



Bolloré Transport Logistics

**ÉTUDES TECHNIQUES DÉTAILLÉES DU
PROJET DE CONSTRUCTION D'UN OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT
AU PK 21+650 DU RÉSEAU FERRÉ ABIDJAN-OUAGADOUGOU**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET
DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE, ROUTE ET OUVRAGES D'ART



Présenté et soutenu publiquement le [23/01/2017] par :

Daouda Soukpafolo COULIBALY

Travaux dirigés par :

M. Moussa LO

Enseignant 2iE

Monsieur BROU Kouassi Jean Claude

Chef de Département Ordonnancement

Monsieur CISSE Youssouf

Chef de Division Ouvrage d'art

Jury d'évaluation du stage :

Président :

Dr. Abdou LAWANE

Membres et correcteurs :

Mr. Décroly DENOUE

Mr. Arnaud OUEDRAOGO

Promotion : 2015-2016



Citations

*« Une théorie sans pratique est vide et
une pratique sans théorie est aveugle »*

Docteur Kwamé NKRUMAH

*« Ce n'est pas parce que les choses sont
difficiles que nous n'osons pas, mais
parce que nous n'osons pas qu'elles sont
difficiles »*

Sénèque

Dédicaces

Je rends grâce à DIEU le tout puissant, le miséricordieux et je dédie ce travail :

- ✚ à mon homonyme, mon parrain, mon mentor Monsieur KONE Daouda Soukpafole qui me soutient tout le temps ;
- ✚ à ma tutrice à Ouagadougou Madame KINDA Assiata Opportune Zoé Irma, Épouse NEMEHOU
- ✚ à mon tendre père Monsieur COULIBALY Yaya pour m'avoir appris le sens du devoir et de l'endurance ;
- ✚ à ma chère mère Madame TUO Nalata Fatoumata pour tout son amour ;
- ✚ à mes oncles Monsieur BAKAYOKO Tetié Abdoulaye, COULIBALY Amadou, qui m'ont beaucoup accompagné et ont eu confiance en moi ;
- ✚ à tous mes parents et proches.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué au bon déroulement de ce projet. Nous adressons nos remerciements les plus profonds à Monsieur Moussa LO enseignant à 2iE (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement) qui a bien voulu nous encadrer, nous donner des conseils et nous assister pour ce projet de fin d'étude.

D'une manière générale, nous remercions l'ensemble du personnel de notre établissement, 2iE, pour la formation reçue et également l'ensemble des agents de la SITARAIL sans exception pour le bon accueil au sein de cette prestigieuse entreprise.

Nous tenons à remercier pour leur conseil et disponibilité tout au long de ce stage, les personnes suivantes :

- ✚ Monsieur Joël HOUNSSINO, Directeur Général de la SITARAIL ;
- ✚ Monsieur Simplicite ESSOH, Directeur des Structures d'Exploitations de la SITARAIL ;
- ✚ Monsieur Corneille TOE, Directeur des Installations Fixes de la SITARAIL ;
- ✚ Monsieur Dognimin Daniel OUATTARA, Chef de Département VBT à la DIF ;
- ✚ Monsieur Alcide N'GUESSAN, Chef Département Affaires Générales à la DIF ;
- ✚ Monsieur Jean claude BROU, Chef Département Ordonnancement à la DIF ;
- ✚ Monsieur Youssouf CISSE, Chef division Ouvrages d'Art à la DIF ;
- ✚ Messieurs les chargés d'études du BET de la DIF : Karim BOUDO, Djiguiba DOUMBIA, Armand Konan KONAN, Romaric OHOUKOU, Serge ORI, Diarassouba DOUMBIA, Christian OKOU et Vincent Monnet MONNET ;
- ✚ Merci à toute ma famille, mes parents et mes frères et sœurs pour leur soutien.
- ✚ Merci à mes tantes : COULIBALY BIBA, BAKAYOKO FATOU et son époux Monsieur TOURE ADAMA pour tout leur aide.
- ✚ Merci à tous mes amis et proches Youssouf TOURE, Noel ATTEBY, Sékou TOURE, Lassina DIAKITE, Arouna DIARRA

Avant-propos

L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (**2iE**), établissement d'enseignement supérieur professionnel basé à Ouagadougou, résulte de la fusion de l'école des Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) avec l'École des Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et l'Équipement Rural (ETSHER) depuis 2006.

Aujourd'hui, établissement d'excellence grâce à la qualité des formations qui y sont dispensées, **2iE** reçoit des étudiants venant de pays différents et de 27 nationalités différentes et ses diplômes sont accrédités par la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI).

Ce prestigieux institut, centre d'excellence pour la formation et la recherche selon la Banque Mondiale, forme des ingénieurs-entrepreneurs dotés de connaissances théoriques et pratiques dans les domaines de l'Eau et l'Assainissement, l'Environnement, du Génie Civil et Infrastructures Hydrauliques, de l'Énergie et l'Électricité, des Mines et des Sciences Managériales.

Par conséquent, en partenariat avec notre structure d'accueil SITARAIL/Bolloré Transport Logistics, **2iE** se présente comme une plateforme pour le marché africain et pour le marché mondial.

Ainsi, pour former des Ingénieurs capables de relever les défis futurs et de répondre aux exigences du marché de l'emploi puis de parfaire leur formation, il est prévu pour chaque étudiant en fin de cycle MASTER, un stage de fin d'études en entreprise d'une durée minimale de cinq (05) mois.

Le présent document tient lieu de justification de notre projet de fin d'étude du cycle MASTER.

Résumé

Au niveau de la zone du PK 21+ 650 de la ligne ferroviaire Abidjan-Ouagadougou à Anyama, une commune du district d'Abidjan marquée par la présence d'un thalweg, force est de constater qu'en saison des pluies, l'ouvrage d'évacuation existant se trouve insuffisant. Ainsi, ce lieu devient une zone de concentration des eaux pluviales ce qui pourrait mettre en danger la sécurité du trafic ferroviaire.

La présente étude s'inscrivant dans le cadre de la réhabilitation du chemin de fer Abidjan-Ouagadougou porte sur l'étude technique détaillée du projet de construction d'un ouvrage de franchissement du thalweg de la voie ferrée Abidjan-Ouagadougou au PK21+650. Cette étude vise à concevoir et dimensionner des variantes d'ouvrages capables d'assurer la sécurité du trafic ferroviaire et un bon drainage ou évacuation des eaux pluies.

Afin d'atteindre cet objectif plusieurs volets d'études ont été élaborés notamment : l'étude topographique et la détermination de la nature du sol de la zone ; l'étude hydrologique et hydraulique à travers la détermination de la pluviométrie moyenne, la détermination de la crue décennale du projet et le choix des variantes d'ouvrages à savoir les dalots préfabriqués $2 \times 3 \times 4$ de 36 m en variante 1 et en variante 2 provisoire , 4 buses de diamètre $\varnothing 1800$; le dimensionnement structural pour s'assurer des normes de conception des ouvrages hydrauliques.

L'étude de l'estimation du coût du projet de la variante dalot et de la variante buse provisoire buse donne les coûts respectifs suivants : cent trente-neuf millions six cent deux mille neuf cent quatre-vingt-six mille FCFA (139 602 986 FCFA) pour les dalots et quarante-six millions neuf cent soixante-quatre mille neuf cent soixante FCFA (46 964 960) FCFA pour les buses.

Il est vrai que le coût du dalot semble être plus élevé, mais pour des questions de pérennité de l'ouvrage de franchissement dans cette zone, de sécurité du trafic et d'investissements à long terme, nous proposons la variante dalot comme ouvrage définitif.

Mots clés :

1. Voie ferrée
2. Ouvrage de franchissement
3. Dalot
4. Buse
5. Crue décennale

Abstract

In the PK 21 + 650 area of the Abidjan-Ouagadougou railway line in Anyama, a municipality in the Abidjan district marked by the presence of a talweg is present, is to note that in the rainy season, the evacuation structure is inadequate. Thus, this place becomes a zone of concentration of rainwater which could endanger the safety of the railway traffic.

This study, within the framework of the rehabilitation of Abidjan-Ouagadougou railway, is about the full technical study of the project to build a bridge crossing the thalweg of Abidjan-Ouagadougou railway at PK21 + 650. The aim of the study is to design and dimension variants of structures capable of ensuring the safety of railway traffic and good drainage.

In order to achieve this objective, several components of the studies have been developed, notably the topographical study and the determination of the nature of the soil of the zone; The hydrological and hydraulic study through the determination of the average rainfall, the determination of the decadal flood of the project and the choice of the variants of works, namely the $2 \times 3 \times 4$ prefabricated scupper of 36 m in variant 1 and in Variant 2 a battery of nozzles 4 nozzle of diameter \emptyset 1800; structural dimensioning to ensure standards of design of hydraulic structures.

The study of the estimation of the project cost of the variant dalot and the variant buse gives the respective costs according to one hundred and thirty-nine million six hundred and two thousand nine hundred and eighty-six thousand FCFA (139,602,986 FCFA) and for the variant dalot Forty-six million nine hundred sixty-four thousand nine hundred and sixty CFA francs (46,964,960) FCFA for the variant buse.

It is true that the cost of the scuppers seems to be higher, but for the reasons of sustainability of the crossing structure in this area, traffic safety and long-term investments we propose as a definitive work the variant dalot.

Keywords:

1. Railway
2. Crossing structure,
3. Dalot,
4. Nozzle
5. Average rainfall

Liste des abréviations

2IE	:	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
BAEL	:	Béton Armé aux Etats Limites.
BV	:	Bassin Versant.
CIEH	:	Certificat International d'Écologie Humaine.
CCTG	:	Cahier de Clauses Techniques Générales.
DIF	:	Direction des Installations Fixes.
ELS	:	État Limite de Service.
ELU	:	État Limite Ultime.
HA	:	Haute Adhérence.
LCPC	:	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
ORSTOM	:	Office de Recherche Scientifique et Technique d'Outre –Mer.
PK	:	Point Kilométrique.
SETRA	:	Service d'Études sur le Transport des Routes et leurs Aménagement.
SITARAIL	:	Société Internationale de Transport Africain par Rail.
SODEXAM	:	Société d'Exploitation de Développement Aéroportuaire Aéronautique Météo.
TTC	:	Toutes Taxes Confondues.
UTM	:	Universal Transverse Mercator.
VBT	:	Voie Bâtiment Travaux.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des paramètres du bassin versant.....	13
Tableau 2 : Pluie totale annuelle sur 10 ans	14
Tableau 3 : Choix d'ouvrage après dimensionnement en sortie dénoyée.....	22
Tableau 4 : Résultat du dimensionnement hydraulique des buses	23
Tableau 5 : Récapitulatif du devis quantitatif et estimatif du dalot	39
Tableau 6 : Récapitulatif du devis quantitatif et estimatif de la buse	39
Tableau 7 : Choix du coefficient de ruissellement en fonction de la pente	52
Tableau 8 : Choix du coefficient de ruissellement en fonction du sol	53
Tableau 9 : Choix du coefficient de ruissellement en fonction de la couverture végétale.....	53

Liste des figures

Figure 1 : Zone du projet ; remblai aval emporté.....	6
Figure 2 : Situation de la zone du projet sur Google earth.....	7
Figure 3 : Vue d'ensemble de la zone du projet.....	7
Figure 4 : Démarche de travail.....	9
Figure 5 : Délimitation du bassin versant avec le logiciel Global Mapper	12
Figure 6 : Représentation schématique de l'ouvrage	25

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre I : Présentation générale du projet	3
I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	3
II. DESCRIPTION DU PROJET.....	5
Chapitre II : Méthodologie de travail	8
I. OUTILS D'INTERVENTIONS.....	8
II. COLLECTE DES DONNÉES.....	8
III. DÉMARCHE DE TRAVAIL.....	9
Chapitre III : Détermination des paramètres de l'étude topographique, hydrologique et hydraulique	10
I. ÉTUDE TOPOGRAPHIQUE ET NATURE DU SOL.....	10
II. ÉTUDE HYDROLOGIQUE.....	11
III. ÉTUDE HYDRAULIQUE.....	19
Chapitre IV : Dimensionnement structural et conditions de réalisation des ouvrages	24
I. LE DALOT.....	24
II. LES BUSES.....	33
III. PLAN ET DÉTAILS DE L'OUVRAGE.....	34
IV. CONDITIONS DE RÉALISATION DES OUVRAGES ET DESCRIPTION DU MATÉRIEL DE LA VOIE FERRÉE ET.....	34
Chapitre V : Étude d'impact environnemental social et estimation financière	38
I. ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL.....	38
II. ESTIMATION FINANCIÈRE.....	39
Conclusion générale et recommandations	40
Bibliographie	42
Liste des annexes	43
Table des matières	108

Introduction générale

L'un des atouts de développement durable de l'intégration des pays Africains est de se doter d'infrastructures permettant de répondre aux besoins actuels et futurs. En effet, les infrastructures ferroviaires telle que le chemin de fer restent dans le monde le moyen le plus économique, fiable et sûr pour le transport des marchandises lourdes ou grandes ainsi que pour le transport des personnes.

C'est dans cette optique que la construction de la ligne du chemin de fer Abidjan-Ouagadougou débutée en 1904, s'est achevée en 1954 à Ouagadougou. Représentant un rôle important dans l'économie de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso, cette ligne constitue un maillon de l'épine dorsale de l'intégration et de l'économie de ces deux pays en ce sens que, chaque année 300 000 voyageurs circulent sur la ligne grâce à 6 trains de voyageurs par semaine qui desservent une quarantaine de gares au départ d'Abidjan et de Ouagadougou.

Cependant, le chemin de fer réhabilité récemment, de 1995 à 2001, connaît aujourd'hui une augmentation de son trafic qui nécessite une urgente réhabilitation. En vue de résoudre ce problème et de contribuer au renforcement de l'intégration régionale, les États de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso ont signé un accord-cadre. D'où le projet de réhabilitation du chemin de fer Abidjan-Ouagadougou–Kaya et celui de la construction de la nouvelle voie ferrée Kaya–Tambao confiée au groupe français Bolloré Transport Logistics à travers sa filiale **SITARAIL** (Société Internationale de Transport Africain par Rail), concessionnaire du réseau.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre thème de mémoire de fin de cycle d'ingénierie « **Études techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage de franchissement au PK 21 + 650 du réseau ferré Abidjan–Ouagadougou** ». Les différentes études effectuées dans le cadre de ce mémoire abordent plusieurs points subdivisés en chapitres présentés ci-dessous :

- ✚ Chapitre 1 : Présentation générale du projet,
- ✚ Chapitre 2 : Méthodologie de travail,
- ✚ Chapitre 3 : Détermination des paramètres de dimensionnement,
- ✚ Chapitre 4 : Dimensionnement structural de la variante choisie,
- ✚ Chapitre 5 : Étude d'impact environnemental et social et estimation financière.

Chapitre I :

Présentation générale du projet

I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I.1. Historique et mission de la SITARAIL Bolloré TRANSPORT LOGISTICS

Le chemin de fer de la ligne Abidjan–Ouagadougou a été construite entre 1905 et 1954. Pendant 80 ans, ce fleuron de l'Afrique de l'Ouest a été exploité par la Régie Abidjan Niger (RAN) qui cessera ses activités en 1989. La Côte d'Ivoire et le Burkina Faso décident alors de gérer séparément leurs réseaux avant de convenir conjointement de la privatisation de la ligne.

Ainsi en 1994, l'appel d'offres international lancé sous l'impulsion des bailleurs de fonds est remporté par SITARAIL pour une durée de 15 ans, dont le capital est détenu majoritairement par le Groupe Bolloré, dans le cadre du partenariat public-privé.

De 1995 à nos jours, SITARAIL a réalisé de nombreux investissements évalués à près de 80 milliards de francs CFA pour l'acquisition et la réhabilitation des infrastructures ferroviaires, avec un projet à court terme d'accompagner les états de Côte d'Ivoire, du Burkina Faso, du Niger et du Bénin dans la réalisation de la boucle ferroviaire Abidjan-Ouagadougou-Niamey-Cotonou pour gérer les importants flux de marchandises des pays de la sous-région, dont les grands projets miniers et agro-industriels. La SITARAIL a pour vision de contribuer au renforcement socio-économique en reliant des hommes et des femmes.

I.2. Domaines d'activités

1. *Le transport des personnes* : beaucoup plus sûr que la route, le transport ferroviaire permet à des milliers de passagers chaque année de voyager en toute sécurité sur la ligne Abidjan-Ouagadougou. Il permet également de désenclaver des zones rurales particulièrement isolées.

2. **Le transport des marchandises** : avec près de 900 000 T de fret par an : des hydrocarbures, des containers de céréales, des engrais, des matériaux de construction, du coton et aussi des animaux vivants.
3. **Pose, renouvellement et entretien des voies ferrées** : l'objectif de la SITARAIL est de moderniser en profondeur les chemins de fers qu'il exploite. Ainsi, chaque année, des programmes d'investissements ainsi que des programmes réguliers des voies et des ouvrages d'art conséquents sont mis en place en partenariat avec les états afin d'entretenir, d'améliorer et de sécuriser les voies ferrées.
4. **Maintenance matérielle roulant** : qu'il s'agisse du transport de personnes ou de marchandises, SITARAIL place la sécurité avant tout. Ainsi, SITARAIL a mis en place un système de management de la qualité en conformité avec les standards internationaux ce qui a favorisé l'obtention de la certification ISO 9001 et IRIS (International Railway Industry Standard). Également, des experts travaillent sur la ligne pour l'entretien, la révision et les réparations des locomotives comme des wagons, afin d'augmenter en continu les capacités de traction.

**Voir Organigramme de la SITARAIL/Bolloré
Transport Logistics en Annexe 1**

I.3. Présentation de la Direction des Installations Fixes (Direction d'accueil)

La Direction des Installations Fixes (DIF) a en charge l'entretien et le contrôle des installations fixes de la SITARAIL. Elle veille au bon fonctionnement des voies et de ses abords. Elle définit la politique et les méthodes d'entretien de ces installations, contrôle l'avancement et la bonne exécution de l'ensemble des travaux. Elle est composée de trois départements qui sont :

-  le Département Voie Bâtiment Travaux (DVBT) ;
-  le Département des Affaires générales (DAG) ;
-  le Département Ordonnancement (DO).

Le Bureau d'Études techniques (BET, où nous avons effectué notre stage) est chargé de toutes les études de conception de la voie, des bâtiments, des ouvrages d'art et des projets d'embranchement.

II. DESCRIPTION DU PROJET

II.1. Contexte et justification du projet

La voie ferrée Abidjan-Ouagadougou longue de 1260 km, réhabilitée le plus récemment de 1995 à 2001, présente aujourd'hui certaines difficultés légères sur certains tronçons.

En effet, au PK 21+ 650 situé à Anyama, une commune du district d'Abidjan, où l'on a la présence d'un thalweg, force est de constater qu'en saison des pluies, ce lieu semble être une zone de concentration des eaux pluviales (zones d'inondation), ce qui met en danger la vie de l'ouvrage ferroviaire et des habitants environnants.

Notre travail consistant à la réalisation des études techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage de franchissement au PK 21+650 du réseau ferré Abidjan-Ouagadougou en tenant compte des critères de coût, de délai de réalisation, de la facilité de mise en œuvre et de l'importance de l'impact sur l'environnement.

Ainsi, notre objectif général est de faire une étude complète d'une ou deux variantes d'ouvrages de franchissement au PK21+650 afin d'assurer la continuité du trafic.

Comme objectifs spécifiques, il s'agira de proposer des ouvrages, de dimensionner ces ouvrages, d'élaborer les plans, de proposer les conditions de réalisations, et de faire le chiffrage des ouvrages proposés

Ce projet qui s'insère dans le cadre de la réhabilitation du chemin de fer Abidjan-Ouagadougou jusqu'à Tambao (Voir situation de la zone du projet en *Annexe 2*) initié par les gouvernements de Côte d'Ivoire et du Burkina Faso permettra de faire passer la vitesse des trains de transport de marchandises de 40 km/h à 70 km/h, et le train des passagers de 50 km/h à environ 80 km/h.

II.2. Situation de la zone du projet

Le projet de construction de notre ouvrage de franchissement se situe à Abidjan (Capitale économique de la Côte d'Ivoire) dans la commune d'Anyama au PK 21+650 avec pour coordonnées géographiques : X= 382784 et Y= 603999 soit 5,4634° en latitude et -4,058106316720 en longitude.

La zone du projet contient actuellement une buse de 800 mm de diamètre et 28 m de longueur située en dessous du rail avec des têtes d'ouvrages inexistantes dégradés. Les figures ci-dessous présentent la zone du projet.



Figure 1: Zone du projet ; remblai aval emporté

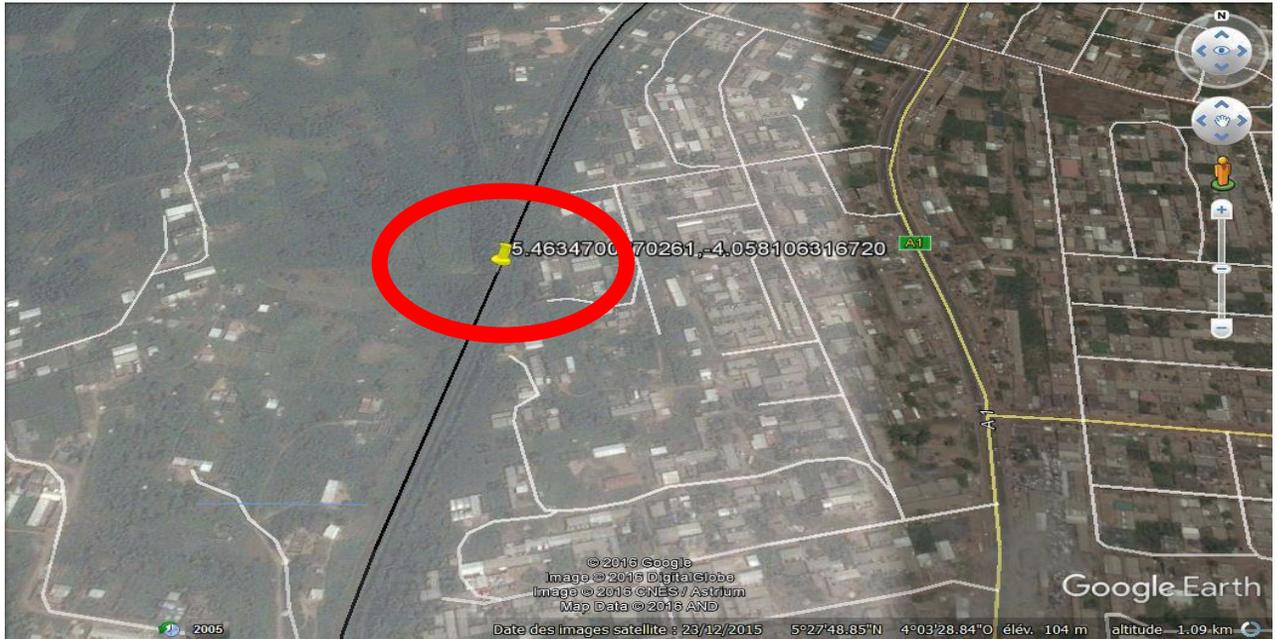


Figure 2 : Situation de la zone du projet sur Google earth

Figure 3 : Vue d'ensemble de la zone du projet



Chapitre II :

Méthodologie de travail

I. OUTILS D'INTERVENTIONS

I.1. Recherches documentaires

Il s'agit de rechercher tous les documents qui entrent dans le cadre du projet. La recherche documentaire s'est basée sur les documents relatifs au dimensionnement des ouvrages de franchissement de la voie ferrée.

I.2. Matériels

Pour mener à bien notre étude, nous avons utilisé le matériel suivant :

- ✚ les logiciels de Dessin Appliqué à l'Ordinateur : Autocad et Covadis pour les dessins ;
- ✚ les logiciels de traitement de données Google Earth et Goba Mapper pour la délimitation des bassins versant ;
- ✚ autres logiciels dont nous avons fait également usage, tels que : Word, Excel, Archicad, Cype

II. COLLECTE DES DONNÉES

II.1. Données cartographiques et topographiques.

Nous avons utilisé une carte du réseau du chemin de fer pour situer la zone d'étude et effectué des levés sur le terrain afin de faire un état des lieux de la zone et de déterminer le bassin versant.

II.2. Données hydrologiques

Cette collecte de donnée à consister à recueillir les données pluviométriques mensuelles de la station de la ville d'Abidjan sur la période de 2005 à 2010 auprès de la SODEXAM.

III. DÉMARCHE DE TRAVAIL

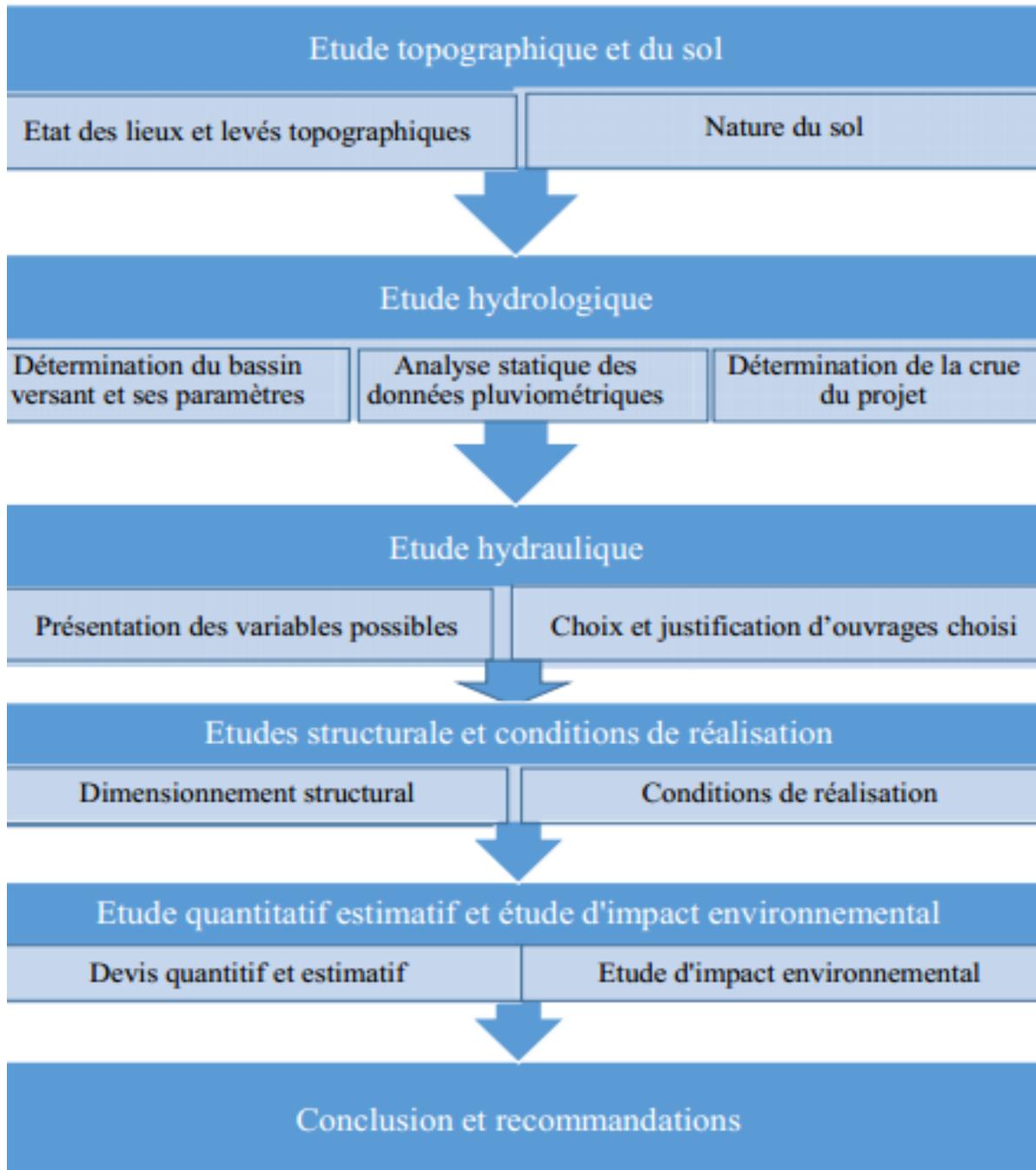


Figure 4 : Démarche de travail

Chapitre III :

Détermination des paramètres de l'étude topographique, hydrologique et hydraulique

I. ÉTUDE TOPOGRAPHIQUE ET NATURE DU SOL

I.1. Étude topographique

I.1.1. État des lieux

Cette tâche à consister à faire une représentation du terrain sur l'ensemble du tronçon depuis le PK 19 en matérialisant les ouvrages existants dans leur ensemble.

I.1.2. Levés topographiques

Effectuées avec la station totale et la canne, les levés ont été faites sur :

- ✚ le rail tous les 20 mètres,
- ✚ les différents ouvrages existants (buses , regard, fossé),
- ✚ le bords des thalwegs gauche et droit,
- ✚ sur toute la zone susceptible d'acheminer les eaux vers notre ouvrage existant du PK 21 + 650.

L'analyse de l'état des lieux et des levées topographiques montrent que notre ouvrage est situé dans une zone où il y a une forte descente d'eau. Les levées ont consisté à poser la canne sur chaque point à lever et à déterminer ses coordonnées. Ces levés ont permis d'avoir une vue générale sur toute la zone du projet.

I.2. Nature du sol

Selon les informations reçues par le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP), la zone du PK 21+650 à ANYAMA est essentiellement en latérite, des cuirasses latéritiques par endroit.

II. ÉTUDE HYDROLOGIQUE

Selon le glossaire d'Hydrologie de 1992, l'hydrologie est la science qui traite les eaux que l'on trouve à la surface de la terre, ainsi qu'au-dessus et au -dessous, de leur formation, de leur circulation et de leur distribution dans le temps et dans l'espace, de leurs propriétés biologiques physiques et chimiques et de leur interaction avec l'environnement y compris avec les êtres vivants.

L'étude hydrologique a pour but de déterminer les crues ou débits du projet, de vérifier et de dimensionner les sections des ouvrages permettant de faire passer les débits correspondant aux crues de fréquence décennale, cinquantennale et centennale.

Les méthodes de calcul hydrologiques prennent en compte la pluviométrie, la topographie des sites, la géologie qui définit les caractéristiques des sols.

Il s'agira de définir les paramètres de dimensionnement de notre ouvrage de franchissement tel que :

- + la détermination du bassin versant,
- + les caractéristiques du bassin versant,
- + les caractéristiques des données pluviométriques,
- + les méthodes de calculs du débit.

II.1. Détermination du bassin versant

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, considéré comme exutoire, est la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cet exutoire. Il est délimité par les lignes de partage des eaux avec les autres bassins versant.

Pour délimiter notre bassin versant, nous avons utilisé le logiciel Google Earth et Gopal Mapper.

Cette délimitation consiste à :

- + repérer tout d'abord l'exutoire,
- + repérer le réseau hydrographique (sens d'écoulement des eaux),
- + repérer les points hauts puis les courbes de niveaux autour de ces points,
- + tracer la ligne de partage des eaux en les rejoignant vers l'exutoire.

II.2. Caractéristiques du bassin versant

II.2.1. La surface et le périmètre du bassin versant

À l'aide du logiciel Google Earth et Global Mapper nous avons déterminé la surface et le périmètre de notre bassin versant. Le principe est le suivant :

- avec Google Earth : on représente le trajet de l'ouvrage,
- avec Global Mapper :
 - on transforme les coordonnées d'origine en coordonnées UTM en précisant la zone 30 qui correspond à notre zone d'étude ;
 - on charge les caractéristiques du relief de la zone du projet et on trace alors les courbes de niveau ;
 - on délimite les bassins versant qui influent sur notre ouvrage de projet et le logiciel se charge de générer les caractéristiques des bassins versant indiqués. (Voir figure ci-dessus)

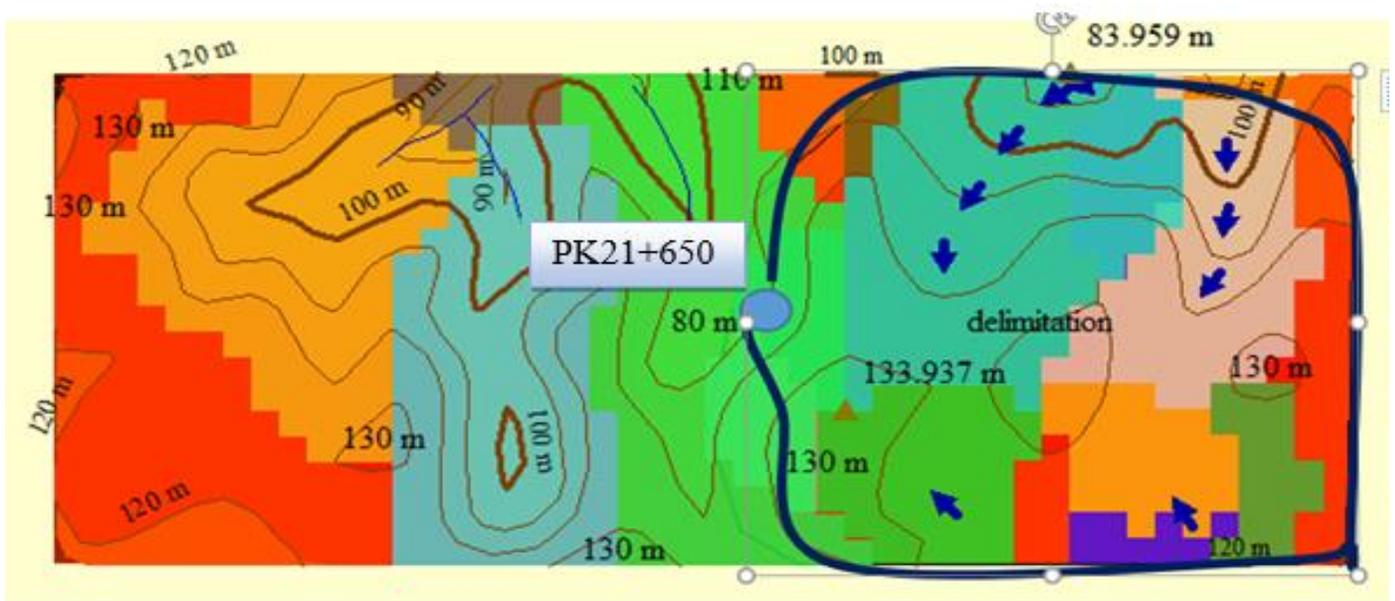


Figure 5 : Délimitation du bassin versant avec le logiciel Global Mapper

Nous avons obtenu une superficie $S=1,04 \text{ km}^2$ et un périmètre $P= 11,48 \text{ km}$

II.2.2. Indice de forme

$$K_G = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi \cdot S}} \sim 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}}$$

P : le périmètre

K_G : le coefficient de GRAVELIUS

$$K_G = 1,5$$

$K_G > 1$, le bassin est de forme allongée.

II.2.3. Pente moyenne du bassin versant

$$i_{moy} = \frac{\Delta H}{\sqrt{S}} = \frac{Alt_{pt+haut} - Alt_{pt+bas}}{\sqrt{S}}$$

i_{moy} : pente moyenne (m/km ou ‰)

$$Alt_{pt+haut} = 130$$

$$Alt_{pt+bas} = 80$$

$$i_{moy} = 42,1\%$$

II.2.4. La longueur du rectangle équivalent

$$L = \frac{P + \sqrt{P^2 - 16S}}{4}$$

$$L = 5,55 \text{ km}$$

II.2.5. Indice globale des pentes

$$I_g = \frac{DH}{L}$$

$$I_g = \frac{50}{5,55}$$

$$I_g = 9 \text{ m/km}$$

Paramètres considérés	Superficie	Périmètre	Indice de forme	Pente moyenne	Longueur du rectangle équivalent	Indice global des pentes
Valeurs numériques	1,04 km ²	11,40km	1,5	42,0 %	5,55km	9m/km

Tableau 1 : Résultats des paramètres du bassin versant

II.3. Caractéristiques des données pluviométriques

Les données météorologiques utilisées fournies par la SODEXAM proviennent de la station d'Abidjan–aéroport de 2005 à 2015. Ces données fournissent une série d'observations des pluies mensuelles sur un échantillon de 10 ans.

Après investigations auprès du service climatologie de la météorologie nationale SODEXAM, les données fournies sont supposées corrigées et bonnes dans l'ensemble.

Les données à notre disposition représentent les hauteurs de pluies moyennes mensuelles de chaque année. Ainsi pour l'obtention des hauteurs de pluies moyennes annuelles, nous allons procéder à la sommation des pluies mensuelles de chaque année. On obtient le tableau suivant

Années	Pluie totale annuelle
2005	136,4
2006	151,1
2007	132,9
2008	142,9
2009	133,7
2010	179,2
2011	163,2
2012	135,0
2013	106,2
2014	178,4
2015	181,0

Tableau 2 : Pluie totale annuelle sur 10 ans

II.3.1. Détermination de la pluie décennale annuelle à l'aide de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné afin de définir les probabilités d'apparition future. Il existe plusieurs lois à savoir la loi de GAUSS, la loi de POISSON, la loi Gamma incomplète, la loi de GALTON (log normal), la loi de FRECHET, la loi X² (Khi-deux), la loi KARAMBIRI-HUBERT et la loi de GUMBEL. Le choix de la loi se fait après analyse des échantillons de pluies.

Dans le cas de notre étude, ayant des données de pluies moyennes annuelles, nous avons opté de faire un ajustement suivant la loi normale ou la loi log normale.

II.3.2. Choix de la période de récurrence et calcul de la pluviométrie moyenne annuelle

II.3.2.1. La période de retour

La durée ou la période de retour (T) d'un événement donné est généralement définie comme étant un intervalle de temps moyen séparant deux événements de fréquence de non dépassement appelée F.

Exprimé en année, c'est la durée au cours de laquelle la période de retour d'une quantité de pluie donnée peut survenir au moins une fois.

II.3.2.2. La pluviométrie

En considérant une année humide avec un temps de retour de 10 ans dans le cadre de notre projet, nous avons obtenu une pluviométrie moyenne annuelle **P= 2071,39 mm**

Le calcul détaillé pour l'obtention de cette pluviométrie est soigneusement décrit en *Annexe 3*.
Calcul de la pluie moyenne décennale.

II.4. Calcul du débit du projet

II.4.1. Présentation succincte des différentes méthodes d'évaluation des débits

L'évaluation du débit de crue décennale peut être faite à partir du manuel élaboré par les équipes du CIEH, l'ORSTOM, du Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF-ENGREF (LCT) et de la FAO et de « Hydraulique Routière ».

Le « Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versant non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche » définit les deux (2) méthodes actualisées ORSTOM et CIEH.

La méthode CIEH est utilisée pour les bassins versant dont la superficie est supérieure à 200 km². Quant à la méthode ORSTOM, elle est utilisée pour les bassins inférieurs à 200 km².

L'hydraulique routière donne la méthode rationnelle utilisée pour l'estimation des débits de crues des petits bassins dont la superficie ne dépasse pas 4 km².

II.4.1.1. Méthode ORSTOM

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

Q_{r10} : débit de pointe de ruissellement superficiel de la crue décennale

A : coefficient d'abattement

S : superficie du bassin en km²

P_{10} : pluie décennale annuelle

K_{r10} : coefficient de ruissellement décennal

α_{10} : coefficient de pointe de la crue décennale (généralement = 2,6)

T_{b10} : temps de base de la crue décennal

$$A = 1 - 0,001(9 \log_{10} T - 0,042 P_{an} + 152) \log_{10} S$$

T : Temps de retour (T=10ans) ;

P_{an} : Pluie annuelle moyenne

S : superficie du bassin en km²

II.4.1.2. Méthode CEIH

Il est évalué à partir de la formule suivante :

$$Q_{10} = aS^b P_{an}^c I_g^d K_{r10}^e$$

Q_{10} : Débit de crue décennale (m³/s)

a, b, c, d, e : Coefficients de la régression multiple

S : Surface du bassin versant (km²)

P_{an} : Pluie annuelle moyenne (mm)

I_g : Indice global de pente (m/km)

K_{r10} : Coefficient de ruissellement décennal

Les paramètres a, b, c, d, e sont déterminés à partir du tableau donnant les coefficients de régressions multiples pour le calcul de Q_{10} (Tableau 11 du manuel de la FAO) en fonction des différents découpages (climatique, géographique « par pays et par groupe de pays »)

II.4.1.3. Méthode rationnelle

Cette méthode est appliquée aux petits bassins versant dont la superficie ne dépasse pas 4 km².

$$Q_{10} = 0,278 CIA$$

C : le coefficient de ruissellement ;

I : intensité de l'averse décennale en mm/h ;

A : La superficie du bassin versant en km² ;

Q_{10} : le débit maximum de la crue décennale m³/s.

II.4.2. Choix de la méthode de dimensionnement du débit

Dans le cas du calcul du débit de crue de notre étude nous avons opté pour la **méthode rationnelle**. Ce choix se justifie par le fait que, d'une part la superficie de notre bassin versant soit inférieure à 4 km², d'autre part notre zone d'étude étant fortement urbanisée, les caractéristiques du bassin versant resteront pratiquement inchangées. Ce qui suppose la théorie selon laquelle le débit maximal est proportionnel à l'intensité de l'averse décennale.

II.4.3. Calcul des paramètres de la méthode rationnelle

II.4.3.1. Détermination du coefficient de ruissellement

La méthode utilisée pour estimer le coefficient de ruissellement est celle préconisée par KENESSEY où le coefficient global de ruissellement C , est la somme de trois coefficients partiels.

✚ C_1 fonction de la pente du bassin.

✚ C_2 fonction de la nature du sol.

✚ C_3 fonction de la couverture végétale du bassin versant.

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Le coefficient de ruissellement obtenu nous donne une valeur $C = 0,6$

Les différents détails du choix des coefficients partiels se trouvent en *Annexe 4*.

II.4.3.2. Détermination de l'intensité de pluie

Le calcul de l'intensité de l'averse décennale I , passe d'abord par celle du temps de concentration T_c du bassin versant. L'intensité I peut être déterminée à partir de la relation entre l'intensité ponctuelle I et le temps de concentration T_c .

$$I = a T_c^{-b}$$

a et b étant les coefficients de Montana de la zone d'étude dépendant du lieu et de la fréquence pluviométrique.

Les coefficients de Montana de la zone d'Anyama nous donnent $a = 460$ et $b = -0.37$

✚ Calcul du temps de concentration T_c

$$T_c = \frac{1}{52} \times \frac{L^{0.77}}{P^{0.38}}$$

$$L = 5,55 \text{ km}$$

$$P = 42 \%$$

$$T_c = 20,42 \text{ min}$$

✚ Calcul du temps de concentration T_c

$$I = 460 \times 20,42^{-0,37}$$

$$I = 150 \text{ mm/h}$$

II.4.3.3. Calcul du débit décennal

$$Q_{10} = 0,28CIA$$

$$Q_{10} = 0,28 \times 0,6 \times 150 \times 1,040$$

$$Q_{10} = 26,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bassins Versant	Surface (Km ²)	Coefficient de ruissellement	Temps de concentration (min/h)	PÉRIODE DE RETOUR 10 ANS			
				a	b	Intensité I (mm/h)	Débit (m ³ /s)
BV 1	1,40	0,6	150	460	-0,37	150	26,21

III. ÉTUDES HYDRAULIQUES

III.1. But de l'étude

L'étude hydraulique de notre projet vise à choisir les différents types d'ouvrages de franchissement ainsi que de déterminer leurs sections ou ouvertures capables d'évacuer le débit de crue calculé.

III.2. Choix et justification des variantes d'ouvrages

Les ouvrages fréquemment utilisés sur la ligne du chemin de fer sont : les buses, les dalots, les ponts à tablier métalliques (PTM), les ponts en maçonnerie et les ponts cadre.

Le choix de l'ouvrage dépend du débit à évacuer, des conditions géotechniques, économiques, de la pérennité de l'ouvrage mais aussi de la durée de réalisation pour éviter un arrêt prolongé de la circulation des trains.

La conception des ouvrages doit respecter les principes et les critères :

- + réaliser des ouvrages économiques ;
- + assurer un drainage correct de la plate-forme ;
- + adopter des pentes les plus proches possibles de celle du terrain afin de minimiser les terrassements ;
- + assurer l'évacuation des débits de crue avec des vitesses limites respectant les tolérances recommandées ;
- + respecter les gabarits permettant de faciliter l'exécution et l'entretien.

Avec un débit de crue décennal estimé à $26,21 \text{ m}^3/\text{s}$ et un remblai de 11,5 m, notre choix sera porté sur les ouvrages transversaux suivant :

1. les dalots en béton armé préfabriqués avec une forte épaisseur de remblai à prendre en compte dans le dimensionnement structural,
2. les buses en béton armé préfabriqué.

III.3. Dimensionnement hydraulique des ouvrages choisis

III.3.1. Les dalots

Le dalot est un ouvrage de franchissement placé sous la chaussée. Il est généralement en béton armé coulé sur place ou préfabriqué et présente une section rectangulaire ou carrée. On adopte les dalots pour des débits élevés, supérieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Selon la conception, il existe trois types de dalots :

- + dalots ordinaires constitués de piédroits fondés sur semelles ou radier général et sur lesquels repose une dalle en béton armé ;
- + dalots cadre dans lesquels la dalle, les piédroits et le radier constituent une structure rigide en béton armé ;
- + dalots portiques analogues aux dalots cadre mais sans radier (piédroits fondés sur semelles)

Dans le cadre de notre projet le dalot sera dimensionné comme un cadre.

On distingue deux types de fonctionnement :

- + la sortie noyée : le niveau de l'eau à l'exutoire dépasse le bord supérieur de l'ouvrage,
- + la sortie libre ou dénoyée : le niveau de l'eau à l'exutoire est en dessous du bord supérieur de du dalot.

La sortie dénoyée présentant plus de sécurité nous avons dimensionné notre ouvrage en sortie libre.

- + Dimensionnement en sortie dénoyée

Débit du projet : $Q = 26,21 \text{ m}^3/\text{s}$

Vitesse admissible d'écoulement : $V = 4 \text{ m/s}$

Hauteur possible de l'ouvrage : $H = Z_{\text{talus}} - Z_{\text{tn}}$

$$H = 99,262 - 88,129$$

$$H = 11,12 \text{ m}$$

La section théorique $S_{th} = \frac{Q}{V} = \frac{26,21}{4}$; $S_{th} = 6,52 \text{ m}^2$

+ La base théorique $B_{th} = \frac{S_{th}}{H} = \frac{6,52}{4}$; $B_{th} = 1,63 \text{ m}$

On prendra une base de $3 \text{ m} > 1,63$

- + Calcul du débit réduit Q_1^*

$$Q_1^* = \frac{q}{B \times H \times \sqrt{2 \times g \times H}} = \frac{26,08}{3 \times 4 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 4}} = 0,25$$

Après analyse de l'abaque en annexe 5 on obtient $H_1^* = 0,64$

$$H_1 = H_1^* \times H; H_1 = 2,56 \text{ m}$$

✚ Calcul de la pente critique

$$Q_2^* = \frac{q}{\sqrt{g \times B^5}} = \frac{26,08}{\sqrt{9,80 \times 3^5}} = 0.21$$

Après analyse de l'abaque en annexe 5 on obtient $I_c^* = 3.2$

$$I = \frac{g \times I_c^*}{K^2 \times B^{1/3}} = 0.48\%$$

On prendra une pente $I = 0.5\%$

✚ Calcul de la vitesse critique et de la vitesse réelle

$$Q_3^* = \frac{q}{K \times B^{1/8} \times \sqrt{I}} = 0.15$$

Après lecture de l'abaque en annexe 5 on obtient la vitesse critique $V^* = 0.36$

$$V_c = V_c^* \times K \times B^{2/3} \times \sqrt{I}$$

$V_c = 3.54 \text{ m/s} < 4 \text{ m/s}$. La condition de la vitesse est vérifiée.

✚ Calcul de la longueur de l'ouvrage L

$$L = l + \left(h - \frac{H}{2}\right) \times 2 ;$$

$L = 36 \text{ m}$ avec :

L : la longueur de l'ouvrage

l : la largeur supérieure du remblai d'accès vue en travers = 14.53m

h : la hauteur de remblai = 11.5 m

H : la hauteur de l'ouvrage = 4 m

Les résultats des calculs hydrauliques sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Proposition	Superficie (Km ²)	Période de retour	Débit	Vitesse réelle	Pente critique	Section	Longueur de l'ouvrage	Nombre d'éléments
1	1,04	10 ans	26,21	3,44	0,5%	2×3×4m	36m	12 éléments de 3m

Tableau 3 : Choix d'ouvrage après dimensionnement en sortie dénoyée

III.3.2. Les buses

✚ Buses circulaires en béton armé préfabriqué

Les buses sont de petits ouvrages en béton ou en métal sous chaussées qui servent à franchir un thalweg, un ruisseau ou à assurer l'écoulement d'un fluide. Elles sont généralement de section circulaire mais parfois en forme d'arches, beaucoup plus aplaties. Les buses sont utilisées exclusivement dans des sections où l'on dispose d'une épaisseur suffisante de remblais (un minimum de 0.80 m de remblai est nécessaire au-dessus de la buse).

❖ Calcul de la section admissible

$$S = \frac{Q}{V} = \frac{26,21}{3} = 8.73 \text{ m}^2$$

❖ Calcul de la section de buse \varnothing 1800

$$S = \pi \frac{D^2}{4}$$

❖ Calcul de la longueur de la buse

$$L = l + \left(h - \frac{D}{2}\right) \times 2$$

❖ Calcul de la surélévation ΔH et de la revanche r

$$\Delta H = 0.083 \frac{Q^2}{D^2} \left[K_e + 0.0028 \frac{L}{D^{4/3}} + 1 \right]$$

$$K_e = 0.70$$

Propositions	D(m)	S(m ²)	Nombre	L	ΔH (m)	V(m/s)	r
\varnothing 1800	1.8	2.54	4	36.93	0.54	3	0.64
\varnothing 1600	1.6	2	5	36.73	0.53	3	0.64

Tableau 4 : Résultat du dimensionnement hydraulique des buses

Pour des questions de topographie de notre site qui ne facilitent pas la mise en œuvre de plusieurs buses nous avons opté pour une batterie de **4 buses de \varnothing 1800**.

Chapitre IV :

Dimensionnement structural et conditions de réalisation des ouvrages

I. LE DALOT

I.1. Normes et réglementations

Dans le cas de cette étude, les normes et les règlements à prendre en compte sont :

- ✚ le fascicule 61 (titre II) concernant les charges d'exploitations, de conceptions, et de calculs et épreuves des ouvrages d'arts ;
- ✚ le fascicule 62 (titre V) sur les règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages d'arts de génie civil ;
- ✚ le fascicule 65 (A du CCTG) et son additif concernant l'exécution des ouvrages en génie civil en béton armé ou précontraint ;
- ✚ bulletin Technique n°4 concernant les appareils d'appui et documents LCP-SETRA concernant leur environnement ;
- ✚ BAEL 91 révisé en 99.

I.2. Calcul de l'ouvrage

Notre calcul d'ouvrage portera sur un dalot cadre fermé ($2 \times 3 \times 4$) long de 36 m. La note de calcul plus détaillée du dalot se trouve en *Annexe 6*.

I.2.1. Pré dimensionnement

Pour une hauteur de remblai de 7.5, l'épaisseur du dalot est calculée par la formule suivante /

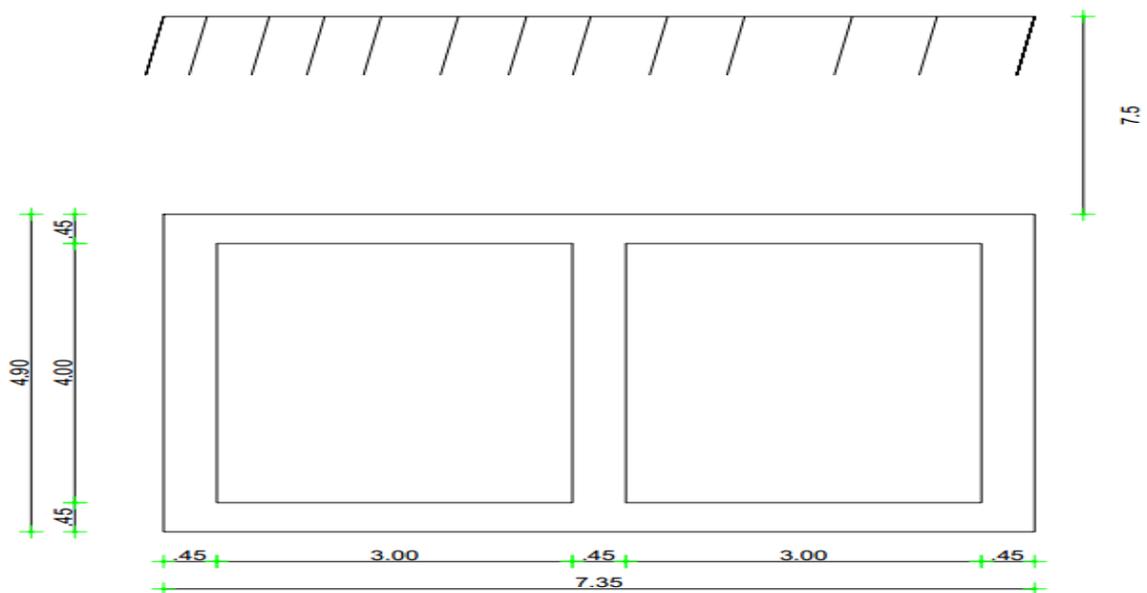
$$e = \frac{l}{10} + 5cm ; \text{ avec } l \text{ la plus grande dimension de la cellule hydraulique.}$$

$$e = 45 cm$$

- ✚ Épaisseur du tablier = 45 cm
- ✚ Épaisseur du radier = 45 cm
- ✚ Épaisseur des pieds droits = 45 cm

La figure ci-dessous donne une représentation schématique de l'ouvrage.

Figure 6 : Représentation schématique de l'ouvrage



1.2.2. Hypothèses et données générales de calcul

1.2.2.1. Caractéristiques des matériaux

✚ Béton

Fissuration préjudiciable

Béton **B25** de poids volumique = **25 kN / m³**

Résistance à la compression à 28 jours : **$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$**

Résistance à la traction à 28 jours : **$f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,1 \text{ MPa}$**

La contrainte à l'état limite du béton : **$\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b} = \frac{0,85 \times 25}{1 \times 1,5} = 14,17 \text{ MPa}$** avec $\gamma_b = 1,5$

Contrainte limite du béton : **$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \cdot f_{c28} = 0,6 \times 25 = 15 \text{ MPa}$**

✚ **Acier**

L'enrobage : $c = 3 \text{ cm}$, car la fissuration est préjudiciable (Ouvrage enterré).

Nuance : acier Haute Adhérence **Fe E 500**

Limite d'élasticité $f_e = 500 \text{ MPa}$

Contrainte de calcul de l'acier : $\sigma_s = f_e / \gamma_s = 435 \text{ MPa}$ avec $\gamma_s = 1,15$

Contrainte limite de l'acier : $\bar{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{2}{3} f_e ; \max(0,5 f_e ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{t28}}) \right\} = 280 \text{ MPa}$

Avec $\eta = 1,6$ car acier Haute Adhérence.

✚ **Remblai**

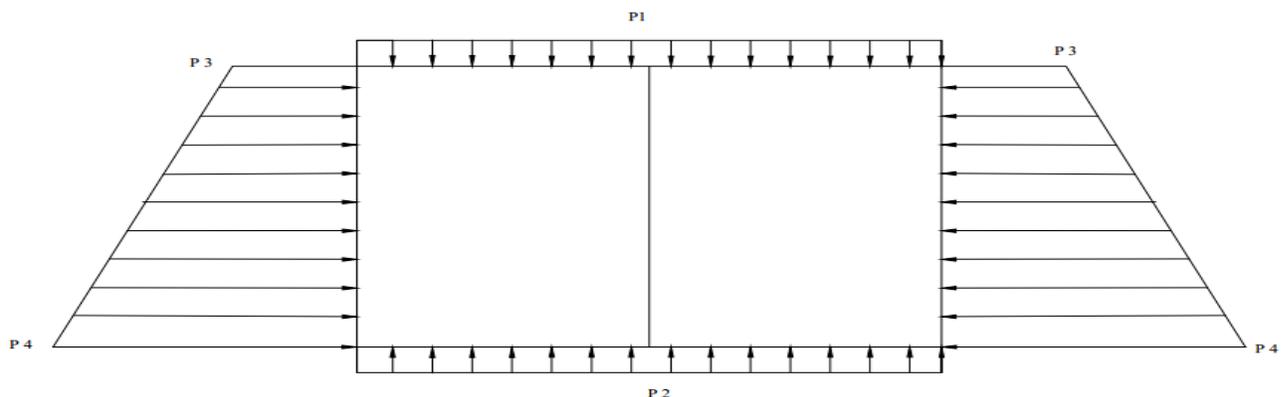
Le remblai d'accès est constitué d'un graveleux latéritique de poids volumique de 21 KN/m^3 et de coefficient de poussée des terres $k = 0,333$. Le dalot est surmonté d'une hauteur de $7,5$ du même matériau.

II.2.2.2. Méthode de calcul

De manière générale, on mènera les calculs par bande de 1 m linéaire de largeur de dalot.

Les valeurs de sollicitation du moment fléchissant M et de l'effort normal N seront déterminées par la méthode des rotations pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud.

1.2.3. Calcul des charges appliquées à la structure



I.2.3.1. Charges permanentes

✚ Charge sur le tablier : P1

- Poids propre du tablier : $P_{\text{ptab}} = e_t \times \gamma_b \times 1 = 0,45 \times 25$

$$P_{\text{ptab}} = 11,25 \text{ kN/ml}$$

- Poids du remblai : $P_r = h_r \times \gamma_d \times 1 = 7,5 \times 20 \times 1$

$$P_r = 150 \text{ kN/ml}$$

- Poids propre du ballast : $P_r = e \times \gamma_{\text{ballast}} \times 1 = 0,2 \times 14,42 \times 1$

$$P_r = 2,88 \text{ kN/ml}$$

- Poids propre rail + traverse : $P_{\text{rail+traverse}} = P_{\text{Trail+traverse}} \times g \times 1 = 175 \times 10$

$$P_{\text{rail+traverse}} = 1,75 \text{ kN/ml}$$

La charge permanente totale sur le tablier : $P_1 = 11,25 + 150 + 3,7 + 1,7 = 166,9 \text{ kN/ml}$

$$P_1 = 166,9 \text{ kN/ml}$$

✚ Charge sur le radier P2

- Poids du tablier : $P_1 = 165,88 \text{ kN/ml}$

- Poids des pieds droits :

$$P_{pd} = \frac{e_1 \times H \times 25 \times 3}{2 \times L + 3 \times e_2} = \frac{0,45 \times 4 \times 25 \times 3}{2 \times 3 + 0,45 \times 3} = 18,36 \text{ kN/ml}$$

$$P_2 = P_1 + P_{pd} = 166,9 + 18,36 = 184,25 \text{ kN/ml}$$

$$P_2 = 184,25 \text{ kN/ml}$$

✚ Charge sur les pieds droits: P3 et P4

$$P_t = K_a \times \rho_t \times h$$

Avec :

$$K_a = 0,333 = \text{coefficient de poussée des terres}$$

h = hauteur du remblai par rapport au point considéré

$$\rho_t = 20 \text{ kN/m}^3 = \text{poids volumique de la terre}$$

$$P_3 (h=7,5) = 0,33 \times 20 \times 7,5 = 49,5 \text{ kN/ml}$$

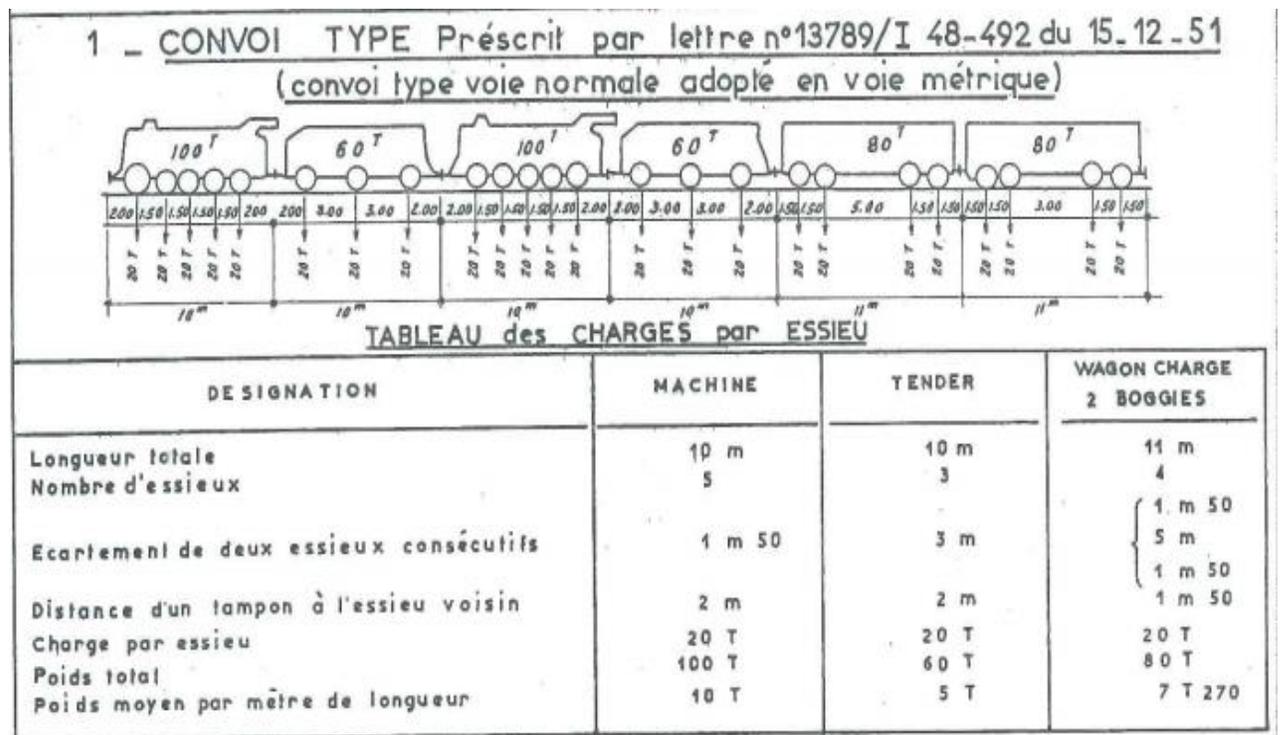
$$P_4 (h=12,4) = 0,33 \times 20 \times 12,4 = 81,84 \text{ kN/m}$$

I.2.3.2. Charges variables

Charges ferroviaires

- ✚ Convoi type prescrit par la lettre n°13789 /I 48-492 du 15-12-51

Convoi type voie normale adopté en voie métrique



- ✚ Calcul du coefficient de majoration

$$\delta = 1 + \frac{0,7}{1+0,2 \times L}$$

Avec L la largeur influence

$$\delta=1,10$$

✚ Calcul des charges réparties par mètre linéaire

➤ Sur le tablier

- Nous avons une charge de 5 essieux de 40 tonnes chacun ($50 \times 40 = 200 \text{ tonnes}$) : $q = 200 \text{ tonnes}$
- La largeur de diffusion des charges selon le sens d'écoulement des eaux pour un angle d'éboulement de 45°

$$L = \text{largeur du convoi sur l'ouvrage} + 2 \times h_{\text{remblai}} \times \tan(45)$$

$$L_x = 6,20 + 2 \times 7,5 \times \tan 45 = 30,49 \text{ m}$$

- La largeur de diffusion des charges selon le sens de circulation des trains

$$L_y = 7,35 \text{ m}$$

La charge Q_t uniforme sur le tablier du dalot est donnée par la relation suivante :

$$Q_t = \frac{q}{L_x \times L_y} = \frac{200}{30,49 \times 7,35} = 0,89 \frac{t}{m^2} = 8,90 \text{ kN/ml}$$

➤ Sur les pieds droits

À l'approche du dalot, le train exerce une pression sur les pieds droits.

La poussée des charges ferroviaires sur les pieds droits est donnée par la relation suivante :

$$Q_p = ka \times Q_t = 0,33 \times 0,89 = 0,29 \text{ t/m}^2 = 2,9 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{p\text{droit}} = 2,90 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{p\text{gauche}} = -2,93 \text{ kN/ml}$$

➤ Sur le radier

$$L_x = 6,20 + 2 \times 11,5 \times \tan 45 = 43,45 \text{ m}$$

$$L_y = 7,35 \text{ m}$$

$$Q_r = \frac{q}{L_x \times L_y} = \frac{200}{43,45 \times 7,35} = 0,62 \text{ t/m}^2 = 6,2 \text{ kN/ml}$$

En affectant le coefficient de majoration on a :

$$Q_{\text{tablier}} = 1,10 \times 8,9 = 9,79 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{p\text{droit}} = Q_{p\text{gauche}} = 1,10 \times 2,93 = 3,22 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{\text{radier}} = 1,10 \times 6,2 = 6,88 \text{ kN/ml}$$

I.2.3.3. Récapitulatif des sollicitations

Partie de l'ouvrage	Sollicitations kN. m/ml et kN/ml		Charges permanentes G	Charges ferroviaires F
TABLIER	Moment Fléchissant	à gauche	-203,31	-9,86
		à droite	-178,94	-11,87
		au milieu	-289,33	6,17
RADIER	Moment Fléchissant	à gauche	180,66	5,15
		à droite	138,11	17,04
		au milieu	-137,78	-2,82
PIEDROIT EXTREME	Moment Fléchissant	inferieur	-51,83	-51,83
		supérieur	-18,41	3,19
		au milieu	107,02	-17,88
	Effort normal		82,31	7,86
PIEDROIT INTERNE	Moment Fléchissant	inferieur	-115,21	-9,33
		supérieur	15,84	3,705
		au milieu	45,84	3,627
	Effort normal		-65,66	5,1

I.2.3.4. Combinaison des charges

La combinaison des charges est donnée par la relation suivante :

⊕ A l'ELS : $G + 1,2 \times F$

⊕ A l'ELU : $1,35G + 1,6 \times F$

Avec G : la charge permanente et F la charge ferroviaire.

I.2.3.5. Récapitulatif des sollicitations après combinaison des charges

Partie d'ouvrage	Sollicitations en kN.m /ml et kN/ml		Combinaisons	
			ELU	ELS
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	-287,5445	-213,142
		A droite	-260,545	-193,172
		Au milieu	-392,8735	-290,926
Radier	Moment fléchissant	A gauche	252,131	186,84
		A droite	213,7125	158,558
		Au milieu	-190,515	-141,164
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	-152,8985	-114,026
		A droite	-19,7495	-14,582
		Au milieu	173,085	128,476
	Effort normal		123,6945	91,742
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	-170,4615	-126,406
		A droite	27,312	20,286
		Au milieu	67,6872	50,1924
	Effort normal		-80,481	-59,54

1.2.4. Calcul des sections d'armatures

Les sections critiques du dalot seront calculées en prenant comme largeur 100 cm et hauteur 45 cm pour les tabliers, radier et piédroits.

Les efforts sont ceux du tableau récapitulatif ci- dessus.

- + La fissuration est jugée préjudiciable.
- + La contrainte du béton est de 25 MPA.
- + L'acier est de nuance HA FeE500.

Pour le calcul des aciers :

- + le tablier et le radier seront calculés en flexion simple,
- + le pied droit central est calculé en compression simple,
- + les pieds droits extérieurs sont calculés en flexion composée.

Les armatures principales sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Le récapitulatif des armatures principales est consigné dans le tableau suivant :

Partie d'Ouvrage			Sections d'aciers (cm ²)	Choix
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	25cm ²	HA20 ; esp =20cm
		A droite	22,66cm ²	HA20 ; esp =20cm
		Au milieu	34,12cm ²	HA 20 ; esp =20cm
Radier	Moment fléchissant	A gauche	21,91cm ²	HA20 ; esp =20cm
		A droite	18,60cm ²	HA16 ; esp =20cm
		Au milieu	16,55cm ²	HA 16, esp =20cm
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	11,6 soit 5.8 /face	HA 14/face ; esp =20cm
		A droite		
Au milieu				
	Effort normal			
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	11,33 soit 5.67/face	HA 14/face ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			

Le récapitulatif des armatures de répartitions est consigné dans le tableau suivant :

Partie d'Ouvrage			Sections d'aciers (cm ²)	Choix
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	8,33	HA 12 ; esp =20cm
		A droite	7,53	HA12 ; esp =20cm
		Au milieu	11,37	HA14 ; esp =20cm
Radier	Moment fléchissant	A gauche	7,30	HA 12 ; esp =20cm
		A droite	6,2	HA10 ; esp =20cm
		Au milieu	5,52	HA10 ; esp =20cm
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	3,87	HA8 ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	3,78	HA8 ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			

II. LES BUSES

Pour les buses il s'agira d'utiliser les buses préfabriquées en fonction du diamètre hydraulique retenu. Nous utiliserons une batterie de 4 buses circulaire de diamètre \varnothing 1800 de type ROCCLA.

III. PLAN ET DÉTAILS DE L'OUVRAGE

À partir des différentes dimensions de l'ouvrage obtenues à l'issue des calculs précédents, les plans ci-dessous des différents ouvrages seront établis :

- ✚ la vue en plan des ouvrages,
- ✚ la vue en élévation,
- ✚ les coupes longitudinales,
- ✚ les coupes transversales,
- ✚ les détails des éléments,
- ✚ les plans de ferrailages détaillés des différentes parties des ouvrages.

Les plans seront consignés en *Annexe 8*.

IV. CONDITIONS DE RÉALISATION DES OUVRAGES ET DESCRIPTION DU MATÉRIEL DE LA VOIE FERRÉE

L'ouvrage à construire au PK 21+650 destiné à franchir le thalweg de la voie ferrée est soit un dalot $2 \times 3 \times 4$ ou soit une batterie de 4 buses $\emptyset 1800$ en béton armé de type ROCCLA.

IV.1. Description du matériel de la voie ferrée

IV.1.1. Le rail

Les rails sont des produits des lingots d'acier laminés et ils sont de type Vignole. Il est constitué de (03) parties :

- ✚ un champignon sur lequel est fait le ralliement,
- ✚ un patin servant d'appui sur les traverses,
- ✚ l'âme qui relie le champignon et le patin.

IV.1.2. Le ballast

Le ballast est un concassé de granite de classe granulométrique 25/55, interposé entre la plateforme et la voie ferrée. Le matériau principal est une pierre de dureté suffisante (granite grès).

Le ballast joue divers rôles :

- ✚ il joue le rôle d'une couche élastique et perméable,
- ✚ il transmet à la plate-forme les charges supportées par les rails,
- ✚ il évite les déplacements longitudinaux et transversaux de la voie,
- ✚ il protège la plate-forme contre l'érosion et l'aération,
- ✚ il empêche la montée de glaise.

Le ballast doit avoir :

- ✚ un coefficient Deval égal à 14 pour les pierres dures et de 12 pour les calcaires ;
- ✚ être assez gros et homogène afin de présenter le minimum de compacité et le maximum de perméabilité ;
- ✚ les arrêtes du ballast doivent être nettes et vives pour permettre l'accrochage aux traverses, l'immobilité de l'ensemble de la couche et favoriser l'existence des vides.

IV.1.3. Les traverses

Elles ont deux principaux rôles :

- ✚ entretoiser les rails pour maintenir leurs écartements,
- ✚ transmettre les charges au ballast.

Il existe trois sortes de traverses : les traverses béton, les traverses bois et les traverses métalliques.

IV.1.3.1. Les traverses béton

Préfabriqués en industrie, elles ont une masse de près de 400 kg, résistent au poinçonnement et sont capables d'assurer la stabilité en l'absence du ballast.

IV.1.3.2. Les traverses métalliques

Les traverses métalliques sont en aciers laminés. Elles sont lourdes de 30 à 40 kg et assurent la stabilité de la voie.

N.B. : Les traverses béton sont économiques car fabriquées sur place. Mais en cas de déraillement, elles sont irrécupérables.

Les traverses métalliques sont importées par conséquent coûteuses par rapport aux traverses béton.

IV.1.4. Autres matériaux nécessaires

Ils permettent de maintenir l'écartement des rails sur les traverses. Ce sont :

- ✚ les crapauds,
- ✚ les boulons,
- ✚ les éclisses,
- ✚ les rondelles,
- ✚ les plaquettes,
- ✚ les coussinets de glissements.

IV.2. Conditions de réalisations des ouvrages

✚ Installation du chantier, préfabrication du cadre ou fourniture des buses

Il s'agira de faire une aire des installations avec tout le matériel y compris la réalisation du cadre à côté de la voie ferrée pour le dalot.

Dans le cas de l'option buse il s'agira de la fourniture des buses avec les fabricants agréés.

✚ Dépose de la voie

Cette opération consiste à déposer la voie existante (rail, traverses, ballast), à la réalisation des fouilles, à la réalisation de la fondation, à la démolition et à l'évacuation de toutes les maçonneries existantes.

Ripage ou manutention de l'ouvrage

Cette tâche consiste à pousser le cadre à l'aide de vérin hydraulique ou d'utiliser une grue pour poser les différents éléments du dalot ou des buses.

Le remblaiement

Le matériau utilisé pour le remblai doit être du graveleux latéritique. Il doit avoir une densité sèche in situ au moins égale à 95 % de la densité sèche maximum donnée par l'essai Proctor modifié. Le compactage se fera par couche de 30 cm. Chaque couche sera soigneusement compactée par plusieurs passes de compacteurs.

Repose de la voie et de ses équipements

Elle consiste à la mise en place de nouvelles traverses et de nouveau rail avec tous leurs équipements.

Ballastage et bourrage

Le ballastage est l'opération qui consiste à verser le ballast sous les traverses. Quant au bourrage, représentant la dernière phase des travaux. Il peut être manuel ou à l'aide d'une machine appelée « bourreuse mécanique ».

Chapitre V :

Étude d'impact environnemental social et estimation financière

I. ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL

Dans cette partie de notre étude il ne s'agit pas de faire une étude complète d'étude d'impact environnemental, mais relever les impacts positifs et négatifs liés à la construction de notre ouvrage.

I.1. Impacts positifs

Comme impacts positifs on peut citer :

- + l'amélioration de la circulation des trains pendant la saison pluvieuse,
- + la sécurité des usagers du train,
- + la sécurité des habitations environnantes.

I.2. Impacts négatifs

- + Érosion des sols en profondeur dans les zones d'emprunts,
- + Nuisances sonores pour les riverains,
- + Brève rupture du trafic ferroviaire pendant la réalisation des travaux.

I.3. Mesures d'atténuations

- + Remettre en état les sols dans les zones d'emprunt et des carrières ;
- + Informer les populations riveraines de la zone des travaux et des éventuels désagréments sonores qui seront provoqués avant le début des travaux ;
- + Prendre les dispositions pour effectuer les travaux dans les règles de l'art, dans la sécurité du personnel, et dans un bref délai.

II. ESTIMATION FINANCIÈRE

L'objectif de l'estimation financière est de faire un devis estimatif et quantitatif des différentes variantes étudiées pour la totalité des travaux prévus.

Elle permet également au maître d'ouvrage SITARAIL de connaître le coût approximatif de l'ouvrage à réaliser. Le détail de l'estimation financière se trouve en *Annexe 7*.

Les tableaux ci-dessous présentent le récapitulatif des différentes variantes.

N°	DESIGNATION DES TRAVAUX	MONTANT
000	SECTION 000 : INSTALLATION DE CHANTIER	7 000 000
100	SECTION 100 : TRAVAUX PRÉPARATOIRES	1 000 000
200	SECTION 200 : TERRASSEMENT	73 746 992
300	SECTION 300 : OUVRAGE D'ART	110 609 164
	TOTAL H. T	118 609 164
	Imprévus et divers (15%)	17 791 375
	TVA (18 %)	3 202 447
	TOTAL TTC	139 602 986

Tableau 5 : Récapitulatif du devis quantitatif et estimatif du dalot

N°	DESIGNATION DES TRAVAUX	MONTANT
000	SECTION 000 : INSTALLATION DE CHANTIER	3 000 000
100	SECTION 100 : TRAVAUX PRÉPARATOIRES	1 000 000
200	SECTION 200 : TERRASSEMENT	53 007 600
300	SECTION 300 : POSE DE BUSES	31 312 000
	TOTAL H. T	35 312 000
	Imprévus et divers (15%)	5 296 800
	TVA (18 %)	6 356 160
	TOTAL TTC	46 964 960

Tableau 6 : Récapitulatif du devis quantitatif et estimatif de la buse

Conclusion générale et recommandations

L'élaboration de notre étude s'inscrit dans le cadre de trouver un ouvrage de franchissement du thalweg de la voie ferrée au PK 21+650 de la ligne Abidjan-Ouagadougou ; il contribuera d'une manière très remarquable à la sécurité du trafic ferroviaire. L'étude de cet ouvrage de franchissement au PK 21+650 dans la zone d'Anyama s'est déroulée en plusieurs étapes que sont :

- ✚ l'étude topographique qui a permis de faire un état des lieux de notre zone d'étude, de délimiter notre bassin versant et déterminer ses caractéristiques avec pour superficie $S=1,04 \text{ km}^2$;
- ✚ l'étude hydrologique qui a permis d'étudier les données pluviométriques obtenues à partir de la station météorologique d'Abidjan afin de déterminer la crue décennale du projet $Q_{10} = 26,21 \text{ m}^3/s$;
- ✚ l'étude hydraulique : en fonction de la crue du projet, de la topographie du terrain, des contraintes de réalisation liées à la durée de rupture du trafic ferroviaire et du dimensionnement hydraulique nous avons retenu par ordre de préférence deux variantes d'ouvrage de franchissement :
 - un dalot préfabriqué $2 \times 3 \times 4$ de **36 m**,
 - une batterie de **4 buses de diamètre $\varnothing 1800$** ;
- ✚ l'étude structurelle qui a permis de calculer les épaisseurs des différents éléments ainsi que les sections d'aciers et de sortir les quantités d'aciers pour le ferrailage de cet ouvrage.

Une épaisseur de 0,45 m et des sections allant de HA 20 à HA8 ont été obtenues à partir des normes de calcul des ouvrages de franchissement.

Il faut noter également que lors de cette étude, le coût de réalisation de ces deux ouvrages a été exprimé à travers un devis quantitatif et estimatif, afin de s'assurer de la faisabilité du projet. Ainsi, le coût de la variante dalot comme ouvrage définitif, s'élève à cent trente-neuf millions six cent deux mille neuf cent quatre-vingt-six FCFA (139 602 986 FCFA) CFA TTC. Quant à la variante buse provisoire, elle s'élève à quarante-six millions neuf cent soixante-quatre mille neuf cent soixante FCFA (46 964 960 FCFA).

Cependant, bien vrai que le dalot semble plus économique, mais pour des questions de sécurité et de pérennité du trafic, nous recommandons le choix définitif la variante dalot.

Bibliographie

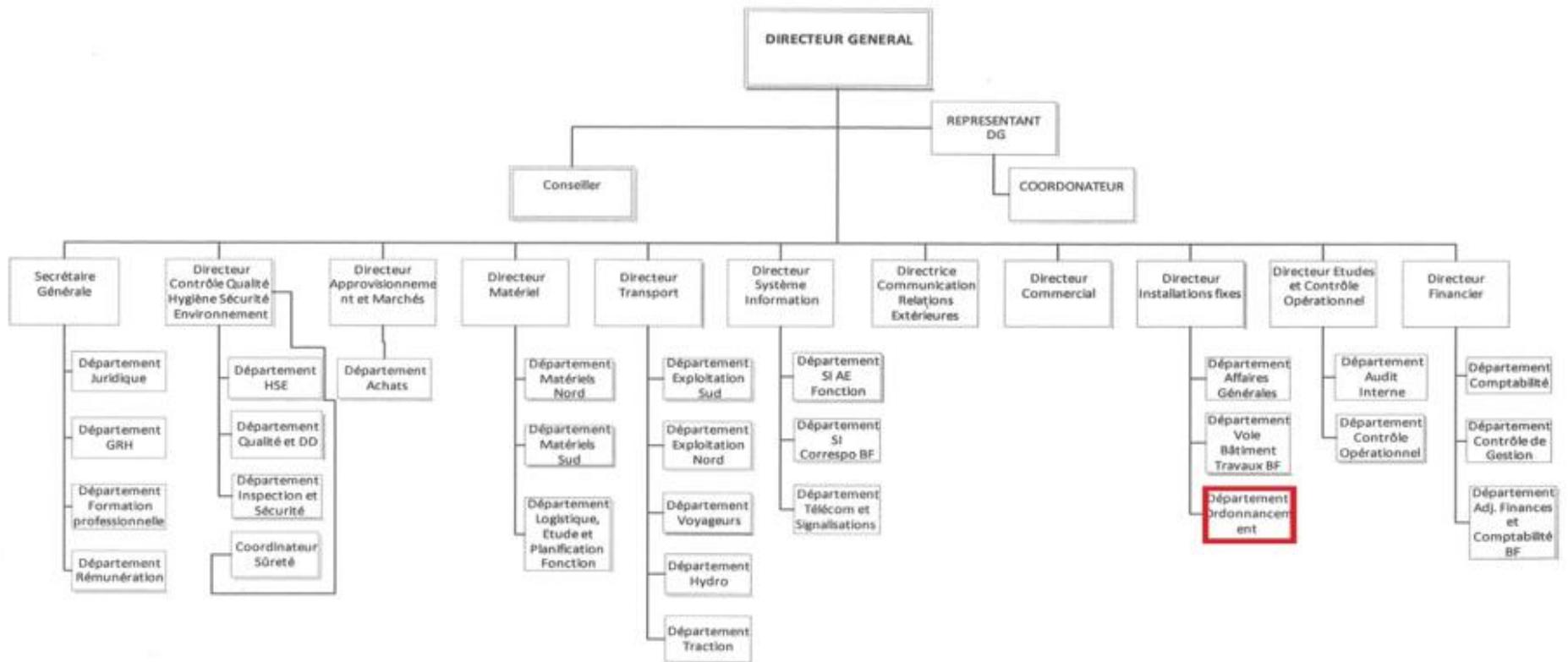
- [1].Adamah MESSAN. Polycopie de cours de Béton armé 1 et 2, 2013.
- [2].Adamah MESSAN. Polycopie de cours de Béton armé 3, 2014.
- [3].Adamah MESSAN. Polycopie de cours d'hydraulique routière partie 2 : ouvrage d'art.
- [4].Manuels d'exécution des petits ouvrages routiers en Afrique, BCEOM, 1975, Min ;
Coopération
- [5].Fascicule XVIII. Reconstruction de la section ferroviaire DIMBOKRO-TAFIRE : Cahier de
prescriptions techniques.
- [6].Angelbert Chabi BIAOU, Polycopié de cours d'hydraulique routière, 2011.
- [7].VANTU, N. Hydraulique Routière. Ministère de la coopération et du développement, France
1981.
- [7].Jean Pierre MOUGUN, BAEL 91 modifié 99, EYROLLES, 2000.
- [8].Le fascicule 61 (titre II) concernant les charges d'exploitations, de conceptions, et de calculs
et épreuves des ouvrages d'arts.

Liste des annexes

<i>Annexe 1</i> : Organigramme de la SITARAIL. Bolloré Transport Logistics	44
<i>Annexe 2</i> : Situation de la zone du projet sur la carte du réseau ferré	45
<i>Annexe 3</i> : Calcul de la pluie moyenne annuelle.....	46
<i>Annexe 4</i> : Choix du coefficient de ruissellement	53
<i>Annexe 5</i> : Abaque du dimensionnement hydraulique	55
<i>Annexe 6</i> : Note de calcul du dalot	55
<i>Annexe 7</i> : Estimation du coût du projet.....	91
<i>Annexe 8</i> : Plans des ouvrages (Plans dalot, Plan buse).....	93

Annexe 1

Organigramme de la SITARAIL. Bolloré Transport



Annexe 2

Situation de la zone du projet sur la carte du réseau ferré



Annexe 3

Calcul de la pluie moyenne annuelle

1. Analyse fréquentielle suivant les lois statistiques.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné afin de définir les probabilités d'apparition future. Il existe plusieurs lois à savoir la loi de GAUSS, la loi de POISSON, la loi Gamma incomplète, la loi de GALTON (log normal), la loi de FRECHET, la loi X2 (Khi-deux), la loi KARAMBIRI-HUBERT et la loi de GUMBEL. Le choix de la loi se fait après analyse des échantillons de pluies.

Dans le cas de notre étude ayant des données de pluies moyenne annuelle nous avons opté de faire un ajustement suivant la loi normale ou la loi log normale.

2. Caractéristiques empiriques de l'échantillon.

Paramètres considérés	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation	Maximum	Minimum
Formules	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$	$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2\right)}$	$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$	=max de l'échantillon	=min de l'échantillon
Valeurs numériques	1759,4 mm	284,5	0,2 soit 20%	2171,5 mm	1274,9 mm

Tableau 1 : Résultat des caractéristiques empiriques de l'échantillon

3. Tracé de l'histogramme des fréquences empiriques et estimation du mode de l'échantillon.

+ Fréquences empiriques

Les fréquences empiriques sont obtenues par la formule suivante :

$$\text{Fréquence} = \frac{\text{effectif par classe}}{\text{échantillon } n}$$

+ Amplitude des classes

Pour obtenir l'amplitude des classes, nous avons appliqué la formule

Suivante : Amplitude = [Pan (max) – Pan (min)] × 10%

$$\text{Amplitude} = 89,66$$

Le tableau ci-dessous nous donne les fréquences empiriques par classe.

Classe	Centre	Effectif	Fréquence (%)
[1274,9 ;1364,59[	2091,67	1	10,00
[1364,59 ;1454,22[	2226,16	0	0,00
[1454,22 ;1543,88[	2360,65	0	0,00
[1543,88 ;1633,54[	2495,14	4	40,00
[1633,54 ;1723,2[	2629,63	2	20,00
[1723,2 ;1812,86[	2764,12	0	10,0
[1812,86 ;1902,52[	2898,61	1	10,0
[1902,52 ;1992,18[	3033,1	0	0,0
[1992,18 ;2081,84[	3167,59	0	0,0
[2081,84 ;2171,5[	2171,5	3	30

Tableau 2 : Fréquence empirique par classe

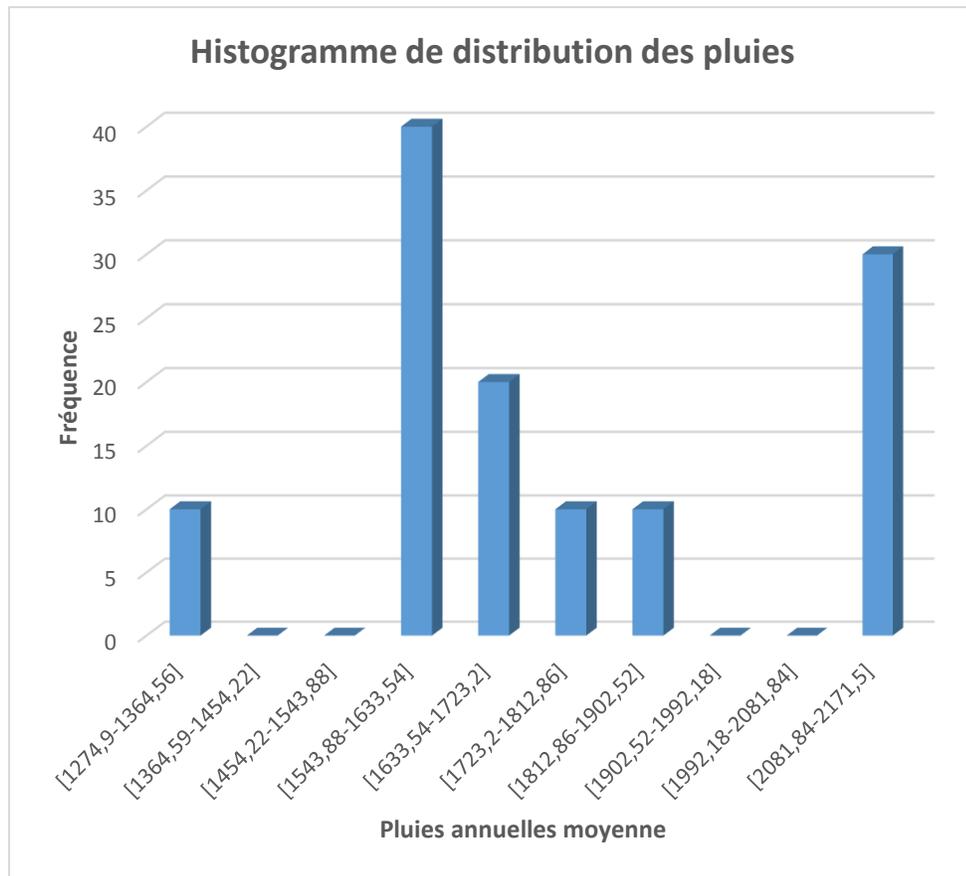


Figure 1 : Histogramme de distribution des pluies

✚ Estimation du mode de l'échantillon

Le mode est déterminé en prenant la valeur moyenne de l'intervalle qui a la fréquence la plus élevée (en millimètre) et est donnée par :

$$X_{\text{mode}} = \frac{1543,88 + 1633,54}{2}$$

$$X_{\text{mode}} = 1588,71 \text{ mm}$$

4. Choix d'une loi de probabilité empirique F(xi) (fréquence expérimentale)

Les données seront classées dans l'ordre croissant et on déterminera les fréquences expérimentales F(x) selon la formule de Hazen suivante : $F(x) = \frac{i-0,5}{n}$ dont les valeurs sont recensées dans le tableau ci-dessous :

Pluie	Rang	Fréquence
1274,9	1	0,04545455
1595,3	2	0,13636364
1604,0	3	0,22727273
1619,7	4	0,31818182
1631,7	5	0,40909091
1637,0	6	0,5
1715,1	7	0,59090909
1813,6	8	0,68181818
2140,2	9	0,77272727
2150,3	10	0,86363636
2171,5	11	0,95454545

Tableau 3 : Résultat des fréquences expérimentales

On définit la médiane comme étant la valeur non dépassée par 50% des cas (F=0,5). En analysant le tableau des fréquences on a une **médiane=1637,0 mm**

5. Choix de la loi d'ajustement de l'échantillon

- + Pour les pluies annuelles ou les débits moyens annuels : on utilise la loi normale ou loi lognormale.
- + Pour les pluies journalières maximales, les crues et les étiages : On utilise la loi de Gumbel, loi de Fréchet ou la loi de Pearson

Ici nos échantillons sont des hauteurs de pluies moyennes annuelles ce qui nous laisse penser à une loi de Gauss ou une loi normale par exemple. Aussi, d'après les calculs précédents nous avons obtenu :

- + moyenne= 1759,1 mm,
- + mode= 1588,71 mm,
- + médiane= 1637.00 mm

Ces valeurs étant plus ou moins voisines, ce qui suggère que cet échantillon peut être ajusté à l'aide de la loi de Gauss.

6. Ajustement par la loi de Gauss

- + Calcul de la fréquence expérimentale de chaque valeur de l'échantillon au non dépassement.

L'ajustement est calculé par la formule de Hazen $F(x) = \frac{(r-0.5)}{N}$

Avec F(x) la fréquence au non dépassement ; r : le rang et N le nombre total d'observations

Année	Pluie Annuelle Classée	Rang	Fréquence	UP
2013	1274,9	1	0,04545455	-1,6906216
2007	1595,3	2	0,13636364	-1,0968036
2009	1604,0	3	0,22727273	-0,7478586
2012	1619,7	4	0,31818182	-0,4727891
2011	1631,7	5	0,40909091	-0,2298841
2005	1637,0	6	0,50000000	0
2008	1715,1	7	0,59090909	0,2298841
2006	1813,6	8	0,68181818	0,4727891
2014	2140,2	9	0,77272727	0,7478586
2010	2150,3	10	0,86363636	1,0968036
2015	2171,5	11	0,95454545	1,6906216

Tableau 4 : Résultat des fréquences expérimentales de chaque échantillon au non dépassement

7. Ajustement graphique sur l'échantillon et détermination des paramètres de la loi ajustée.

Après avoir placé le nuage de points, nous avons tracé la droite graphique de sorte à obtenir un nombre de points égal de part et d'autre de la droite. L'équation de la droite graphique est donnée par la formule : $Y_i = x + \sigma \cdot u_i$

On va déterminer les paramètres de la loi : l'écart type et la moyenne des nuages des points M_i . On choisit deux points 0.05 et 0.95 correspondants chacun respectivement à 5% et 95% ;

$$\text{Pour } F^*(x_1) = 0.05 \Rightarrow U_1 = -1.69$$

$$\text{Pour } F^*(x_2) = 0.95 \Rightarrow U_2 = 1.69$$

$$\text{En résolvant le système on a : } \begin{cases} 1279 = x - 1.69 \times \sigma \\ 2172 = x + 1.69 \times \sigma \end{cases}$$

La résolution de ce système nous donne : $x = 1725 \text{ mm}$ et $\sigma = 264.20 \text{ mm}$

8. Ajustement numérique

Selon les caractéristiques de notre échantillonnage nous avons :

La moyenne $x = 1759,4 \text{ mm}$ et l'écart type $\sigma = 284,5 \text{ mm}$

$$\text{Pour } F^*(x_1) = 0.05 \Rightarrow U_1 = -1.69$$

$$\text{Pour } F^*(x_2) = 0.95 \Rightarrow U_2 = 1.69$$

Selon l'équation $Y_i = x + \sigma \cdot u_i$, on obtient $Y_1 = 1278.66 \text{ mm}$ et $Y_2 = 2240.012 \text{ mm}$

On trace alors la droite (M1M2) de coordonnées M1(1278.66 ; 0.05) et M2 (2240.012 ; 0.95) d'équation générale $Y = 284.5x + 1759.4$

9. Détermination de la pluie moyenne annuelle décennale

L'équation de la loi de Gauss s'écrit : $Y_i = x + \sigma \cdot u_i$ avec

σ = l'écart-type et x = la moyenne avec u_i la variable considérée, Y_i les hauteurs de pluies moyennes annuelles.

Les années moyennes correspondent aux années ayant pour temps de retour $T=5$ ans.

En ce qui concerne les hauteurs de pluie moyenne annuelle des années sèches et humides on les calculera pour des temps de retour respectivement de 5, 10 et 100 ans. (Voir tableau ci-dessous)

	T (ans)	F (xi)	U_i	Y_i (Pluie mm)
Année moyenne	5 ans	0,5	0	1759,39
Années sèches	5 ans	0,2	-0,74	1546,66
	10ans	0,1	-1,09	1447,39
	100ans	0,01	-1,69	1278,48
Années humides	5ans	0,8	0,74	1972,13
	10ans	0,9	1,09	2071,39
	100ans	0,99	1,69	2240,30

Tableau5 : Pluviométrie en fonction du temps de retour

10. Choix de la période de récurrence et pluviométrie moyenne annuelle

✚ La période de retour

La durée ou la période de retour (T) d'un évènement donné est généralement définie comme étant un intervalle de temps moyen séparant deux évènements de fréquence de non dépassement F .

Exprimé en année, c'est la durée au cours de laquelle la période de retour d'une quantité de pluie donnée peut survenir au moins une fois.

✚ La pluviométrie

En considérant une année humide avec un temps de retour de 10 ans nous avons obtenu une pluviométrie moyenne annuelle **P= 2071.39 mm**

Annexe 4

Choix du coefficient de ruissellement

La méthode utilisée pour estimer le coefficient de ruissèlement est celle préconisée par KENESSEY ou le coefficient global de ruissellement C , est la somme de trois coefficients partiels.

- ✓ C_1 fonction de la pente du bassin
- ✓ C_2 fonction de la nature du sol
- ✓ C_3 fonction de la couverture végétale du bassin versant

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

✚ Le coefficient C_1

Ce coefficient dépend de la pente du thalweg principal, estimée comme étant le rapport de la dénivelée du thalweg par sa longueur développée.

Pente du bassin	Valeurs de C_1
$P < 3.5\%$	0.05
$3.5\% < P < 10\%$	0.10
$10\% < P < 20\%$	0.15
$20\% < P < 35\%$	0.20
$35\% < P$	0.25

Tableau 7 : Choix du coefficient de ruissellement en fonction de la pente

Ayant une pente $i_{moy} = 42.1\%$ pour notre bassin versant on retiendra $C_1 = 0.25$

✚ Le coefficient C_2

Le coefficient C_2 dépend de la nature du sol, avec les valeurs suivantes :

Nature du sol	Valeurs de C_2
- Imperméable	$0.20 < C_2 < 0.30$
- Peu imperméable	$0.10 < C_2 < 0.20$
- Perméable	$0.05 < C_2 < 0.10$
- Très imperméable	$0.03 < C_2 < 0.05$

Tableau 8 : Choix du coefficient de ruissellement en fonction du sol

Avec un sol dominé par le sable argileux dans notre zone d'étude nous avons retenu la valeur $C_2 = 0.20$

✚ Le coefficient C_3

Couverture végétale	Valeurs de C_3
- Rocheux	$0.25 < C_3 < 0.30$
- Savane	$0.15 < C_3 < 0.25$
- Forêt dégradée-champs	$0.05 < C_3 < 0.15$
- Forêt primaire	$0.03 < C_3 < 0.05$

*Tableau 9 :
Choix du coefficient de ruissellement en fonction de la couverture végétale*

Etant dans une zone de forêt dégradée. La valeur de retenue est $C = 0.25 + 0.20 + 0.15 = 0.6$

$$C = 0.6$$

Annexe 5

Abaques du dimensionnement hydraulique

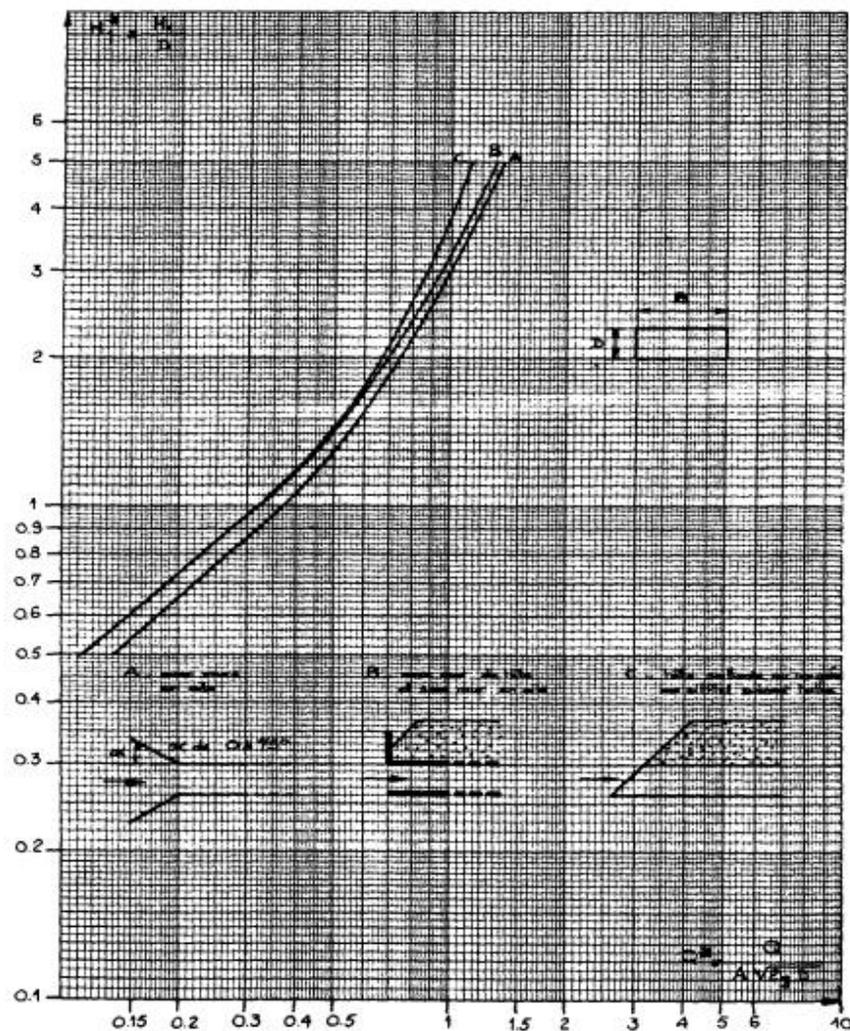
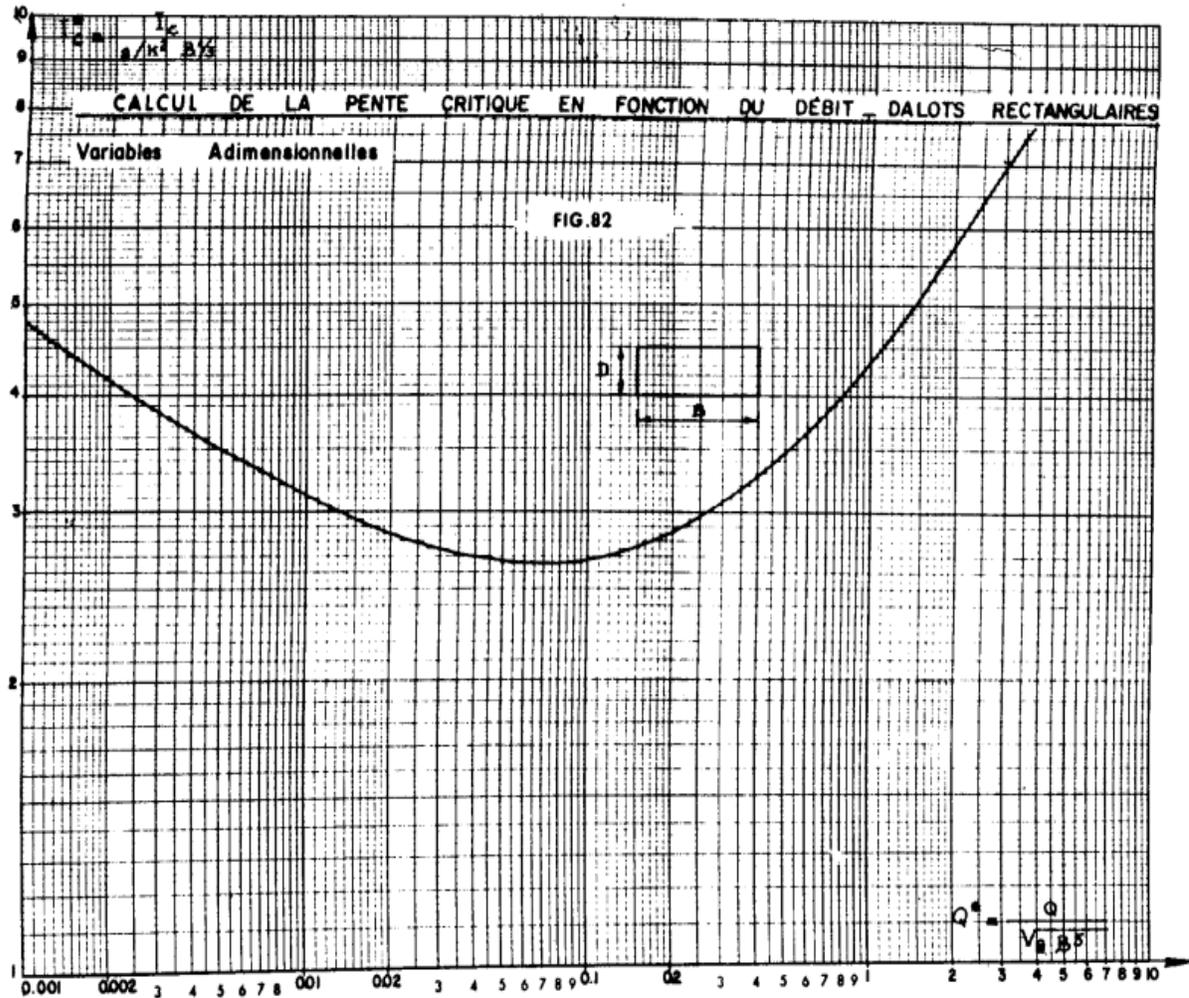


Fig. 77. Sortie libre. Dalots rectangulaires.

*Abaque 1 : Calcul de la profondeur d'eau amont H_1 **

Fig. 82. Calcul de la pente critique en fonction du débit. Dalots rectangulaires.



Abaque 2 : Calcul de la pente critique du dalot

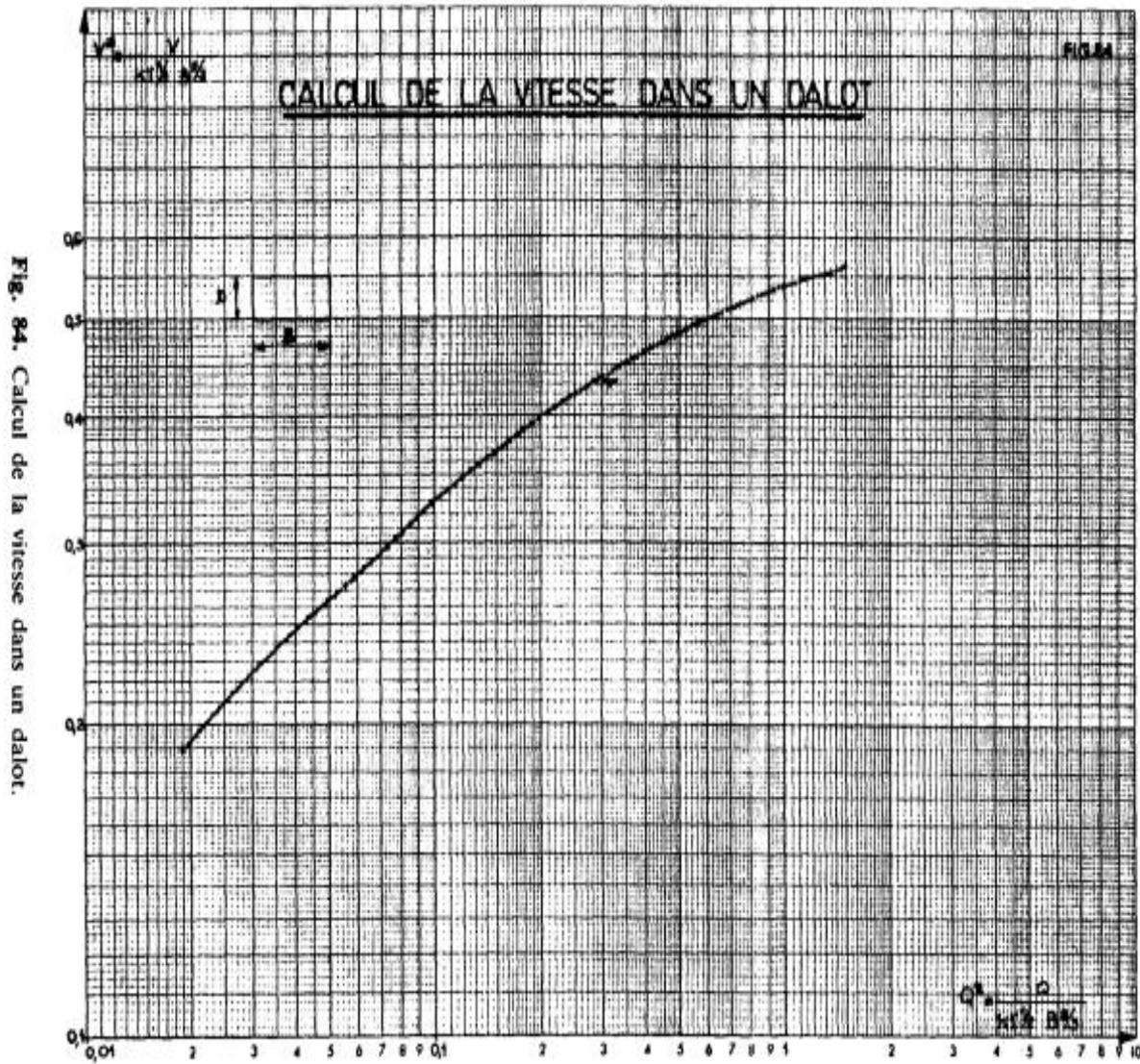


Fig. 84. Calcul de la vitesse dans un dalot.

Abaque 3 : Calcul de la vitesse d'écoulement du dalot

Annexe 6

Note de calcul du dalot

1. Normes et réglementations

Dans le cas de cette étude, les normes et les règlements à prendre en compte sont :

- ✚ le fascicule 61 (titre II) concernant les charges d'exploitations, de conceptions, et de calculs et épreuves des ouvrages d'arts ;
- ✚ le fascicule 62 (titre V) sur les règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages d'arts de génie civil ;
- ✚ le fascicule 65 (A du CCTG) et son additif concernant l'exécution des ouvrages en génie civil en béton armé ou précontraint ;
- ✚ le bulletin Technique n°4 concernant les appareils d'appui et documents LCP-SETRA
- ✚ le BAEL 91 révisé en 99.

2. Calcul de l'ouvrage

Notre calcul d'ouvrage portera sur un dalot cadre fermé (2 × 3 × 4) long de 36 m

3. Pré dimensionnement

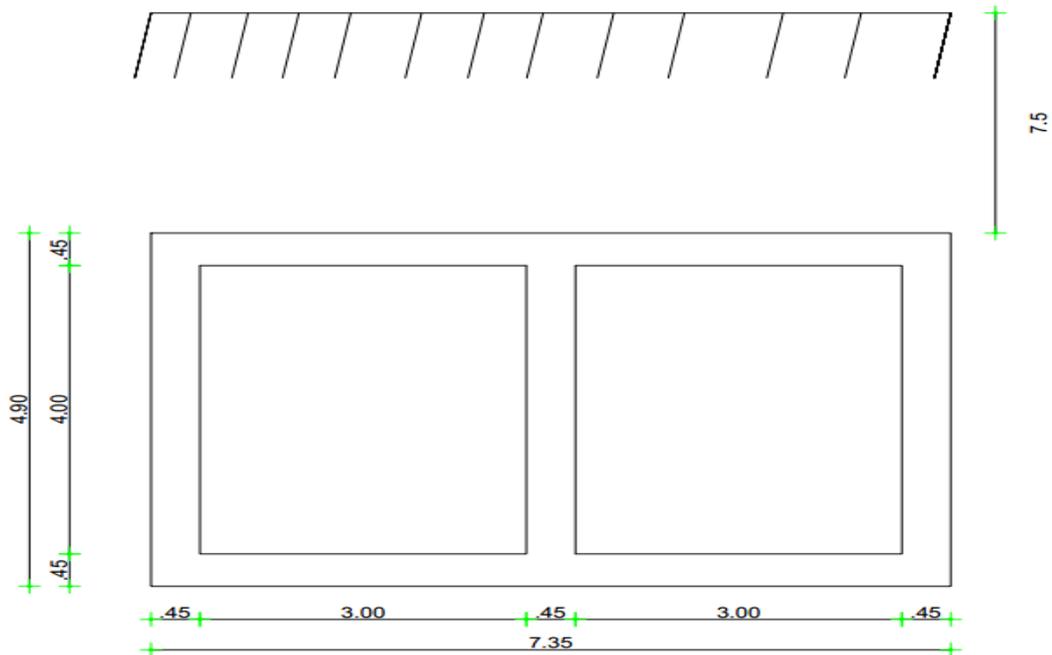
Pour une hauteur de remblai de 7.5 m, l'épaisseur du dalot est calculée par la formule suivante :

$$e = \frac{l}{10} + 5cm ; \text{ avec } l \text{ la plus grande dimension de la cellule hydraulique.}$$

$$e = 45 \text{ cm}$$

- ✚ Epaisseur du tablier= 45 cm
- ✚ Epaisseur du radier = 45 cm
- ✚ Epaisseur des pieds droits = 45 cm

Représentation schématique de l'ouvrage



4. Hypothèse et données générales de calcul

✚ Règle de calcul

Les calculs seront conduits conformément aux dispositions suivantes :

- ✚ le fascicule 61 (titre II) concernant les charges d'exploitation, conception, calcul et épreuves des ouvrages d'arts ;
- ✚ le fascicule (62 titre I) : Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art : Règles techniques de conception des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites (BAEL 91 révisé 99) ;
- ✚ le fascicule (62 (titre V) sur les règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages d'arts de génie civil ;
- ✚ BAEL 91 révisé en 99.

5. Caractéristiques des matériaux

✚ Béton

Fissuration préjudiciable

Béton **B25** de poids volumique = $2,5 \text{ t/m}^3$

Résistance à la compression à 28 jours : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

Résistance à la traction à 28 jours : $f_{t28} = 0,6 + 0,06 f_{c28} = 2,1 \text{ MPa}$

La contrainte à l'état limite du béton : $\sigma_{bc} = \frac{0,85 \cdot f_{c28}}{\theta \cdot \gamma_b} = \frac{0,85 \times 25}{1 \times 1,5} = 14,17 \text{ MPa}$ avec $\gamma_b = 1,5$

Contrainte limite du béton : $\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 \cdot f_{c28} = 0,6 \times 25 = 15 \text{ MPa}$

✚ Acier

L'enrobage : $c = 3 \text{ cm}$, car la fissuration est préjudiciable (Ouvrage enterré).

Nuance : acier Haute Adhérence **Fe E 500**

Limite d'élasticité $f_e = 500 \text{ MPa}$

Contrainte de calcul de l'acier : $\sigma_s = f_e / \gamma_s = 435 \text{ MPa}$ avec $\gamma_s = 1,15$

Contrainte limite de l'acier : $\overline{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{2}{3} f_e ; \max(0,5 f_e ; 110 \sqrt{\eta \cdot f_{t28}}) \right\} = 280 \text{ MPa}$

Avec $\eta = 1,6$ car acier Haute Adhérence.

✚ Remblai

Le remblai d'accès est constitué d'un graveleux latéritique de poids volumique de 21 KN/m^3 et de coefficient de poussée des terres $k = 0,333$. Le dalot est surmonté d'une $7,5 \text{ m}$ de hauteur du même matériau.

6. Méthode de calcul

De manière générale, on mènera les calculs par bande de 1 m linéaire de largeur de dalot.

Les valeurs de sollicitation du moment fléchissant M et de l'effort normal N seront déterminées par la méthode des rotations pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud.

✚ $M_{i,j}$ = moment statique appliqué au nœud i par la barre ij

✚ $m_{i,j}$ = moment d'encastrement appliqué au nœud i par la barre j (déterminé par les charges appliquées à la barre)

✚ a_i = rotation du nœud i

✚ k_1 = caractéristique de la rigidité des barres horizontales $k_1 = \frac{2xExl1}{L} = \frac{2xl1}{L}$

✚ k_2 = caractéristique de la rigidité des barres verticales $k_2 = \frac{2xExl2}{L} = \frac{2xl2}{L}$

✚ $M_{i,j} = k \times (2 \times a_i + a_j) + m_{i,j}$, $k = k_1$ ou k_2

✚ b_i = constante du nœud i

Le moment d'inertie du tablier et du radier = $I1$ = Moment d'inertie du piedroit = $I2$.

$$I1 = I2 = \frac{450 \times 1000^3}{12} = 3.8 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$k1 = \frac{2 \times 3.810^{10}}{3450} = 2.1710^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$k2 = \frac{2 \times 3.810^{10}}{4450} = 1.69 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$2 \times (k_1 + k_2) = 7.72 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$2 \times (2 \times k_1 + k_2) = 1.21 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

L'équilibre aux nœuds s'écrit :

$$\text{Nœud 1 : } M_{1.2} + M_{1.6} = 0$$

$$\text{Nœud 2 : } M_{2.1} + M_{2.3} + M_{2.5} = 0$$

$$\text{Nœud 3 : } M_{3.2} + M_{3.4} = 0$$

$$\text{Nœud 4 : } M_{4.3} + M_{4.5} = 0$$

$$\text{Nœud 5 : } M_{5.4} + M_{5.2} + M_{5.6} = 0$$

$$\text{Nœud 6 : } M_{6.5} + M_{6.1} = 0$$

En écrivant l'équilibre de tous les nœuds , nous obtenons 6 équations à 6 inconnues

$$\text{Nœud 1 : } 2 \times (k_1 + k_2) a_1 + k_1 \times a_2 + k_2 \times a_6 = -(m_{1.2} + m_{1.6}) = b_1$$

$$\text{Nœud 2 : } k_1 \times a_1 + 2 \times (2k_1 + k_2) a_2 + k_1 \times a_3 + k_2 \times a_5 = -(m_{2.1} + m_{2.3} + m_{2.5}) = b_2$$

$$\text{Nœud 3 : } k_1 \times a_2 + 2 \times (k_1 + k_2) a_3 + k_2 \times a_4 = -(m_{3.2} + m_{3.4}) = b_3$$

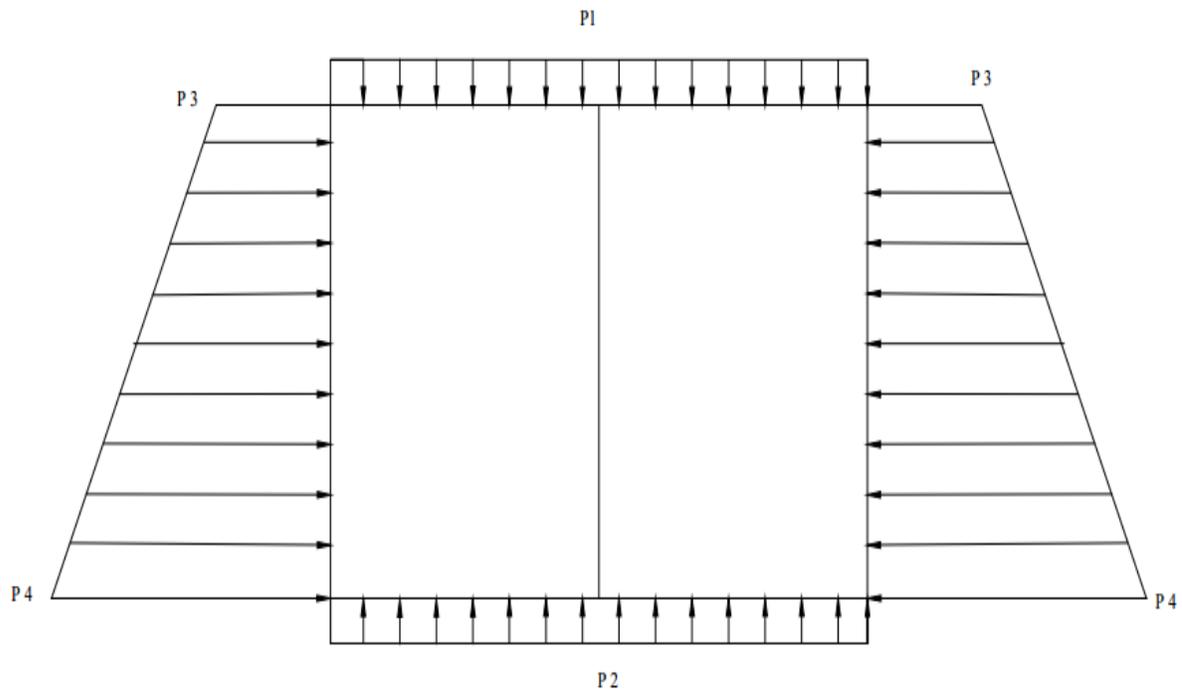
$$\text{Nœud 4 : } k_2 \times a_3 + 2 \times (k_1 + k_2) a_4 + k_1 \times a_5 = -(m_{4.3} + m_{4.5}) = b_4$$

$$\text{Nœud 5 : } k_2 \times a_2 + k_1 \times a_4 + 2 \times (2k_1 + k_2) a_5 + k_1 \times a_6 = -(m_{5.2} + m_{5.4} + m_{5.6}) = b_5$$

$$\text{Nœud 6 : } k_2 \times a_1 + k_1 \times a_5 + 2 \times (k_1 + k_2) a_6 = -(m_{6.1} + m_{6.5}) = b_6$$

Ces équations permettrons de calculer les sollicitations.

7. Calculs de sollicitations



8. Charges permanentes

+ Charge sur le tablier : P1

- Poids propre du tablier : $P_{ptab} = e_t \times \gamma_b \times 1 = 0,45 \times 25$
 $P_{ptab} = 11,25 \text{ kN/ml}$
- Poids du remblai : $P_r = h_r \times \gamma_d \times 1 = 7,5 \times 20 \times 1$
 $P_r = 150 \text{ kN/ml}$
- Poids propre du ballast : $P_r = e \times \gamma_{ballast} \times 1 = 0,2 \times 14,42 \times 1$
 $P_r = 2,88 \text{ kN/ml}$
- Poids propre rail + traverse : $P_{rail+traverse} = P_{Trail+traverse} \times g \times 1 = 175 \times 10$
 $P_{rail+traverse} = 1,75 \text{ kN/ml}$

La charge permanente totale sur le tablier : $P_1 = 11,25 + 150 + 3,7 + 1,7 = 166,90 \text{ kN/ml}$
 $P_1 = 166,90 \text{ KN/ml}$

+ Charge sur le radier P2

- Poids du tablier : $P_1 = 165,88 \text{ KN/ml}$
- Poids des pieds droits :
$$P_{pd} = \frac{e_1 \times H \times 25 \times 3}{2 \times L + 3 \times e_2} = \frac{0,45 \times 4 \times 25 \times 3}{2 \times 3 + 0,45 \times 3} = 18,36 \text{ KN/ml}$$

 $P_2 = P_1 + P_{pd} = 166,9 + 18,36 = 184,25 \text{ KN/ml}$
 $P_2 = 184,25 \text{ KN/ml}$

+ Charge sur les pieds droits : P3 et P4

$$P_t = K_a \times \rho_t \times h$$

Avec :

$$K_a = 0,333 = \text{coefficient de poussée des terres}$$

h = hauteur du remblai par rapport au point considéré

$$\rho_t = 20 \text{ KN/m}^3 = \text{poids volumique de la terre}$$

$$P_3 (h=7,5) = 0,33 \times 20 \times 7,5 = 49,5 \text{ KN/ml}$$

$$P_4 (h=12,4) = 0,33 \times 20 \times 12,4 = 81,84 \text{ KN/m}$$

✚ Charge des moments d'encastremets

$$m_{1,2} = -P_1 \times \frac{L^2}{12} = -166,9 \times \frac{3^2}{12}$$

$$m_{1,2} = -124,413 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{2,3} = m_{1,2} = -124,413 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{3,2} = -m_{2,3} = 124,413 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{2,1} = -m_{1,2} = 124,431 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{4,5} = -P_2 \times \frac{L^2}{12} = -185,26 \times \frac{3^2}{12}$$

$$m_{4,5} = -138,19 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{5,4} = -m_{4,5} = 138,19 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{5,6} = m_{4,5} = -138,19 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{6,5} = -m_{5,6} = 138,19 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{6,1} = -(p_4 - p_3) \times \frac{H^2}{20} - p_3 \frac{H^2}{12}$$

$$m_{6,1} = -91,87 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{16} = (p_4 - p_3) \times \frac{H^2}{30} + p_3 \frac{H^2}{12} = 83,248 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{3,4} = m_{16} = 83,248 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{4,3} = m_{6,1} = -91,87 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{2,5} = m_{5,2} = 0 \text{ kN, m/ml}$$

✚ Charge des coefficients $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$

$$b_1 = -(m_{1,2} + m_{1,6}) = -(-125,1 + 83,248) = 216,285 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_2 = -(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,5}) = -(125,1 - 125,1 + 0) = 0 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_3 = -(m_{3,2} + m_{3,4}) = -(125,1 + 83,248) = -207,661 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_4 = -(m_{4,3} + m_{4,5}) = -(-91,87 - 138,95) = 230,060 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_5 = -(m_{5,2} + m_{5,4} + m_{5,6}) = -(0 + 138,95 - 138,95) = 0 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_6 = -(m_{6,1} + m_{6,5}) = -(-91,87 + 138,95) = -46,316 \text{ kN, m/ml}$$

a1	a2	a3	a4	a5	a6	b
7,72	2,17	0	0	0	1,69	2,16285E-05
2,17	12,06	2,17	0	1,1	0	0
0	1,4	7,72	1,69	0	0	-2,07661E-05
0	0	1,69	12,06	2,17	0	2,30061E-05
0	1,1	0	1,4	1,21	2,17	0
1,69	0	0	0	2,17	7,72	-4,63165E-06

a1	2,70837E-06
a2	4,63799E-07
a3	-3,44056E-06
a4	3,04482E-06
a5	-3,6405E-06
a6	-1,69547E-07

On déduit les moments statiques appliqué à chaque noeud

M12	3,1945582
M21	203,31345
M23	-178,9444
M45	-85,04231
M54	138,18803
M56	-299,8654
M65	51,831307
M61	-51,83131
M16	-3,194558
M43	-47,10274
M25	-45,84803
M52	-115,2107
M34	18,414317
M32	-14,84306

✚ Calcul des moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits

$$\text{Tablier : } M_{0t} = \frac{P1 \times L^2}{8} = \frac{165,88 \times 3^2}{8} = 186,615 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Radier : } M_{0r} = -\frac{P2 \times L^2}{8} = \frac{184,25 \times 3^2}{8} = -207,28 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Piédroit : } M_{0p} = \frac{P3 \times H^2}{8} + \frac{(P4 - P3) \times H^2}{16} = \frac{49,5 \times 4^2}{8} + \frac{(81,84 - 49,5) \times 4^2}{16} = 131,34 \text{ kN,m/ml}$$

✚ Calcul des moments maximum en travées

✚ Tablier :

➤ Travée 1

Appui gauche : $M_{agt} = M_{1,2} = 3,19$ kN,m/ml

Appui droit : $M_{adt} = - M_{2,1} = -203,31$ kN,m/ml

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-169,86-60,13)}{2} + 186,615 = 86,55$ kN,m/ml

➤ Travée 2

Appui gauche : $M_{agt} = M_{2,3} = -178,94$ kN,m/ml

Appui droit : $M_{adt} = - M_{3,2} = 14,84$ kN,m/ml

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-363,97+26,96)}{2} + 186,615 = -289,33$ kN,m/ml

Calcul des moments				
Tablier				
Travées	Mot	Mapg	Mapd	Mtt
1	186,615	3,19	-203,31	86,55
2	186,615	-178,94	14,84	-289,33

Radier :

➤ Travée 1

Appui gauche : $M_{agt} = M_{6,5} = 180,66$ kN,m/ml

Appui droit : $M_{adt} = - M_{5,6} = -41,66$ kN,m/ml

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0r} = \frac{(180,66-41,66)}{2} - 208,42 = -137,781$ kN,m/ml

➤ **Travée 2**

Appui gauche : $M_{agt} = M_{5,4} = 138,19 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adt} = - M_{4,5} = 85,04 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(138,19+85,04)}{2} - 208,42 = -95,67 \text{ kN,m/ml}$

Calcul des moments				
Radier				
Travées	Mot	Mapg	Mapd	Mtt
1	-208,42	180,66	-41,66	-137,78
2	-208,42	138,19	85,04	-95,67

✚ **Pieds droits :**

➤ **Piédroit gauche :**

Appui gauche : $M_{agp} = M_{6,1} = -51,83 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = - M_{1,6} = 3,19 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agp}+M_{adp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-51,83+3,19)}{2} + 131,34 = 107,02 \text{ kN,m/ml}$

➤ **Piédroit intérieur :**

Appui gauche : $M_{agp} = M_{5,2} = -115,21 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = - M_{2,5} = 45,84 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agp}+M_{adp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-115,21+45,84)}{2} + 131,34 = 96,655 \text{ kN,m/ml}$

➤ **Piédroits droits :**

Appui gauche : $M_{agp} = M_{4,3} = -47,10 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = - M_{3,4} = -18,41 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agp}+M_{adp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-47,10-18,41)}{2} + 131,34 = 98,585 \text{ kN,m/m}$

Calcul des moments				
Pieds droits				
Pieds droits	Mot	Mapg	Mapd	Mtt
Extrême gauche	131,34	-51,83	3,19	107,02
Intérieur	131,34	-115,21	45,84	45,84
Extrême droit	131,34	-47,1	-18,41	96,585

Calcul des réactions d'appuis

Tablier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(-203,31 - 3,19)}{3} + \frac{165,88 \times 3}{2} = 179,99 \text{ kN, /ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(3,19 + 201,31)}{3} + \frac{165,88 \times 3}{2} = 317,65 \text{ kN, /ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(14,84 + 178,94)}{3} + \frac{165,9 \times 3}{2} = 340,96 \text{ kN, /ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(-178,94 - 14,84)}{3} + \frac{165,9 \times 3}{2} = 211,78 \text{ kN, /ml}$$

Radier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(-41,66 - 180,66)}{3} + \frac{184,25 \times 3}{2} = 202,26 \text{ kN, /ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(180,66 + 41,66)}{3} + \frac{184,25 \times 3}{2} = 350,48 \text{ kN, /ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(85,04 - 138,19)}{3} + \frac{184,25 \times 3}{2} = 258,65 \text{ kN, /ml}$$

$$\text{Appui droit : } R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(138,95 - 14,96)}{3} + \frac{184,25 \times 3}{2} = 294,09 \text{ kN, /ml}$$

✚ Calcul des efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits

$$\text{Piédroit gauche : } P_{pg} = R_{agt} - R_{agr} = 179,98 - 202,27 = -22,28 \text{ kN, /ml}$$

$$\text{Piédroit droit : } P_{pd} = R_{agt} - R_{agr} = 179,98 - 202,27 = 82,31 \text{ kN, /ml}$$

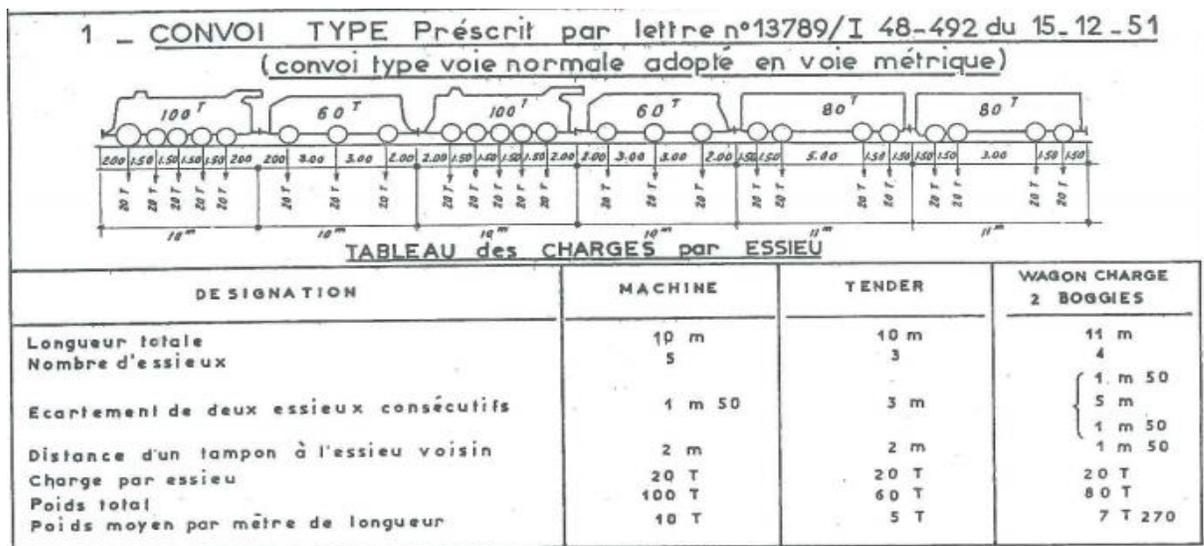
$$\text{Piédroit interne : } P_{pg} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (317,65 - 350,48) = -65,656 \text{ kN, /ml}$$

Calcul des réactions d'appuis		
Tablier		
Travées	Ragd	Radt
1	179,99	317,65
2	340,97	211,78
Radier		
Travées	Ragd	Radt
1	202,27	350,48
2	258,66	294,09
Pieds droits		
Pieds droit gauche	$P_{pg} = -22,281 \text{ KN, /ml}$	
Pieds droit droit	$P_{pd} = 82,31 \text{ KN, /ml}$	
Pieds droit interne	$P_{dinterne} = -65,656 \text{ KN, /ml}$	

7. Charges variables : Charges ferroviaires

🚂 Convoi type prescrit par la lettre n°13789 / I 48-492 du 15-12-51

Convoi type voie normale adopté en voie métrique



✚ Calcul du coefficient de majoration

$$\delta = 1 + \frac{0,7}{1+0,2 \times L}$$

Avec L la largeur influence

$$\delta = 1,10$$

✚ Calcul des charges réparties par mètre linéaire

➤ Sur le tablier

- Nous avons une charge de 5 essieux de 40 tonnes chacun ($50 \times 40 = 200 \text{ tonnes}$) : $q = 200 \text{ tonnes}$
- La largeur de diffusion des charges selon le sens d'écoulement des eaux pour un angle d'éboulement de 45°

$$L = \text{largeur du convoi sur l'ouvrage} + 2 \times h_{\text{remblai}} \times \tan(45)$$

$$Lx = 6,20 + 2 \times 7,5 \times \tan 45 = 30,49 \text{ m}$$

- La largeur de diffusion des charges selon le sens de circulation des trains

$$Ly = 7,35 \text{ m}$$

La charge Q_t uniforme sur le tablier du dalot est donné par la relation suivante :

$$Q_t = \frac{q}{Lx \times Ly} = \frac{200}{30,49 \times 7,35} = 0,89 \frac{t}{m^2} = 8,9 \text{ kN/ml}$$

➤ Sur les pieds droits

À l'approche du dalot, le train exerce une pression sur les pieds droits

- La poussée des charges ferroviaires sur les pieds droits est donnée par la relation suivante :

$$Q_p = ka \times Q_t = 0,33 \times 0,89 = 0,29 \text{ t/m}^2 = 2,9 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{p\text{droit}} = 2,9 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{p\text{gauche}} = -2,93 \text{ kN/ml}$$

➤ Sur le radier

$$Lx = 6,20 + 2 \times 11,5 \times \tan 45 = 43,45 \text{ m}$$

$$Ly = 7,35 \text{ m}$$

$$Q_r = \frac{q}{Lx \times Ly} = \frac{200}{43,45 \times 7,35} = 0,62 \text{ t/m}^2 = 6,2 \text{ kN/ml}$$

En affectant le coefficient de majoration on a :

$$Q_{\text{tablier}} = 1,10 \times 8,9 = 9,79 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{\text{pdroit}} = Q_{\text{pgauche}} = 1,10 \times 2,93 = 3,22 \text{ kN/ml}$$

$$Q_{\text{radier}} = 1,10 \times 6,2 = 6,88 \text{ kN/ml}$$

✚ Calcul des moments d'encastrement

$$m_{1,2} = -Q_t \times \frac{L^2}{12} = -9,79 \times \frac{3^2}{12} = -7,34 \text{ kN/ml}$$

$$m_{2,1} = -m_{1,2} = 7,34 \text{ kN/ml}$$

$$m_{2,3} = m_{1,2} = -7,34 \text{ kN/ml}$$

$$m_{3,2} = -m_{2,3} = 7,34 \text{ kN}$$

$$m_{4,5} = -Q_r \times \frac{L^2}{12} = -6,88 \times \frac{3^2}{12}$$

$$m_{4,5} = -5,16 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{5,4} = -m_{4,5} = 5,16 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{5,6} = m_{4,5} = -5,16 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{6,5} = -m_{5,6} = 5,16 \text{ kN,m/ml}$$

$$m_{6,1} = -(Q_{p1\text{droit}} - Q_{p2\text{droit}}) \times \frac{H^2}{20} - Q_{p\text{droit}} \times \frac{H^2}{12}$$

$$m_{6,1} = -(3,22 - 3,22) \times \frac{4^2}{20} - 3,22 \times \frac{16}{12}$$

$$m_{6,1} = -4,29 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{1,6} = (Q_{p1\text{droit}} - Q_{p2\text{droit}}) \times \frac{H^2}{20} + Q_{p\text{droit}} \times \frac{H^2}{12}$$

$$m_{1,6} = (3,22 - 3,22) \times \frac{4^2}{20} + 3,22 \times \frac{16}{12}$$

$$m_{1,6} = 4,29 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{1,6} = m_{3,4} = 4,29 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{6,1} = m_{4,3} = -4,29 \text{ kN, m/ml}$$

$$m_{2,5} = m_{5,2} = 0,00 \text{ kN, m/ml}$$

Charge des coefficients $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$,

$$b_1 = -(m_{1,2} + m_{1,6}) = -(-7,34 - 4,29) = 11,63 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_2 = -(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,5}) = -(7,34 - 7,34 + 0) = 0 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_3 = -(m_{3,2} + m_{3,4}) = -(7,34 + 4,29) = -11,63 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_4 = -(m_{4,3} + m_{4,5}) = -(-4,29 - 5,16) = 9,45 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_5 = -(m_{5,2} + m_{5,4} + m_{5,6}) = -(0 + 4,75 - 4,75) = 0 \text{ kN, m/ml}$$

$$b_6 = -(m_{6,1} + m_{6,5}) = -(-4,29 + 5,16) = -0,87 \text{ kN, m/ml}$$

Les valeurs de a sont :

a1	1,30502E-07
a2	3,80449E-08
a3	-1,92231E-07
a4	1,58437E-07
a5	-2,95336E-07
a6	4,31777E-08

M12	-0,850656224
M21	11,82303483
M23	-9,860256524
M45	-4,692631316
M54	5,159997969
M56	-17,04063222
M65	0,625117556
M61	-0,625117556
M16	0,850656224
M43	-2,18353137
M25	-3,705261464
M52	-9,339401605
M34	0,470184997
M32	-0,177238925

✚ Calcul des moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits

$$\text{Tablier : } M_{0t} = \frac{Q_t \times L^2}{8} = \frac{9,79 \times 3^2}{8} = 11,013 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Radier : } M_{0r} = -\frac{Q_r \times L^2}{8} = -\frac{6,22 \times 3^2}{8} = -7,74 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Piédroit : } M_{0p} = \frac{Q_{pdroit} \times H^2}{8} + \frac{(Q_{pdroit} - Q_{pdroit}) \times H^2}{16} = \frac{3,85 \times 4^2}{8} + \frac{(3,22 - 3,22) \times 4^2}{16} = 6,44 \text{ kN,m/ml}$$

✚ Calcul des moments maximum en travées

✚ Tablier :

➤ Travée 1

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{1,2} = -0,850 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{2,1} = -11,82 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Au milieu de la travée : } M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-0,85 - 11,82)}{2} + 11,013 = 4,678 \text{ kN,m/ml}$$

➤ Travée 2

$$\text{Appui gauche : } M_{agt} = M_{2,3} = -9,86 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Appui droit : } M_{adt} = -M_{3,2} = 0,177 \text{ kN,m/ml}$$

$$\text{Au milieu de la travée : } M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0t} = \frac{(-9,86 + 0,177)}{2} + 11,013 = 6,17 \text{ kN,m/ml}$$

Calcul des moments				
Tablier				
Travées	Mot	Mapg	Mapd	Mtt
1	11,013	-0,85	-11,87	4,68
2	11,013	-9,86	0,177	6,17

Radier :

➤ Travée 1

Appui gauche : $M_{agt} = M_{6,5} = 0,625 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adt} = - M_{5,6} = 17,04 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0r} = \frac{(0,625+17,04)}{2} - 7,74 = 1,0925 \text{ kN,m/ml}$

➤ Travée 2

Appui gauche : $M_{agt} = M_{5,4} = 5,15 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adt} = - M_{4,5} = 4,69 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tt} = \frac{(M_{agt}+M_{adt})}{2} + M_{0r} = \frac{(5,15+4,49)}{2} - 7,74 = -2,82 \text{ kN,m/ml}$

Calcul des moments				
Radier				
Travées	Mor	Mapg	Mapd	Mtt
1	-7,74	0,625	17,04	1,0925
2	-7,74	5,15	4,69	-2,82

➤ Pieds droits :

➤ Piédroit gauche :

Appui gauche : $M_{agp} = M_{6,1} = -0,625 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = - M_{1,6} = -0,85 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agp}+M_{adp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-0,625-0,85)}{2} + 6,44 = 1,37 \text{ kN,m/ml}$

Piédroit intérieur :

Appui gauche : $M_{agp} = M_{5,2} = -9,33 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = - M_{2,5} = 3,705 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agp}+M_{adp})}{2} + M_{0p} = \frac{(-9,33+3,705)}{2} + 6,44 = 3,627 \text{ kN,m/ml}$

Piedroits droits :

Appui gauche : $M_{agp} = M_{4,3} = -2,18 \text{ kN,m/ml}$

Appui droit : $M_{adp} = -M_{3,4} = -0,47 \text{ kN,m/ml}$

Au milieu de la travée : $M_{tp} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{0p} = \frac{(-2,18 - 0,47)}{2} + 6,44 = 5,11 \text{ kN,m/ml}$

Calcul des moments				
Pieds droits				
Pieds droits	Mot	Mapg	Mapd	Mtt
Extrême gauche	6,44	-51,83	3,19	-17,88
Intérieur	6,44	-9,33	3,705	3,627
Extrême droit	6,44	-2,18	-0,47	5,115

✚ Calcul des réactions d'appuis

Tablier :

➤ **Travée 1**

Appui gauche : $R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(-0,85 + 11,82)}{3} + \frac{9,79 \times 3}{2} = 11,028 \text{ kN, /ml}$

Appui droit : $R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(-9,86 - 0,177)}{3} + \frac{9,79 \times 3}{2} = 18,34 \text{ kN, /ml}$

➤ **Travée 2**

Appui gauche : $R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(0,177 + 9,86)}{3} + \frac{8,9 \times 3}{2} = 18,03 \text{ kN, /ml}$

Appui droit : $R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P1 \times L}{2} = \frac{(-9,86 - 0,177)}{3} + \frac{8,9 \times 3}{2} = 11,34 \text{ kN, /ml}$

Radier :

➤ **Travée 1**

Appui gauche : $R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(17,04 - 0,625)}{3} - \frac{7,74 \times 3}{2} = 15,79 \text{ kN, /ml}$

Appui droit : $R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(0,625 - 17,04)}{3} - \frac{7,74 \times 3}{2} = 4,84 \text{ kN, /ml}$

➤ **Travée 2**

Appui gauche : $R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(4,69 - 5,15)}{3} - \frac{7,74 \times 3}{2} = 10,16 \text{ kN, /ml}$

Appui droit : $R_{agt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{L} + \frac{P2 \times L}{2} = \frac{(5,15 - 4,69)}{3} - \frac{7,74 \times 3}{2} = 10,47 \text{ kN, /ml}$

✚ Calcul des efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits

Piédroit gauche : $P_{pg} = R_{agt} - R_{agr} = 11,10 - 15,79 = -4,76 \text{ kN, /ml}$

Piédroit droit : $P_{pd} = R_{agt} - R_{agr} = 18,03 - 10,166 = 7,864 \text{ kN, /ml}$

Piédroit interne : $P_{pg} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (18,341 - 4,84) = 5,1 \text{ kN, /ml}$

Calcul des réactions d'appuis		
Tablier		
Travées	Ragd	Radt
1	11,02	18,34
2	18,03	11,339
Radier		
Travées	Ragd	Radt
1	15,79	4,84
2	10,16	10,47
Pieds droits		
Pieds droit gauche	$P_{pg} = -4,76 \text{ kN, /ml}$	
Pieds droit droit	$P_{pd} = 7,864 \text{ kN, /ml}$	
Pieds droit interne	$P_{dinterne} = 5,1 \text{ kN, /ml}$	

Récapitulatif des sollicitations

Partie de l'ouvrage	Sollicitations kN, m/ml et kN/ml		Charges permanentes G	Charges ferroviaires F
TABLIER	Moment Fléchissant	à gauche	-203,31	-9,86
		à droite	-178,94	-11,87
		au milieu	-289,33	6,17
RADIER	Moment Fléchissant	à gauche	180,66	5,15
		à droite	138,11	17,04
		au milieu	-137,78	-2,82
PIEDROIT EXTREME	Moment Fléchissant	inferieur	-51,83	-51,83
		supérieur	-18,41	3,19
		au milieu	107,02	-17,88
	Effort normal		82,31	7,86
PIEDROIT INTERNE	Moment Fléchissant	inferieur	-115,21	-9,33
		supérieur	15,84	3,705
		au milieu	45,84	3,627
	Effort normal		-65,66	5,1

8. Combinaison des charges

La combinaison des charges est donnée par la relation suivante :

- ✚ A l'ELS : $G + 1,2 \times F$
- ✚ A l'ELU : $1,35G + 1,6 \times F$

Avec G : la charge permanente et F la charge ferroviaire,

Partie d'Ouvrage	Sollicitations en kN,m/ml et kN/ml		Combinaisons	
			ELU	ELS
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	-287,5445	-213,142
		A droite	-260,545	-193,172
		Au milieu	-392,8735	-290,926
Radier	Moment fléchissant	A gauche	252,131	186,84
		A droite	213,7125	158,558
		Au milieu	-190,515	-141,164
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	-152,8985	-114,026
		A droite	-19,7495	-14,582
		Au milieu	173,085	128,476
	Effort normal		123,6945	91,742
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	-170,4615	-126,406
		A droite	27,312	20,286
		Au milieu	67,6872	50,1924
	Effort normal		-80,481	-59,54

9. Calcul des sections d'armatures

Pour le calcul des aciers :

- le tablier et le radier seront calculés en flexion simple,
- le pied droit central est calculé en compression simple,
- les pieds droits extérieurs sont calculés en flexion composée,

a) Armatures du tablier

Données de calcul : $h = 0,45$ $d = 0,9 \times h = 0,9 \times 0,45 = 0,405 \text{ m}$

$f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ $f_e = 500 \text{ MPa}$

$F_{bu} = \sigma_{bc} = 14,17 \text{ MPa}$ $f_{su} = \sigma_s = 347,83 \text{ MPa}$ $b = 1 \text{ m}$

✚ Section d'armature à mi- travée

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 392,87 \text{ kN, m/ml}$

Moment réduit/ Recherche du pivot : $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{93,954 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,169$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow$ PIVOTA \rightarrow Pas d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{(1 - 2\mu_u)}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,233$

$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,0052) = 0,37 \text{ m}$

Section d'acier théorique

$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{392,87 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 24,60 \text{ cm}^2$

Condition de non fragilité (CNF)

$A_{st \text{ min}} = 0,23 \times b_0 \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e}\right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$

❖ Calcul à l'ELS

$$M_{ser} = 290,926 \text{ kN}, m/ml$$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3} fe = 333,333 \\ 0,5 fe = 250 \\ 110\sqrt{\eta \times ftj} = 201,63 \end{array} \right. \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,19 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN}, m/ml$$

$$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow \text{Pas d'aciers comprimés}$$

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{290,92610^{-3}}{0,341 \times 250} = 34,12 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{ftj}{fe} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow \text{Condition vérifiée}$$

✚ Section d'armature sur appuis gauche

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 287,544 \text{ kN}, m/ml$

Moment réduit/ Recherche du pivot : $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{287,544 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,124$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow$ PIVOTA \rightarrow Pas d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,166$$

$$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,0052) = 0,38 \text{ m}$$

Section d'acier théorique

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{287,544 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 17,49 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_0 \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e}\right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est $A_{st} = 3,91 \text{ cm}^2$

$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow$ Condition vérifiée

❖ Calcul à l'ELS

$M_{ser} = 213,142 \text{ kN}, m/ml$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \begin{cases} \frac{2}{3} f_e = 333,333 \\ 0,5 f_e = 250 \\ 110\sqrt{\eta} \times f_{tj} = 201,63 \end{cases} \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,19 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN, m/ml}$$

$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow$ Pas d'aciers comprimés

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{213,142, 10^{-3}}{0,341 \times 250} = 25,00 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} \text{ à l'ELU} = A_{st} \text{ à l'ELS} = A_{st \min} = 3,91 \text{ cm}^2$$

✚ Section d'armature sur appuis droite

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 260,545 \text{ kN, m/ml}$

$$\text{Moment réduit/ Recherche du pivot : } \mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{15,05 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,112$$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow$ PIVOTA \rightarrow Pas d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{(1 - 2\mu_u)}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,149$$

$$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,008) = 0,38 \text{ m}$$

Section d'acier théorique

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{260,545 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 15,73 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est $A_{st} = 3,91 \text{ cm}^2$

$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow$ Condition vérifiée

❖ Calcul à l'ELS

$$M_{ser} = 193,172 \text{ KN}, m/ml$$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \begin{cases} \frac{2}{3} f_e = 333,333 \\ \max \begin{cases} 0,5 f_e = 250 \\ 110\sqrt{\eta \times f_{tj}} = 201,63 \end{cases} \end{cases} \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,19 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN}, m/ml$$

$$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow \text{Pas d'aciers comprimés}$$

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{193,172 \times 10^{-3}}{0,341 \times 250} = 22,66 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

b) Armatures du radier

✚ Section d'armature à mi-travée

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 190,515 \text{ kN}, m/ml$

Moment réduit/ Recherche du pivot : $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{190,515 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,089$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow$ PIVOTA \rightarrow Pas d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,107$$

$$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,0052) = 0,39 \text{ m}$$

Section d'acier théorique

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{190,515 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 11,30 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_0 \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e}\right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$$

$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow$ Condition vérifiée

❖ Calcul à l'ELS

$M_{ser} = 141,164 \text{ kN}, m/ml$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{3} f_e = 333,333 \\ 0,5 f_e = 250 \\ 110\sqrt{\eta} \times f_{tj} = 201,63 \end{array} \right. \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\overline{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,192 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN, m/ml}$$

$$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow \text{Pas d'aciers comprimés}$$

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{141,16410^{-3}}{0,341 \times 250} = 16,55 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow \text{Condition vérifiée}$$

✚ Section d'armature appuis gauche

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 252,131 \text{ kN, m/ml}$

Moment réduit/ Recherche du pivot : $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{252,13 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,109$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow \text{PIVOTA} \rightarrow \text{Pas d'aciers comprimés}$

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{(1 - 2\mu_u)}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,144$$

$$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,105) = 0,38 \text{ m}$$

Section d'acier théorique

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{252,131 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 15,19 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow \text{Condition vérifiée}$$

❖ Calcul à l'ELS

$$M_{ser} = 186,84 \text{ KN}, m/ml$$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \begin{cases} \frac{2}{3} fe = 333,333 \\ 0,5 fe = 250 \\ 110\sqrt{\eta} \times ftj = 201,63 \end{cases} \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ser} = \frac{n \times \overline{\sigma}_{bc}}{n \times \overline{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,192 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN}, m/ml$$

$$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow \text{Pas d'aciers comprimés}$$

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{186,84 \times 10^{-3}}{0,341 \times 250} = 21,91 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{ftj}{fe} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

$$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow \text{Condition vérifiée}$$

✚ Section d'armature appuis droite

❖ Calcul à l'ELU

Le moment Ultime : $M_u = 213,712 \text{ kN}, m/ml$

Moment réduit/ Recherche du pivot : $\mu_u = \frac{M_u}{(b \times d^2 \times F_{bu})} = \frac{213,712 \cdot 10^{-3}}{(1 \times 0,405^2 \times 14,17)} = 0,092$

On a $\mu_u < 0,186 \rightarrow$ PIVOTA \rightarrow Pas d'aciers comprimés

Paramètres de déformation

$$\alpha_u = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,0040}) = 0,121$$

$$Z_u = d(1 - 0,4\alpha_u) = 0,405(1 - 0,4 \times 0,0052) = 0,39m$$

Section d'acier théorique

$$A_{st} = \frac{M_u}{Z_u \times \sigma_s} = \frac{213,712 \cdot 10^{-3}}{0,40 \times 434,78} = 12,75 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_0 \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e}\right) = 0,23 \times 1 \times 0,450 \times \frac{2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}^2$$

$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow$ Condition vérifiée

✚ Calcul à l'ELS

$M_{ser} = 158,558 \text{ kN}, m/ml$

Paramètre de déformation

$$\sigma_{st} \begin{cases} \varphi \rightarrow \text{Fissuration préjudiciable} \\ 0,8\varphi \rightarrow \text{Fissuration très préjudiciable} \end{cases}$$

$$\text{Avec } \varphi = \min \begin{cases} \frac{2}{3} f_e = 333,333 \\ 0,5 f_e = 250 \\ 110\sqrt{\eta} \times f_{tj} = 201,63 \end{cases} \quad \varphi = 250 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 250} = 0,474$$

Fibre neutre :

$$y_{ser} = \alpha_{ser} \times d = 0,47 \times 0,405 = 0,192 \text{ m}$$

$$Z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0,405 - \frac{0,19}{3} = 0,341 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{serb} = \frac{1}{2} \times b_o \times y_{ser} \times \overline{\sigma}_{bc} \times Z_{ser} = 0,5 \times 1 \times 0,341 \times 15 \times 0,341 = 490,071 \text{ kN}, m/ml$$

$M_{ser} < M_{serb} \rightarrow$ Pas d'aciers comprimés

Calcul des aciers

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{Z \times \sigma_{st}} = \frac{158,55810^{-3}}{0,341 \times 250} = 18,60 \text{ cm}^2$$

Condition de fragilité (CNF)

$$A_{st \min} = 0,23 \times b_o \times d \times \left(\frac{f_{tj}}{f_e} \right) = 3,91 \text{ cm}^2$$

$A_{st} > A_{st \min} \rightarrow$ Condition vérifiée

c) Armatures du pied droit intérieur

Les calculs sont effectués pour un pied droit considéré au mètre linéaire comme un poteau de $1 \times 0,45$,

Données : $h = 0,45 \text{ m}$; Hauteur $H = 4 \text{ m}$; $b = 1 \text{ m}$; $c = 0,02 \text{ m}$

Effort normal sollicitant le poteau

$$N_u = 80,481 \text{ kn}, m/ml$$

Longueur de flambement : $L_f = 0,7 \times h = 0,7 \times 4 = 2,80$

Elancement : $\lambda = 3,46 \frac{L_f}{h} = 3,6 \times \frac{2,80}{0,45} = 21,55$

$$\lambda < 50\beta = 1 + 0,2 \times \left(\frac{\lambda}{35} \right)^2 = 1 + 0,2 \times \left(\frac{21,55}{35} \right)^2 = 1,12$$

$$B_r = (h - c) \times (b - c) = (0,45 - 0,02) \times (0,45 - 0,02) = 0,42$$

$k = 1,10$, car plus de la moitié des charges appliquées avant 90 jours,

❖ **Calcul de la section minimale d'armatures**

$$u = 2 \times (h + b) = 2 \times (0,45 + 1) = 2,90$$

$$B = h \times b = 0,45 \times 1 = 0,45 \text{ m}^2$$

$$A_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{4 \text{ cm}^2}{m} \times u \text{ en cm}^2 \\ 0,2 \times \frac{B}{100} \end{array} \right.$$

$$A_{min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 2,90 = 11,6 \\ 0,2 \times \frac{0,45}{100} = 0,009 \end{array} \right.$$

$$A = A_{min} = 11,6 \text{ cm}^2$$

$$\text{Vérification } A_{max} = 5 \times \frac{B}{100} = 5 \times \frac{450}{100} = 225 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 11,6 \text{ cm}^2$$

d) Armatures du pied droit extrêmes

✚ **Calcul à l'ELU**

$$Mu = 173,085 \text{ kN}, m/ml$$

$$Nu = 123,695 \text{ kN/ml}$$

$$e_a = \max \left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ cm} \\ \frac{H}{250} \end{array} \right. \rightarrow e_a = 2 \text{ cm}$$

$$e_1 = \frac{Mu}{Nu} + e_a = \frac{173,085}{123,695} + 0,02 = 1,42 \text{ cm}$$

Sollicitations ultimes corrigées pour le flambement

Elancement géométrique :

$$l_f = 0,7 \times l_0 = 0,5 \times 1 \text{ m} = 2,8 \text{ m}$$

Pièce chargée de façon excentrée :

$$\rightarrow \frac{l_f}{h} < \max \left\{ \begin{array}{l} 15 \\ 20 \times \frac{e_1}{h} \end{array} \right. \rightarrow \frac{0,5}{0,2} = 2,5 < 15$$

Excentricité du 2nd ordre :

$$a = \left(\frac{Mu}{Mser + Mu} \right) = 0,85$$

$$e_2 = \frac{3 \times lf^2}{10^4 \times h} (2 + a \times \varphi) = \frac{3 \times 2,8^2}{10^4 \times 0,45} (2 + 0,95 \times 2) = 0,019 \text{ cm}$$

Avec $\varphi = 2$

Sollicitations corrigées pour le calcul en flexion composée :

$$\begin{cases} Nu = Ni \\ M = Nu(e_1 + e_2) \\ e_0 = e_1 + e_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Nu = 123,695 \text{ kN/ml} \\ M = 123,695(1,25 + 0,01) = 177,95 \text{ kN, m} \\ e_0 = 1,25 + 0,01 = 1,44 \text{ m} \end{cases}$$

Sollicitation ramenée au centre de gravité des aciers tendus :

$$\begin{cases} e_A = e_0 + \left(d - \frac{h}{2}\right) \\ Mu_A = Nu \times e_A \end{cases} \rightarrow \begin{cases} e_A = 1,26 + \left(0,405 - \left(\frac{0,45}{2}\right)\right) = 1,61 \\ Mu_A = 91,742 \times 1,44 = 200,22 \text{ kN, m} \end{cases}$$

Moment réduit de référence à l'ELU :

$$\mu_{BC} = 0,8 \times \frac{h}{d} \times \left(1 - 0,4 \frac{h}{d}\right) = 0,8 \times \frac{0,45}{0,405} \times \left(1 - 0,4 \frac{0,45}{0,405}\right)$$

$$\mu_{BC} = 0,49$$

Moment réduit agissant :

$$\mu_{uA} = \frac{Mu_A}{b_0 \times d^2 \times f_{bu}} = \frac{132,50, 10^{-3}}{1 \times 0,405^2 \times 14,17}$$

$$\mu_{uA} = 0,08$$

$\mu_{uA} < \mu_{BC} \rightarrow$ Section partiellement comprimée

✚ Calcul à l'ELS

$$\begin{cases} N_{ser} = Ng + Nq \\ M_{ser} = Mg + Mq \\ e_{ser} = \frac{M_{ser}}{N_{ser}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} N_{ser} = 123,69 \text{ kN/ml} \\ M_{ser} = 152,653 \text{ kN,m} \\ e_{ser} = \frac{152,653}{123,69} = 1,23 \text{ m} \end{cases}$$

Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus

$$\begin{cases} e_A = e_{0ser} + \left(d - \frac{h}{2}\right) = 1,23 + (0,405 - 0,225) = 1,414 \\ M_{serA} = N_{ser} \times e_A = 123,69 \times 1,414 = 174,917 \text{ kN,m/ml} \end{cases}$$

Moment réduit :

$$\gamma_M = \frac{M_u}{M_{ser}} = \frac{132,50}{174,91} = 1,74$$

$$10^4 \mu_{tu} = 3440 \times \theta \times \gamma_M + 49 \times \frac{f_{c28}}{\theta} - 3100 = 3440 \times 1 \times 1,10 + 49 \times 25 - 3100 = 4121,2$$

$$\mu_{tu} = 0,41$$

On a: $\mu_{uA} < \mu_{BC} \rightarrow$ Section partiellement comprimée

$\mu_{uA} < \mu_{tu} \rightarrow$ Pas besoin d'aciers comprimés

Paramètre de déformation

$$a_{uA} = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{uA}}) = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0,03}) = 0,11$$

Bras de levier :

$$z_{uA} = d(1 - 0,4a_{uA}) = 0,18 \times (1 - 0,4 \times 0,038) = 0,39 \text{ m}$$

$$A = \frac{M_{uA}}{z_{uA} \times \sigma_s} = \frac{148,59, 10^{-3}}{0,39 \times 347,83} = 14,88 \text{ cm}^2$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = A - \frac{Nu}{\sigma_s} = 0,22, 10^{-3} - \frac{101,22, 10^{-3}}{347,83} = 11,33 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité (CNF) de la section :

$$A_{min} = \frac{0,23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0,23 \times 1 \times 0,405 \times 2,1}{500} = 3,91 \text{ cm}$$

10. Résumé des armatures principales sont consignées dans le tableau suivant

Partie d'Ouvrage			Sections d'aciers (cm ²)	Choix
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	25cm ²	HA20 ; esp =20cm
		A droite	22,66cm ²	HA20 ; esp =20cm
		Au milieu	34,12cm ²	HA 20 ; esp =20cm
Radier	Moment fléchissant	A gauche	21,91cm ²	HA20 ; esp =20cm
		A droite	18,60cm ²	HA16 ; esp =20cm
		Au milieu	16,55cm ²	HA 16, esp =20cm
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	11,6 soit 5,8 /face	HA 14/face ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	11,33 soit 5,67/face	HA 14/face ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			

11. Les armatures de répartitions sont consignées dans le tableau suivant

Partie d'Ouvrage			Sections d'aciers (cm ²)	Choix
Tablier	Moment fléchissant	A gauche	8,33	8HA 12 ; esp =20cm
		A droite	7,53	HA12 ; esp =20cm
		Au milieu	11,37	HA14 ; esp =20cm
Radier	Moment fléchissant	A gauche	7,30	HA 12 ; esp =20cm
		A droite	6,2	HA10 ; esp =20cm
		Au milieu	5,52	HA10 ; esp =20cm
Pieds droit externes	Moment fléchissant	A gauche	3,87	HA8 ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			
Pieds droit internes	Moment fléchissant	A gauche	3,78	HA8 ; esp =20cm
		A droite		
		Au milieu		
	Effort normal			

Annexe 7

Estimation du coût du projet

1. Devis quantitatif et estimatif du dalot

N°	DESIGNATIONS	Unités	Quantités	Prix Unitaires	PRIX TOTAL
	<u>SECTION 000 :INSTALLATION DE CHANTIER</u>				
001	Installation de chantier	ens	1	7 000 000	7 000 000
	TOTAL INSTALLATION DE CHANTIER				7 000 000
	<u>SECTION 100:TRAVAUX PREPARATOIRES</u>				
101	Reprofilage de la piste d'accès et création d'une zone de stockage	ens	1,0	1 000 000	1 000 000
	TOTAL TRAVAUX PREPARATOIRES				1 000 000
	<u>SECTION 200:TERRASSEMENT</u>				
201	Démolition d'ouvrage existant	Ft	1	500 000	500 000
202	Réalisation de fouille en tranchée pour l'exécution des travaux	m ³	12558	2 000	25 116 000
202	Fourniture de sable pour remblais hydraulique sur l'ouvrage	m ³	770,64	7 800	6 010 992
203	Fourniture et mise en œuvre de graveleux latéritique pour reconstitution de remblais technique sur l'ouvrage,	m ³	5400	7 800	42 120 000
	TOTAL TERRASSEMENT				73 746 992
	<u>SECTION 300:OUVRAGE D'ART</u>				
301	Réalisation de béton de propreté dosé à 150 Kg/m3 de ciment CPA	m ³	45,2748	60 000	2 716 488
302	Réalisation de béton armé dosé à 400 Kg/m3 pour tête de buse	m ³	573,8482	180 000	103 292 676
303	Perrés maçonnés	m ²	230	20 000	4 600 000
	TOTAL OUVRAGE D'ART				110 609 164
TOTAL H. T					118 609 164
Imprévus et divers (15%)					17 791 375
TVA 18 %					3 202 447
TOTAL TTC					139 602 986

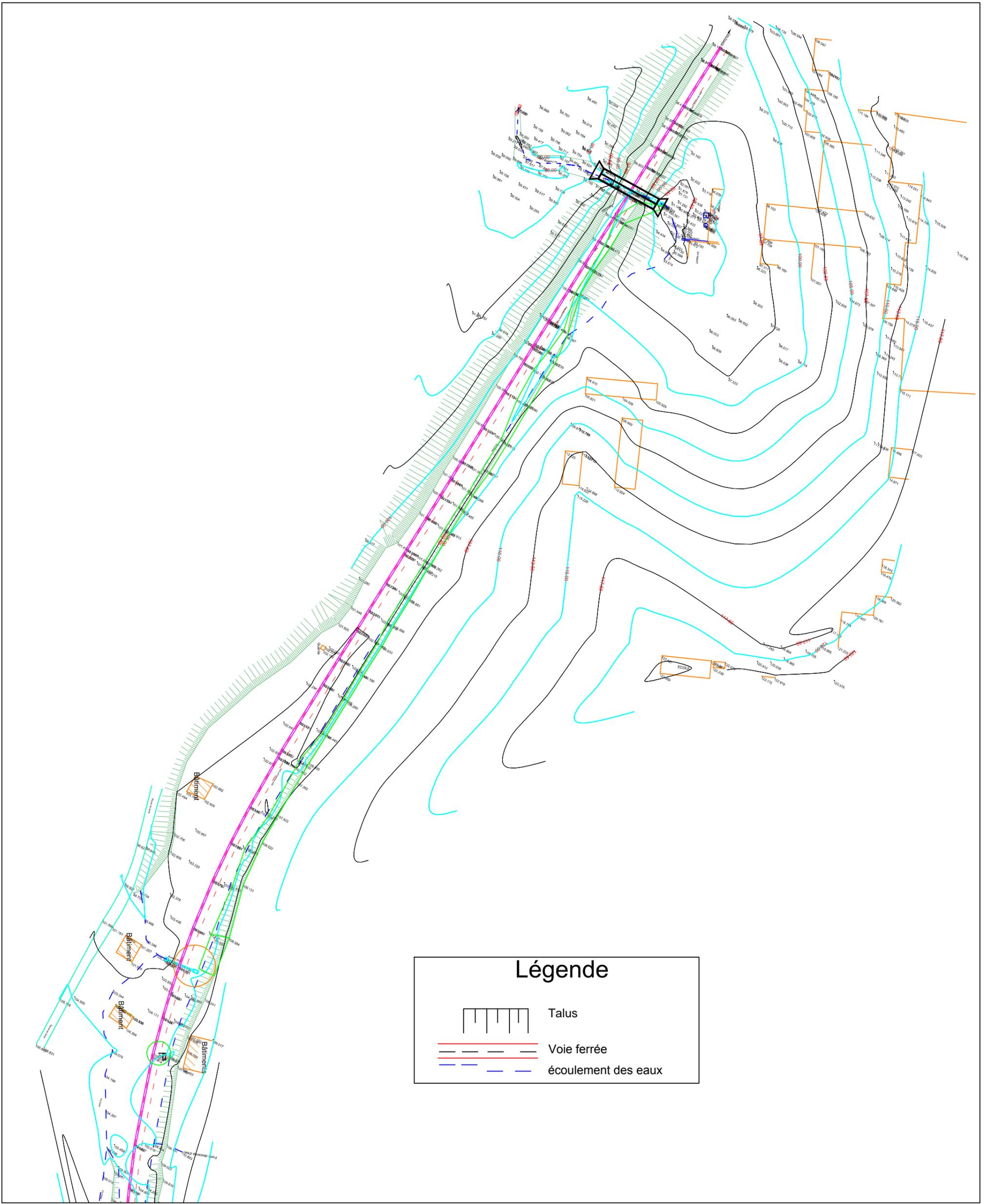
2, Devis quantitatif et estimatif de la buse

N°	DESIGNATIONS	Unités	Quantités	Prix Unitaires	PRIX TOTAL
<u>SECTION 000 :INSTALLATION DE CHANTIER</u>					
1	Installation de chantier	ens	1	3 000 000	3 000 000
TOTAL INSTALLATION DE CHANTIER					3 000 000
<u>SECTION 100:TRAVAUX PREPARATOIRES</u>					
101	Reprofilage de la piste d'accès et création d'une zone de stockage	ens	1	1 000 000	1 000 000
TOTAL TRAVAUX PREPARATOIRES					1 000 000
<u>SECTION 200:TERRASSEMENT</u>					
201	Démolition d'ouvrage existant	Ft	1	100 000	100 000
202	Réalisation de fouille en tranchée pour l'exécution des travaux	m ³	8740	2 000	17 480 000
202	Fourniture et mise en œuvre de sable de lagune pour lit de pose et réconstitution de remblais hydraulique sur l'ouvrage	m ³	770,64	7 800	6 010 992
203	Fourniture et mise en œuvre de graveuleux latéritique pour réconstitution de remblais technique sur l'ouvrage,	m ³	3771,36	7 800	29 416 608
TOTAL TERRASSEMENT					53 007 600
<u>SECTION 300:POSE DE BUSE</u>					
301	Fourniture et pose de 3 buses de \varnothing 1800 et une buse \varnothing 800 de type rocla	ml	148	150 000	22 200 000
302	Réalisation de béton de propreté dosé à 150 Kg/m ³ de ciment CPA	m ³	7,28	60 000	436 800
303	Réalisation de béton armé dosé à 400 Kg/m ³ pour tête de buse	m ³	22,64	180 000	4 075 200
303	Perrés maçonnés	m ²	230	20 000	4 600 000
TOTAL POSE DE BUSE					31 312 000
TOTAL H. T					35 312 000
Imprévus et divers (15%)					5 296 800
TVA 18 %					6 356 160
TOTAL TTC					46 964 960

PLANS DES OUVRAGES

- 1. Plans dalot**
- 2. Plans buse**

Plans dalot



Légende

	Talus
	Voie ferrée
	écoulement des eaux

Direction des Installations fixes
Département Ordonnancement
Bureau d'étude



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferrée Abidjan-Ouagadougou

Plan d'implantation de l'ouvrage

Itinéraire

PK 21 + 650 ,Anyama



Date

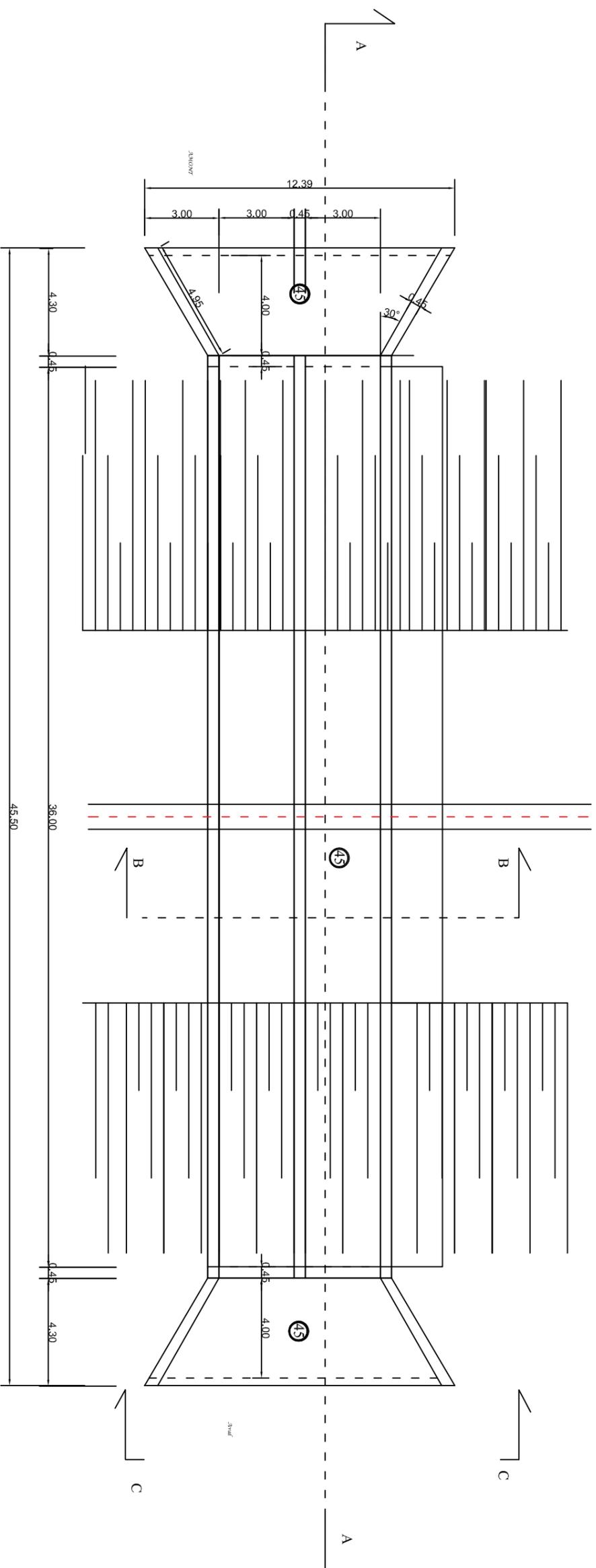
Novembre 2016

Dessiné par :
COULIBALY Soukpatolo Daouda
Elevé Ingénieur
en Master 2 Génie civil
2015-2016

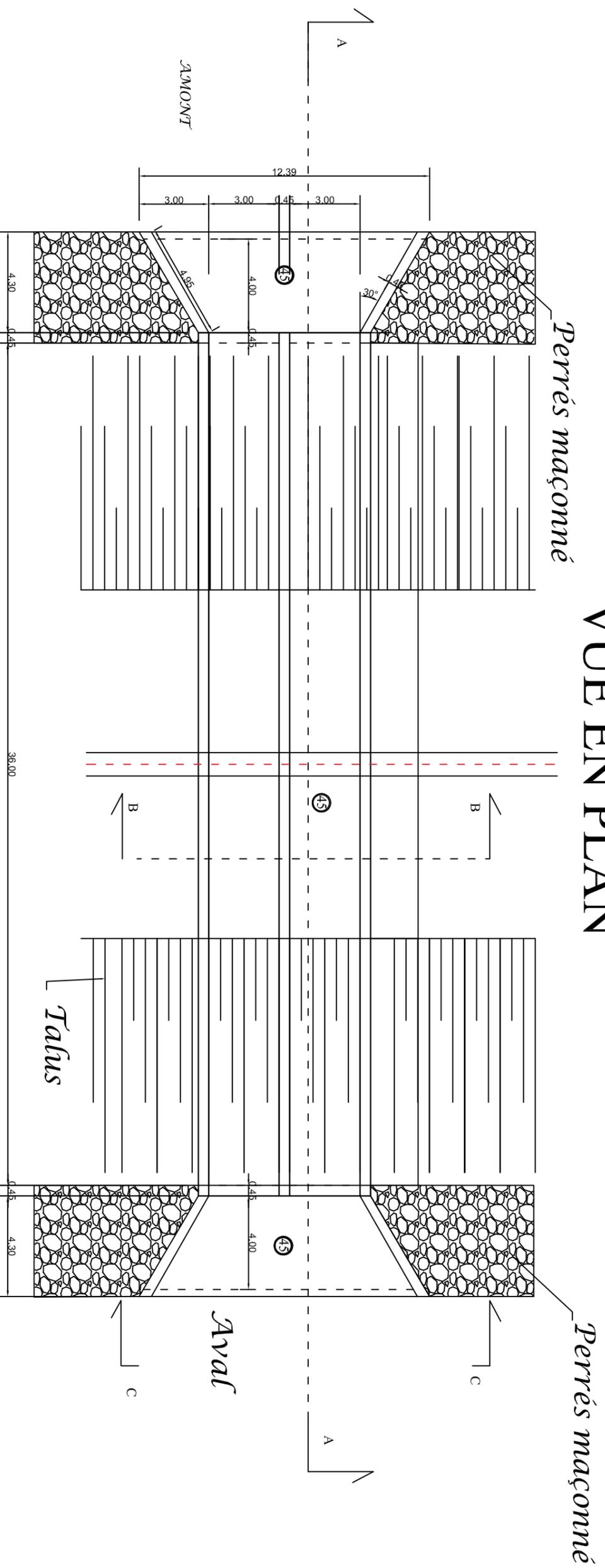
Echelle : 1/500

N°1

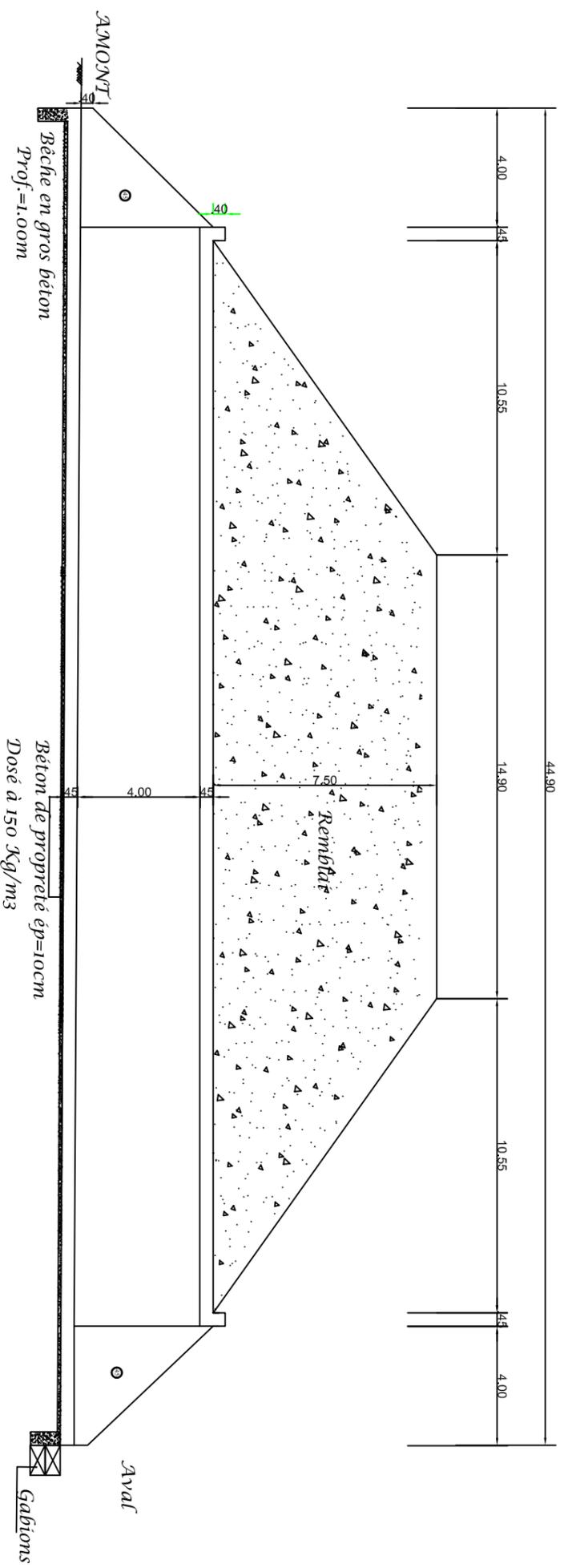
VUE EN PLAN



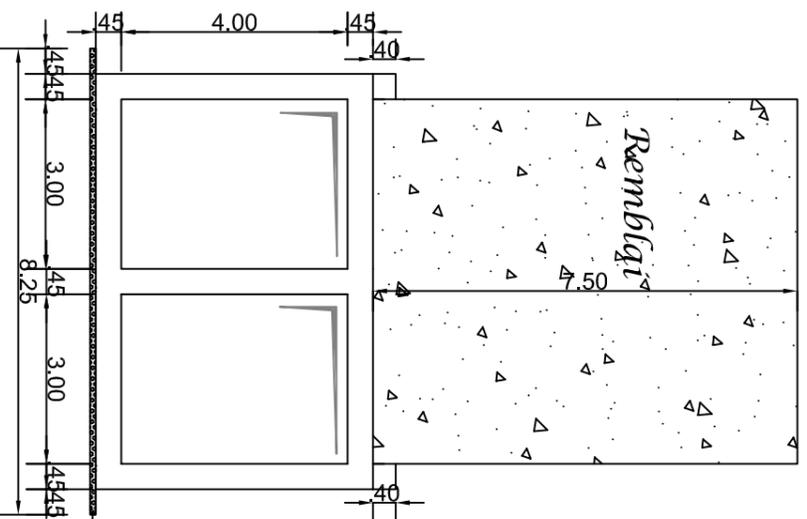
VUE EN PLAN



COUPE LONGITUDINALE

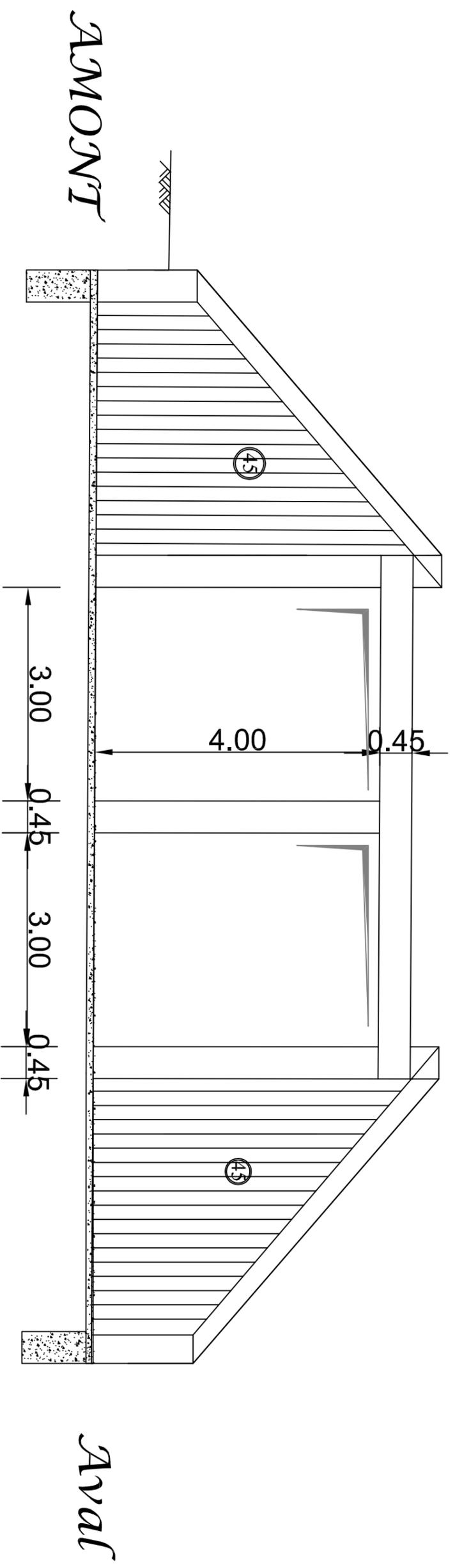


COUPE TRANSVERSALE:



Béton de propreté $\epsilon_p=10cm$
 Dosé à 150 Kg/m³

COUPE TRANSVERSALE COUPE C-C



Direction des Installations fixes
Département Ordonnancement
Bureau d'étude



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferrée Abidjan-Ouagadougou

OUVRAGE : DALOT 2.00 x 3.00 x 4.00
Coffrage : COUPE C-C

ITINERNAIRE
PK 21 + 650 : Anyama



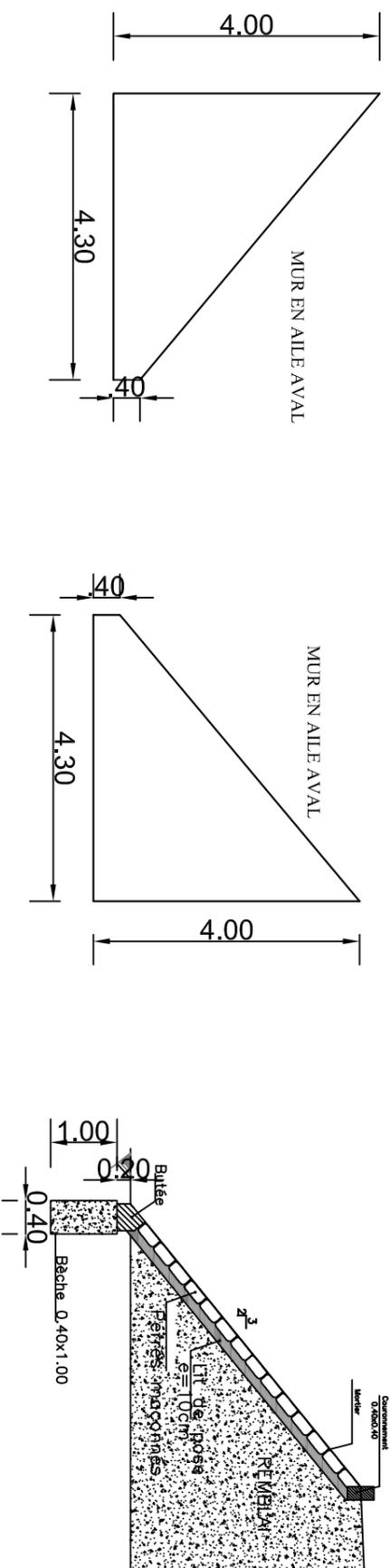
Date
Novembre 2016

Dessiné par :
COULIBALY Soukpatolo Daouda
Elève Ingénieur en
Master 2 Génie civil
2015-2016

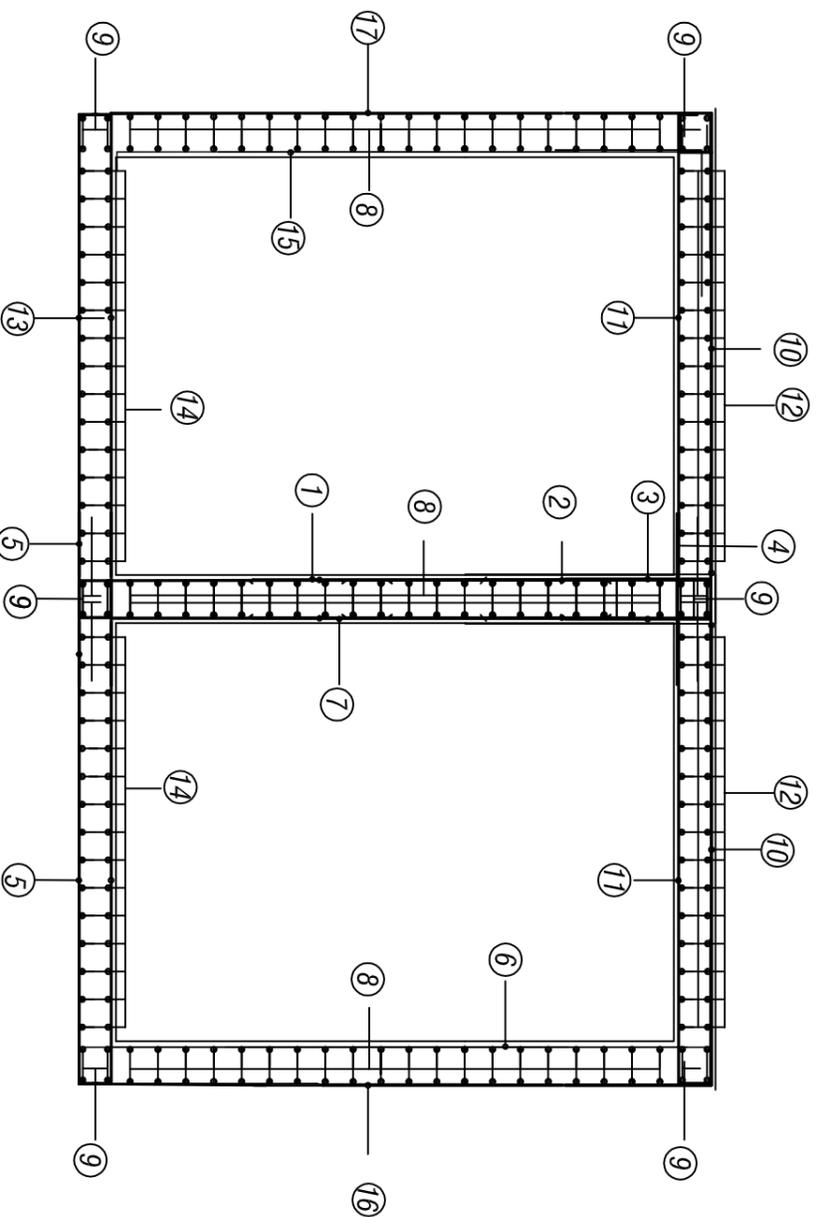
Echelle : 1/75
N°5

PLAN MURS EN AILES

PERRÉ MACONNÉ



CORPS D'OUVRAGE



NOMENCLATURE DES ACIERS DU CORPS								
repère	Ø	e	nombre	Croquis	Longueur Unitaire (cm)	Longueur Totale (m)	Poids au ml (Kg)	Poids total partiel (Kg)
FERRAILLAGE TRANSVERSALE								
1	20	15	70	300	300	210.00	2.466	517.86
2	16	15	140	385	400	560.00	1.578	883.68
3	12	15	140	85	180	252.00	0.888	223.78
4	8	15	140	19	80	112.00	0.395	44.24
5	10	15	70	19	141	98.70	0.617	60.90
6	16	30	35	869	899	314.65	1.578	496.52
7	16	30	35	300	300	105.00	1.578	165.69
8	12	17	192	50	1150	2208.00	0.888	1960.71
9	14	20	24	50	1150	276.00	1.210	333.96
10	12	15	140	327	412	576.80	0.888	512.20
11	12	15	140	327	327	457.80	0.888	406.53
12	8	17	72	25	1150	828.00	0.395	327.06
13	10	15	140	327	346	484.40	0.617	298.88
14	10	17	72	15	1074	773.28	0.617	477.12
15	16	15	70	869	899	629.30	1.578	993.04
16	20	15	70	300	300	210.00	2.466	517.86
17	16	15	82	385	400	328.00	1.578	517.59



Direction des Installations -
Département Ordonnancement-GET

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE:
Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferré Abidjan-Diégadougou
OUVRAGE: DALOT 2x3x4
Plan de ferrailage du corps de l'ouvrage.

ITINERAIRE
PK 21+650: Anyama

Institut International d'Ingénierie de
l'Eau et de l'Environnement
IIE

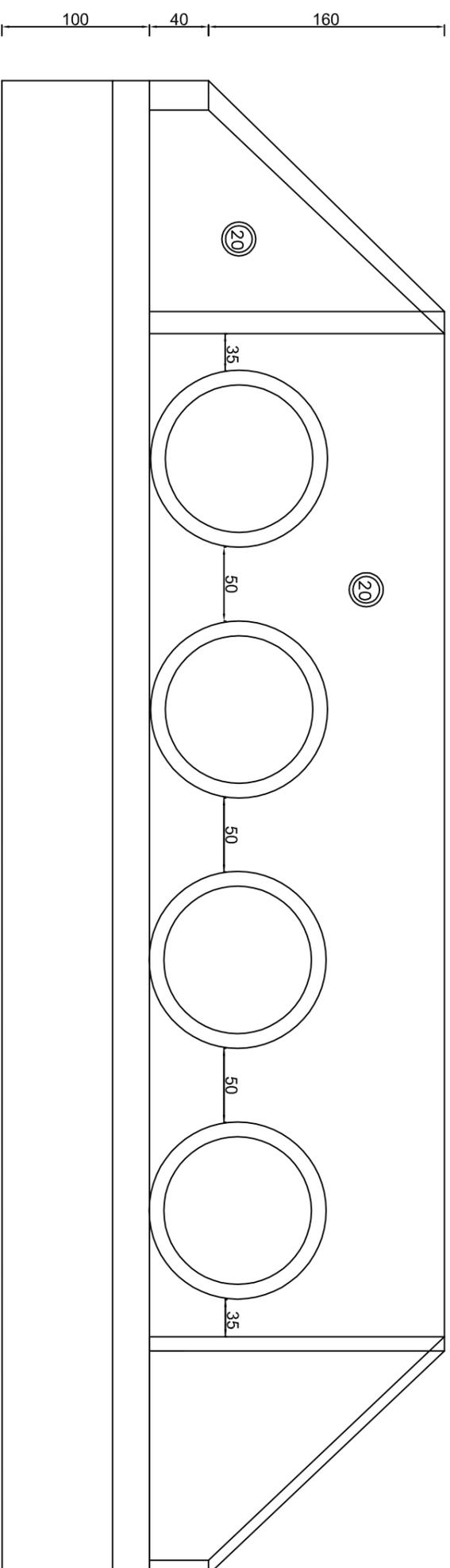
Date:
Novembre 2016

Dessiné par:
COULIBALY Soukpholo
Dessiné par:
Téle ingénieur: Mactar 2
Génie civil 2015-2016

Echelle: 1/75
N° 01

Plans buse

ELEVATION



Direction des Installations-
Département Ordomancement-GET



SIT'ARRAIL
TRANSPORT FERROVAIRE
DE PERSONNES ET DE MARCHANDISES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE:
Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferré Abidjan-Diégadougou
OUVRAGE: 4 buses Ø1800

LITNERAIRE
.....
PK 21+650: Anyama

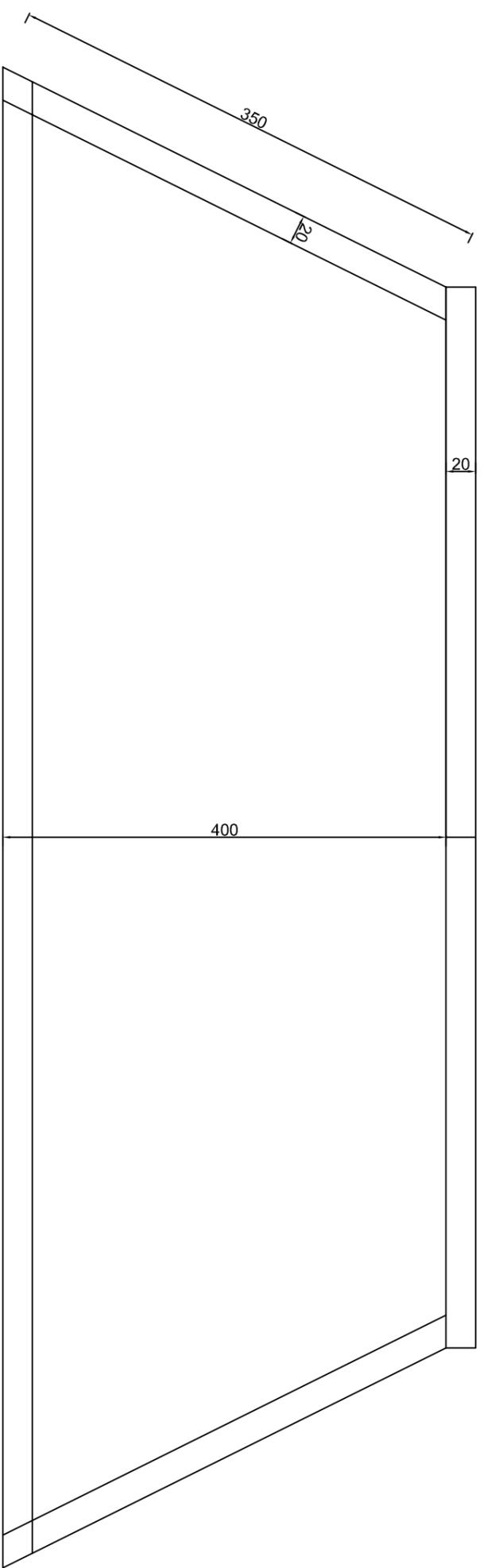
Institut International d'Ingénierie de
l'Eau et de l'Environnement



Date:
Novembre 2016

Dessiné par:
COULIBALY Soukpafofo
Daouda
Titre ingénieur :Mastar 2
Génie civil -2015-2016

Echelle: 1/75
N° 01



VUE EN PLAN

Direction des Installations-
Département Ordomancement-GET



SIT'ARRAIL
TRANSPORT FERROVAIRE
DE PERSONNES ET DE MARCHANDISES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE:
Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferré Abidjan-Diégadougou
OUVRAGE: 4 buses Ø1800

ITINERAIRE
.....
PK 21+650: Anyama

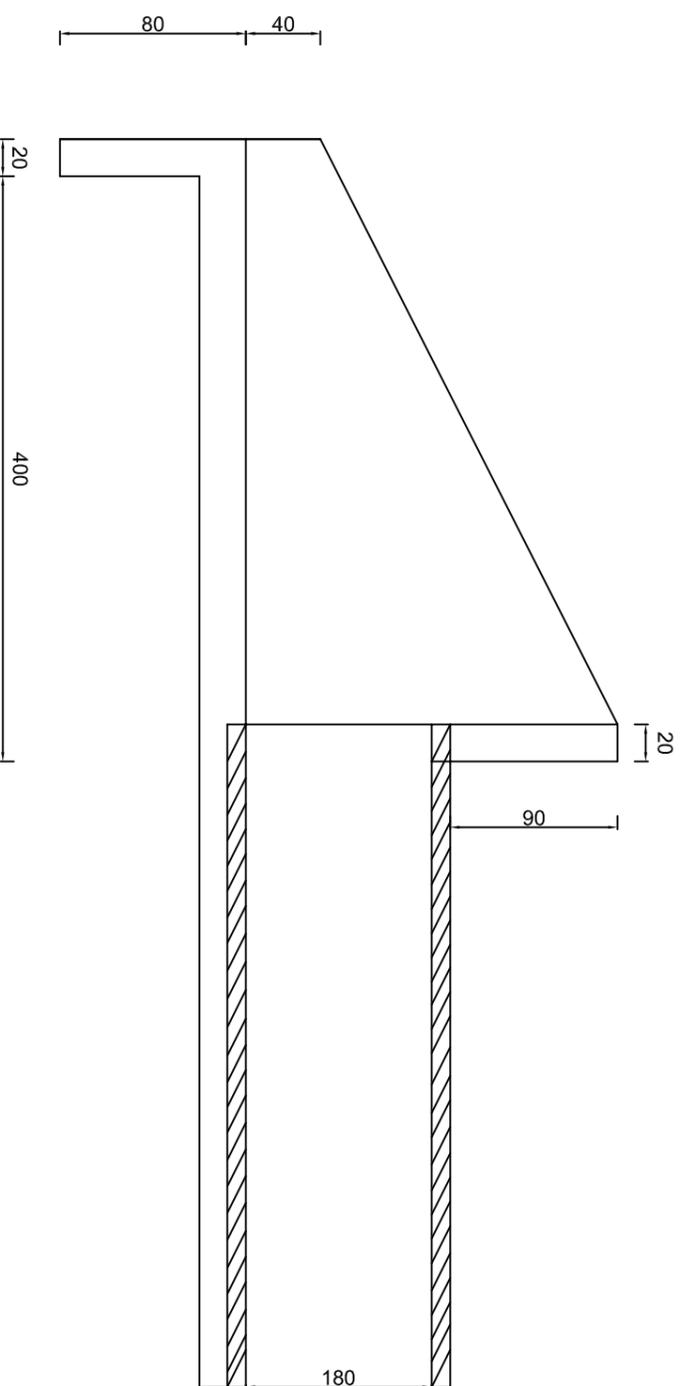
Institut International d'Ingénierie de
l'Eau et de l'Environnement



Date:
Novembre 2016

Dessiné par:
COULIBALY Soukpafofo
Daouda
Titre ingénieur: Master 2
Génie civil 2015-2016

Echelle: 1/75
N° 02



COUPE A-A

Direction des Installations-
Département Ordomancement-GET



SIT'ARRAIL
TRANSPORT FERROVAIRE
DE PERSONNES ET DE MARCHANDISES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE:
Etudes Techniques détaillées du projet de construction d'un ouvrage
de franchissement au PK 21+650 du réseau ferré Abidjan-Diégadougou
OUVRAGE: 4 buses Φ 1800

LITENKALIRE
PK 21+650: Anyama

Institut International d'Ingénierie de
l'Eau et de l'Environnement



Date:
Novembre 2016

Dessiné par:
COULIBALY Soukphafio
Daouda
Titre ingénieur :Mastar 2
Génie civil -2015-2016

Echelle: 1/75
N° 03

Table des matières

Citations	i
Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Avant-propos	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Liste des abréviations	vii
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Introduction générale	2
Chapitre I : Présentation générale du projet	3
I. PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL	3
I.1. Historique et mission de la SITARAIL Bolloré TRANSPORT LOGISTICS	3
I.2. Domaines d'activités	3
I.3. Présentation de la Direction des Installations Fixes (Direction d'accueil)	4
II. DESCRIPTION DU PROJET	5
II.1. Contexte et justification du projet	5
II.2. Situation de la zone du projet	6
Chapitre II : Méthodologie de travail	8
I. OUTILS D'INTERVENTIONS	8
I.1. Recherches documentaires	8
I.2. Matériels	8
II. COLLECTE DES DONNÉES	8
II.1. Données cartographiques et topographiques	8
II.2. Données hydrologiques	8
III. DÉMARCHE DE TRAVAIL	9

Chapitre III : Détermination des paramètres de l'étude topographique, hydrologique et hydraulique	10
I. ÉTUDE TOPOGRAPHIQUE ET NATURE DU SOL	10
I.1. Étude topographique	10
I.1.1. États des lieux	10
I.1.2. Levées topographiques	10
I.2. Nature du sol	10
II. ÉTUDE HYDROLOGIQUE	11
II.1. Détermination du bassin versant	11
II.2. Caractéristiques du bassin versant	12
II.2.1. La surface et périmètre du bassin versant	12
II.2.2. Indice de forme	13
II.2.3. Pente moyenne du bassin versant	13
II.2.4. La longueur du rectangle équivalent	13
II.2.5. Indice globale des pentes	13
II.3. Caractéristiques des données pluviométriques	14
II.3.1. Détermination de la pluie décennale annuelle à l'aide de l'analyse fréquentielle	15
II.3.2. Choix de la période de récurrence et calcul de la pluviométrie moyenne annuelle	15
II.3.2.1. La période de retour	15
II.3.2.2. La pluviométrie	15
II.4. Calcul du débit du projet	16
II.4.1. Présentation succincte des différentes méthodes d'évaluation des débits	16
II.4.1.1. Méthode ORSTOM	16
II.4.1.2. Méthode CEIH	17
II.4.1.3. Méthode rationnelle	17
II.4.2. Choix de la méthode de dimensionnement du débit	17
II.4.3. Calcul des paramètres de la méthode rationnelle	18
II.4.3.1. Détermination du coefficient de ruissèlement	18
II.4.3.2. Détermination de l'intensité de pluie	18
II.4.3.3. Calcul du débit décennal	19
III. ÉTUDES HYDRAULIQUES	19
III.1. But de l'étude	19
III.2. Choix et justification des variantes d'ouvrages	19
III.3. Dimensionnement hydraulique des ouvrages choisis	20
III.3.1. Les dalots	20
III.3.2. Les buses	23

Chapitre IV : Dimensionnement structural et conditions de réalisation des ouvrages	24
I. LE DALOT	24
I.1. Normes et réglementations	24
I.2. Calcul de l'ouvrage	24
I.2.1. Pré dimensionnement	24
I.2.2. Hypothèse et données générales de calcul	25
I.2.2.1. Caractéristiques des matériaux	25
I.2.2.2. Méthode de calcul	26
I.2.3. Calcul des charges appliquées à la structure	26
I.2.3.1. Charges permanentes	27
I.2.3.2. Charges variables	28
I.2.3.3. Récapitulatif des sollicitations	30
I.2.3.4. Combinaison des charges	30
I.2.3.5. Récapitulatif des sollicitations après combinaison des charges	31
I.2.4. Calcul des sections d'armatures	32
II. LES BUSES	33
III. PLAN ET DÉTAILS DE L'OUVRAGE	34
IV. CONDITIONS DE RÉALISATION DES OUVRAGES ET DESCRIPTION DU MATÉRIEL DE LA VOIE FERRÉE ET	34
IV.1. Description du matériel de la voie ferrée	34
IV.1.1. Le rail	34
IV.1.2. Le ballast	35
IV.1.3. Les traverses	35
IV.1.3.1. Les traverses béton bi-bloc	35
IV.1.3.2. Les traverses métalliques	36
IV.1.4. Autres matériaux nécessaires	36
IV.2. Conditions de réalisations des ouvrages	36

Chapitre V : Étude d'impact environnemental social et estimation financière	38
I. ÉTUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL	38
I.1. Impacts positifs.....	38
I.2. Impacts négatifs.....	38
I.3. Mesures d'atténuations.....	38
II. ESTIMATION FINANCIÈRE	39
Conclusion générale et recommandations	40
Bibliographie	42
Liste des annexes	43