### III.1.1. Etat actuel du barrage

L'état du barrage a été apprécié à travers la visite du site. Elle a permis d'apprécier l'état physique du barrage et des ouvrages annexes. Elle a aussi permis de constater l'ampleur des dégâts sur le barrage.

#### III.1.1.1. La cuvette du barrage

A la date du 30 mars 2019, il y avait toujours de l'eau dans le barrage. La partie de la cuvette au droit de la digue est assez nue (absence d'arbres) de façon générale. Sur les berges, on rencontre quelques arbustes et des ravines bien marquées qui peuvent entrainer des départs important de matériaux solides vers la cuvette du barrage. La cuvette n'est pas utilisée comme zone d'emprunt pour les usages de la population.

#### III.1.1.2. Etat de la digue

Nous avons en place une digue routière en terre homogène d'une largeur en crête de 3 mètres et d'une longueur de 693 mètres (avec déversoir).

- **Couronnement du remblai**

La crête du remblai des rives gauche et droite présente des affaissements et de légères dépressions par endroits avec un pendage moins marqué. Nous avons constaté une absence de murets de crête sur toute la digue. Le couronnement ne présente pas de fissures. La jonction entre le couronnement et le parement amont en rive droite présente quelques anomalies caractérisées par une désolidarisation entre les perrés maçonnés et le remblai.

- **Le parement amont**

Le parement amont est protégé en perrés maçonnés sur les rives gauche et droite. Il est en place et en bon état dans son ensemble. Néanmoins on remarque la présence de quelques arbustes en rive gauche.

- **Le parement aval**

Le parement aval n'est pas protégé dans son ensemble. Seulement le bloc technique est protégée en perré maçonné. En rive droite, on constate des dégradations moyennement prononcées. Par contre en rive gauche, les dégradations sont très prononcées avec des profondeurs allant jusqu'à 25 cm. Ces dégradations sont caractérisées par la présence de griffes d'érosions, de ravines au

pied du talus et d'arbustes sur le parement. Il n'existe pas de zone humide sur le parement. Le fossé de pied n'est pas visible.

L'état des dégradations observées sur toute la digue sont présentées à la Figure 4.

***a- Désolidarisation entre la couronne et le talus amont***

***b- Talus aval en rive droite sans protection***

***c- Griffes d'erosions sur le talus aval rive gauche***

***d- Le talus aval en rive droite érodé***

*Figure 4 : Dégradations de la digue du barrage*

### III.1.1.3. Etat de l'évacuateur de crue

L'évacuateur de crue est un déversoir de type radier long de 211 m, fondé sur du remblai compacté avec dalle en béton armé sur la crête et sur les talus amont et aval (constitué de plots alternés). La jonction entre la digue et le déversoir est faite par une rampe en béton armé longue de 10 mètres de part et d'autres. Les joints du déversoir sont en béton bitumineux.

- **Etat des plots**

Les plots de la crête présentent des légers affaissements et des fissures par endroits. Néanmoins sur la partie terminale de la crête, on remarque un décrochement entre deux plots. Les joints de la crête présentent des dégradations moyennes.

Au niveau du talus aval, la deuxième moitié présente des dégradations bien marquées. En effet, elles sont caractérisées par des affouillements au niveau du remblai sous la dalle avec des départs de matériaux, des fissures, l'affleurement des armatures par endroit et le décrochement de certains plots par rapport aux autres. Dans cette partie, les joints sont pour la plupart en bon état sauf à des endroits bien déterminés (les parties de décrochement).

- **Le mur bajoyer**

Le mur bajoyer est en bon état. Le bloc technique en rive droite est aussi en bon état. Mais en rive gauche, la dégradation du talus aval non protégé affecte légèrement le bloc technique.

- **Le bassin de dissipation**

Le bassin de dissipation est un bassin de type II avec une longueur de 4 m et un seuil terminal de 1 m. Il a été réalisé en béton cyclopéen avec des plots de 10 m en moyenne. Il présente des dégradations très avancées sur près de 162 mètres (16 plots) avec des plots cassés. Dans cette partie, le remblai sous le bassin présente des affouillements avec des départs de matériaux. De plus les blocs chicanes sont presque tous arrachés.

- **Les enrochements à l'aval du bassin de dissipation**

Les enrochements à l'aval du bassin de dissipation sont composés de moellons latéritiques. On remarque des départs de moellons latéritiques à travers la dégradation de certaines grilles. Les murets de blocage qui contiennent les enrochements sont dégradés par endroits. On remarque un affaissement du remblai sous les enrochements.

L'état des dégradations observées sur l'évacuateur de crue et le bassin de dissipation sont données respectivement dans les Figure 5 et Figure 6.

***a- Crète du déversoir réparée par les populations***

***b- Décrochement des plots de la crête du déversoir***

***c- Décrochement des plots du talus aval du déversoir***

***d- Dégradation des plots du déversoir***

*Figure 5 : Dégradation du déversoir*

*a- Dégradation du bassin de dissipation*

*b- Affouillement sous le seuil du bassin de dissipation et presence d'eau*

*c- Affaissements des enrochements et affouillements du remblai*

*d- muret de blocage des enrochements cassé*

*Figure 6 : Dégradations du bassin de dissipation et des enrochements*

#### III.1.1.4. Etat des ouvrages annexes

- **Protection aval et chenal d'évacuation**

La protection aval est assurée en rive droite par des enrochements sur une longueur totale d'environ 76 m. On remarque une cassure après les 30 premiers mètres.

En rive gauche, la protection est assurée par une digue de protection tout le long du périmètre irrigué situé en aval rive gauche du barrage. Au droit de l'évacuateur de crue, la digue est protégée par des perrés maçonnés. On y observe une dégradation prononcée sur une dizaine de mètres. Cette digue présente des dépressions sur la crête et des griffes d'érosions sur les talus qui ne sont pas protégés.

- **L'ouvrage de prise**

L'ouvrage de prise est constitué d'un bac amont, d'une conduite en fonte de 300 mm de diamètre et d'un bac aval équipé d'un robinet vanne. Elle présente des fuites d'eau à la jonction avec le canal d'amené du périmètre irrigué.

La Figure 7 présentent les dégradations observées au niveau des ouvrages externes du barrage.

***a- Erosion des terres nues du chenal d'évacuation***

***b- Dégradation des terres nues du chenal d'évacuation***

***c- Digue de protection dégradée***

***d- Perrés maconnés de la digue de protection degradés***

*Figure 7 : Dégradations des ouvrages annexes du barrage*

### III.1.2. Causes probable des dégradations

Les causes de la dégradation des ouvrages du barrage peuvent être d'une part un manque de rigueur technique lors de la mise en œuvre et d'autres part le manque d'entretien.

#### III.1.2.1. La digue

Les dégradations majeures de la digue se trouvent au niveau du parement aval. La protection du talus aval est faite pour lutter contre les eaux de ruissellement qui pourraient causer des ravinements au niveau de celui-ci (DURAND et al, 1999). La présence de griffes d'érosion et de ravinement au niveau du talus se justifie donc par l'absence de cette protection.

#### III.1.2.2. L'évacuateur de crue

Les dégradations majeures de l'évacuateur de crue se situent au niveau du bassin de dissipation et du parement aval du déversoir. Les affaissements et les décrochements observés sur le parement aval et la crête du déversoir peuvent s'expliquer par un mauvais compactage du remblai. Le passage des véhicules sur celui-ci peut aussi être la cause de ces dégradations. Tous ces éléments pourraient provoquer une érosion régressive comme il a été constaté sous le déversoir, chose qui pourrait fragiliser la stabilité de la structure. Cette situation explique la désolidarisation des moellons et leur dispersion ainsi que les affouillements observés.

#### III.1.2.3. Les terres à l'aval du bassin de dissipation

Les ravinements constatés sur les terres à l'aval du bassin de dissipation peuvent s'expliquer par la cassure observée sur les moellons de protection placés en rive droite et la destruction du bassin de dissipation.

Au regard du diagnostic du barrage et de ses ouvrages annexes, une réhabilitation des ouvrages défectueux s'impose. Néanmoins les solutions à apporter seront fonction des résultats de l'étude géotechnique. Elle se feront soit par la reprise totale (ou remplacement) de certains ouvrages, soit par de simples retouches pour d'autres.

## III.2. Etudes hydrologiques

### III.2.1. Caractérisation du bassin versant

La carte du bassin versant du barrage de Yaongo est présentée à la Figure 8.

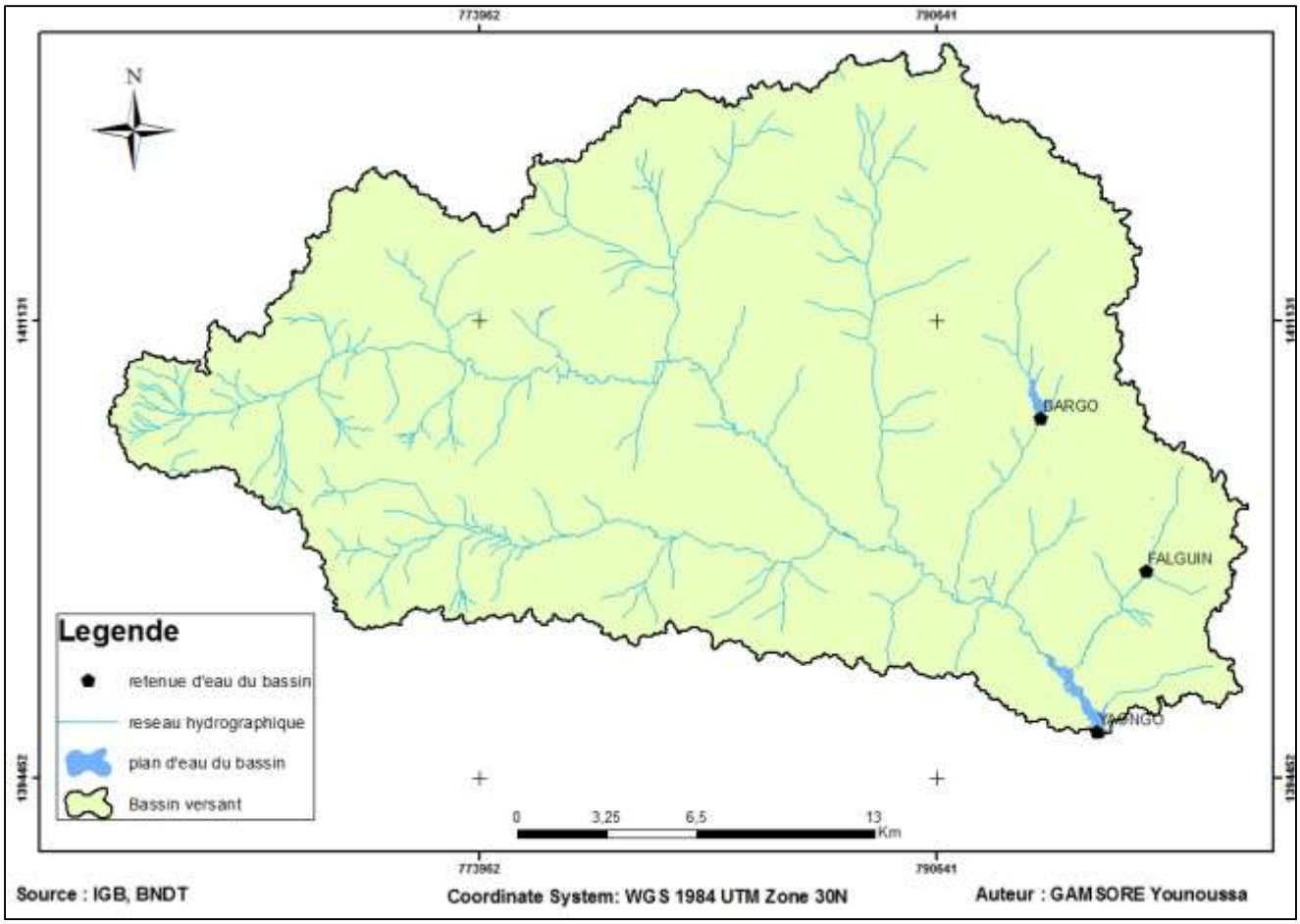



*Figure 8 : Carte du bassin versant du barrage de Yaongo*

Les caractéristiques physiques et morphologiques du bassin versant sont données dans le Tableau 9. Les détails des calculs sont présentés dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 64.

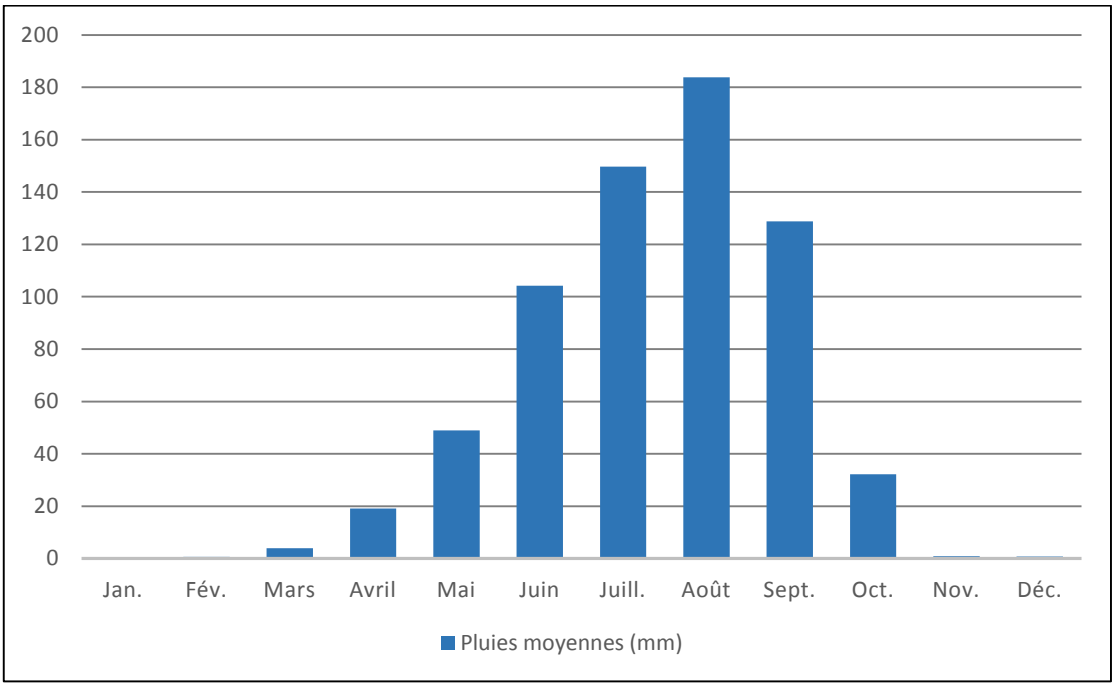
*Tableau 9 : Caractéristiques du bassin versant*

| **Paramètres** | **Unité** | **Valeurs** |
|---|---|---|
| Superficie | km² | 633,80 |
| Périmètre | km | 164,28 |
| Pente moyenne | % | 3,47 |
| Altitude max | m | 363 |
| Altitude min | m | 269 |
| Longueur du réseau | km | 330,00 |
| Longueur cours d'eau principal | km | 47,54 |
| Indice de compacité | - | 1,84 |
| Longueur du rectangle équivalent | km | 73,52 |
| Largeur du rectangle équivalent | m | 8,62 |
| Indice global de pente | m/km | 0,57 |
| Pente transversale moyenne | m/km | 8,98 |
| Indice global de pente corrigée | m/km | 4,84 |
| Dénivelée Spécifique | m | 121,92 |
| Densité de drainage | - | 0,52 |
| Relief | - | Fort |
| Classe d'infiltrabilité | - | RI |
| Hydrographie | - | Dendidrique |
| Classes de pentes | - | R2 |
| Régime hydrologique | - | Régime sahélien |

### III.2.2. Analyse statistiques des pluies

❖ **Distribution des pluies moyennes mensuelles**

La distribution des pluies moyennes mensuelles de la station pluviométrique de Boulsa de 1980 à 2015 montre que l'essentiel des apports pluviométriques est enregistré de Mai à Septembre, ce qui représente environ 92 % de ces apports. Cette distribution est présentée dans le Graphe 1.




*Graphe 1 : Histogramme des pluies moyennes de la station de Boulsa (1980-2015)*

- **Analyse des pluies annuelles**

L'ajustement à la loi normale des pluies moyennes annuelles donne les résultats qui sont résumés dans le Tableau 10. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 66.

*Tableau 10 : Valeurs caractéristiques des pluies annuelles*

| **Périodes sèches** | | **Période de retour (ans)** | **Périodes humides** | |
|---|---|---|---|---|
| **Fréquences** | **Pluies moyenne (mm)** | | **Fréquences** | **Pluies moyennes (mm)** |
| 0,001 | 224,7 | 1000 | 0,999 | 1117,3 |
| 0,01 | 335 | 100 | 0,99 | 1007 |
| 0,02 | 374 | 50 | 0,98 | 967,6 |
| 0,05 | 433,5 | 20 | 0,95 | 908,5 |
| 0,1 | 485,9 | 10 | 0,9 | 856,1 |
| 0,5 | 671 | moyenne | 0,5 | 671 |

- **Analyse des pluies maximales journalières annuelles**

Les résultats de l'ajustement à la loi de Gumbel des pluies maximales journalières sont résumés dans le Tableau 11. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 69.

*Tableau 11 : Valeurs caractéristiques des pluies maximales journalières annuelles*

| **Périodes sèches** | | **Période de retour (ans)** | **Périodes humides** | |
|---|---|---|---|---|
| **Fréquences** | **Pluies moyennes (mm)** | | **Fréquences** | **Pluies moyennes (mm)** |
| 0,01 | 2 | 100 | 0,99 | 189,4 |
| 0,02 | 7 | 50 | 0,98 | 168 |
| 0,05 | 15,1 | 20 | 0,95 | 139,5 |
| 0,1 | 23,2 | 10 | 0,9 | 117,5 |
| 0,5 | 59,9 | moyenne | 0,5 | 59,9 |

### III.2.3. Détermination des crues

#### ❖ Crue de projet

Le Tableau 12 donne les résultats du calcul de la crue de projet. Les détails des calculs sont présentés dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 73.

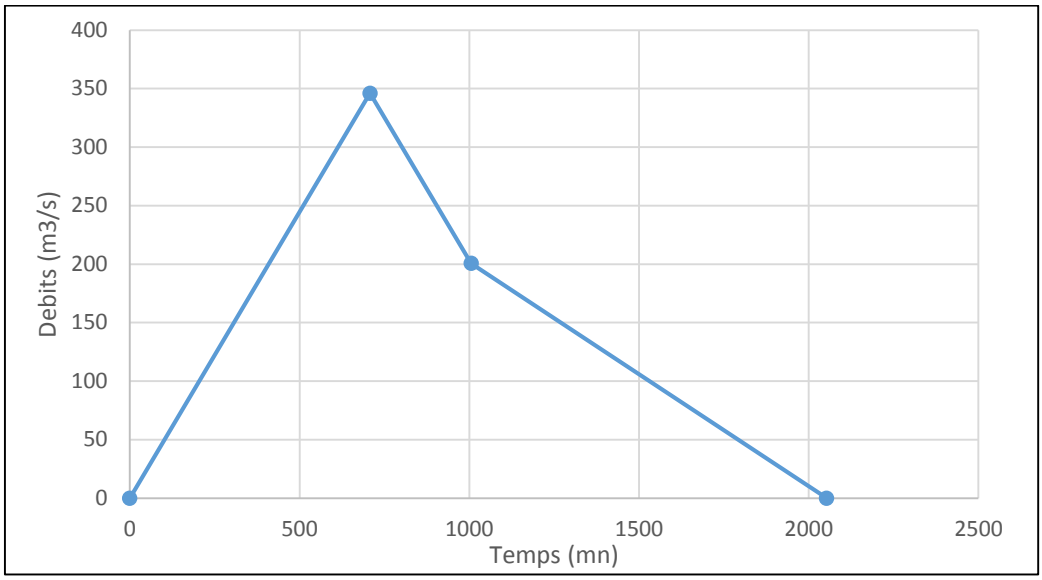
*Tableau 12 : Calcul de la crue de projet*

| **Débit ($m^3/s$)** | **Méthode ORSTOM** | **Méthode CIEH** | **Débit de pointe** | **Coefficient majorateur** | **Débit projet** |
|---|---|---|---|---|---|
| | Q10 | Q10 | Q10 | C | Qp |
| | 144,21 | 134,37 | 144,37 | 2,4 | 346,09 |

La crue de rupture obtenue est de **1449,34 $m^3/s$.**

#### ❖ Hydrogramme de crue

La courbe de l'hydrogramme de la crue du projet est présentée dans le Graphe 2. Les paramètres de tracé de cette courbe sont présentés dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 75.




*Graphe 2 : Hydrogramme de crue du projet*

## III.3. Estimation et exploitation de la retenue

### III.3.1. Evaluation des besoins en eau

Le résultat des calculs des besoins en eau agricoles, pastoraux et humaines (ménages)est confiné dans le Tableau 13. Les détails des calculs sont présentés dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 79.

*Tableau 13 : Besoins en eau par campagne*

| Désignation | Unité | Valeur |
|---|---|---|
| Besoins agricoles | $m^3$ | 254 459,65 |
| Besoins pastoraux | $m^3$ | 75 540,74 |
| Besoins humains | $m^3$ | 19 019,12 |

### III.3.2. Estimation des pertes en eau

Les pertes totales en eau (infiltration et évaporation) dans la cuvette pendant la campagne sont estimées à **1385,86 mm** soit un volume de **1 183 294, 20 m³**. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 82.

### III.3.3. Evaluation des dépôts solides

Le volume des dépôts solides donne une valeur de **99 971,03 m³/ans**. Le volume représente chaque année une perte de capacité du barrage. Cette situation montre un état d'ensablement conséquent. Nous proposerons donc des actions pour réduire ces dépôts solides. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 83.

### III.3.4. Evaluation du volume de la retenue

A travers le traitement des résultats de l'étude topographique de la retenue, nous obtenons des volumes en fonction des altitudes. La courbe hauteur volume et la courbe hauteur surface ainsi obtenues sont présentées dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 84. Le Tableau 14 ci-dessous donne les caractéristiques de la cuvette au plan d'eau normal (PEN).

*Tableau 14 : Caractéristiques de la cuvette du barrage*

| Désignation | Unité | Valeurs |
|---|---|---|
| Cote du PEN | m | 298,50 |
| Volume de la retenue au PEN | $m^3$ | 1 524 635,91 |
| Surface du plan d'eau au PEN | ha | 165,65 |

### III.3.5. Calculs des apports liquides

Selon sa situation géographique et ses caractéristiques, le bassin versant du barrage de Yaongo correspond au bassin type de Boulsa à Niégha (Classification de Rodier) dont les caractéristiques sont les suivantes :

S = 1010 km² ; Ds = 49 m ; Dd = 1,1 km/km² ; Pmed = 775 mm ; Kmed = 3,9 %.

Les résultats du calcul des apports liquides en fonction des périodes de retour sont résumés dans le Tableau 15 ci-dessous. Le détail des calculs est donné dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 83.

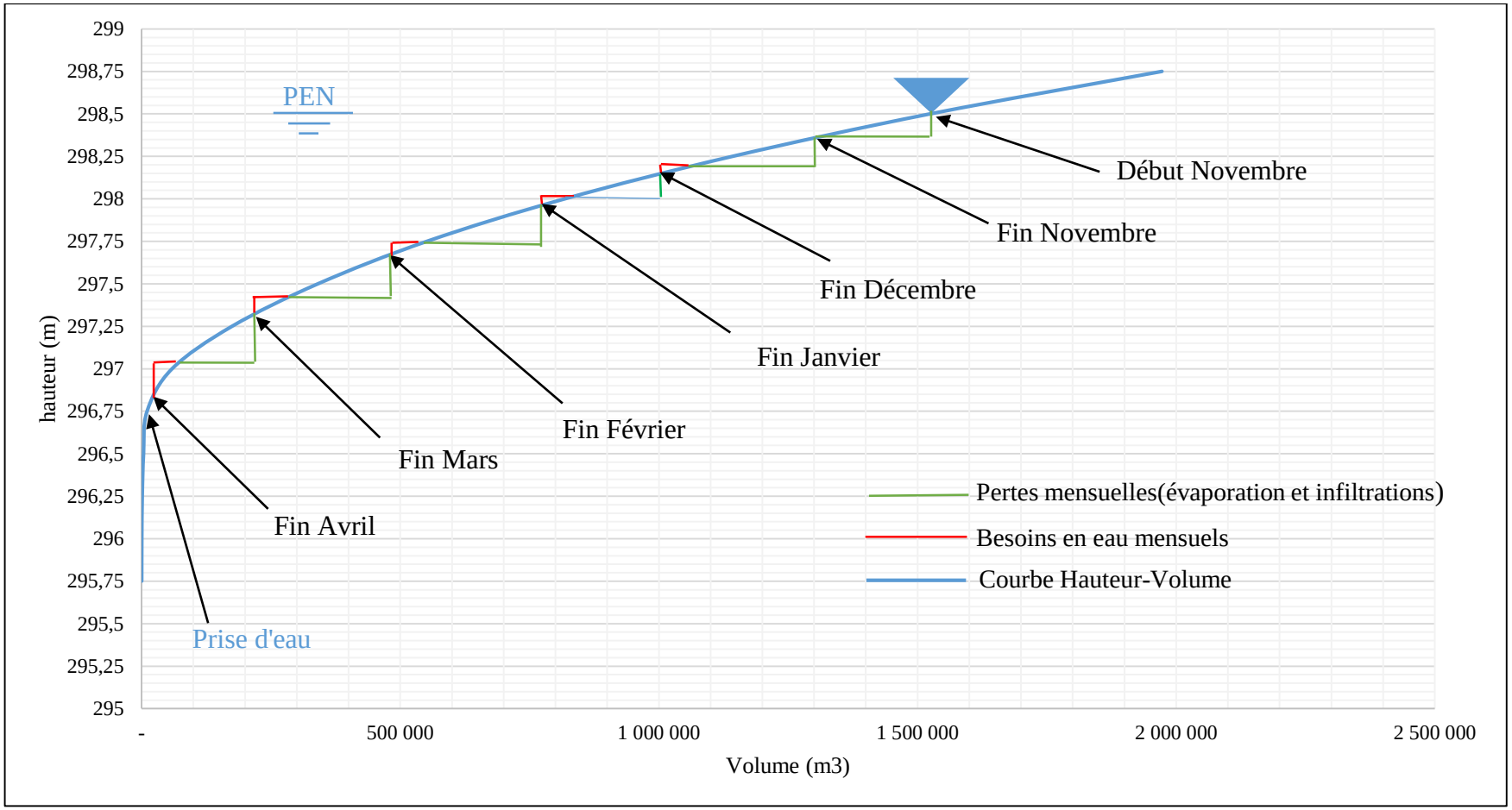
*Tableau 15 : Calcul des apports liquides*

| **Période de retour** | **lame d'eau (mm)** | **Ke (%)** | **Apport liquides ($m^3$)** |
|---|---|---|---|
| Année décennale humide | 60 | 7,01% | 38 028 000 |
| Année moyenne | 30 | 4,47% | 19 014 000 |
| Année décennale sèche | 10 | 2,06% | 6 338 000 |
| Année cinquantennale sèche | 4,6 | 1,23% | 2 915 480 |
| Année centennale sèche | 3,3 | 0,98% | 2 091 540 |

Il ressort que le volume des apports liquides en année décennale sèche qui est de **6 338 000 $m^3$** est supérieur à la capacité de stockage du barrage qui est de **1 524 636 $m^3$**. La disponibilité de l'eau pour le barrage est donc assurée.

### III.3.6. Simulation de l'utilisation de la retenue

La simulation à travers la courbe d'exploitation de la retenue a donné les résultats qui sont présentés au Graphe 3.




*Graphe 3 : Simulation de la retenue*

De la simulation de l'utilisation de la retenue, il ressort qu'au début de la campagne (début décembre), le volume d'eau est estimé à 1 524 635,91 $m^3$. Le barrage dont la capacité diminue au fur et à mesure du temps sous l'effet des pertes totales (besoins en eau, infiltrations et évaporations) se retrouve avec un volume de 927,54 $m^3$ en fin Mai (fin de campagne). A cette période, l'eau est à la cote de 296,81 m. Il se trouve que ce niveau est supérieur à la cote de la prise d'eau qui est de 296,75 m, ce qui montre que l'eau sera disponible pour satisfaire les besoins tant que le remplissage du barrage sera effectif.

Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.2 à la page 85.

## III.4. Vérification de la conception des ouvrages existants

### III.4.1. Vérification de la conception de la digue

❖ **Les pentes des talus**

Les pentes des talus amont et aval sont de l'ordre de 1V/2H. Cette valeur est en adéquation avec la recommandation de J.M. DURRAND dans *Techniques des petits barrages en Afrique occidentale et équatoriale*, car ici la hauteur totale du barrage est inférieure à 5 m (barrage en terre homogène).

❖ **La largeur en crête**

*Tableau 16 : Vérification de la largeur en crête*

| Largeur en crête (m) | Formule de PREECE | Formule de KNAPPEN | Valeur mesurée |
|---|---|---|---|
| | 3,50 | 3,33 | 3,00 |

La largeur en crête n'est pas respectée. Il faudrait donc à la réhabilitation veiller au respect de celle-ci.

### III.4.2. Vérification de la conception de l'évacuateur de crue

La longueur actuelle du déversoir est de 211 m environ. Avec cette valeur, la charge au-dessus du seuil obtenu est de 1,03 m, ce qui est supérieur à la valeur admissible pour ce type de déversoir qui est de compris entre 0,7 et 0,9 m (LO, 2016). La longueur du déversoir devra donc être revue à la hausse.

### III.4.3. Crue de rupture du barrage

La crue de rupture du barrage est estimée à **1468 m$^3$/s**. Cette valeur est largement supérieure à la crue de projet.

## III.5. Proposition de réhabilitation des ouvrages existants du barrage

### III.5.1. Réhabilitation de la digue du barrage

❖ **Caractéristiques de la digue**

Le Tableau 17 donne les caractéristiques retenues pour la réhabilitation de la digue.

*Tableau 17 : Caractéristiques de la digue*

| **Désignation** | **Valeur** |
|---|---|
| Cote de la digue (m) | 300,00 |
| Hauteur de la digue (m) | 4,5 |
| Longueur de la digue (sans déversoir) (m) | 482 |
| Largeur en crête de la digue (m) | 3,5 |
| Largeur de la fondation de la digue (m) | 21,4 |
| Revanche libre (m) | 0,90 |
| Pentes des talus amont et aval | 1V / 2H |

Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.3 à la page 86.

❖ **Travaux de réhabilitation et de protection de la digue**

Les travaux réhabilitation et de protection de la digue obtenus sont les propositions de solutions tirées de l'analyse de l'étude diagnostic. ils sont présentés dans le Tableau 18 .

*Tableau 18 : Travaux de réhabilitation et de protection de la digue*

| **Désignation** | **Travaux à réaliser** |
|---|---|
| **Le talus amont** | - Le maçonnage des perrés existants sera renforcé en rive gauche et repris totalement en rive droite.<br>- La reprise du butée de pied sur toute la longueur en enrochements de 1,5 m de largeur en gueule et 0,5 m de profondeur. |
| **La crête** | - Un décapage de 10 cm sera fait sur la crête et celle-ci sera rechargée par une couche d'argile compacté de 10 cm<br>- La protection de la crête se fera par une couche de 20 cm de graveleux latéritiques. La crête aura une pente de 3% vers l'amont.<br>- A l'amont de la crête, il sera réalisé un muret de crête de 0,50 m x 0,50 m encré dans la digue de 0,50 m. |

| | |
|---|---|
| | - A l'aval de la crête, il sera réalisé un muret de crête de 0,50 m x 1,00 m encré dans la digue de 0,50 m. |
| **Le talus aval** | - Le dessouchage des arbustes présents sur les talus<br>- Le taillage et rechargement des talus avec des matériaux argileux compactée tout en corrigeant les pentes<br>- La réalisation de perré maçonné au niveau du bloc technique.<br>- La protection du talus aval par une couche d'enrochements latéritiques de 20 cm d'épaisseur soigneusement posée sur une couche de pose de grave latéritique de 10 cm d'épaisseur.<br>- La réalisation d'un tapis drainant de 10 cm d'épaisseur et 9 m longueur.<br>- La réalisation de butée de pied en enrochements de 1,5 m de largeur en gueule et 0,5 m de profondeur au pied aval. |

La réalisation de ces travaux sera facilité grâce aux différentes zones d'emprunts comme décrite dans la synthèse de l'étude géotechnique.

❖ **Stabilité des pentes**

La vérification de la stabilité des pentes donne un facteur de sécurité Fs = 2,60 avec 1V/2H comme valeurs de pente des talus amont et aval. La Figure 9 présente le cercle de glissement le plus défavorable des pentes de la digue du barrage.

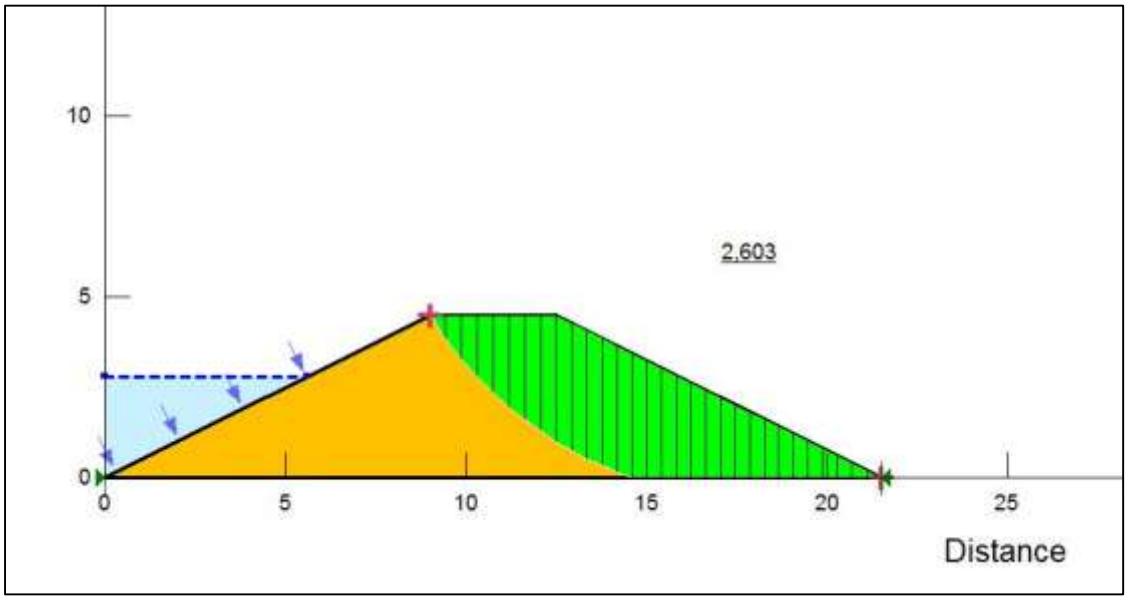



*Figure 9 : Cercle de glissement le plus défavorable*

### III.5.2. Réhabilitation de l'évacuateur de crue

#### ❖ Résultat du laminage

Le laminage de la crue de projet a permis de retenir les caractéristiques suivantes pour l'évacuateur de crue :

- La longueur déversante est de 250 m ;
- La lame d'eau déversante est de 0,80 m ;
- Le débit maximal évacué est de 312,87 $m^3/s$.

Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.1 à la page 79.

#### ❖ Stabilité du déversoir

Les résultats de l'étude de la stabilité du déversoir sont donnés dans le Tableau 19. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.4 à la page 89.

*Tableau 19 : Stabilité du déversoir*

| Désignation | Unité | Valeur |
|---|---|---|
| Stabilité vis-à-vis du glissement | | |
| Angle d'inclinaison de la partie aval du déversoir | degré | 45 |
| Somme des forces horizontales | kN/ml | 92,27 |
| Somme des forces verticales | kN/ml | 361,88 |
| Coefficient de sécurité au glissement | - | **1,30 > 1,20** |
| Stabilité vis-à-vis du renversement | | |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 385,27 |
| Somme des moments renversant | kN.m | 157,42 |
| Coefficient de sécurité au renversement | - | **2,45 > 1,5** |
| Stabilité vis-à-vis de la rupture | | |
| Contrainte maximale du déversoir | $kN/m^2$ | 81,17 |
| Contrainte limite admissible du béton | $kN/m^2$ | 4600 |
| Comparaison des contraintes | - | $\sigma_{max} \leq \sigma_{lim,beton}$ |
| Stabilité vis-à-vis de la fissuration | | |
| L'excentricité | m | 0,49 |
| B/6 | m | 0,73 |
| Comparaison des valeurs | - | $\lvert e \rvert \leq {}^{b}/_{6}$ |

Nous remarquons que les conditions de stabilités sont vérifiées, cela implique que la sécurité entière de l'ouvrage sera assurée.

- **Caractéristiques du déversoir**

Les caractéristiques du déversoir obtenue sont résumés dans le Tableau 20.

*Tableau 20 : Caractéristiques du déversoir*

| **Désignation** | **Unité** | **Valeur** |
|---|---|---|
| Type de déversoir | - | Déversoir Poids à profil trapézoïdal |
| Cote de la crête du déversoir | M | 298,50 |
| Hauteur totale du déversoir | M | 3,8 |
| Lame d'eau au-dessus du déversoir | M | 0,80 |
| Longueur du seuil déversant | M | 250 |
| Largeur en crête du déversoir | M | 1,00 |
| Largeur de fond du déversoir | M | 4,40 |
| Profondeur de la partie encrée | M | 1,00 |

### III.5.3. Dimensionnement du bassin de dissipation

Les caractéristiques du bassin de dissipation ainsi que du chenal d'évacuation sont résumés dans le Tableau 21. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.5 à la page 93.

*Tableau 21 : Caractéristiques du bassin de dissipation et du chenal d'évacuation*

| **Désignation** | **Unité** | **valeur** |
|---|---|---|
| **Bassin de dissipation** | | |
| Débit évacué par le déversoir | $m^3/s$ | 312,87 |
| Lame d'eau déversante | m | 0,80 |
| Enfoncement du bassin | m | 1,00 |
| Tirant d'eau avant le ressaut | m | 0,14 |
| Vitesse d'eau à l'entrée du bassin | m/s | 8,98 |
| Nombre de Froude | - | 6,6 |
| Bassin type retenu | Bassin USBR de type II en béton cyclopéen | |
| Tirant d'eau conjugué | m | 1,37 |
| Longueur du bassin de dissipation | m | 4 |

| Désignation | Unité | valeur |
|---|---|---|
| Hauteur du seuil terminal | m | 0,50 |
| Hauteur des blocs de chicane | m | 0,30 |
| Hauteur des blocs de chute | m | 0,15 |
| Distance entre les blocs de chicane | m | 0,20 |
| Distance entre les blocs de chute | m | 0,15 |
| **Chenal d'évacuation** | | |
| Pente longitudinale | % | 0,3 |
| Pente des talus | - | 1V/2H |
| Profondeur | m | 0,50 |
| Largeur au plafond | m | 250 |

### III.5.4. Dimensionnement du mur bajoyer

❖ **Caractéristiques géométriques**

Les caractéristiques géométriques retenues du bajoyer sont donnés dans le Tableau 22.

*Tableau 22 : Caractéristiques géométriques du mur Bajoyer*

| Désignation | Unité | Valeur |
|---|---|---|
| Hauteur maximale du bajoyer | m | 4,50 |
| Profondeur d'encrage du mur | m | 1,00 |
| Epaisseur du voile à la base | m | 0,40 |
| Epaisseur du sommet du voile | m | 0,20 |
| Epaisseur de la semelle | m | 0,40 |
| Largeur de la semelle | m | 4,00 |
| Largeur du patin | m | 0,65 |
| Largeur du talon | m | 2,95 |

❖ **Stabilité du mur bajoyer**

Les résultats de l'étude de la stabilité externe et interne du mur bajoyer sont résumés respectivement dans les Tableau 23 et Tableau 24. Le détail des calculs est présenté dans les notes de calculs en ANNEXES 1.5 à la page 99.

*Tableau 23 : Stabilité externe du mur Bajoyer*

| **Désignation** | **Unité** | **Valeur** |
|---|---|---|
| Stabilité vis-à-vis du glissement | | |
| Somme des forces horizontales | kN/ml | 62,26 |
| Somme des forces verticales | kN/ml | 338,19 |
| Coefficient de sécurité au glissement | - | **3,78 > 1,50** |
| Stabilité vis-à-vis du renversement | | |
| Somme des moments stabilisant | kN.m | 748,47 |
| Somme des moments renversant | kN.m | 107,50 |
| Coefficient de sécurité au renversement | - | **6,96 > 1,50** |
| Stabilité du sol de fondation | | |
| L'excentricité | m | 0,10 |
| B/4 | m | 1,00 |
| Comparaison des valeurs | - | **e < B/4** |

*Tableau 24 : Stabilité interne du mur Bajoyer*

| **Désignation** | **Unité** | **Valeur** | **Conditions de non fragilité** | **Choix des aciers** |
|---|---|---|---|---|
| Vérification des aciers horizontaux en face arrière | cm²/ml | 4,52 | 4 | 4 HA 12 esp 25 |
| Vérification des aciers horizontaux en face avant | cm²/ml | 4,52 | 3 | 4 HA 12 esp 25 |
| Vérification des aciers verticaux en face arrière | cm²/ml | 6,79 | 4 | 6 HA 12 esp 15 |
| Vérification des aciers verticaux en face avant | cm²/ml | 4,52 | 4 | 4 HA 12 esp 25 |
| Vérification des aciers de répartition du patin | cm²/ml | 4,52 | 4 | 4 HA 12 esp 20 |
| Vérification des aciers de répartition du talon | cm²/ml | 4,52 | 4 | 4 HA 12 esp 20 |

Nous remarquons que conditions de stabilité externes et internes du mur bajoyer sont vérifiées. L'ouvrage ainsi dimensionné pourra assurer sa fonction de mur de soutènement.

### III.5.5. Réhabilitation de la digue de protection

Les caractéristiques retenues pour la réhabilitation de la digue de protection sont présentées dans le Tableau 25.

*Tableau 25 : Caractéristiques de la digue de protection*

| **Désignation** | **Caractéristique** |
|---|---|
| Type de digue | Digue en terre homogène |
| Cote de la crête (m) | 297,50 |
| Longueur de la digue (km) | 1,00 |
| Largeur en crête (m) | 3 |
| Pente des talus amont / aval | 1V/2H |
| Protection du talus amont | Perré maçonné sur 20 m et graveleux latéritiques sur la suite |
| Protection du talus aval | Graveleux latéritique |
| Protection de la crête | Grave latéritique |

### III.5.6. Réhabilitation de l'ouvrage de prise

La cote de calage de la prise d'eau a été maintenue à **296,75 m**. soit une hauteur d'eau au-dessus de la prise de 2,50 m au-dessus de l'ouvrage. Ce qui donne un volume mort de **1 524 459,01 m$^3$** pour mener à terme la campagne agricole pour les 15 ha de terre aménagée.

Les éléments retenus pour la réhabilitation de l'ouvrage de prise sont :

- La reprise du bac amont en béton armé de 1.50 m x 1.50 m muni d'une grille amovible,
- Le remplacement de la vanne actuelle par un robinet vanne de diamètre DN 300. Les autres équipements ont été maintenus ;
- Réhabilitation du regard aval abritant le robinet vanne ;
- Une purge de la conduite d'alimentation sera faite pour assurer un bon fonctionnement de l'ouvrage.

# CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent projet portant sur l'étude technique de réhabilitation du barrage de Yaongo fait partie d'un programme de réhabilitation de cinq (05) barrages au profit du ProValAB, qui a comme finalité entre autre d'améliorer durablement la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages et d'accroitre leurs revenus. La réhabilitation de ce barrage vise essentiellement la satisfaction des besoins en eau pastoraux de la localité et d'un périmètre irrigué de 15 ha.

Il ressort de cette étude que l'ouvrage réhabilité permettra de stocker 1 524 635,91 $m^3$ d'eau à travers la rehausse de la cote du déversoir de 0,25 m, chose qui est en mesure de satisfaire les différents besoins en eau. Cependant les dépôts solides peuvent représenter une menace pour le barrage et par conséquents pour les activités économiques et sociales dépendants de celui-ci.

Aussi dans le contexte de variabilité climatique dans lequel nous sommes, marqué par soit des périodes sèches soit des pluies à fortes intensités, les ouvrages du barrage pourraient connaitre de sérieuses sollicitations qui pourraient présenter un danger pour le bon fonctionnement de ceux-ci.

Pour faire face à ces problèmes sus-cités, nous recommandons les actions suivantes :

- Le respect des règles de l'art lors de la mise en œuvre des ouvrages ;
- La réalisation d'ouvrages de conservation des sols au niveau des versants présentant des zones de ravinements (foyer de transport des matières solides) ;
- La réalisation de digues filtrantes pour freiner le transport des matériaux solides ;
- La mise en place d'un comité formel de gestion et d'entretien régulier du barrage.

Le coût des travaux de réhabilitation du barrage est estimé à huit cent soixante-dix-huit millions quatre cent quarante-trois mille neuf cent quatre-vingt-dix-huit (**878 443 998**) Francs CFA TTC

# Bibliographie

AC3E. (2012). *Rapport d'étude Diagnostic du barrage de Koubri.* Burkina Faso.

CETRI. (2019). *Rapport d'éTude géotechnique du barrage de Yaongo.* Burkina Faso

COMPAORE. (1996). *Cours des barrages, 2eme edition.* EIER

DURAND. (1996). *Petits barrages pour l'equipement rural en Afrique.* 282 pages.

DURAND, ROYET, MERIAUX (1999). *Techniques des pétits barrages en Afrique Sahélienne et équatoriale.* 401 pages.

FAO 54. (1996). *Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décenales et apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale seche.* 244 pages.

KARAMBIRI. (2008). *Cours d'Hydrologie, Master II, Infrastructures et réseaux hydrauliques,* Institut 2IE

KARAMBIRI, GUEYE. (2006). *Cours de barrage Master II, Infrastructures et réseaux hydrauliques.* Institut 2IE.

LO. (2016). *Cours de Barrage Licence III, Genie-Civil et Hydrauliques.* Institut 2IE.

PCD. (2014-2018). *Plan communale de developpement de la commune de Dargo.* 107 pages.

SAHEL CONSULT. (1999). *Rapport d'étude d'amenagement à l'aval du barrage de Yaongo.* Brukina Faso.

SAHEL CONSULT. (1999). *Rapport d'étude géotechnique de barrage de Yaongo.* Burkina Faso.

# ANNEXES

ANNEXES 1. NOTES DE CALCULS ..... 62

ANNEXES 1.1. Etudes hydrologiques ..... 62

ANNEXES 1.2. Etudes de la retenue ..... 79

ANNEXES 1.3. Calculs de la digue du barrage ..... 86

ANNEXES 1.4. Calculs du déversoir ..... 88

ANNEXES 1.5. Les ouvrages annexes ..... 93

ANNEXES 2. PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE ..... 101

ANNEXES 3. DEVIS ESTIMATIF ET QUANTITATIF ..... 109

ANNEXES 4. LES PIECES GRAPHIQUES ..... 115

# ANNEXES 1. NOTES DE CALCULS

## ANNEXES 1.1. Etudes hydrologiques

### 1. Calcul des caractéristiques du bassin versant

❖ **Caractéristiques physiques**

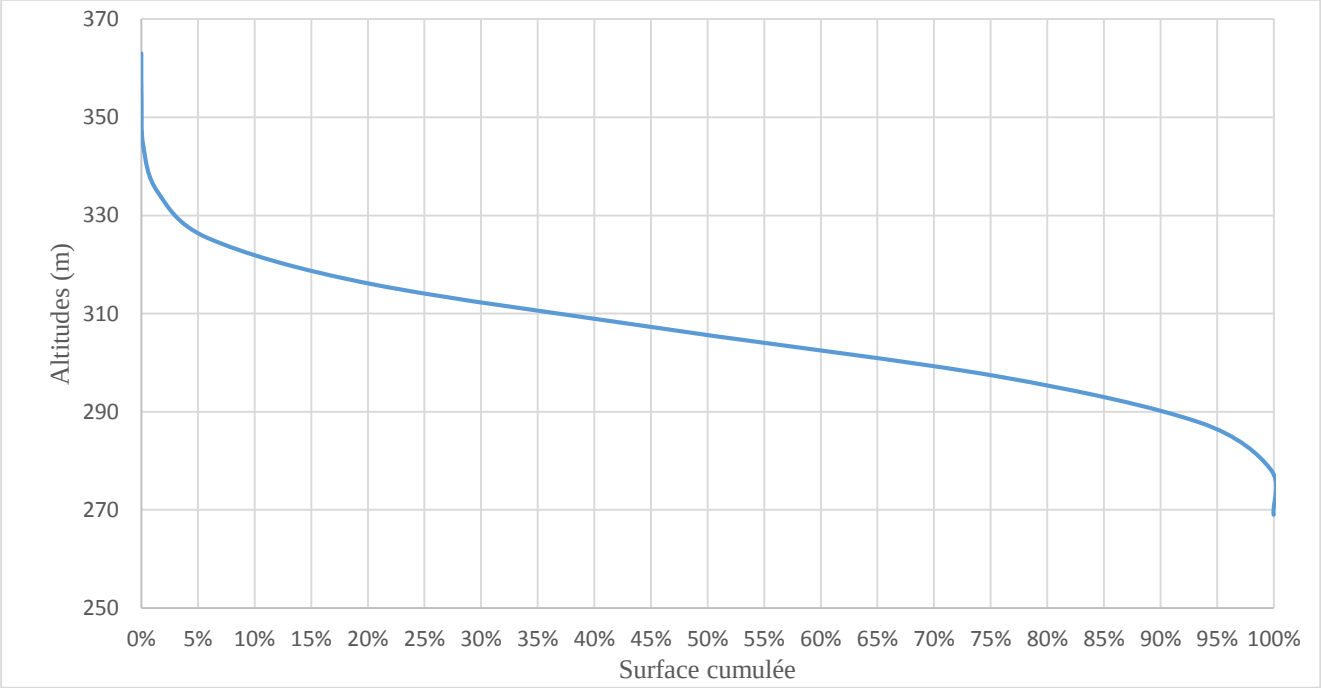
| Paramètres | Formules | Résultats |
|---|---|---|
| Surface S (km²) | | 633,80 |
| Périmètre (km) | | 164,28 |
| Pente moyenne (%) | | 3,47 |
| Altitude max (m) | | 363 |
| Altitude min (m) | | 269 |
| Longueur du réseau ∑Li (km) | | 330,00 |
| Longueur cours d'eau principal (km) | | 47,54 |
| Indice de compacité Icomp | $0{,}282 * P/\sqrt{S}$ | 1,84 |
| Longueur du rectangle équivalent L (km) | $\frac{P + \sqrt{P^2 - 16 * S}}{4}$ | 73,52 |
| Largeur du rectangle équivalent (km) | $\frac{P}{2} - L$ | 8,62 |
| Indice global de pente *Ig* (m/km) | $\frac{Atl(5\%) - Alt(95\%)}{L}$ | 0,57 |
| Pente transversale moyenne IT (m/km) | | 8,98 |
| Indice global de pente largeur du rectangle équivalent (m/km) | $\frac{Atl(5\%) - Alt(95\%)}{l}$ | 4,84 |
| Dénivelée Spécifique Ds (m) | $Ig * \sqrt{S}$ | 121,92 |
| Densité de drainage Dd | $\frac{\sum Li}{S}$ | 0,52 |

❖ **Les paramètres de tracé de la courbe hypsométrique**

| Altitude (m) | Surface partielle (km²) | La surface en % |
|---|---|---|
| 269 | 633,80 | 100% |
| 278,4 | 631,78 | 99,7% |
| 287,8 | 592,37 | 93% |
| 297,2 | 479,25 | 76% |
| 306,6 | 298,10 | 47% |
| 316 | 128,92 | 20% |
| 325,4 | 37,13 | 6% |
| 334,8 | 9,13 | 1% |
| 344,2 | 1,11 | 0% |
| 353,6 | 0,14 | 0% |
| 363 | 0,00 | 0% |
| Cote spécifique H5% | | 327,2 m |
| Cote spécifique H95% | | 285,5 m |

*Source : Global mapper*

❖ **Courbe hypsométrique du bassin versant**



- **Les pentes transversales**

| Pentes | Valeurs (m/km) |
|---|---|
| IT1 | 4,70 |
| IT2 | 6,89 |
| IT3 | 7,56 |
| IT4 | 16,77 |
| IT moyen | 8,98 |

## 2. Analyse statistiques des pluies

### ❖ Calcul des variables réduites de Gauss pour les pluies moyennes annuelles

| Pluies annuelles | Valeurs ordonnées | Rang | Fréquences | variables réduites |
|---|---|---|---|---|
| 623,8 | 346,50 | 1 | 0,01388889 | -2,20041058 |
| 757,1 | 431,60 | 2 | 0,04166667 | -1,7316644 |
| 601,9 | 475,50 | 3 | 0,06944444 | -1,47994139 |
| 590,4 | 480,70 | 4 | 0,09722222 | -1,29754293 |
| 581 | 492,00 | 5 | 0,125 | -1,15034938 |
| 480,7 | 544,60 | 6 | 0,15277778 | -1,02459239 |
| 634,4 | 581,00 | 7 | 0,18055556 | -0,91324993 |
| 712 | 590,40 | 8 | 0,20833333 | -0,8122178 |
| 753,1 | 600,40 | 9 | 0,23611111 | -0,71886805 |
| 668,9 | 601,90 | 10 | 0,26388889 | -0,63140189 |
| 492 | 607,80 | 11 | 0,29166667 | -0,54852228 |
| 712,2 | 612,20 | 12 | 0,31944444 | -0,46925288 |
| 653,2 | 617,30 | 13 | 0,34722222 | -0,39283081 |
| 600,4 | 623,80 | 14 | 0,375 | -0,31863936 |
| 958,6 | 624,70 | 15 | 0,40277778 | -0,24616365 |
| 632,4 | 632,40 | 16 | 0,43055556 | -0,17495994 |
| 636,8 | 634,40 | 17 | 0,45833333 | -0,10463346 |
| 431,6 | 636,80 | 18 | 0,48611111 | -0,03482132 |
| 617,3 | 653,20 | 19 | 0,51388889 | 0,03482132 |
| 612,2 | 668,90 | 20 | 0,54166667 | 0,10463346 |
| 346,5 | 673,30 | 21 | 0,56944444 | 0,17495994 |
| 475,5 | 673,30 | 22 | 0,59722222 | 0,24616365 |
| 607,8 | 711,00 | 23 | 0,625 | 0,31863936 |
| 544,6 | 712,00 | 24 | 0,65277778 | 0,39283081 |
| 983,6 | 712,20 | 25 | 0,68055556 | 0,46925288 |
| 924,9 | 737,50 | 26 | 0,70833333 | 0,54852228 |

| Pluies annuelles | Valeurs ordonnées | Rang | Fréquences | variables réduites |
|---|---|---|---|---|
| 673,3 | 741,80 | 27 | 0,73611111 | 0,63140189 |
| 786,9 | 753,10 | 28 | 0,76388889 | 0,71886805 |
| 924,9 | 757,10 | 29 | 0,79166667 | 0,8122178 |
| 673,3 | 786,90 | 30 | 0,81944444 | 0,91324993 |
| 786,9 | 786,90 | 31 | 0,84722222 | 1,02459239 |
| 862,5 | 862,50 | 32 | 0,875 | 1,15034938 |
| 711 | 924,90 | 33 | 0,90277778 | 1,29754293 |
| 741,8 | 924,90 | 34 | 0,93055556 | 1,47994139 |
| 737,5 | 958,60 | 35 | 0,95833333 | 1,7316644 |
| 624,7 | 983,60 | 36 | 0,98611111 | 2,20041058 |

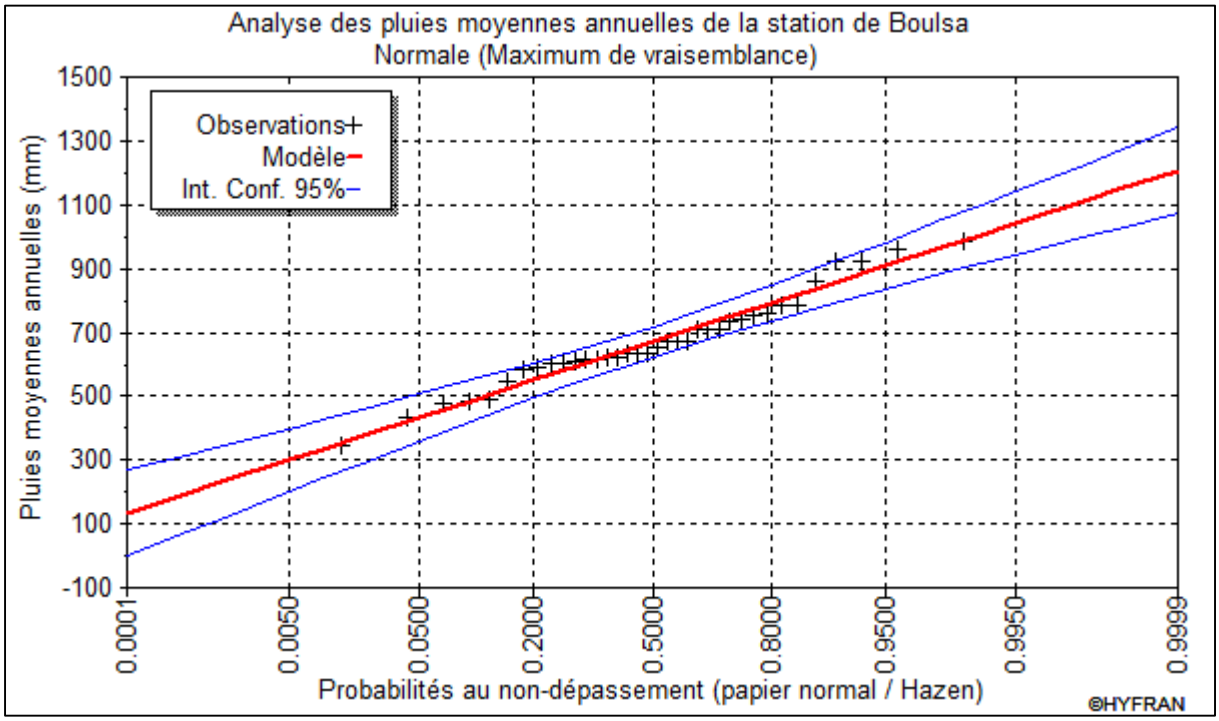
- **Calcul des quantiles pour les pluies moyennes annuelles**

| Période de retour | Fréquences | variables réduite | Quantiles Xp | Bornes inférieures | Bornes supérieures |
|---|---|---|---|---|---|
| Millénaire humide | 0,999 | 3,0902323 | 1117,26 | 1003,90 | 1230,62 |
| **Centennale humide** | **0,99** | **2,3263479** | **1006,95** | **916,13** | **1097,76** |
| Cinquantenale humide | 0,98 | 2,0537489 | 967,58 | 884,40 | 1050,76 |
| Vingtennale humide | 0,95 | 1,6448536 | 908,53 | 836,17 | 980,89 |
| **Décennale humide** | **0,9** | **1,2815516** | **856,06** | **792,40** | **919,73** |
| Année moyenne | 0,5 | 0 | 670,99 | 623,82 | 718,17 |
| **Décennale sèche** | **0,1** | **-1,2815516** | **485,92** | **422,26** | **549,58** |
| Vingtennale sèche | 0,05 | -1,6448536 | 433,45 | 361,09 | 505,81 |
| Cinquantennale sèche | 0,02 | -2,0537489 | 374,40 | 291,23 | 457,58 |
| **Centennale sèche** | **0,01** | **-2,3263478** | **335,04** | **244,22** | **425,85** |
| Millénaire sèche | 0,001 | -3,0902323 | 224,72 | 111,36 | 338,09 |

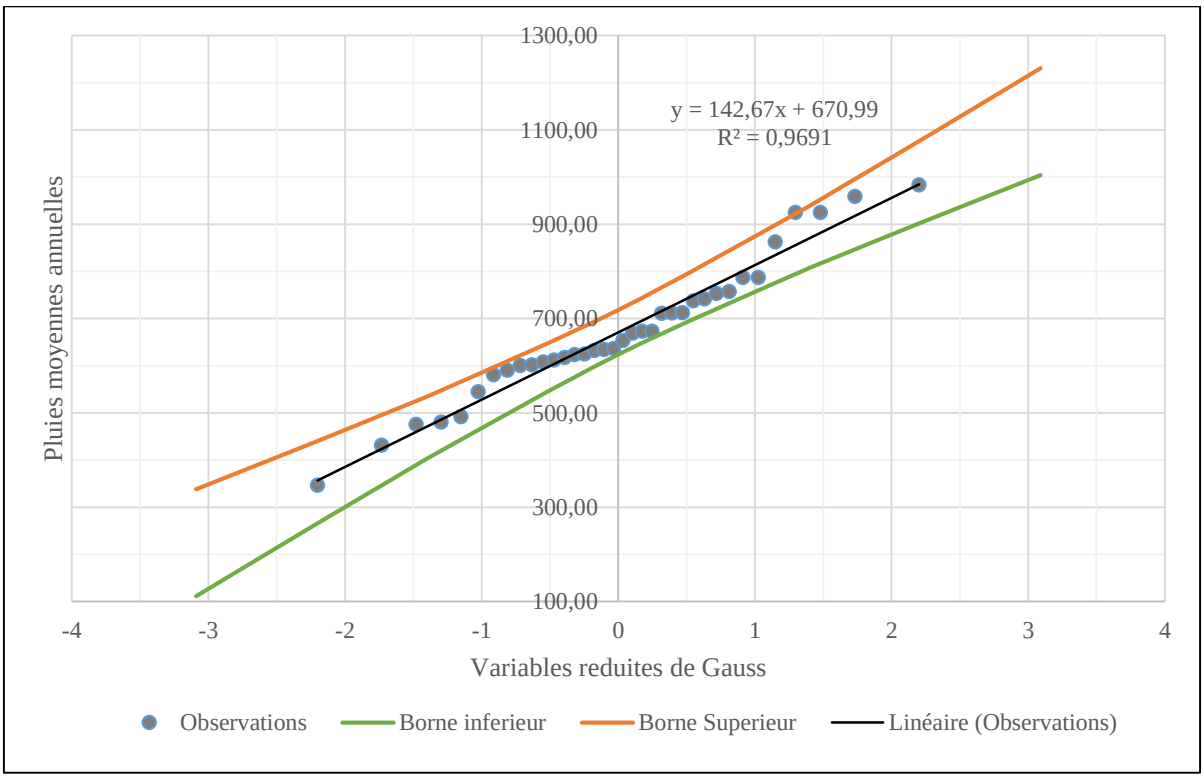
❖ **Résultats obtenues HYFRAN**

| Périodes de retour | Fréquences | Quantiles | borne inferieur | borne supérieur |
|---|---|---|---|---|
| 10000 | 0,9999 | 1210 | 1070 | 1340 |
| 2000 | 0,9995 | 1150 | 1030 | 1270 |
| 1000 | 0,999 | 1120 | 1000 | 1230 |
| 200 | 0,995 | 1040 | 944 | 1140 |
| **100** | **0,99** | **1010** | **915** | **1100** |
| 50 | 0,98 | 968 | 884 | 1050 |
| 20 | 0,95 | 909 | 836 | 982 |
| **10** | **0,9** | **856** | **792** | **920** |
| 5 | 0,8 | 793 | 737 | 848 |
| 3 | 0,6667 | 733 | 684 | 783 |
| 2 | 0,5 | 671 | 624 | 718 |
| 1,4286 | 0,3 | 595 | 545 | 646 |
| 1,25 | 0,2 | 549 | 494 | 605 |
| **1,1111** | **0,1** | **486** | **422** | **550** |
| 1,0526 | 0,05 | 433 | 360 | 506 |
| 1,0204 | 0,02 | 374 | 290 | 458 |
| **1,0101** | **0,01** | **335** | **243** | **427** |
| 1,005 | 0,005 | 299 | 200 | 398 |
| 1,001 | 0,001 | 225 | 110 | 339 |
| 1,0005 | 0,0005 | 196 | 74,8 | 317 |

❖ **Analyse graphique des pluies moyennes annuelles avec HYFRAN**




❖ **Analyse graphique des pluies moyennes annuelles avec EXCELL**



- **Calcul des variables réduites de Gumbel pour les pluies maximales journalières**

| Pluies max journalières | Valeurs ordonnés | Rang | Fréquences | Variables réduites |
|---|---|---|---|---|
| 64,6 | 37,20 | 1 | 0,01388889 | -1,45317376 |
| 57,8 | 37,5 | 2 | 0,04166667 | -1,15626901 |
| 53,5 | 38,00 | 3 | 0,06944444 | -0,98103981 |
| 62,6 | 40,00 | 4 | 0,09722222 | -0,84619267 |
| 41,2 | 40,20 | 5 | 0,125 | -0,73209937 |
| 57 | 41,20 | 6 | 0,15277778 | -0,63061776 |
| 59 | 42,40 | 7 | 0,18055556 | -0,53749682 |
| 73 | 45,00 | 8 | 0,20833333 | -0,45019365 |
| 55 | 48,70 | 9 | 0,23611111 | -0,367038 |
| 53,5 | 49,00 | 10 | 0,26388889 | -0,28685208 |
| 51 | 51,00 | 11 | 0,29166667 | -0,20875548 |
| 82,5 | 53,50 | 12 | 0,31944444 | -0,13205572 |
| 59,9 | 53,50 | 13 | 0,34722222 | -0,0561821 |
| 48,7 | 54,10 | 14 | 0,375 | 0,01935689 |
| 77,5 | 55,00 | 15 | 0,40277778 | 0,09500291 |
| 40 | 56,00 | 16 | 0,43055556 | 0,17116928 |
| 70 | 56,80 | 17 | 0,45833333 | 0,2482581 |
| 37,5 | 57,00 | 18 | 0,48611111 | 0,32667511 |
| 49 | 57,80 | 19 | 0,51388889 | 0,40684375 |
| 42,4 | 59,00 | 20 | 0,54166667 | 0,48921993 |
| 37,2 | 59,90 | 21 | 0,56944444 | 0,57430861 |
| 40,2 | 60,70 | 22 | 0,59722222 | 0,66268393 |
| 56 | 61,20 | 23 | 0,625 | 0,75501486 |
| 45 | 62,60 | 24 | 0,65277778 | 0,8520995 |
| 38 | 63,50 | 25 | 0,68055556 | 0,95491249 |
| 69 | 64,60 | 26 | 0,70833333 | 1,06467333 |

| Pluies max journalières | Valeurs ordonnés | Rang | Fréquences | Variables réduites |
|---|---|---|---|---|
| 189,5 | 69,00 | 27 | 0,73611111 | 1,18294803 |
| 71 | 70,00 | 28 | 0,76388889 | 1,31180699 |
| 56,8 | 71,00 | 29 | 0,79166667 | 1,45408145 |
| 83,5 | 73,00 | 30 | 0,81944444 | 1,61380405 |
| 239,4 | 77,50 | 31 | 0,84722222 | 1,79701975 |
| 60,7 | 82,50 | 32 | 0,875 | 2,01341868 |
| 61,2 | 83,50 | 33 | 0,90277778 | 2,28005238 |
| 86,5 | 86,50 | 34 | 0,93055556 | 2,63145729 |
| 54,1 | 189,50 | 35 | 0,95833333 | 3,15684949 |
| 63,5 | 239,40 | 36 | 0,98611111 | 4,26968115 |

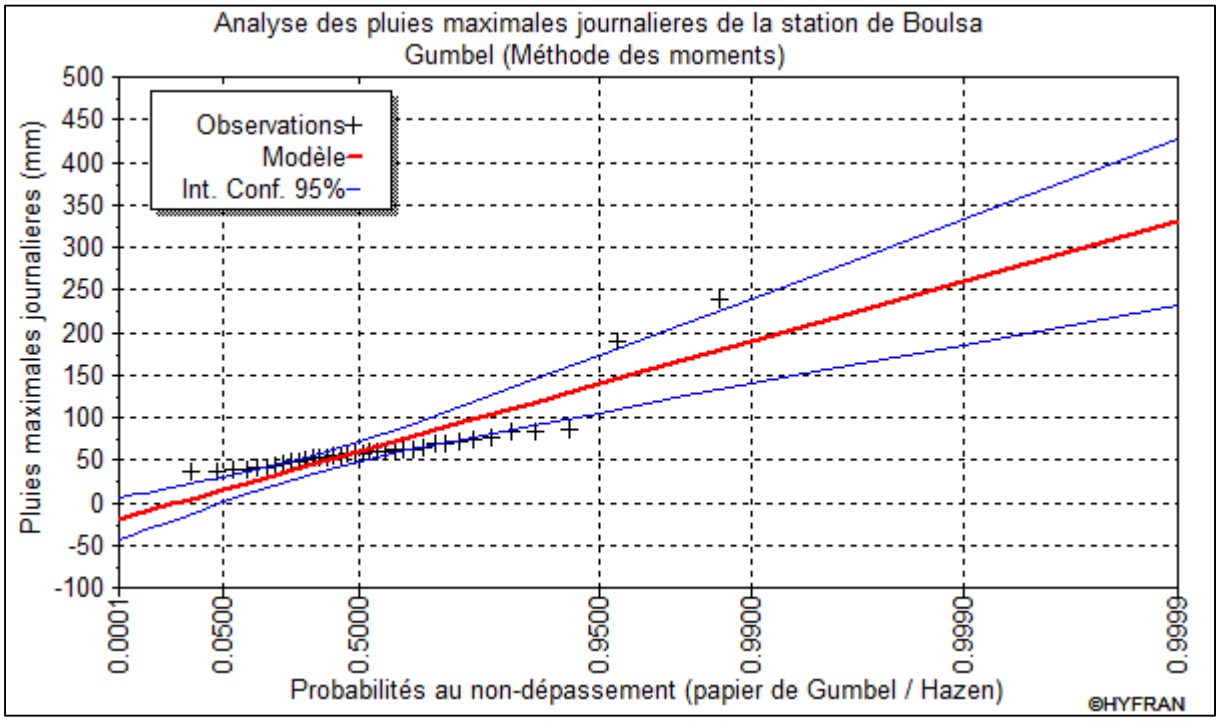
- **Calcul des quantiles pour les pluies maximales journalières**

| Période de retour | Fréquence | Variable réduite | Quantile Xp | k | Borne inferieur | Borne supérieur |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Millénaire humide | 0,999 | 6,907255 | 259,91 | 4,937598 | 183,36 | 336,46 |
| **Centennale humide** | **0,99** | **4,600149** | **189,35** | **3,138056** | **137,03** | **241,67** |
| Cinquantennale humide | 0,98 | 3,901939 | 168,00 | 2,593452 | 122,95 | 213,05 |
| Vingtennale humide | 0,95 | 2,970195 | 139,50 | 1,866692 | 104,06 | 174,95 |
| **Décennale humide** | **0,9** | **2,250367** | **117,49** | **1,305226** | **89,33** | **145,65** |
| Année moyenne | 0,5 | 0,366513 | 59,88 | -0,164179 | 48,26 | 71,49 |
| **Décennale sèche** | **0,1** | **-0,834032** | **23,16** | **-1,100605** | **11,60** | **34,72** |
| Vingtennale sèche | 0,05 | -1,097189 | 15,11 | -1,305867 | 1,82 | 28,41 |

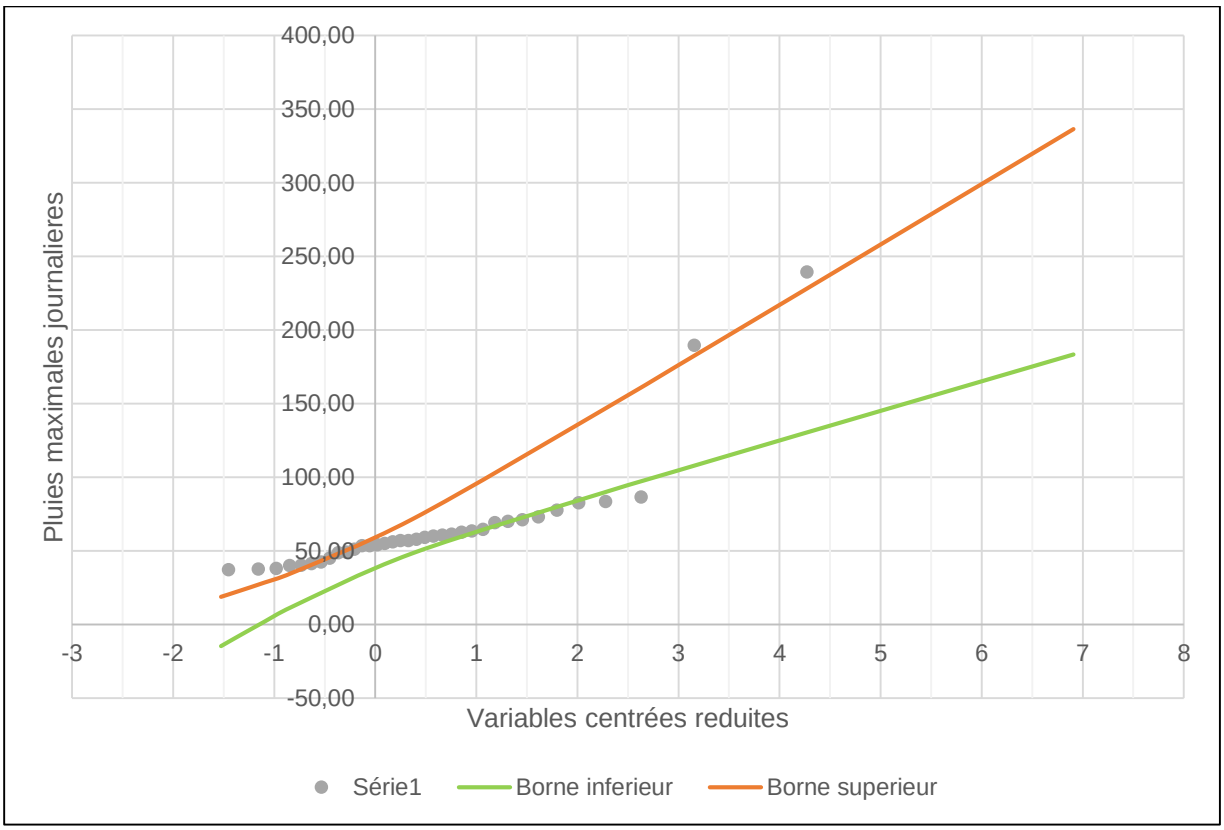
- **Résultats obtenues HYFRAN**

| Périodes de retour | Fréquences | Quantiles | borne inferieur | borne supérieur |
|---|---|---|---|---|
| 10000 | 0,9999 | 330 | 232 | 428 |
| 2000 | 0,9995 | 281 | 200 | 362 |
| 1000 | 0,999 | 260 | 186 | 334 |
| 200 | 0,995 | 211 | 153 | 268 |
| **100** | **0,99** | **189** | **139** | **240** |
| 50 | 0,98 | 168 | 125 | 211 |
| 20 | 0,95 | 139 | 106 | 173 |
| **10** | **0,9** | **117** | **90,7** | **144** |
| 5 | 0,8 | 94,5 | 74,7 | 114 |
| 3 | 0,6667 | 76,3 | 61,3 | 91,2 |
| 2 | 0,5 | 59,9 | 48,1 | 71,6 |
| 1,4286 | 0,3 | 43 | 32,2 | 53,8 |
| 1,25 | 0,2 | 34,1 | 22,6 | 45,6 |
| **1,1111** | **0,1** | **23,2** | **9,87** | **36,5** |
| 1,0526 | 0,05 | 15,1 | 0,0386 | 30,2 |
| 1,0204 | 0,02 | 6,97 | -10,2 | 24,1 |
| **1,0101** | **0,01** | **1,98** | **-16,5** | **20,5** |
| 1,005 | 0,005 | -2,3 | -22 | 17,4 |
| 1,001 | 0,001 | -10,4 | -32,5 | 11,7 |
| 1,0005 | 0,0005 | -13,3 | -36,3 | 9,67 |
| 1,0001 | 0,0001 | -19,2 | -44 | 5,59 |

❖ **Analyse graphique des pluies maximales journalières avec HYFRAN**




❖ **Analyse graphique des pluies maximales journalières avec EXCELL**



## 3. Calcul des crues

### ❖ Calcul du débit décennal par la méthode ORSTOM

| Paramètres | Formules | Résultats |
|---|---|---|
| Coefficient d'abattement A | $1-\left[\frac{(161-0{,}042*\bar{P}_{an})}{1000}*logS\right]$ | 0,63 |
| Hauteur de pluie journalière décennale P10 (mm) | | 117,49 |
| Hauteur de pluie moyenne journalière décennale Pm10 (mm) | $P_{10}*A$ | 73,77 |
| Coefficient de ruissèlement Kr 70 pour P= 70 mm pour Igcor= 3m/km | $\frac{a}{(S+b)}+c$ | 10,75% |
| Coefficient de ruissèlement Kr 70 pour P= 70 mm pour Igcor= 7 m/km | $\frac{a}{(S+b)}+c$ | 14,87% |
| Coefficient de ruissèlement Kr 70 pour P= 70 mm | Interpolation entre Igcor= 3 et 7 m/km | 12,65% |
| Coefficient de ruissèlement Kr100 pour P= 100 mm pour Igcor= 3 m/km | $\frac{a}{(S+b)}+c$ | 12,38% |
| Coefficient de ruissèlement Kr100 pour P= 100 mm pour Igcor= 7 m/km | $\frac{a}{(S+b)}+c$ | 15,46% |
| Coefficient de ruissèlement Kr100 pour P= 100 mm | Interpolation entre Igcor= 3 et 7 m/km | 13,80% |
| Coefficient de ruissèlement de la crue décennale Kr10 | Interpolation entre Kr70 et Kr100 | 14,47% |
| Temps de base décennale Tb10 (mn) pour Igcor= 3 m/km | $250*S^{0,35}+300$ | 2691,24 |
| Temps de base décennale Tb10 (mn) pour Igcor= 7 m/km | $126*S^{0,35}+100$ | 1305,19 |
| Temps de base décennale Tb10 (mn) | Interpolation entre Ig =3 et Ig=7 | 2052,64 |
| Temps de montée décennale Tm10 (mn) pour Igcor=3 m/km | $100*S^{0,35}+75$ | 1031,50 |
| Temps de montée décennale Tm10 (mn) pour Igcor=7 m/km | $32*S^{0,35}+23$ | 329,08 |
| Temps de montée décennale Tm10 (mn) | Interpolation entre Ig =3 et Ig=7 | 707,87 |

| **Paramètres** | **Formules** | **Résultats** |
|---|---|---|
| Coefficient de pointe de la crue décennale α10 | | 2,60 |
| lame d'eau ruisselé décennale Lr10 (mm) | $P_{m10} * K_{r10}$ | 10,67 |
| Volume d'eau ruisselé décennale Vr10 (m3) | $L_{r10} * \mathrm{S(km2)} * 10^3$ | 6765769,26 |
| Débit moyen ruisselé Qmr10 (m3/s) | $V_{r10}/T_{b10}$ | 54,94 |
| Débit maximum ruisselé Qr10 (m3/s) | $\alpha_{10} * Q_{mr10}$ | 137,34 |
| Coefficient de majoration (m) | infiltrabilité RI | 1,05 |
| Débit de pointe Q10 (m3/s) | $Q_{r10} * m$ | **144,21** |

❖ **Calcul du débit décennal par la méthode CEIH**

| Classification par rapport à la pluie annuelle (équation 10) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Paramètres | a | s | i | p | k | d |
| Valeurs | 0,0833 | 0,696 | 0,953 | | 0,534 | |
| Débit Q1 (m3/s) | | | | | | 139,13 |
| Classification par rapport au pays (équation 40) | | | | | | |
| Paramètres | a | s | i | p | k | d |
| Valeurs | 0,254 | 0,462 | 0,101 | | 0,976 | |
| Débit Q1 (m3/s) | | | | | | 79,65 |
| Classification par rapport à la position géographique (équation 27) | | | | | | |
| Paramètres | a | s | i | p | k | d |
| Valeurs | 0,56 | 0,619 | 0,279 | | 0,51 | |
| Débit Q1 (m3/s) | | | | | | 184,33 |
| Débit de pointe décennale Q10 (m3/s) | | | | | | **134,37** |

### ❖ Les paramètres de l'hydrogramme de crue

| Tb10 | Tm10 | α | Q/Qmax | Qmax | Q | 2Tm10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2052,64 | 707,87 | 2,3 | 0,58 | 346,09 | 200,61 | 1415,74 |

| Paramètres de la courbe | |
|---|---|
| Temps (min) | Débit (m3/s) |
| 0 | 0 |
| 707,87 | 346,09 |
| 1005,44 | 200,61 |
| 2052,64 | 0 |

| | |
|---|---|
| a | -0,49 |
| b | 692,29 |

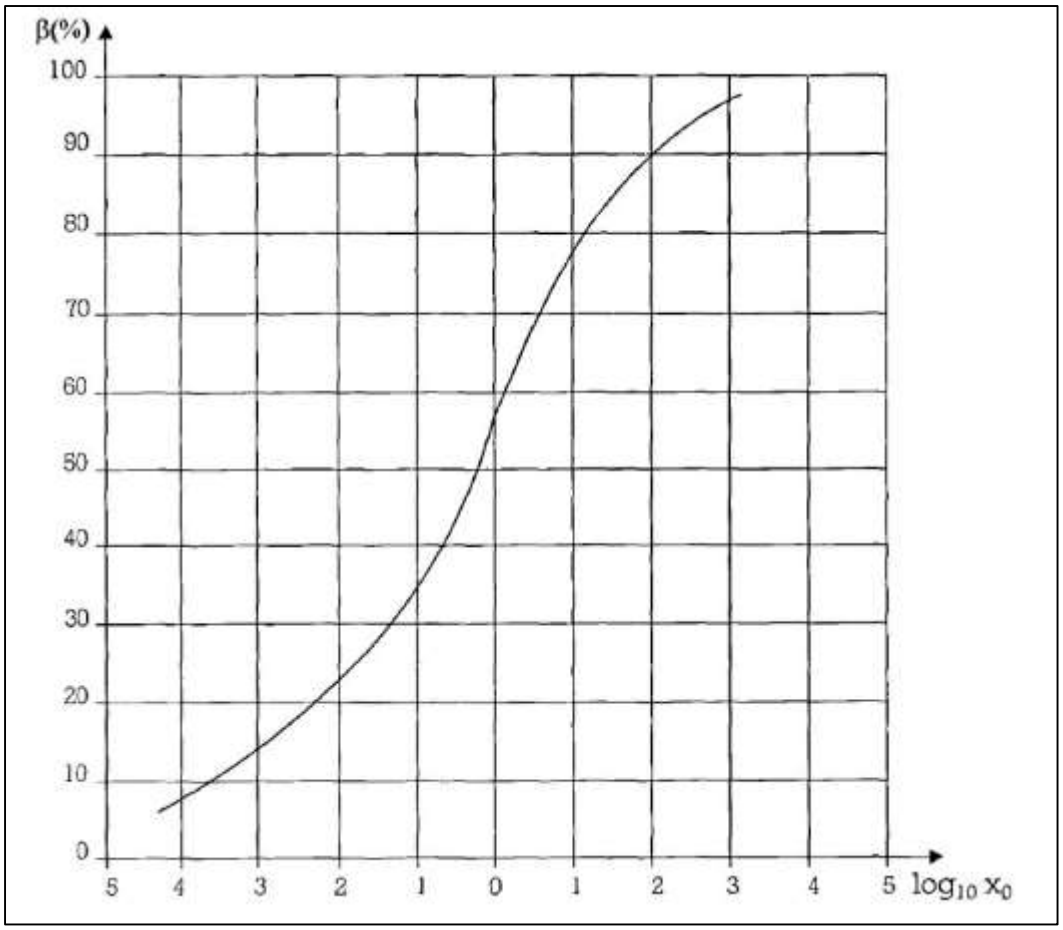
## ❖ Coefficients de calculs du débit par la méthode CIEH

| N° | Description | Echantillon | Correlation | | Constante | Exposants des paramètres de l'équation 4.1 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | n | $r^2$ | r | a | S | Ig | Pan | PM10 | Kr10 | Dd |
| | DECOUPAGE CLIMATIQUE SANS KR10 | | | | | | | | | | |
| | avec S et Ig | | | | | | | | | | |
| 1 | 0-400 mm | 71 | 0.760 | 0.874 | 2.83 | 0.624 | 0.491 | | | | |
| 2 | 400-800 mm | 128 | 0.570 | 0.755 | 2.03 | 0.590 | 0.588 | | | | |
| 3 | 1200-1600 mm | 87 | 0.579 | 0.761 | 1.33 | 0.598 | 0.457 | | | | |
| | avec S, Ig et Dd | | | | | | | | | | |
| 4 | 0-400 mm | 33 | 0.629 | 0.793 | 2.43 | 0.583 | 0.506 | | | | 0.320 |
| 5 | 400-800 mm | 69 | 0.598 | 0.773 | 1.83 | 0.620 | 0.618 | | | | 0.121 |
| 6 | 800-1200 mm | 87 | 0.591 | 0.769 | 2.01 | 0.649 | 0.066 | | | | 0.824 |
| | DECOUPAGE CLIMATIQUE AVEC KR10 | | | | | | | | | | |
| | avec S et Kr10 | | | | | | | | | | |
| 7 | 0-400 mm | 66 | 0.758 | 0.870 | 0.553 | 0.655 | | | | 0.802 | |
| 8 | 400-800 mm | 116 | 0.736 | 0.858 | 0.461 | 0.540 | | | | 0.941 | |
| | avec S, Ig et Kr10 | | | | | | | | | | |
| 9 | 0-400 mm | 65 | 0.847 | 0.920 | 0.167 | 0.745 | 0.731 | | | 0.475 | |
| 10 | 400-800 mm | 116 | 0.806 | 0.898 | 0.0833 | 0.696 | 0.953 | | | 0.534 | |
| | DECOUPAGE POUR LA ZONE Pan < 1000 mm | | | | | | | | | | |
| | Tous les bassins | | | | | | | | | | |
| 11 | S, Kr10 | 180 | 0.716 | 0.846 | 0.410 | 0.524 | | | | 0.982 | |
| 12 | S, Ig, Kr10 | 176 | 0.795 | 0.892 | 0.095 | 0.643 | 0.406 | | | 1.038 | |
| | Longitude < 10° Ouest (seulement au Sénégal et en Mauritanie) | | | | | | | | | | |
| 13 | S,Ig | 21 | 0.569 | 0.754 | 1.78 | 0.557 | 0.805 | | | | |
| 14 | S, Ig, PM10 | 21 | 0.581 | 0.762 | 55.0 | 0.462 | 0.667 | | -0.652 | | |
| 15 | S, Ig, Kr10 | 20 | 0.722 | 0.850 | 0.224 | 0.540 | 0.622 | | | 0.767 | |
| 16 | S, Kr10 | 20 | 0.645 | 0.803 | 0.661 | 0.375 | | | | 0.910 | |
| | Longitude comprise entre 10° Ouest et 10° Est | | | | | | | | | | |
| 17 | S, Kr10, PM10 | 117 | 0.764 | 0.874 | 30.2 | 0.492 | | | -0.972 | 0.948 | |
| 18 | S, Ig, Kr10 | 117 | 0.788 | 0.888 | 0.0678 | 0.661 | 0.412 | | | 1.105 | |
| | Longitude supérieure à 10° Est (seulement au Tchad et au nord Cameroun) | | | | | | | | | | |
| 19 | S, PM10 | 46 | 0.646 | 0.804 | 0.00372 | 0.605 | | | 1.778 | | |
| 20 | S, Ig | 45 | 0.645 | 0.803 | 2.72 | 0.626 | 0.360 | | | | |
| 21 | S, Ig, PM10 | 45 | 0.679 | 0.824 | 0.00638 | 0.694 | 0.305 | | 1.411 | | |
| 22 | S, Kr10 | 39 | 0.77 | 0.877 | 0.610 | 0.523 | | | | 0.908 | |
| 23 | S, Ig, Kr10 | 39 | 0.821 | 0.906 | 0.134 | 0.678 | 0.374 | | | 0.940 | |
| 24 | S, PM10, Kr10 | 39 | 0.805 | 0.897 | 0.00243 | 0.608 | | | 1.263 | 0.882 | |
| | DECOUPAGE PAR PAYS OU GROUPES DE PAYS | | | | | | | | | | |
| | Afrique de l'Ouest (de 10°E à 10°W) | | | | | | | | | | |
| 25 | S,KR10 | 295 | 0.628 | 0.792 | 1.41 | 0.542 | | | | 0.511 | |
| 26 | S,Kr10,PM10 | 295 | 0.654 | 0.809 | 146 | 0.479 | | | -0.969 | 0.457 | |
| 27 | S,Kr10,Ig | 288 | 0.650 | 0.806 | 0.560 | 0.619 | 0.279 | | | 0.510 | |
| | Afrique centrale | | | | | | | | | | |
| 28 | S,KR10 | 50 | 0.738 | 0.859 | 0.521 | 0.625 | | | | 0.876 | |
| 29 | S,Kr10,IG,PM10 | 49 | 0.815 | 0.903 | 893 | 0.773 | 0.567 | | -2.051 | 0.923 | |
| 30 | S,Kr10,Ig | 49 | 0.778 | 0.882 | 0.109 | 0.771 | 0.419 | | | 0.887 | |
| | Sénégal + Mauritanie | | | | | | | | | | |
| 31 | S, PM10 | 40 | 0.563 | 0.750 | 5450000 | 0.215 | | | -2.830 | | |
| 32 | S Kr10 | 35 | 0.843 | 0.918 | 0.288 | 0.405 | | | | 1.117 | |
| 33 | S Kr10 Ig | 35 | 0.851 | 0.922 | 0.195 | 0.471 | 0.239 | | | 1.046 | |
| | Côte d'Ivoire | | | | | | | | | | |
| 34 | S | 37 | 0.713 | 0.844 | 4.83 | 0.562 | | | | | |
| 35 | S Ig | 34 | 0.729 | 0.854 | 2.29 | 0.651 | 0.216 | | | | |
| 36 | S, PM10 | 36 | 0.706 | 0.840 | 0.000174 | 0.645 | | | 2.149 | | |
| 37 | S Kr10 | 31 | 0.791 | 0.889 | 0.380 | 0.586 | | | | 0.805 | |
| 38 | S Kr10 Ig | 28 | 0.787 | 0.887 | 0.275 | 0.618 | 0.099 | | | 0.798 | |
| | Burkina Faso | | | | | | | | | | |
| 39 | S Kr10 | 61 | 0.818 | 0.904 | 0.410 | 0.425 | | | | 0.923 | |
| 40 | S Kr10 Ig | 60 | 0.824 | 0.908 | 0.254 | 0.462 | 0.101 | | | 0.976 | |
| | Burkina Faso + Mali + Niger | | | | | | | | | | |
| 41 | S Kr10 | 137 | 0.688 | 0.829 | 0.407 | 0.532 | | | | 0.941 | |
| 42 | S Kr10 Ig | 133 | 0.755 | 0.869 | 0.0912 | 0.643 | 0.399 | | | 1.019 | |
| 43 | S A*P10 | 133 | 0.589 | 0.767 | 35600 | 0.342 | | | -1.808 | | |
| 44 | S, Kr10 PM10 | 133 | 0.757 | 0.870 | 203 | 0.459 | | | -1.301 | 0.813 | |
| 45 | S, Ig PM10 | 130 | 0.592 | 0.769 | 22400 | 0.363 | 0.059 | | -1.748 | | |
| | Tchad + Nord Cameroun (Pan <1000 mm) | | | | | | | | | | |
| 46 | S Ig | 55 | 0.638 | 0.799 | 1.28 | 0.412 | 0.739 | | | | |
| 47 | S Kr10 | 49 | 0.838 | 0.915 | 0.525 | 0.530 | | | | 0.950 | |
| 48 | S Kr10 Ig | 48 | 0.884 | 0.940 | 0.105 | 0.709 | 0.432 | | | 0.949 | |

*Source : Crues et apports (FAO 54)*

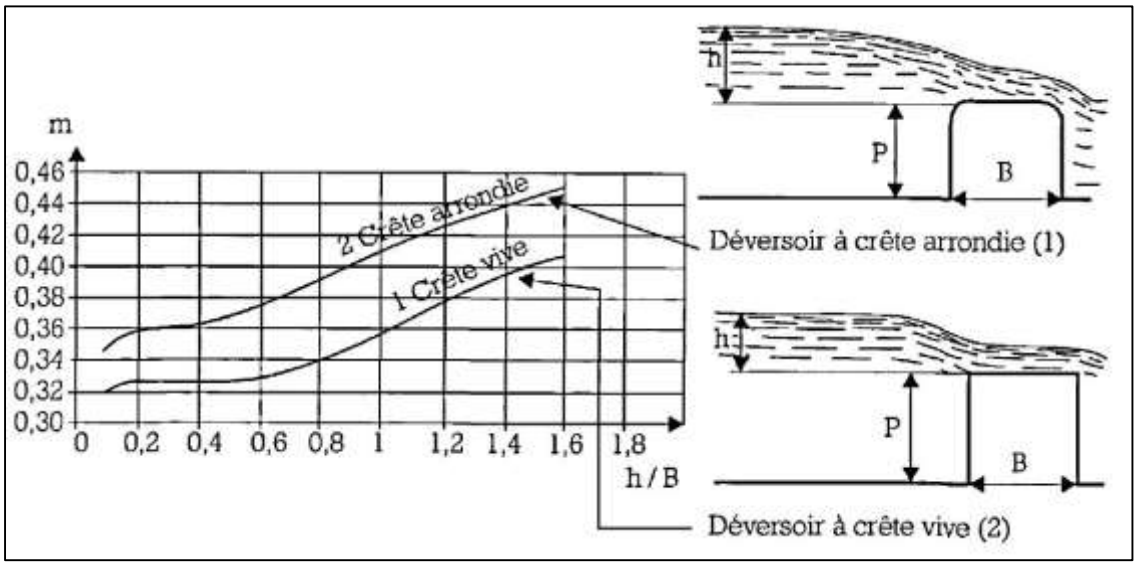
## 4. Laminage de la crue

### ❖ Abaque de lecture de la valeur β pour le laminage




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

### ❖ Coefficients de débit d'évacuateur de crue




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

- **Calcul du laminage**

| L(m) | S(m2) | m | tm(s) | Qcmax(m3/s) | g(m/s2) | X0 | log10 X0 | Beta | Qemax |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 311,99 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 682,33 | 1,89 | 95% | 294,18 |
| 265,19 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 492,98 | 1,68 | 94,0% | 290,72 |
| 262,07 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 481,45 | 1,58 | 93,0% | 287,26 |
| 258,95 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 470,06 | 1,53 | 92,0% | 283,80 |
| 255,83 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 458,80 | 1,50 | 91,0% | 280,34 |
| 252,71 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 447,68 | 1,56 | 90,5% | 278,61 |
| 251,15 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,12 | 346,09 | 9,81 | 442,17 | 1,56 | 90,4% | 278,26 |

- **Résultat du laminage**

| h(m) | L(m) | S(m2) | m | tm(s) | Qcmax(m3/s) | g(m/s2) | X0 | log10 X0 | B | Qemax |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,80 | 250,00 | 1656532,92 | 0,35 | 42472,1234 | 346,09 | 9,81 | 438,12 | 2,64 | 90% | 278,26 |

| L(m) | m | Qe(m3/s) | g(m/s2) | h |
|---|---|---|---|---|
| 250 | 0,35 | 278,26 | 9,81 | 0,80 |

## ANNEXES 1.2. Etudes de la retenue

### 1. Calcul des besoins en eau

❖ **Besoins en eau des cultures**

| Mois | | Décembre | | Janvier | Février | | Mars | | Avril |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de jr du mois | | 31 | | 31 | 28 | | 31 | | 30 |
| ETP journalier (mm/j) | | 5,22 | | 5,77 | 6,38 | | 7,12 | | 7,38 |
| ETP mensuel (mm) | | 161,82 | | 178,87 | 178,64 | | 220,72 | | 221,4 |
| P (mm) | | 0,888571429 | | 0,8 | 0 | | 0,690625 | | 3,967741935 |
| Pe (mm) | | 0 | | 0 | 0 | | 0 | | 0 |
| Assolement et / ou rotation de spéculation | | | | | | | | | |
| Tomate | nombre de jrs | 30 | | 31 | 31 | | 23 | 5 | 25 |
| | Kc | 0,6 | | 1,15 | 1,15 | | 1,15 | 0,8 | 0,8 |
| | ETP période (mm/j) | 5,22 | | 5,77 | 6,38 | | 7,12 | 7,12 | 7,38 |
| | ETP période (mm) | 156,6 | | 178,87 | 197,78 | | 163,76 | 35,6 | 184,5 |
| | ETM période (mm) | 93,96 | | 205,7005 | 227,447 | | 188,324 | 28,48 | 147,6 |
| | ETM mensuelle (mm) | 93,96 | | 205,7005 | 227,447 | | 216,804 | | 147,6 |
| Oignons | nombre de jrs | 20 | 10 | 31 | 19 | 12 | 3 | | |
| | Kc | 0,7 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 0,95 | 0,95 | | |
| | ETP période (mm/j) | 5,22 | 5,22 | 5,77 | 6,38 | 6,38 | 7,12 | | |

| **Mois** | | **Décembre** | | **Janvier** | | **Février** | | **Mars** | **Avril** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ETP période (mm) | 104,4 | 52,2 | 178,87 | | 121,22 | 76,56 | 21,36 | |
| | ETM période (mm) | 73,08 | 54,81 | 187,8135 | | 127,281 | 72,732 | 20,292 | |
| | ETM mensuelle (mm) | 127,89 | | 187,8135 | | 200,013 | | 20,292 | |
| Riz | nombre de jrs | 30 | | 20 | 11 | 31 | | 28 | 30 |
| | Kc | 1,2 | | 1,1 | 1,2 | 1,2 | | 1,2 | 1,05 |
| | ETP périodes (mm/j) | 5,22 | | 5,77 | 5,77 | 6,38 | | 7,12 | 7,38 |
| | ETP périodes (mm) | 156,6 | | 115,4 | 63,47 | 197,78 | | 199,36 | 221,4 |
| | ETM périodes (mm) | 187,92 | | 126,94 | 76,164 | 237,336 | | 239,232 | 232,47 |
| | ETM mensuelle (mm) | 187,92 | | 203,104 | | 237,336 | | 239,232 | 232,47 |
| **Calculs des besoins en eau** | | | | | | | | | |
| ETM mens retenue (mm) | | 187,92 | | 205,7005 | | 237,336 | | 239,232 | 232,47 |
| Besoins net (m3/ha) | | 187,92 | | 205,7005 | | 237,336 | | 239,232 | 232,47 |
| Efficience du réseau | | 0,65 | | 0,65 | | 0,65 | | 0,65 | 0,65 |
| Besoins brutes (m3/ha) | | 2 891,08 | | 3 164,62 | | 3 651,32 | | 3 680,49 | 3 576,46 |
| Besoins brutes (m3) | | 43366,15 | | 47469,35 | | 54769,85 | | 55207,38 | 53646,92 |
| besoin total par campagne | | | | | | | | | 254 459,65 |

### ❖ Besoins en eau pastorales

| | |
|---|---|
| Nombre total de bêtes en transhumances | 6000 |
| Nombre de Bovins | 8900 |
| Nombre de Caprins | 13255 |
| Nombre d'ovins | 7490,5 |
| Nombre de porcins | 357,5 |
| Consommation journalière d'un bovin (l/j) | 30 |
| Consommation journalière d'un caprin (l/j) | 3,5 |
| Consommation journalière d'un ovin (l/j) | 13 |
| Consommation journalière d'un porcin (l/j) | 12 |
| Consommation totale journalière (l/j) | 415059 |
| Consommation totale journalière (m3/j) | 415,059 |
| Consommation totale mensuelle (m3) | 12451,77 |
| Consommation totale par campagne (m3) | **62 258,85** |

### ❖ Besoins humains

| | |
|---|---|
| Population en 2006 (habitants) | 2816 |
| taux d'accroissement de la population | 2,7% |
| population à l'horizon du projet (habitants) | 6967 |
| allocation par jours à la population (l/j) | 15 |
| besoins journaliers à l'horizon du projet (m3/j) | **104,50** |

### ❖ Besoins en eau de divers animaux

| Type d'animal | Situation | Consommation (en litres) | Fréquence d'abreuvement |
|---|---|---|---|
| BOVINS (zébus ou taurins) | - en ranching | 25 | 1 ou 2 fois / jour |
| | - élevage extensif (conditions normales) | 30 - 40 | 1 ou 2 fois / jour |
| | - avec pâturage nocturne | 15 - 20 | 1 ou 2 fois / jour |
| | - en période de sécheresse | 50 - 60 | 1 fois tous les 2 jours |
| PETITS RUMINANTS | - conditions normales (saison sèche) | 3,5 - 4 | 1 fois / jour |
| | - en ranching | 5 | |
| | - en lactation | 5 - 5,5 | |
| CHEVAUX | | 20 - 30 | 1 ou 2 fois / jour |
| ANES | | 10 - 13 | 1 fois / jour |
| PORCS | - jeunes | 4 | 1 ou 2 fois / jour |
| | - en lactation | 18 | |
| CHAMEAUX | | 60 - 80 | 1 fois tous les 4 à 5 jours |
| | - après une longue déprivation | 100 | ingestion en 15 minutes |

*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

## 2. Calculs des pertes

| Mois | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Durée (jrs) | 31 | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 |
| Evaporation bac Ebac (mm/mois) | 238 | 256 | 275 | 333 | 327 | 317 |
| Evaporation bac Ebac (mm/jours) | 7,68 | 9,14 | 8,87 | 11,10 | 10,90 | 10,23 |
| Evaporation Lac Elac (mm/jours) | 5,68 | 6,30 | 6,19 | 7,09 | 7,01 | 6,75 |
| Evaporation mensuelle | 176,00 | 195,44 | 173,36 | 219,68 | 210,28 | 209,10 |
| Infiltration journalière (mm/j) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Infiltration mensuelle (mm/mois) | 31 | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 |
| Pertes en eau (mm) | 207,00 | 226,44 | 201,36 | 250,68 | 240,28 | 240,10 |
| Pertes totale (mm) | | | | | **1365,86** | |

### 3. Evaluation des dépôts solides

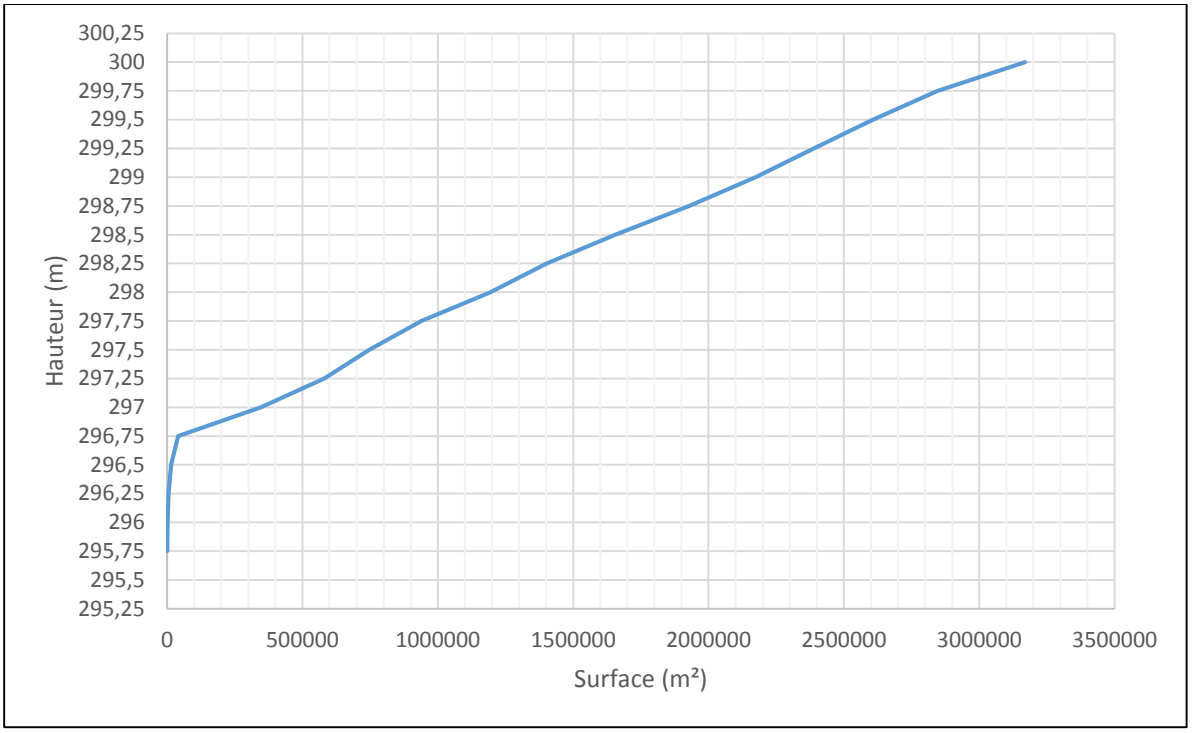
| **Paramètres** | **Surface (km²)** | **Pluie annuelle** | **Dégradation Spécifique** | **Apports solides annuel** |
|---|---|---|---|---|
| Symbole | S | $P_{an}$ | $D = 137 * \left(\frac{P_{an}}{700}\right)^{-2,2} * S^{-0,05} * [0,25 + 1,13 * (h + r)]^{1,15}$ | $V = D * S$ |
| Résultats | 633,8 | 670,99 | 157,73 | 99 971,03 |

### 4. Calcul des apports liquides

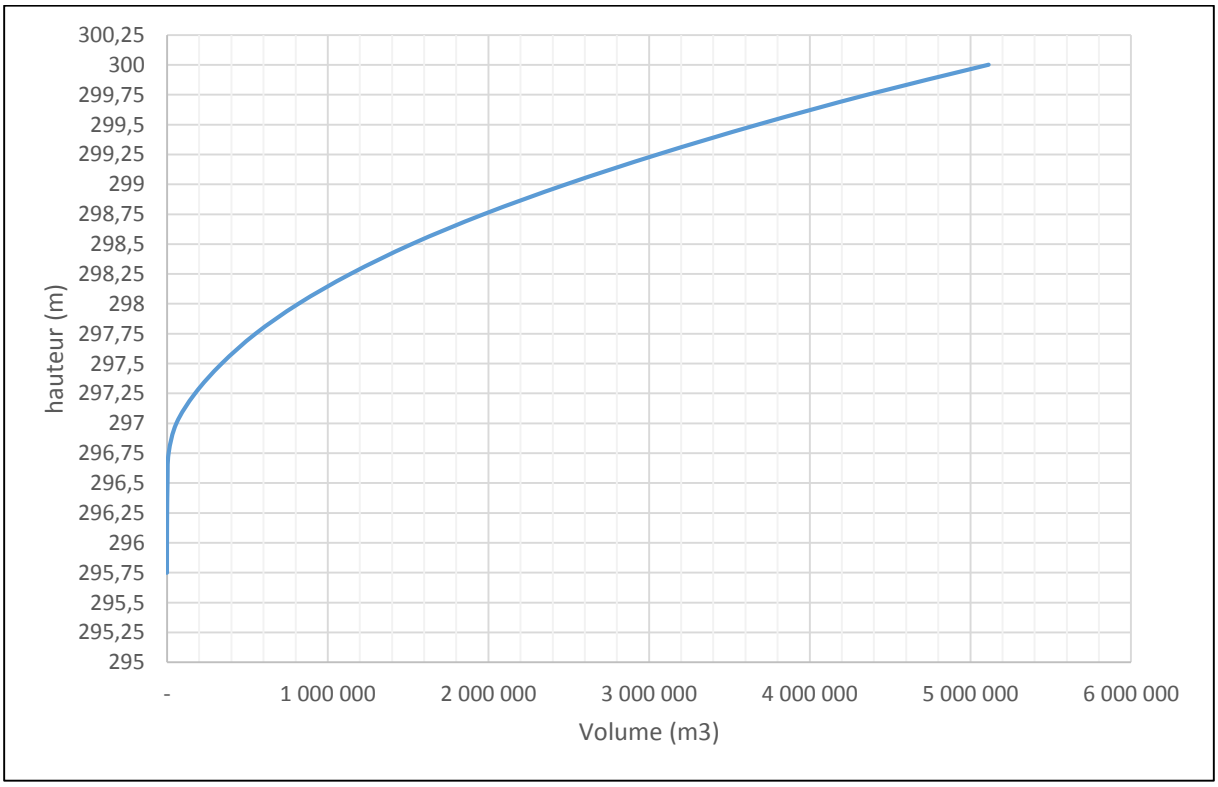
| Périodes de retour | lame d'eau (mm) | Ke (%) | Pluie (mm) | Surface (km²) | Apport liquides (m3) |
|---|---|---|---|---|---|
| Symbole | $Le$ | $Ke = Le/P$ | $P$ | $S$ | $V = Ke * P * S * 1000$ |
| Année décennale humide | 60 | 7,01% | 856,06 | 633,8 | 38 028 000 |
| Année moyenne | 30 | 4,47% | 670,99 | 633,8 | 19 014 000 |
| Année décennale sèche | 10 | 2,06% | 485,92 | 633,8 | 6 338 000 |
| Année Cinquantennale sèche | 4,6 | 1,23% | 374,40 | 633,8 | 2 915 480 |
| Année centennale sèche | 3,3 | 0,98% | 335,04 | 633,8 | 2 091 540 |

## 5. Evaluation du volume de la retenue

### ❖ Courbe hauteur surface




### ❖ Courbe hauteur volume



## 6. Simulation de la retenue

| Périodes | Début de campagne | | Pertes (évaporation, infiltration) | | | Besoins en eau | | | Fin de campagne | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mois | Niveau (mm) | Volume ($m^3$) | Hauteur d'eau évaporée (mm) | Hauteur d'eau infiltrée (mm) | Volume correspondant ($m^3$) | Volume prélevé (humains) ($m^3$) | Volume consommé (irrigation) | Volume consommé (animaux) ($m^3$) | Volume ($m^3$) | Niveau (mm) |
| Décembre | **298,50** | **1 524 635,91** | 176,00 | 31 | 1 208 159,96 | 3239,52 | 43 366,15 | 12866,829 | 1 148 687,46 | 298,25 |
| Janvier | 298,25 | 1 148 687,46 | 195,44 | 31 | 854 934,45 | 3239,52 | 47469,35 | 12866,829 | 791 358,76 | 297,97 |
| Février | 297,97 | 791 358,76 | 173,36 | 28 | 576 785,28 | 2926,01 | 54769,85 | 11621,652 | 507 467,77 | 297,70 |
| Mars | 297,70 | 507 467,77 | 219,68 | 31 | 305 616,20 | 3239,52 | 55207,38 | 12866,829 | 234 302,47 | 297,34 |
| Avril | 297,34 | 234 302,47 | 210,28 | 30 | 104 867,03 | 3135,01 | 53646,92 | 12451,77 | 35 633,32 | 296,88 |
| Mai | 296,88 | 35 633,32 | 209,10 | 31 | 7 406,58 | 3 239,52 | - | 3 239,52 | **927,54** | **296,81** |
| | | | | | | | | | Dépôts solide (mm) | 0,07 |
| | | | | | | | | | Cote finale | **296,75** |

## ANNEXES 1.3. Calculs de la digue du barrage

### 1. Caractéristiques géométriques

#### ❖ Calcul de la revanche

| Paramètre | Accélération de la pesanteur (m/s²) | Fetch (km) | Hauteur des vagues (m) | Vitesse des vagues (m/s) | Revanche (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| Symbole | $g$ | $f$ | $h_v = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} * \sqrt{f}$ | $V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} * h_v$ | $R = 0{,}75 * h_v + \frac{V^2}{2g}$ |
| Résultat | 9,81 | 3,30 | 1,12 | 2,25 | 0,78 |

#### ❖ Hauteur de la digue

| Paramètre | Revanche libre (m) | Charge au-dessus du déversoir (m) | Hauteur plan d'eau normal (m) | Hauteur de la digue (m) |
|---|---|---|---|---|
| Symbole | $R$ | $h$ | $H_{PEN}$ | $H_{digue} = H_{PEN} + h + R$ |
| Résultat | 0,8 | 0,8 | 2,8 | 4,50 |

#### ❖ Calcul de la largeur en crête

| Hauteur de la digue (m) | Largeur en crête (m) PREECE | largeur en crête (m) KNAPPEN | Largeur en crête choisie (m) | largeur au fond |
|---|---|---|---|---|
| $H_{digue}$ | $1{,}65 * \sqrt{H_{digue}}$ | $1{,}1 * \sqrt{H_{digue}} + 1$ | $L_c$ | $L_f$ |
| 4,80 | 3,50 | 3,33 | 3,5 | 21,44 |

## 2. Stabilité des pentes

### ❖ Fruits indicatifs des talus des barrages

| Hauteur du barrage | Type du barrage en terre | Fruit des talus | |
|---|---|---|---|
| | | Amont | Aval |
| Inférieure à 5 m | - Homogène ou à zones | 2 | 2 |
| 5 à 10 m | - Homogènes, granulométrie étendue | 2,5 | 2,25 |
| | - Homogène, à fort pourcentage d'argile | 2,75 | 2,25 |
| | - A noyau et recharges grossières | 2,25 | 2 |
| 10 à15 m | - Homogène, granulométrie étendue | 2,75 | 2 |
| | - Homogène, à fort pourcentage d'argile | 3 | 2,5 |
| | - A noyau et recharges grossières | 2,5 | 2,25 |

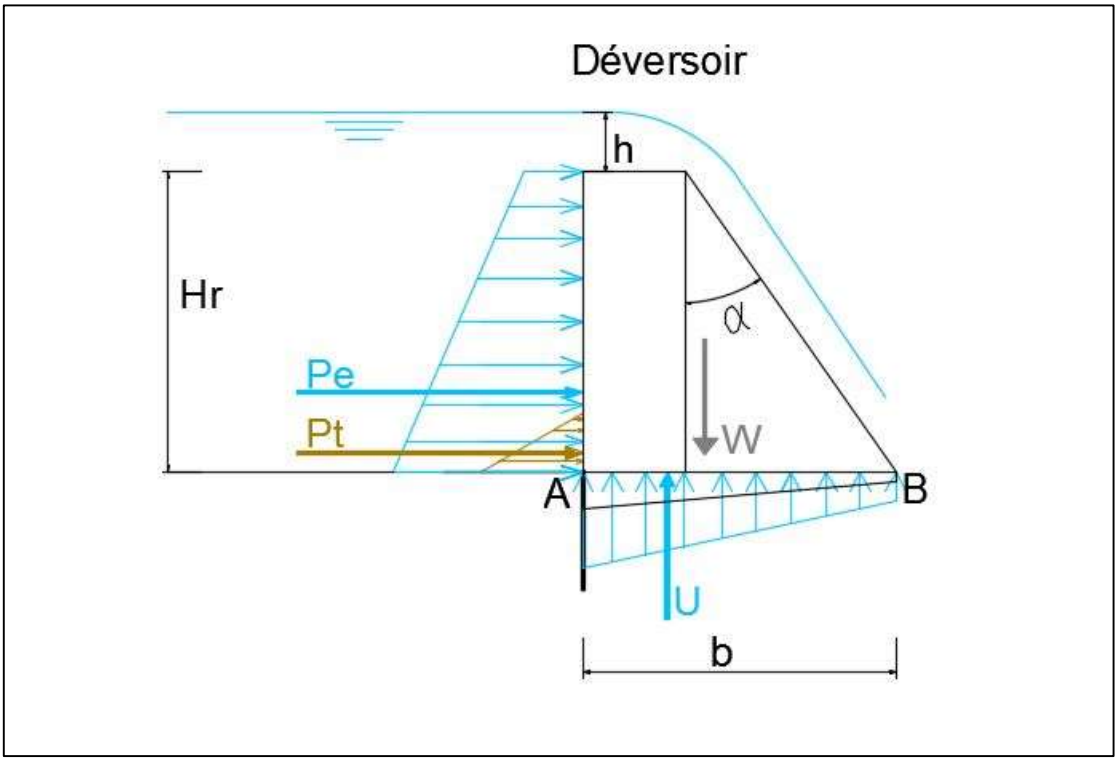
*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

## ANNEXES 1.4. Calculs du déversoir

### ❖ Les hypothèses de calculs

| | |
|---|---|
| Poids volumique du béton cyclopéen (Mpa) | 24 |
| Résistance du béton à 28 jrs fc28 (kN/m3) | 20 |
| Poids volumique de l'eau (kN/m3) | 10 |
| Poids volumique des terres (kN/m3) | 18 |
| tan φ | 0,33 |
| Hauteur des sédiments hsed (m) | 1 |

### ❖ Le Bilan des forces appliquées au déversoir



### ❖ Calcul de l'angle α vérifiant la condition de stabilité au glissement

| Calcul de l'angle α pour le glissement | $\alpha_g$ |
|---|---|
| $\frac{W-U}{Pt+Pe} * \tan\varphi \geq 1{,}2 \leftrightarrow \tan\alpha \geq \frac{6H_r^2 - 1{,}55H_r - 2{,}286}{4{,}55H_r^2 + 5{,}85H_r} \leftrightarrow \alpha \geq \tan^{-1}\left(\frac{6H_r^2 - 1{,}55H_r - 2{,}286}{4{,}55H_r^2 + 5{,}85H_r}\right)$ | 41,7433585 |

### ❖ Calcul de l'angle α vérifiant la condition de stabilité au renversement

| Calcul de l'angle α pour le renversement | $tan\alpha$ | $\alpha_r$ |
|---|---|---|
| $\frac{M_{/B}(W-U)}{M_{/B}(Pt+Pe)} \geq 1{,}5 \leftrightarrow \left(\frac{8}{3}H_r^3 + \frac{11}{2}H_r^2\right) * (\tan\alpha)^2 + \left(-\frac{20}{3}H_r^2 + 11H_r\right) * \tan\alpha + \frac{11}{2} - 1{,}485 + \frac{62}{3}H_r - \frac{27}{4}H_r^2 - \frac{5}{2}H_r^3 \geq 0$ | 0,78590469 | 38,16 |

### ❖ Caractéristiques géométriques retenues

| | | |
|---|---|---|
| Hauteur total du déversoir | $H$ | 3,8 |
| inclinaison aval choisi | $\alpha$ | 45 |
| Base b | $1 + Hr * tan\alpha$ | 4,39 |

### ❖ Calcul du facteur de sécurité au glissement

| **Paramètre** | **Poids propre (kN/m)** | **Pressions interstitielles (kN/m)** | **Poussée des terres (kN/m)** | **Poussée de l'eau (kN/m)** | **Facteur de sécurité** |
|---|---|---|---|---|---|
| Symbole | *W* | *U* | *Pt* | *Pe* | *Fsg* |
| Formule | $24H_r + 22 + (12H_r^2 + 22H_r) * \tan\alpha$ | $0{,}5 * b * (\frac{2}{3} * H_r + 1{,}2)$ | $\frac{1}{2} * \gamma_{sable} * h_{sed} * K_a$ | $4{,}5H_r + 5H_r^2$ | $\frac{W - U}{Pt + Pe} * tan\varphi$ |
| Résultat | 370,08 | 8,20 | 2,97 | 89,3 | **1,30** |

❖ **Calcul du facteur de sécurité au renversement**

| **Paramètre** | **Moment du poids propre/B** | **Moment des pressions interstitielles / B** | **Moment de la poussée des terres / B** | **Moment de la poussée de l'eau / B** | **Facteur de sécurité** |
|---|---|---|---|---|---|
| symbole | *M/B (W)* | *M/B (U)* | *M/B (Pe)* | *M/B (Pt)* | *Fsr* |
| Formule | $(6H_r^3 + 10H_r^2) * (\tan\alpha)^2 + (20H_r) * \tan\alpha + 24H_r + 10$ | $\left(\frac{10}{3}H_r^3 + \frac{9}{2}H_r^2\right) * (\tan\alpha)^2 + \left(\frac{20}{3}H_r^2 + 9H_r\right) * \tan\alpha + \frac{10}{3}H_r + \frac{9}{2}$ | $\frac{10}{6}H_r^3 + \frac{9}{2}H_r^2$ | $\frac{1}{3} * h_{sed} * P_t$ | $\frac{M_{/B}(W - U)}{M_{/B}(Pt + Pe)}$ |
| Résultat | 650,83 | 265,56 | 156,43 | 0,99 | **2,45** |

### ❖ Vérification de la stabilité vis-à-vis de la fissuration

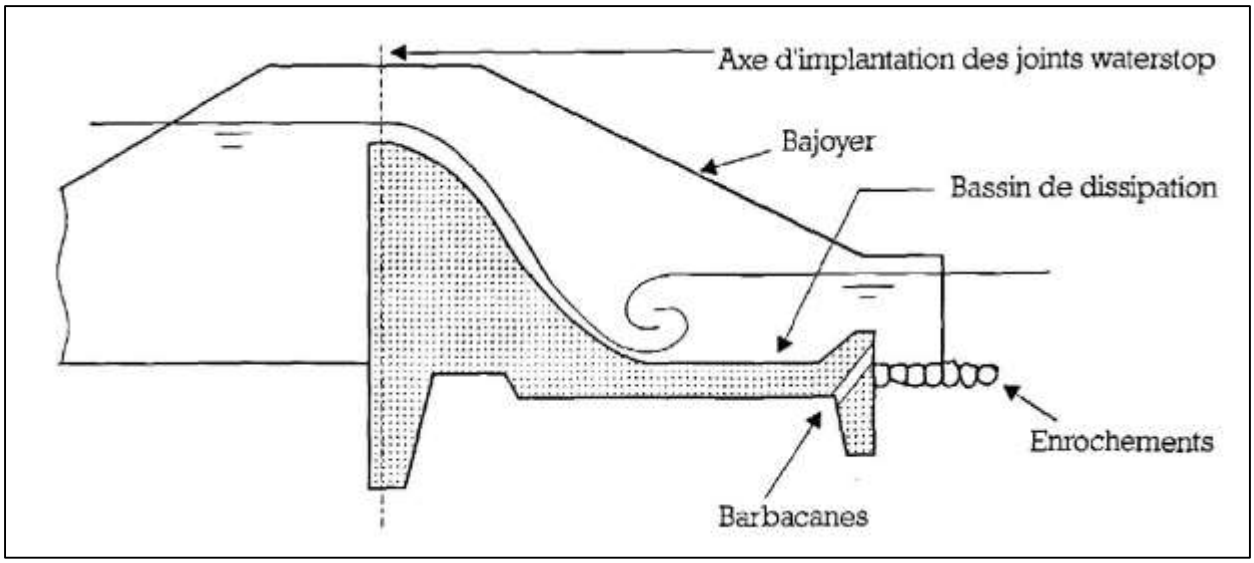
| **Paramètre** | **Abscisse du centre de gravité (m)** | **Ordonné du centre de gravité** | **somme des forces stabilisantes** | **somme des forces renversantes** |
|---|---|---|---|---|
| Symbole | *Xgouv* | *Ygouv* | *W-U* | *Pt + Pe* |
| Formule | $\frac{\left(\frac{1}{6}H_r^3+\frac{1}{3}H_r^2\right)\tan\alpha^2+\left(\frac{1}{2}H_r^2+\frac{1}{3}H_r\right)\tan\alpha+\frac{1}{2}H_r+\frac{1}{3}}{\left(\frac{1}{2}H_r^2+\frac{3}{4}H_r\right)\tan\alpha+H_r+\frac{3}{4}}$ | $\frac{\left(\frac{1}{6}H_r^3+\frac{1}{2}H_r\right)\tan\alpha+\frac{1}{2}H_r^2+\frac{1}{2}}{\left(\frac{1}{2}H_r^2+\frac{3}{4}H_r\right)\tan\alpha+H_r+\frac{3}{4}}$ | $19H_r+9+(9H_r+7H_r^2)\tan\alpha$ | $2{,}97+9H_r+5H_r^2$ |
| Résultat | 1,94 | 1,47 | 216,48 | 109,37 |

| *b/6* | calcul de l'excentricité | *e* |
|---|---|---|
| $\frac{1}{6}*(1+Hr*tan\alpha)$ | $X_{Gouv}+Y_{Gouv}*\left(\frac{Pt+Pe}{W-U}\right)-\frac{b}{2}$ | **0,49** |
| **0,73** | conclusion sur la stabilité vis-à-vis de la fissuration | **vérifiée** |

### ❖ Vérification de la stabilité vis-à-vis de la rupture

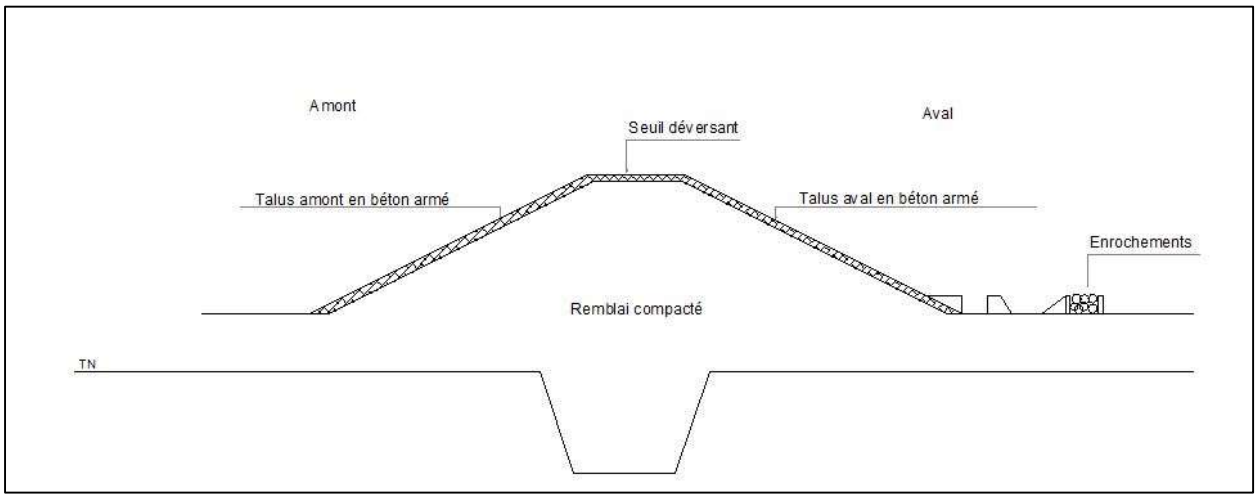
| **Paramètre** | **Contrainte limite du béton** | **Contraigne maximale du béton du déversoir** | **Condition de stabilité** |
|---|---|---|---|
| **Symbole** | $\sigma_{lim,\,beton}$ | $\sigma_{max}$ | $\sigma_{max}\leq\sigma_{lim,\,beton}$ |
| **Formule** | $0{,}23*f_{c28}$ | $\left(\frac{W-U}{b}\right)*\left(1+\frac{6\lvert e\rvert}{b}\right)$ | $\left(\frac{W-U}{b}\right)*\left(1+\frac{6\lvert e\rvert}{b}\right)\leq 0{,}23*f_{c28}$ |
| **Résultat** | 4600 | 81,18 | vérifiée |

- **Déversoir à profil Creager**




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

- **Déversoir de type radier**



## ANNEXES 1.5. Les ouvrages annexes

### 1. Le Bassin de dissipation

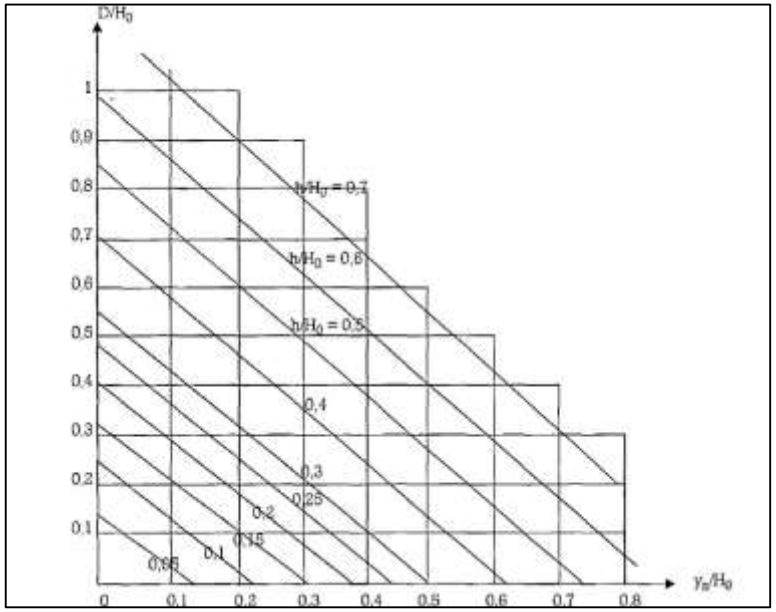
❖ **Calcul du tirant d'eau à l'aval du bassin**

| **Débit évacué par le déversoir** | **Longueur du déversoir** | **Tirant d'eau critique** | **Coefficient de Manning Strickler** | **Tirant d'eau à l'aval** | **Pente du canal d'évacuation** | **Débit calculé q (m3/s)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Q (m3/s)* | *L* | $y_c = 0{,}47 * \left(\frac{Q}{L}\right)^{2/3}$ | *Ks* | *Yn* | *I* | $\frac{K_s * (L * y_n)^{\frac{5}{3}} * I^{\frac{1}{2}}}{2 * y_n + L}$ |
| 312,87 | 250,00 | **0,55** | 75 | **0,49** | 0,003 | 312,87 |

❖ **Calcul de la profondeur d'encrage**

| **Hauteur du déversoir hors sol** | **Rapport Yn/H0** | **Lame d'eau au-dessus du déversoir** | **Rapport h/ho** | **Rapport D/HO** | **Profondeur d'encrage** | **Débit linéaire** | **Hauteur totale du déversoir** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *ho* | *Yn/H0* | *h* | *h/Ho* | *D/Ho* | *D* | *q* | *H* |
| 2,8 | 0,18 | 0,8 | 0,28 | 0,36 | 1,00 | 1,25 | 3,80 |

❖ **Abaque de lecture de D en fonction de h et de Yn**




❖ **Calcul de la vitesse d'entrée et du tirant d'eau au pied du coursier**

| **Tiran d'eau au pied du coursier** | **Accélération de la pesanteur** | **Hauteur totale du déversoir** | **Lame d'eau au-dessus du déversoir** | **Vitesse à l'entrée du bassin** |
|---|---|---|---|---|
| *y1* | *g* | *H* | *h* | *V1* |
| **0,14** | 9,81 | 3,80 | 0,8 | **8,98** |

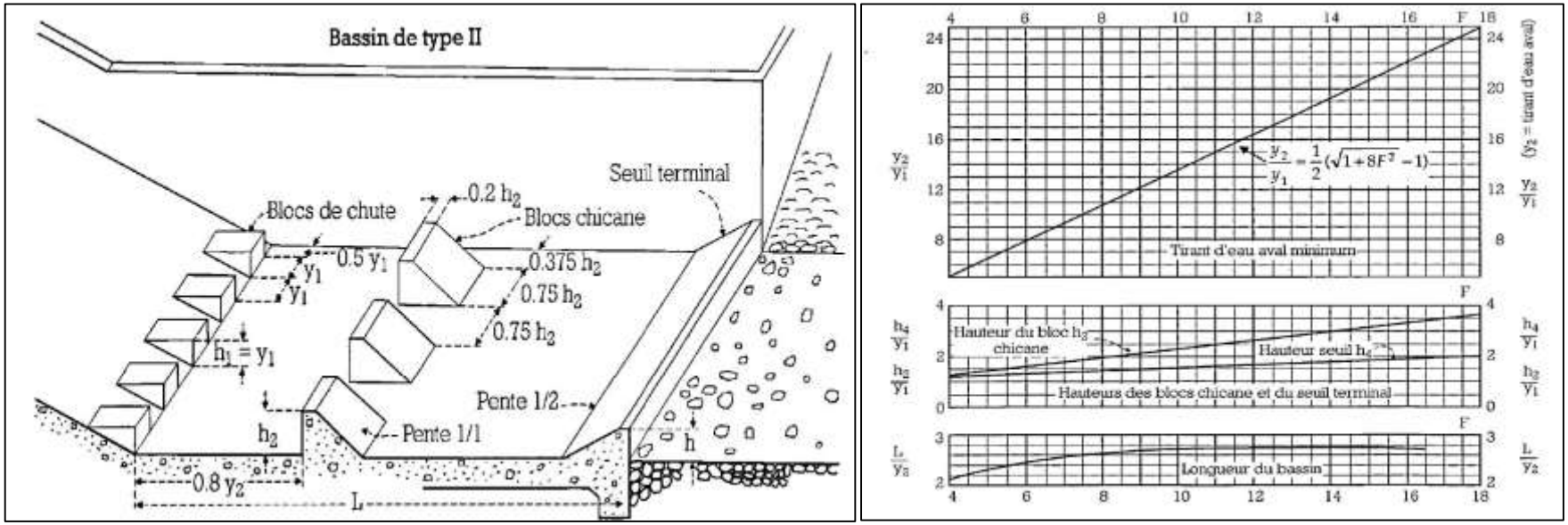
### ❖ Calcul du nombre de Froude

| Tiran d'eau à l'entrée du bassin | Vitesse à l'entrée du bassin | Nombre de Froude |
|---|---|---|
| $y$ | $V$ | $\frac{V}{\sqrt{g * y}}$ |
| 0,14 | 8,98 | **6,6** |

### ❖ Calcul des caractéristiques géométriques du bassin de dissipation

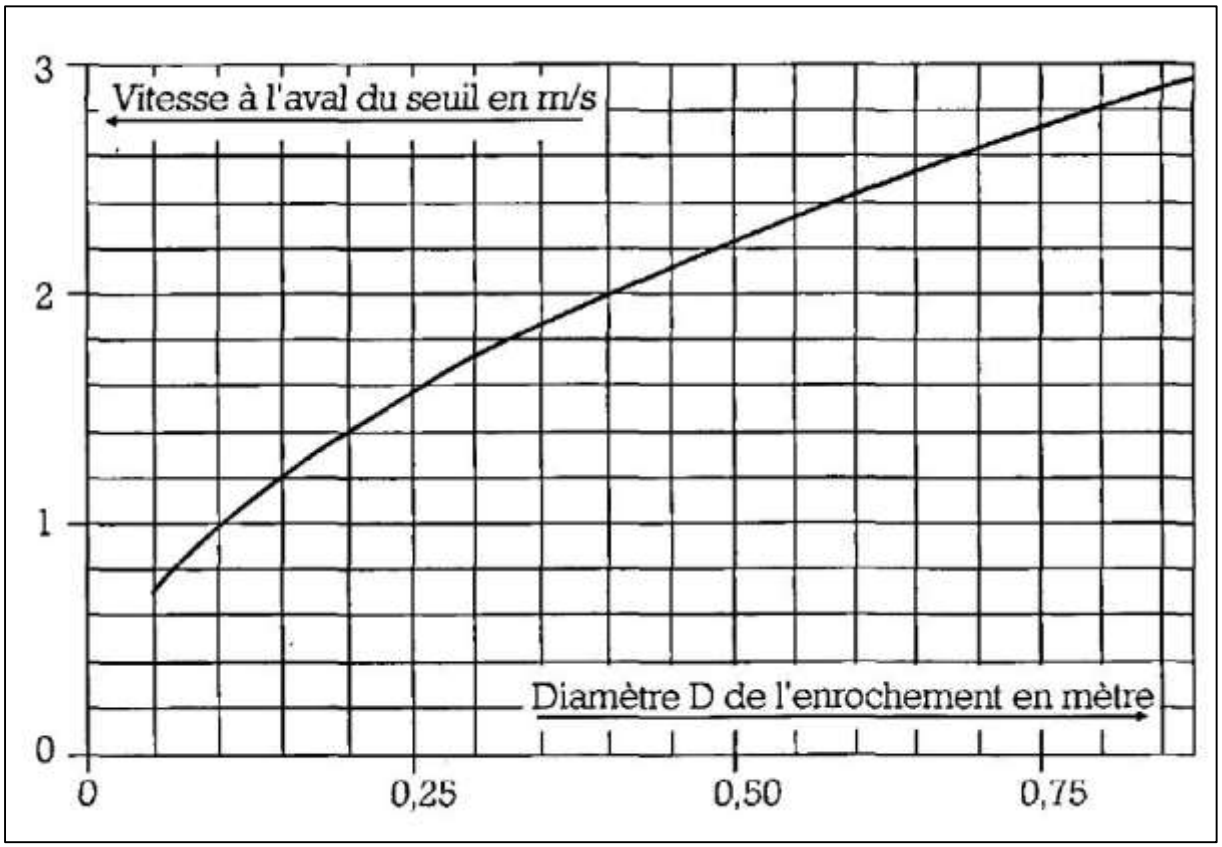
| Hauteur des blocs de chutes | Tirant d'eau à l'aval du bassin de dissipation | Rapport h2/y1 (abaque) | Hauteur des blocs de chicanes | Rapport h4/y1 (abaque) | Hauteur du seuil terminal | Rapport L/y2 (abaque) | Largeur du bassin de dissipation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| h1 | y2 | h2/y1 | h2 | h4/y1 | h4 | L/y2 | L |
| 0,14 | 1,23 | 1,75 | 0,24 | 1,30 | 0,20 | 2,6 | 3,19 |

### ❖ Abaque de lecture des caractéristiques du bassin de dissipation de type II



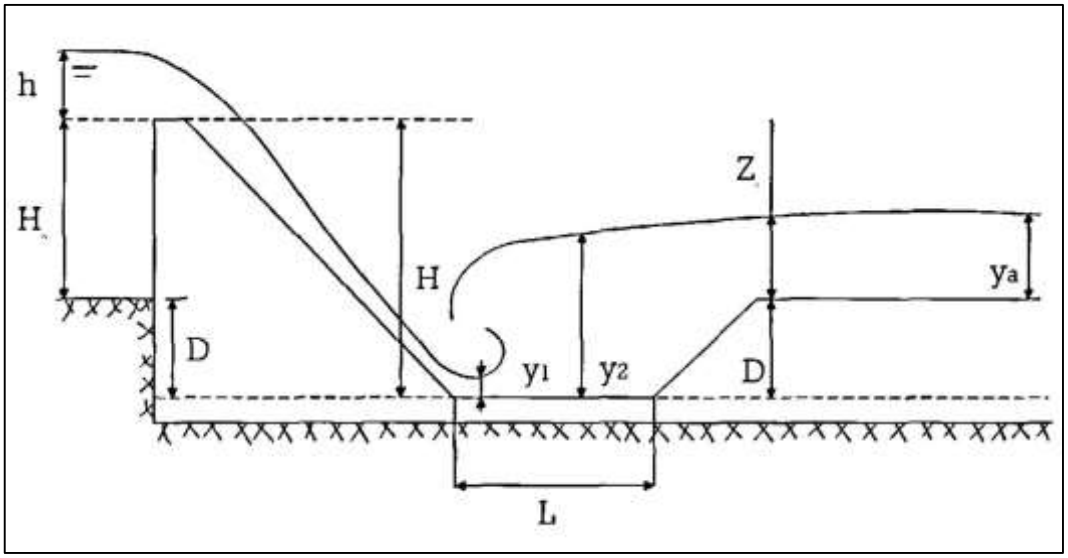

*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

❖ **Taille des enrochements**




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

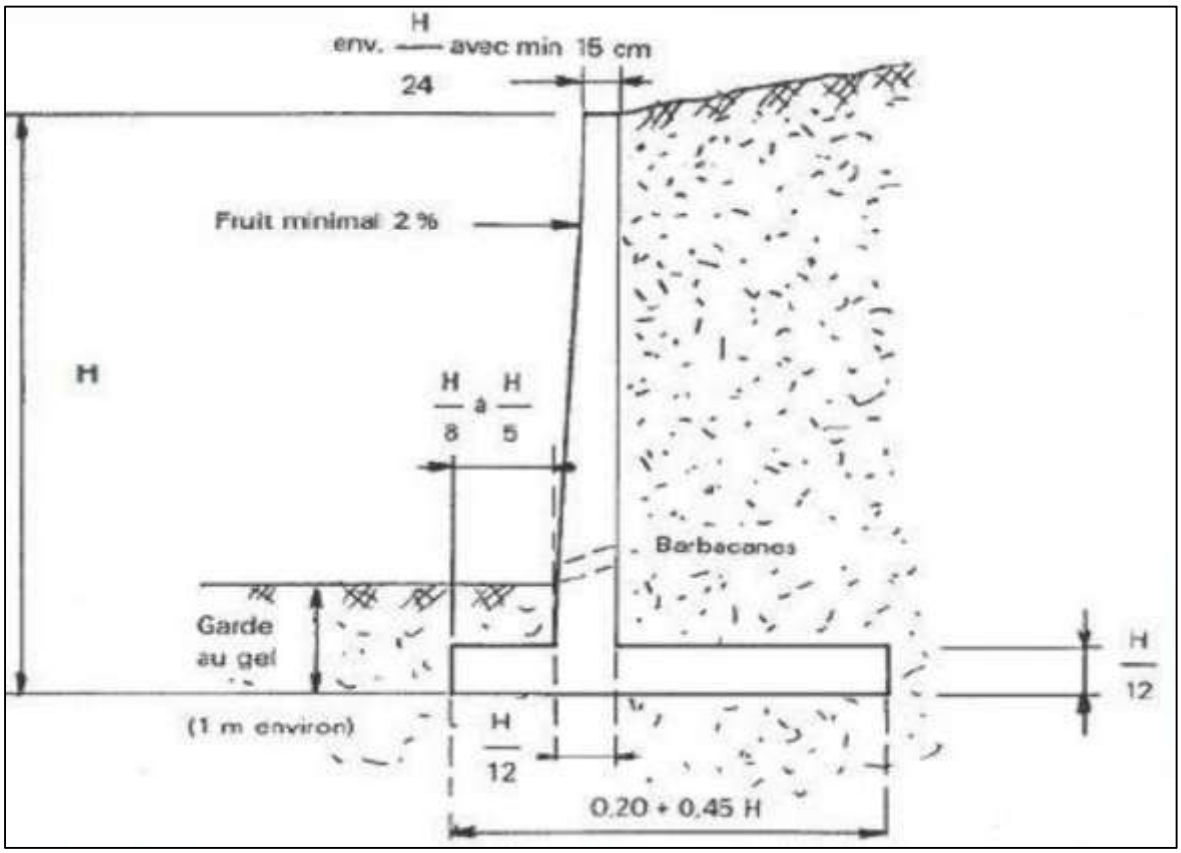
❖ **Ensemble déversoir et bassin de dissipation**




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

## 2. Le mur Bajoyer

### ❖ Eléments de predimensionnement




*Source : Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*

### ❖ Les hypothèses de calcul

| | |
|---|---|
| Poids volumique du béton cyclopéen (Mpa) | 24 |
| Résistance du béton à 28 jrs fc28 (kN/m3) | 20 |
| Poids volumique de l'eau (kN/m3) | 10 |
| Poids volumique des terres (kN/m3) | 18 |
| tan φ | 0,33 |
| φ | 18,26 |
| Hauteur de sédiments hsed | 1 |
| Surcharge (kN/m2) | 10 |

- **Prédimensionnement**

| | |
|---|---|
| Hauteur totale Ht (m) | 4,5 |
| Hauteur du voile Hv (m) | 4,1 |
| Largeur sommet voile e0 (m) | 0,2 |
| Largeur à la base voile e1 (m) | 0,4 |
| Hauteur de la semelle e2 (m) | 0,4 |
| Largeur du patin b1 (m) | 0,65 |
| Largeur du Talon b2 (m) | 2,95 |
| Largeur de la semelle B (m) | 4 |

- **Stabilité vis-à-vis du renversement et du glissement**

| **Paramètre** | **symbole** | **valeur** | **Bras de leviers** | **Moments des forces (kN/m).m** |
|---|---|---|---|---|
| Poids propre (kN/m) | *W* | 67,92 | 1,48 | 100,58 |
| Surcharge verticale (kN/m) | *Pqv* | 2,50 | 2,53 | 74,49 |
| Poids des terres vert (kN/m) | *Pt* | 225,09 | 2,47 | 556,97 |
| Poussée des terres verticale (kN/m) | *Pav* | 15,65 | 1,05 | 16,43 |
| Poussée des terres horizontale (kN/m) | *Pah* | 47,41 | 1,50 | 71,12 |
| Surcharge horizontale (kN/m) | *Pqh* | 14,85 | 2,45 | 36,38 |
| Facteur de sécurité du glissement ***(Fsg>1,5)*** | | | 4,43 | vérifié |
| Facteur de sécurité du renversement ***(Fsr>1,5)*** | | | 6,96 | vérifié |

❖ **Stabilité du sol de fondation**

| **Paramètre** | **Symbole** | **Valeur** |
|---|---|---|
| Somme force verticale (kN/m) | *Fv* | 338,16 |
| Somme force horizontale (kN/m) | *Fh* | 62,26 |
| Résultante (kN/m) | *R* | 343,84 |
| Excentricité (m) | *e* | 0,10 |
| Quart de la base (m) | B/4 | 1,00 |
| Obliquité | angle δ | 80 |
| Conditions de stabilité | | vérifiée |

# ANNEXES 2. PLAN DE GESTION ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE

## ❖ Grille d'évaluation des impacts

| Source d'impact | COMPOSANTES DU MILIEU RECEPTEUR | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Milieu Physique | | | Milieu Biologique | | Milieu humain | | | | | |
| | Air | Sol | Eaux de surface | Faune | Végétation | Sécurité / Santé | Emploi | Circulation déplacement | Commerce et transport | Agriculture et élevage | Paysage |
| **Phase de préparation du site et de réhabilitation des ouvrages** | | | | | | | | | | | |
| Installation du chantier | N | N | O | O | N | N | P | O | P | O | N |
| Déblai et mise en dépôt du tout venant | N | N | O | N | N | N | O | O | O | O | N |
| Travaux de réhabilitation de la digue du barrage | N | N | N | O | N | N | P | N | P | O | N |
| Travaux de reconstruction du déversoir | N | N | N | O | N | N | P | N | P | O | N |
| Transport et circulation liée aux activités de chantier | N | N | O | N | N | N | P | N | P | O | N |
| Création et exploitation des emprunts et carrières | N | N | O | N/P | N | N | P | N | O | O | N |
| Pose des protections des talus de la digue | N | N | N | N | N | N | P | N | O | O | N |
| Travaux de reconstruction de la diguette de protection | N | N | N | O | N | N | P | N | P | N | N |
| Présence de main d'œuvre | O | O | N | N | N | N | P | O | P | | P |
| **Phase d'exploitation de l'eau** | | | | | | | | | | | |
| Entretien des infrastructures de la retenue | N | N | N | O | N | N | P | N | P | N | N |
| Exploitation du périmètre irrigué en aval | | | N | N | P | O | P | O | P | P | P |

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

❖ **Plan de mise en œuvre des mesures d'atténuations**

| Milieu Récepteur | IMPACTS | Mesures d'atténuation / Bonification | Responsabilités | | | Indicateur de suivi | Calendrier d'exécution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Exécution | Surveillance | Suivi | | |
| **Milieux biophysique** | | | | | | | |
| Air/Micro climat | -Emission de poussière ;<br>-Emission de gaz d'échappement ($co_2$) | -Arrosage régulier des voies d'accès au chantier et à la traversé des agglomérations ;<br>-visite technique régulier des véhicules et engins du chantier. | Entreprise | -Mission de Contrôle (MDC)<br>- UCP<br>DPEEVCC | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC | -Le chantier et la traversée des agglomérations sont arrosés<br>-Les véhicules et engins sont peu polluants | Début et pendant les travaux |
| Sols | -Erosion et tassement du sol ;<br>-Pollution par les hydrocarbures ; | -Remise en état des zones d'emprunt et de carrières ;<br>-Gestion des déchets solides et liquides | Entreprise | -MDC<br>-Comité de surveillance<br>DPEA<br>DPEEVCC | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC<br>BUNASOLS | les zones d'emprunt sont remises en état ;<br>-existence d'un plan de gestion des déchets de l'entreprise. | Pendant et après les travaux |
| Eaux de surface | -Risque de pollution par les matières en suspension et les hydrocarbures ; | -Imposition dans le cahier de charges la propreté des lieux (collecte et élimination des déchets solides et liquides) ;<br>-Renforcer les capacités du comité local de l'eau (CLE) ; | Entreprise,<br>exploitant du barrage | MDC<br>Comité de surveillance<br>DPEA<br>DPEEVCC | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC | existence d'un comité de l'eau du barrage ;<br>-existence des pistes d'accès à l'eau du barrage ; | Début, pendant et après les travaux |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | -Risque de pollution de l'eau du barrage par les engrais chimiques.<br>-Risque de pollution par le piétinement et les déjections animales | -délimiter un couloir de protection des berges du barrage ;<br>- identification des voies d'accès à l'eau du bétail et réalisation des perrés maçonnés au niveau des voies d'accès au barrage. | | Mairie | | -Un couloir de protection des berges du barrage existe | |
| Végétation | -Destruction du couvert végétal ;<br>-Prolifération des plantes envahissantes | -Plantation de compensation et protection des berges du barrage ;<br>-Reboisement compensatoire dans les zones d'emprunts ; | -Entreprise,<br>-Populations bénéficiaires ; | MDC<br>-Comité de surveillance<br>DPEEVCC | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC | Les arbres sont plantés et entretenu | Pendant et Après travaux |
| Faune | -Risque de collision ;<br>-Destruction de l'habitat faunique ;<br>-Risque d'intoxication des animaux et | -Interdiction de prélever la faune par le personnel du chantier pour l'alimentation,<br>-Limitation de vitesse à 30Km/h sur le chantier ;<br>-Réglementation de l'abreuvement du bétail ; | -Entreprise,<br>-Exploitant du barrage ;<br>-DPEEVCC ;<br>-DPRAH | MDC<br>-Comité de surveillance<br>DPEEVCC<br>Mairie | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC<br>-DPRAH | -Les conducteurs circulent à une vitesse réduite.<br>-Les exploitants sont formés et l'utilisation des pesticides est contrôlée ; | Pendant et après les travaux |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | le bétail par les pesticides lors de l'abreuvage. | -Réalisation de piste à bétail bien balisée | | | | -les pistes à bétail existent et son empruntées par le bétail<br>-l'abreuvement du bétail est réglementée dans la zone d'influence du projet. | |
| **Milieu humain** | | | | | | | |
| Sécurité / Santé | -Nuisance olfactive, auditif et émission de poussière ;<br>- Développement de maladies hydriques (paludisme, bilharzioses) ;<br>-Risque d'accident de travail ou de circulation. | -Interdiction l'accès des chantiers aux populations riveraines surtout les enfants ;<br>-Limitation la vitesse à 30 km/h<br>-Installer des balises et panneaux de signalisation aux endroits dangereux ;<br>-Doter la main d'œuvre d'équipements de protection individuel (EPI) et veiller à leur utilisation effective ;<br>- Arrosage des chantiers et à la traversée des agglomérations | - Entreprises<br>-Prestataires de service ;<br>-District sanitaire de la commune | MDC<br>-Comité de surveillance<br>DPEEVCC | - Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC<br>-DPEA<br>Mairie | le nombre d'accidents sur les chantiers est faible ou nul<br>-les balises et panneaux de signalisation existent ;<br>-le personnel est doté d'équipements de protection individuel (EPI) ;<br>-les voies d'accès au chantier sont arrosées au moins 2 fois par jours. | Dès le début et pendant les travaux |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Population | -Risque de noyade ;<br>-Risque de contamination aux IST (VIH/SIDA) ;<br>- Inondation des concessions à proximité du barrage<br>- Inondation des concessions<br>-Destruction de vergers | -Sensibiliser les populations riveraines sur les risques de noyade ;<br>- Mettre en place un comité de gestion du barrage ;<br>- mettre en place un comité de gestion des conflits liés à l'utilisation de l'eau du barrage<br>-Sensibilisation les populations et le personnel du chantier sur les IST/SIDA | - Mairie ;<br>-Préfecture,<br>-CVD<br>-DPEA ;<br>-DPRAH<br>-District sanitaire de la commune<br>- Cellule projet | -MDC ;<br>- Comité de suivi ;<br>- DPEEVCC<br>- Mairie | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC<br>-Mairie | -le personnel des chantiers et les riverains sont sensibilisés sur l'IST/SIDA ;<br>- PV de sensibilisation des riverains sur le risque de noyade<br>-un comité de gestion des conflits est effectif. | Début des travaux,<br>pendant les travaux et Pendant l'exploitation |
| Circulation | -Perturbation de la circulation ;<br>-Risque d'accident de circulation | -Opter pour la limitation de vitesse en agglomération et sur le chantier | Entreprise ; | MDC<br>-Comité de surveillance | MDC ; BUNEE | Le nombre d'accidents de circulation est faible ou nul | Pendant et après travaux |
| Emploi | -Création d'emplois | Privilégier l'embauche de la main d'œuvre locale ; | -Entreprises<br>-Mairie | MDC<br>-Comité de surveillance ; | Comité de surveillance<br>BUNEE | La main d'œuvre locale est recrutée ; | Dès le début des travaux et |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | temporaires ou permanents<br>-Brassage de population,<br>-Intégration, cohésion sociale | Priorité est donnée aux entreprises locales pour la réalisation des travaux. | | -Mairie | DPEEVCC<br>-DPRAH | -Les entreprises locales sont impliquées dans les travaux | pendant les travaux |
| Commerce, Transport, Artisanat | -Amélioration de l'achat de produits locaux ;<br>-Achat des équipements de construction ;<br>-Achat de carburant, de pièces de rechange et de nourriture | -Politique pertinente d'appui au secteur agropastoral ;<br>-Améliorer la voie d'accès au site ;<br>-Renforcer les mécanismes de commercialisation. | Ministère chargé des infrastructures<br>Ministère du commerce | Comité de suivi | Mairie, BUNEE ; CVD | -la politique d'appui au secteur agropastoral et une foire de commerce de agropastoral existent ;<br>-la voie d'accès au site sont en bon état ; | Pendant l'exploitation |
| Conditions des femmes rurales | -Création d'activés génératrices de revenue<br>-Amélioration des revenus et | -Soutenir les activités féminines qui mériteraient un accompagnement approprié du système de financement décentralisé assurant la promotion des | - Services en charge<br>de la promotion de la femme | Comité de suivi | Comité de surveillance<br>BUNEE<br>DPEEVCC | Les tâches ménagères sont allégées.<br>Les micro-projets sont réalisés en faveur des femmes rurales. | Pendant l'exploitation |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | du bien-être de la femme rurale | Activités Génératrices de Revenus (AGR). | -Structures de micro-crédits ;<br>-Mairie | | -DPRAH | | |

❖ **Récapitulatif du cout de mise en œuvre des d'atténuations**

| **Impacts/Actions environnementales** | **Unité** | **Quantité** | **C.U. (FCFA)** | **TOTAL (FCFA)** |
|---|---|---|---|---|
| Dégradation de la qualité de l'air (arrosage des voies d'accès) | Forfait | | | 2 000 000 |
| Remise en état des emprunts | Forfait | | | 3 000 000 |
| Renforcement technique des exploitants du barrage sur la protection des berges, sur l'impact de l'utilisation des pesticides | Forfait | --- | --- | 2 000 000 |
| Renforcement des mécanismes de commercialisation | Forfait | --- | --- | 2 000 000 |
| Programme d'appui technique et de vulgarisation agricole et de l'élevage par DPRAH et DPEA | Forfait | 3 ans | 500.000 | 1 500 000 |
| Sensibilisation sur les infections sexuellement transmissibles telles que le VIH SIDA | Forfait | | | 2 000 000 |
| Mettre en place un plan d'IEC de prévention sur les maladies hydriques (paludisme, etc.) | Forfait | | | 1 500 000 |
| Former et sensibiliser le personnel sur les risques lié à l'intoxication et aux mesures de sécurité | Forfait | | | 500 000 |
| Appui aux comités de gestion du barrage | Annuel | 3 ans | 500.000 | 1 500 000 |
| Soutien aux activités féminines assurant la promotion des Activités Génératrices de Revenus. | Forfait | | | 2.000 000 |
| Reboisement de compensation (zones d'emprunts, protection des berges, plantation d'alignement sur les pistes) | Forfait | 3000 | 2000 | 6 000 000 |
| Surveillance et suivi environnemental (suivi permanent, la supervision, évaluation). | Forfait | - | 7 000 000 | 7 000 000 |
| Compensation pour les infrastructures publiques (forages) | U | 2 | 9 000 000 | 18 000 000 |
| Dédommagement des propriétaires de vergers | | | | 9 525 000 |
| **TOTAL GENERAL** | | | | **58 525 000** |

# ANNEXES 3. METRE ET DEVIS

## ❖ Volume de remblais

| Profils | Cote TN (m) | Distance partielle (m) | Hauteur digue (m) | Surface partielle (m²) | Volume partiel ($m^3$) | Volume cumulé ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 300,00 | - | 0,10 | 0,37 | - | - |
| 2 | 299,98 | 12,77 | 0,12 | 0,45 | 5,23 | 5,23 |
| 3 | 299,88 | 23,89 | 0,22 | 0,87 | 15,71 | 20,94 |
| 4 | 299,70 | 16,29 | 0,40 | 1,72 | 21,07 | 42,01 |
| 5 | 299,65 | 12,76 | 0,45 | 1,98 | 23,61 | 65,62 |
| 6 | 299,57 | 22,25 | 0,53 | 2,42 | 48,91 | 114,53 |
| 7 | 299,75 | 23,46 | 0,35 | 1,47 | 45,59 | 160,12 |
| 8 | 299,20 | 22,40 | 0,90 | 4,77 | 69,89 | 230,01 |
| 9 | 298,98 | 22,03 | 1,12 | 6,43 | 123,35 | 353,37 |
| 10 | 298,63 | 22,67 | 1,47 | 9,47 | 180,18 | 533,54 |
| 11 | 298,50 | 22,13 | 1,60 | 10,72 | 223,37 | 756,91 |
| 12 | 297,96 | 14,05 | 2,14 | 16,65 | 192,27 | 949,18 |
| 13 | 297,69 | 9,99 | 2,41 | 20,05 | 183,32 | 1 132,50 |
| 14 | 297,53 | 7,98 | 2,57 | 22,20 | 168,60 | 1 301,10 |
| 15 | 297,08 | 22,61 | 3,02 | 28,81 | 576,73 | 1 877,83 |
| 16 | 296,62 | 22,09 | 3,48 | 36,40 | 720,26 | 2 598,09 |
| 17 | 296,13 | 22,33 | 3,97 | 45,42 | 913,49 | 3 511,59 |
| 18 | 295,93 | 22,25 | 4,17 | 49,37 | 1 054,53 | 4 566,12 |
| 19 | 295,77 | 21,97 | 4,33 | 52,65 | 1 120,75 | 5 686,87 |
| 20 | 295,66 | 21,96 | 4,44 | 54,97 | 1 181,67 | 6 868,54 |
| 21 | 295,60 | 7,26 | 4,50 | 56,25 | 403,72 | 7 272,26 |
| 22 | 295,58 | 8,34 | 4,52 | 56,68 | | |
| 23 | 295,56 | 22,48 | 4,54 | 57,11 | | |
| 24 | 295,52 | 22,83 | 4,58 | 57,98 | | |
| 25 | 295,50 | 22,28 | 4,60 | 58,42 | | |
| 26 | 295,57 | 22,49 | 4,53 | 56,90 | | |
| 27 | 295,75 | 22,87 | 4,35 | 53,07 | | |
| 28 | 295,95 | 22,82 | 4,15 | 48,97 | | |
| 29 | 296,03 | 22,53 | 4,07 | 47,37 | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 296,34 | 22,63 | 3,76 | 41,44 | | |
| 31 | 296,59 | 14,16 | 3,51 | 36,93 | | |
| 32 | 296,73 | 7,88 | 3,37 | 34,51 | | |
| 33 | 297,09 | 20,95 | 3,01 | 28,66 | | |
| 34 | 297,29 | 21,08 | 2,81 | 25,63 | | |
| 35 | 297,32 | 0,77 | 2,78 | 25,19 | 19,56 | 7 291,82 |
| 36 | 298,42 | 21,38 | 1,68 | 11,52 | 392,45 | 7 684,27 |
| 37 | 299,52 | 22,64 | 0,58 | 2,70 | 161,06 | 7 845,33 |
| 38 | 301,94 | 21,63 | -1,84 | 0,33 | 32,81 | 7 878,14 |

❖ **Décapage de la digue**

| Profils | Cote TN (m) | Distance partielle (m) | Hauteur de décapage (m) | Largeur de décapage (m) | Surface partielle (m²) | surface cumulée (m²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | (m) | | | |
| 1 | 299,85 | - | 0,25 | 2,25 | 0,00 | - |
| 2 | 299,85 | 12,77 | 0,25 | 4,5 | 60,34 | 60,34 |
| 3 | 299,85 | 23,89 | 0,25 | 4,5 | 112,88 | 173,22 |
| 4 | 299,85 | 16,29 | 0,25 | 4,5 | 76,97 | 250,19 |
| 5 | 299,85 | 12,76 | 0,25 | 4,5 | 60,29 | 310,48 |
| 6 | 299,85 | 22,25 | 0,25 | 4,5 | 105,13 | 415,61 |
| 7 | 299,85 | 23,46 | 0,25 | 4,5 | 110,85 | 526,46 |
| 8 | 299,85 | 22,40 | 0,25 | 4,5 | 105,84 | 632,30 |
| 9 | 299,85 | 22,03 | 0,25 | 4,5 | 104,09 | 736,39 |
| 10 | 299,85 | 22,67 | 0,25 | 4,5 | 107,12 | 843,51 |
| 11 | 299,85 | 22,13 | 0,25 | 4,5 | 104,56 | 948,07 |
| 12 | 299,85 | 14,05 | 0,25 | 4,5 | 66,39 | 1 014,46 |
| 13 | 299,85 | 9,99 | 0,25 | 4,5 | 47,20 | 1 061,66 |
| 14 | 299,85 | 7,98 | 0,25 | 4,5 | 37,71 | 1 099,37 |
| 15 | 299,85 | 22,61 | 0,25 | 4,5 | 106,83 | 1 206,20 |
| 16 | 299,85 | 22,09 | 0,25 | 4,5 | 104,38 | 1 310,57 |
| 17 | 299,85 | 22,33 | 0,25 | 4,5 | 105,51 | 1 416,08 |
| 18 | 299,85 | 22,25 | 0,25 | 4,5 | 105,13 | 1 521,21 |
| 19 | 299,85 | 21,97 | 0,25 | 4,5 | 103,81 | 1 625,02 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 299,85 | 21,96 | 0,25 | 4,5 | 103,76 | 1 728,78 |
| 21 | 299,85 | 7,26 | 0,25 | 4,5 | 34,30 | 1 763,09 |
| 22 | 298,35 | 8,34 | 1,75 | 7,5 | | |
| 23 | 298,35 | 22,48 | 1,75 | 10,5 | | |
| 24 | 298,35 | 22,83 | 1,75 | 10,5 | | |
| 25 | 298,35 | 22,28 | 1,75 | 10,5 | | |
| 26 | 298,35 | 22,49 | 1,75 | 10,5 | | |
| 27 | 298,35 | 22,87 | 1,75 | 10,5 | | |
| 28 | 298,35 | 22,82 | 1,75 | 10,5 | | |
| 29 | 298,35 | 22,53 | 1,75 | 10,5 | | |
| 30 | 298,35 | 22,63 | 1,75 | 10,5 | | |
| 31 | 298,35 | 14,16 | 1,75 | 10,5 | | |
| 32 | 298,35 | 7,88 | 1,75 | 10,5 | | |
| 33 | 298,35 | 20,95 | 1,75 | 10,5 | | |
| 34 | 298,35 | 21,08 | 1,75 | 10,5 | | |
| 35 | 299,85 | 0,77 | 0,25 | 7,5 | 6,06 | 1 769,15 |
| 36 | 299,85 | 21,38 | 0,25 | 4,5 | 101,02 | 1 870,17 |
| 37 | 299,85 | 22,64 | 0,25 | 4,5 | 106,97 | 1 977,14 |
| 38 | 299,85 | 21,63 | 0,25 | 4,5 | 102,20 | 2 079,35 |

❖ **Devis quantitatif et estimatif**

| N° | DESIGNATION | UNITE | QUANTITE | PRIX UNITAIRE | PRIX TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|
| **100** | **Frais de chantier** | | | | |
| 101 | Amenée et repli du matériel | ff | 1,0 | 45 000 000 | 45 000 000 |
| 102 | Installation du chantier | ff | 1,0 | 30 000 000 | 30 000 000 |
| 103 | La délimitation de la bande de servitude | ff | 1,0 | 10 000 000 | 10 000 000 |
| | **Sous-total 100** | | | | **85 000 000** |
| **200** | **Digue** | | | | |
| 201 | Abattage et dessouchage des arbres et des arbustes sur les talus y compris toutes sujétions | ff | 1,0 | 50 000 | 50 000 |
| 202 | Débroussaillage et nettoyage | ha | 1,3 | 200 000 | 269 067 |
| 203 | Déblais provenant du taillage du corps de la digue en dedans dans zone d'effondrement | $m^3$ | 2 142,0 | 500 | 1 071 000 |
| 204 | Maçonnerie de moellons pour mur de crête aval | $m^3$ | 112,0 | 15 000 | 1 680 000 |
| 205 | Maçonnerie de moellons pour mur parapet | $m^3$ | 224,0 | 15 000 | 3 360 000 |
| 206 | Déblai à la main à travers le remblai pour muret de crête aval et mur parapet | $m^3$ | 224,0 | 4 500 | 1 008 000 |
| 207 | Déblai de butée de pied amont et drain de pied aval | $m^3$ | 353,0 | 4 000 | 1 412 000 |
| 208 | Remblai compactés aux engins(digue) | $m^3$ | 4 137,0 | 7 000 | 28 959 000 |
| 209 | Couche de pose talus amont et aval | $m^3$ | 21,0 | 8 000 | 168 000 |
| 210 | Perré sec talus aval | $m^2$ | 104,0 | 15 000 | 1 560 000 |
| 211 | Perré maçonné sur le talus amont | $m^2$ | 52,0 | 20 000 | 1 040 000 |
| 212 | Enrochement butée de pied amont et drain de pied aval | $m^3$ | 353,0 | 10 000 | 3 530 000 |
| 213 | Revêtement latéritique compacté sur crête | $m^3$ | 277,0 | 7 000 | 1 939 000 |
| | **Sous-total 200** | | | | **46 046 067** |
| **300** | **Evacuateur de crue** | | | | |
| 301 | Travaux de nettoyage de l'emprise du déversoir y compris le chenal | $m^3$ | 8 362,0 | 500 | 4 181 000,0 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 302 | Déblai issu du décapage du chenal sur environ 150 ml | $m^3$ | 451,0 | 5 000 | 2 255 000,0 |
| 303 | Béton cyclopéen à 250kg/m3 | $m^3$ | 3 921,0 | 100 000 | 392 100 000,0 |
| 304 | Béton armé à 350kg/m3 coulé à la verticale | $m^3$ | 71,0 | 180 000 | 12 780 000,0 |
| 305 | Béton de propreté à 150kg/m3 | $m^3$ | 21,0 | 80 000 | 1 680 000,0 |
| 306 | Béton ordinaire à 250kg/m3 pour bassin dissipation, blocs de chute, blocs chicanes | $m^3$ | 494,0 | 100 000 | 49 400 000,0 |
| 307 | Joints waterstop | ml | 434,0 | 40 000 | 17 360 000,0 |
| 308 | Joints bitumineux | ml | 263,0 | 5 000 | 1 315 000,0 |
| 309 | Enrochement | $m^3$ | 631,0 | 20 000 | 12 620 000,0 |
| 310 | Gabions de blocage | $m^3$ | 114,0 | 30 000 | 3 420 000,0 |
| 311 | Tapis filtrant en sable sous bassin et enrochement | $m^3$ | 557,0 | 10 000 | 5 570 000,0 |
| 312 | Tubes PVC pour barbacanes DN 50 | ml | 73,0 | 3 000 | 219 000,0 |
| 313 | Béton de blocage | $m^3$ | 55,0 | 100 000 | 5 500 000,0 |
| 314 | Remblai compacté pour diguettes de protection | $m^3$ | 14 175,0 | 5 000 | 70 875 000,0 |
| 315 | Couronnement latéritique pour digue de protection | $m^3$ | 1 236,0 | 5 500 | 6 798 000,0 |
| 316 | Perré maçonné pour diguette de protection | $m^2$ | 38,0 | 15 000 | 570 000,0 |
| 317 | Perré sec pour diguettes de protection | $m^2$ | 706,0 | 7 500 | 5 295 000,0 |
| | **Sous-total 300** | | | | **591 938 000** |
| **400** | **Ouvrages de prise** | | | | |
| 401 | Béton de propreté à 150kg/m3 | $m^3$ | 2,0 | 80 000 | 160 000,0 |
| 402 | Béton ordinaire à 250kg/m3 | $m^3$ | 15,0 | 100 000 | 1 500 000,0 |
| 403 | Béton armé à 350kg/m3 | $m^3$ | 12,0 | 180 000 | 2 160 000,0 |
| 404 | Perré maçonné | $m^2$ | 10,0 | 20 000 | 200 000,0 |
| 405 | Enrochement | $m^3$ | 2,0 | 150 000 | 300 000,0 |
| 406 | Déblai à la main | $m^3$ | 22,0 | 5 000 | 110 000,0 |
| 407 | Déblai provenant de l'excavation de la digue existante pour encrage de l'ouvrage de prise | $m^3$ | 6,0 | 5 000 | 30 000,0 |
| 408 | Béton cyclopéen à 250kg/m3 pour escalier de descente | $m^3$ | 3,0 | 100 000 | 300 000,0 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 409 | Fourniture et pose de conduite en fonte DN 300 y compris béton d'enrobage | ml | 35,0 | 30 000 | 1 050 000,0 |
| 410 | Fourniture et pose de Robinet-vanne DN 300 | U | 1,0 | 2 500 000 | 2 500 000,0 |
| 411 | Fourniture et pose de Crépine | U | 1,0 | 250 000 | 250 000,0 |
| 412 | Fourniture et pose de Grille métallique pour les bac amont et aval | U | 2,0 | 800 000 | 1 600 000,0 |
| 413 | Maçonneries de moellons pour escalier d'accès | $m^3$ | 4,0 | 75 000 | 300 000,0 |
| 414 | Echelle de descente dans les bacs | U | 2,0 | 100 000 | 200 000,0 |
| | **Sous-total 400** | | | | **10 660 000** |
| **500** | **Dispositif d'auscultation du barrage** | | | | |
| 501 | Echelle limnimétriquees | ml | 6,0 | 100 000 | 600 000,0 |
| 502 | La délimitation de la bande de servitude | ff | 1,0 | 5 000 000 | 5 000 000,0 |
| 503 | Implantation des bornes d'auscultation | U | 2,0 | 100 000 | 200 000,0 |
| 504 | Matérialisation et implantation des bornes de la PHE | ff | 1,0 | 5 000 000 | 5 000 000,0 |
| | **Sous-total 500** | | | | **10 800 000** |
| **TOTAL General HT** | | | | | **744 444 067** |
| **TVA (18%)** | | | | | **133 999 932** |
| **TOTAL GENERAL TTC** | | | | | **878 443 998** |

# ANNEXES 4. LES PIECES GRAPHIQUES

1. **Vue en plan de la cuvette**
2. **Vue en plan de la digue**
3. **Profil en long de la digue**
4. **Profil en travers type de la digue**
5. **Vue en plan de l'ensemble et coupes de la digue et des ouvrages**
6. **Plan de ferraillage du mur bajoyer**
7. **Vue en plan et coupe de l'ouvrage de prise**